

**ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ
ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ В УМОВАХ
ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ**

Монографія

***PROSPECTIVE DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE
FERROUS METALLURGY UNDER ENVIRONMENTAL CONSTRAINTS***

Monograph

**Харків
2025**

УДК 338.45:669.1:504

П27

Рекомендовано вченою радою Науково-дослідного центру індустріальних проблем розвитку НАН України (протокол № 13 від 28.11.2025 р.)

Рецензенти: **Старовойт Анатолій Григорович** – доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, заслужений металург України, генеральний директор УНПА «Укрококс», завідувач кафедри металургійного палива та вогнетривів Українського державного університету науки і технологій (м. Дніпро);
Бубенко Павло Трохимович – доктор економічних наук, професор, завідувач відділу науково-технічного та економічного розвитку Північно-Східного наукового центру НАН і МОН України (м. Харків);
Хвесик Михайло Артемович – академік НААН України, доктор економічних наук, професор, керівник Центру економіки природокористування та безпеки життєдіяльності Інституту демографії та досліджень якості життя імені Михайла Птухи НАН України (м. Київ)

П27 Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень : монографія / за ред. Є. І. Котлярова, Т. І. Салашенко ; авт. кол. : В. Є. Хаустова, М. О. Кизим, Є. І. Котляров, Т. І. Салашенко, І. В. Шульга, І. О. Губарєва, Д. М. Костенко. Харків : ФОРМ Лібуркіна Л. М., 2025. 178 с. Укр. мова

ISBN 978-617-7801-57-2

DOI: <https://doi.org/10.32983/978-617-7801-57-2>

УДК 338.45:669.1:504

ISBN 978-617-7801-57-2

© Колектив авторів, 2025

© ФОРМ Лібуркіна Л. М., 2025

Анотація

Чорна металургія України в попередні роки була одним із лідерів у світовому рейтингу виробників сталі. Це пояснювалося наявністю розвиненого видобутку вітчизняної залізорудної сировини і коксівного вугілля, а також потужним гірничо-металургійним комплексом, у складі якого діяло більше 100 підприємств чорної металургії. На цей час гірничо-металургійний комплекс України втратив лідерські позиції, що пояснюється руйнуванням та окупацією цілої низки металургійних підприємств внаслідок російської військової агресії. Навіть після втрати суттєвої частки потужностей український гірничо-металургійний комплекс залишається експортно-орієнтованим. На ринках ЄС така спрямованість висуває вимоги до екологічності виробництва. Низькі викиди парникових газів є конкурентною перевагою, але забезпечення такої переваги потребує технологічної модернізації виробництва. Наявна технологія передбачає використання доменного процесу, який не дозволяє отримувати металопродукцію з низьким вуглецевим слідом. Ця обставина, а також те, що значна частина основних засобів металургійних підприємств відпрацювала нормативні строки експлуатації, роблять актуальним пошук нових напрямів розвитку чорної металургії країни. У монографії наведено результати дослідження, виконаного за рахунок бюджетних коштів, спрямованих на забезпечення проведення державними науковими установами наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок за результатами державної атестації. Для визначення перспективних напрямів модернізації металургії досліджено світові тенденції розвитку чорної металургії та наявні обмеження на подальше функціонування технологій зі значним екологічним впливом. Запропоновано напрями технологічних перетворень в галузі переробки основних видів сировини – коксівного вугілля і залізорудної сировини, які відповідають обмеженням на викиди парникових газів.

Монографія може бути корисною для вчених, які займаються проблематикою розвитку металургійної промисловості України, політиків і державних службовців, дотичних до питань повноценного розвитку і модернізації економіки країни, а також практиків, які цікавляться зазначеними питаннями.

Ключові слова: металургійна промисловість, сировинний потенціал, залізорудна сировина, коксівне вугілля, потужності, технології чорної металургії, екологічність виробництва, викиди парникових газів, технологічні перетворення, технологія прямого відновлення заліза, технологія виробництва коксу без уловлювання хімічних продуктів коксування, повноценний розвиток економіки.

Abstract

Ukraine's ferrous metallurgy used to be one of the leaders in the global steel production ranking. This was due to the availability of developed domestic iron ore and coking coal mining, as well as a powerful mining and metallurgical complex, which included over 100 ferrous metallurgy enterprises. Currently, Ukraine's mining and metallurgical complex has lost its leading positions, which is explained by the destruction and occupation of a number of steel plants as a result of Russian military aggression. Even after losing a significant part of its capacity, Ukraine's mining and metallurgical complex remains export-oriented. In EU markets, this orientation comes with requirements for environmentally friendly production. Low greenhouse gas emissions are a competitive advantage, but achieving this edge requires technological modernization of production. The existing technology involves using a blast furnace process, which does not allow producing metal products with a low carbon footprint. This situation, along with the fact that a significant part of the main assets of metallurgical enterprises has reached the end of its service life, makes it urgent to find new directions for the development of the country's ferrous metallurgy. The monograph presents the results of a study funded by the State budget, aimed at supporting national scientific institutions in conducting scientific research and scientific-technical (experimental) developments based on the results of State certification. To identify prospective directions for the modernization of metallurgy, global trends in ferrous metallurgy and the existing limitations on the further operation of technologies with a significant environmental impact were studied. Technological transformation directions have been proposed in the processing of key raw materials – coking coal and iron ore – that comply with greenhouse gas emission restrictions.

The monograph can be useful for researchers working on the development of Ukraine's metallurgical industry, politicians and government officials involved in postwar development and economic modernization, as well as practitioners interested in these issues.

Keywords: metallurgical industry, raw material potential, iron ore raw materials, coking coal, capacities, ferrous metallurgy technologies, environmentally friendly production, greenhouse gas emissions, technological transformations, direct iron reduction technology, coke production technology without capturing chemical by-products, postwar economic development.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України	9
1.1. Світові тенденції розвитку металургії	9
1.2. Наявний стан металургійної промисловості України	54
1.3. Аналіз сировинного потенціалу та наявних потужностей металургійної промисловості України.....	78
Висновки до розділу 1.....	95
Перелік використаних джерел до розділу 1.....	96
Розділ 2. Екологічні аспекти наявних технологій чорної металургії.....	105
2.1. Оцінка впливу наявних технологій на довкілля	105
2.2. Законодавче регулювання викидів парникових газів металургійними підприємствами в країнах ЄС.....	123
Висновки до розділу 2.....	137
Перелік використаних джерел до розділу 2.....	138
Розділ 3. Перспективні напрями розвитку української металургії заліза з урахуванням цілей кліматичної політики.....	144
3.1. Технологія прямого і непрямого відновлення заліза	144
3.2. Технологія виробництва коксу без уловлювання хімічних продуктів коксування	161
Висновки до розділу 3.....	169
Перелік використаних джерел до розділу 3.....	170
Загальні висновки	174

CONTENTS

Introduction	7
Chapter 1. Current state of the global and Ukrainian ferrous metallurgy	9
1.1. Global trends in metallurgy development.....	9
1.2. Current state of Ukraine's metallurgical industry	54
1.3. Analysis of the raw material potential and existing capacities of Ukraine's metallurgical industry.....	78
Conclusions for Section 1	95
List of sources used for Section 1	96
Chapter 2. Environmental aspects of current ferrous metallurgy technologies.....	105
2.1. Assessment of the impact of current technologies on the environment.....	105
2.2. Legislative regulation of greenhouse gas emissions by metallurgical enterprises in Ukraine and the EU.....	123
Conclusions for Section 2	137
List of sources used for Section 2	138
Chapter 3. Prospective directions for the development of Ukrainian iron metallurgy taking into account the goals of climate policy	144
3.1. Direct iron reduction technology	144
3.2. Coke production technology without capturing chemical by-products of coking.....	161
Conclusions for Section 3	169
List of sources used for Section 3	170
General conclusions	174

ВСТУП

До недавнього часу Україна вважалася одним із світових лідерів металургійної промисловості. Після 2014 р. (початку військової агресії РФ та подальшої окупації частини індустріальних регіонів) Україна втратила ці лідируючі позиції внаслідок втрати не лише частини металургійних підприємств, а й можливостей з видобутку коксівного вугілля. Військові загрози, а також логістичні обмеження не дозволяють замінити втрачені потужності з видобутку вугілля ні масовим імпортом цієї сировини, ні широкомасштабним імпортом основного продукту коксування – доменного коксу.

З іншого боку, виробництво чавуну у традиційний, доменний спосіб все більше входить у протиріччя з цілями кліматичної політики цивілізації. Традиційна орієнтація процесу отримання заліза на використання вуглецю призводить до значних викидів парникового газу – діоксиду вуглецю в обсягах, що приблизно в два рази перевищують обсяг виробництва кінцевої продукції (чавуну, сталі та сталевого металопрокату).

Це обумовлює пошук альтернативного шляху розвитку чорної металургії. Світові тенденції розвитку металургії свідчать про переорієнтацію на принципово інший спосіб отримання заліза, а саме – заміну вуглецю іншим відновником (воднем, або сумішшю – водень + монооксид вуглецю) – так звана «безкоксва металургія». На цей час в Україні відсутній досвід промислового впровадження цієї прогресивної технології, що обумовлює необхідність виконання досліджень відповідної спрямованості. Крім того, актуальним є питання адаптації експорту металопродукції до вимог світової кліматичної політики і, зокрема, – до європейського законодавства щодо механізму транскордонного регулювання викидів вуглекислого газу.

Такий комплекс проблем визначив зміст монографії. Для обґрунтування шляхів розбудови української чорної металургії в монографії розглянуто комплекс питань, пов'язаних з оцінкою сучасного стану металургії заліза в світі та визначенням напряму повоєнного розвитку

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

української металургії заліза. Розроблені пропозиції орієнтовані на максимальне використання тієї сировини, яка видобувається в країні на даний час.

Окремо розглянуто вплив чорної металургії на довкілля, визначено основні джерела забруднення (передусім атмосферного повітря) і обґрунтовано напрями подальшої трансформації металургійних підприємств з метою досягнення кліматичних цілей людства. Враховуючи процеси інтеграції економіки України з економікою країн ЄС, проаналізовано сучасну правову базу транскордонного регулювання викидів діоксиду вуглецю. Запропоновано заходи адаптації українських металургійних підприємств до коксу.

В окремому розділі монографії надано пропозиції щодо побудови низьковуглецевої металургії на базі наявних українських корисних копалин, а саме – кам'яного вугілля та залізорудної сировини. Запропоновані технічні рішення щодо поєднання процесу газифікації вугілля і електролізу води дозволяють створити виробництво заліза прямого відновлення, яке за екологічними характеристиками відповідає вимогам міжнародного законодавства щодо викидів парникових газів.

Враховуючи, що повна відмова від використання коксу при сучасному стані розвитку технологій не можлива (виробництво феросплавів, ливарне виробництво, технології отримання деяких кольорових металів), запропоновано технологію виробництва коксу без уловлювання хімічних продуктів коксування (так званого «двопродуктового заводу»). Ця технологія дозволяє відмовитися від виробництва малоліквідних продуктів і отримувати лише товарний кокс і електроенергію за одночасного зниження викидів шкідливих речовин.

Монографія підготовлена на основі матеріалів, отриманих при виконанні Комплексного дослідження «Обґрунтування напрямів розвитку низьковуглецевої металургії заліза в контексті циркулярної економіки», яке виконувалося за рахунок бюджетних коштів, спрямованих на забезпечення проведення державними науковими установами наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок за результатами державної атестації.

Розділ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ СВІТУ ТА УКРАЇНИ

1.1. Світові тенденції розвитку металургії

Єдиним джерелом елементного заліза є залізна руда, яка використовується безпосередньо для відновлення або перетворюється на концентрати, окатки або агломерат.

Глобальний ринок залізної руди є висококонцентрованим як з точки зору попиту, так і пропозиції. Світові запаси залізної руди у 2024 р. оцінювалися в 200 млрд т; порівняно з 2021 р. відбувся приріст запасів на 20 млрд т, по 10 млрд т у 2023 р. та 10 млрд т у 2024 р., але при цьому відбувалося постійне зниження вмісту заліза з 47 % у 2021 р. до 44 % (рис. 1.1). Світовий резерв залізної руди постійно поповнюється за рахунок нових розвідок і переоцінок, але цей приріст частіше відбувається завдяки включенню руд із нижчим вмістом заліза, що відображає загальносвітову тенденцію до використання менш якісних, але більш доступних ресурсів. Очікується розвиток одного з найбільших у світі родовищ високосортної залізної руди в Гвінеї (родовище Сі-манду) [5].

Запаси, млрд т

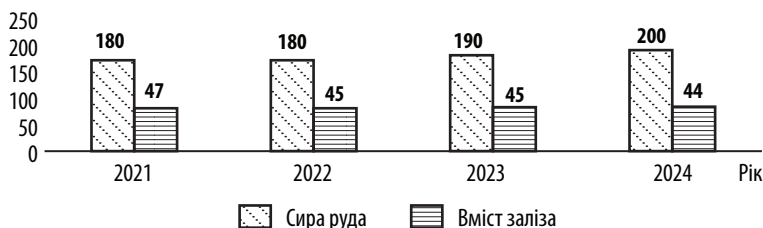


Рис. 1.1. Динаміка світових запасів залізної руди у 2021–2024 рр.

Джерело: складено за [1–4]

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

Світові запаси залізної руди розподілені нерівномірно (рис. 1.2), з найбільшою концентрацією в Азійсько-Тихоокеанському регіоні (Австралія – 58 млрд т, Китай – 20 млрд т) та Європі (Росія – 35 млрд т та Казахстан – 2,5 млрд т, Україна – 6,5 млрд т та Швеція – 1,3 млрд т). Приріст обсягу запасів було забезпечено переважно за рахунок Росії (+10 млрд т) та Австралії (+7 млрд т). Запаси для України складаються з категорій А і В радянської системи класифікації запасів. Водночас спостерігається зниження середньої якості запасів: зростання обсягу супроводжувалося додаванням руди з нижчим вмістом заліза, про що свідчить низький відсоток залізу у запасах Китаю (34,5 %) та України (35,4 %), тоді як найвищу якість мають запаси США (63,9 %) та Індії (61,8 %) [4]. Це вказує на глобальний тренд, де для задоволення попиту доводиться включати в резерви бідніші руди, що потребують більш інтенсивного збагачення.

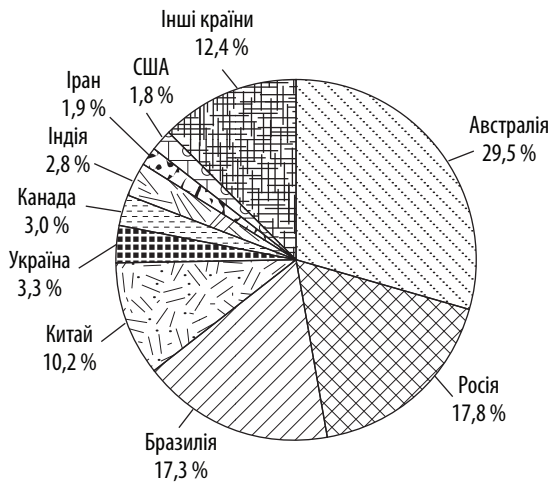


Рис. 1.2. Структура світових запасів залізної руди в 2024 р.

Джерело: складено за [4]

Світовий видобуток залізної руди у період 2021–2024 рр. продемонстрував загальну тенденцію до скорочення обсягів через глобальні економічні виклики та стратегічні зміни в металургійній промисловос-

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

ті. Загальний видобуток придатної руди у 2024 р. знизився порівняно з 2021 р. на 100 млн т, а в перерахунку на залізо – на 40 млн т порівняно з 2021 р. (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Динаміка видобутку сирової залізної руди в світі у 2021–2024 рр.

Країна	2021		2022		2023		2024	
	млн т	Частка %	млн т	Частка %	млн т	Частка %	млн т	Частка %
Австралія	900	34,6	944	37,8	953	37,7	930	37,2
Бразилія	380	14,6	435	17,4	440	17,4	440	17,6
Китай	360	13,8	272	10,9	278	11,0	270	10,8
Індія	240	9,2	251	10,0	278	11,0	270	10,8
Іран	50	1,9	78,3	3,1	85,4	3,4	90	3,6
рф	100	3,8	84,2	3,4	90,9	3,6	91	3,6
США	47,5	1,8	39	1,6	44,7	1,8	48	1,9
Україна	81	3,1	34,1	1,4	41,7	1,6	42	1,7
Світ	2600	100,0	2500	100,0	2530	100,0	2500	100,0

Джерело: складено за [1–4]

Найбільші світові постачальники, такі як Австралія та Бразилія, демонстрували значний приріст видобутку придатної руди (на 30 млн т та 60 млн т відповідно). До цієї тенденції приєднався Іран, який суттєво наростив видобуток сирової руди на 40 млн т. Водночас Китай скоротив видобуток придатної руди на 90 млн т, що є частиною його стратегії зміщення власної, переважно низькосортної руди, на високоякісну імпортну сировину. В Україні видобуток придатної руди впав на 39 млн т (майже на 50 %) через військову агресію.

Ключова якісна тенденція полягає у зростаючому фокусі на високоякісній сировині для забезпечення декарбонізації металургії (табл. 1.2). Світовий видобуток в перерахунку на чисте залізо характеризувався значною волатильністю: він досяг піку в 2022 р. (1630 млн т), але потім знизився у 2023 р. (1540 млн т) і частково відновився до 1560 млн т у 2024 р. Загалом за період 2021–2024 рр. світовий видобуток в перерахунку на чисте залізо скоротився на 40 млн т.

Таблиця 1.2

Динаміка видобутку в перерахунку на чисте залізо в світі у 2021-2024 рр.

Країна	2021			2022			2023			2024		
	млн т	частка, %	% Fe	млн т	частка, %	% Fe	млн т	частка, %	% Fe	млн т	частка, %	% Fe
Австралія	560	35,0	62,2	565	34,7	59,9	584	37,9	61,3	580	37,2	62,4
Бразилія	240	15,0	63,2	273	16,7	62,8	276	17,9	62,7	280	17,9	63,6
Китай	220	13,8	61,1	246	15,1	90,4	170	11,0	61,2	174	11,2	64,4
Індія	150	9,4	62,5	169	10,4	67,3	156	10,1	56,1	172	11,0	63,7
Іран	33	2,1	66,0	47,9	2,9	61,2	51,3	3,3	60,1	55,9	3,6	62,1
Рф	71	4,4	71,0	66,7	4,1	79,2	55,8	3,6	61,4	53,3	3,4	58,6
США	29	1,8	61,1	30,1	1,8	77,2	28	1,8	62,6	30	1,9	62,5
Україна	51	3,2	63,0	30,1	1,8	88,3	21,3	1,4	51,1	26,1	1,7	62,1
Світ	1600	100,0	61,5	1630	100,0	65,2	1540	100,0	60,9	1560	100,0	62,4

Джерело: складено за [1-4]

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

Австралія та Бразилія значно зміцнили свої позиції, наростивши обсяги видобутку (в перерахунку на залізо) на 20 млн т і 40 млн т відповідно й утримуючи сукупну частку в понад 60 % світового ринку. Водночас окремі країни-конкуренти пережили найбільше падіння: Китай скоротив видобуток (у перерахунку на залізо) на 46 млн т через внутрішню стратегію декарбонізації металургійної промисловості, а Україна втратила 24,9 млн т, що спричинено повномасштабним вторгненням рф. Таке зміщення обсягів від виробників, які переважно орієнтовані на внутрішній ринок (Китай), до експортних гігантів (Австралія, Бразилія) посилює залежність світової металургії від обмеженого кола постачальників.

Всупереч скороченню загального обсягу сирової залізної руди середній питомий вміст заліза у світовому видобутку зріс з 61,54 % до 62,4 %, що стало наслідком попиту на високоякісну руду, необхідну для декарбонізації сталеливарного виробництва, а також результатом припинення видобутку найбіднішої руди. Збільшення середнього вмісту заліза в руді в Китаї (з 61,1 % до 64,4 %) свідчить про його перехід до найбільш якісних внутрішніх ресурсів. При цьому найбільше падіння якості зафіксовано в рф – з 71,0 % до 58,6 %, що вказує на зміну структури видобутку на користь більш бідних родовищ і зниження ефективності збагачення. Якість збагаченої руди в Україні, попри військову агресію, залишилася на середньосвітовому рівні – 62,1 %, знизившись, однак, на 0,9 % порівняно із довоєнним періодом.

Динаміка експорту залізної руди у вартісному еквіваленті 2021–2024 рр. характеризується різким зниженням вартості, що є наслідком як зниження її обсягів видобутку, так і падінням світових цін (рис. 1.3).

Світовий експорт сирової руди у вартісному вираженні різко скоротився з 188,2 млрд дол. США у 2021 р. до 140,5 млрд дол. США у 2024 р., що становить падіння приблизно на 25,4 %. Це відбулося на тлі збільшення кількості країн-експортерів з 75 до 77 за аналізований період. Світовий ринок залишається висококонцентрованим, а його динаміка повністю визначається двома країнами: Австралія та Бразилія, які сукупно відповідали за 82,8 % світового експорту у 2021 році (155,9 млрд дол. США) і за 83,4 % у 2024 році (117,2 млрд дол. США).

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

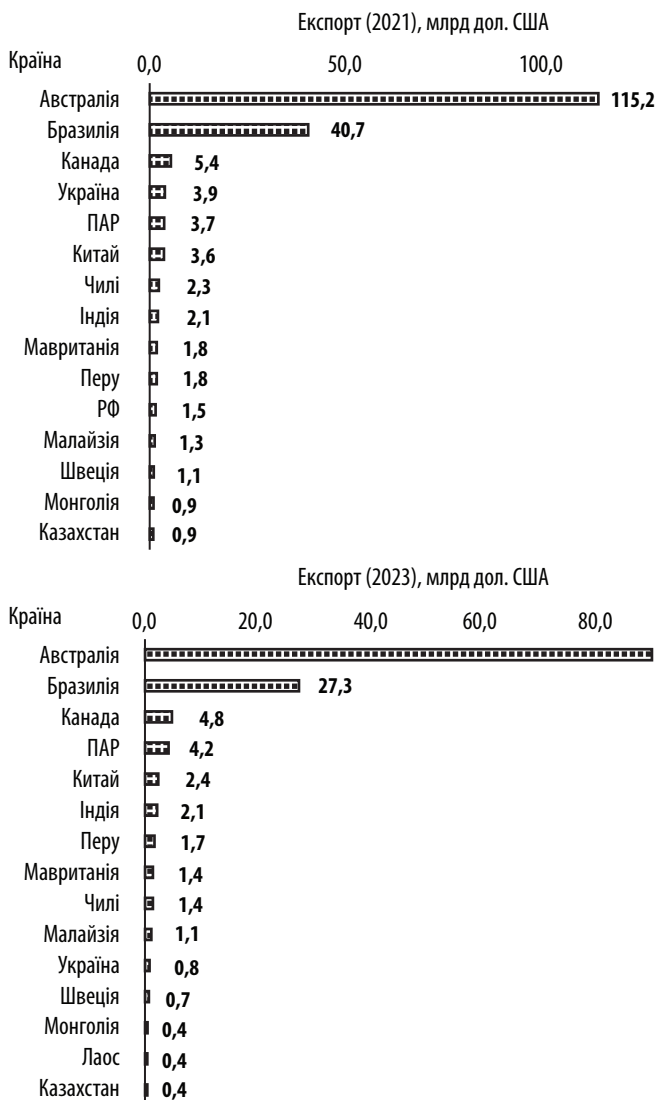


Рис. 1.3. ТОП-15 країн-експортерів залізної руди у 2021 р. та 2023 р.

Джерело: складено за [6]

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

Вартість експорту з Китаю скоротилася з 3,6 млрд дол. США до 2,4 млрд дол. США, через скорочення експортної орієнтації та тенденцією Китаю до скорочення власного видобутку та концентрації на імпорті високоякісної руди. Однак Китай піднявся в рейтингу з 6-го на 5-те місце, увійшовши до ТОП-5 світових експортерів. ПАР – одна з небагатьох країн, яка збільшила вартість експорту (з 3,7 млрд дол. США до 4,2 млрд дол. США) та піднялася з 5-го на 4-те місце. Зберегла свій обсяг експорту Індія (2,1 млрд дол. США в обидвох порівнюваних роках), а Перу та Мавританія продемонстрували відносну стійкість.

Україна втратила 6 позицій у рейтингу (із 4-го місця у 2021 р. на 11-те місце в 2023 р.) та скоротила вартість власного експорту з 3,9 млрд дол. США у 2021 р. до 0,8 млрд дол. США у 2023 р., що є прямим наслідком порушення логістики та виробництва через військову агресію. РФ повністю вибула з експортерів з 2022 р., оскільки припинила надавати СОТ власні дані. У 2021 р. її експорт становив 1,5 млрд дол. США.

Світовий імпорт залізної руди у вартісному вираженні зазнав значного скорочення, впавши на 29 % – з 244,2 млрд дол. США у 2021 р. до 173,2 млрд дол. США у 2023 р. Це падіння відображає два основні чинники: по-перше, вартість світового імпорту різко впала внаслідок корекції цін на залізну руду після піку 2021 р.; по-друге, кількість країн, що імпортують залізну руду, скоротилася зі 106 до 96, що свідчить про концентрацію закупівель. Усі країни, що входять до ТОП-15 країн-імпортерів, зафіксували значне падіння вартості імпорту, відображаючи загальносвітову тенденцію до скорочення виробництва сталі після стрімкого постпандемічного відновлення у 2021 р. (рис. 1.4).

Імпорт залізної руди є надзвичайно концентрованим, причому закупівлі Китаю є визначальними для світової торгівлі, домінування якого у структурі світового імпорту посилилося. Його частка зросла із 72,4 % у 2021 р. до 75,9 % у 2023 р., що є наслідком його імпоротної експансії на світові ринки.

Такі металургійні гіганти, як Японія, Корея та Німеччина, зафіксували падіння вартості імпорту в середньому на 31–37 % через скорочення виробництва сталі, а Велика Британія та Чехія вибули з ТОП-15, поступившись місцем Індії та Бельгії. Найбільше скорочення імпорту

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

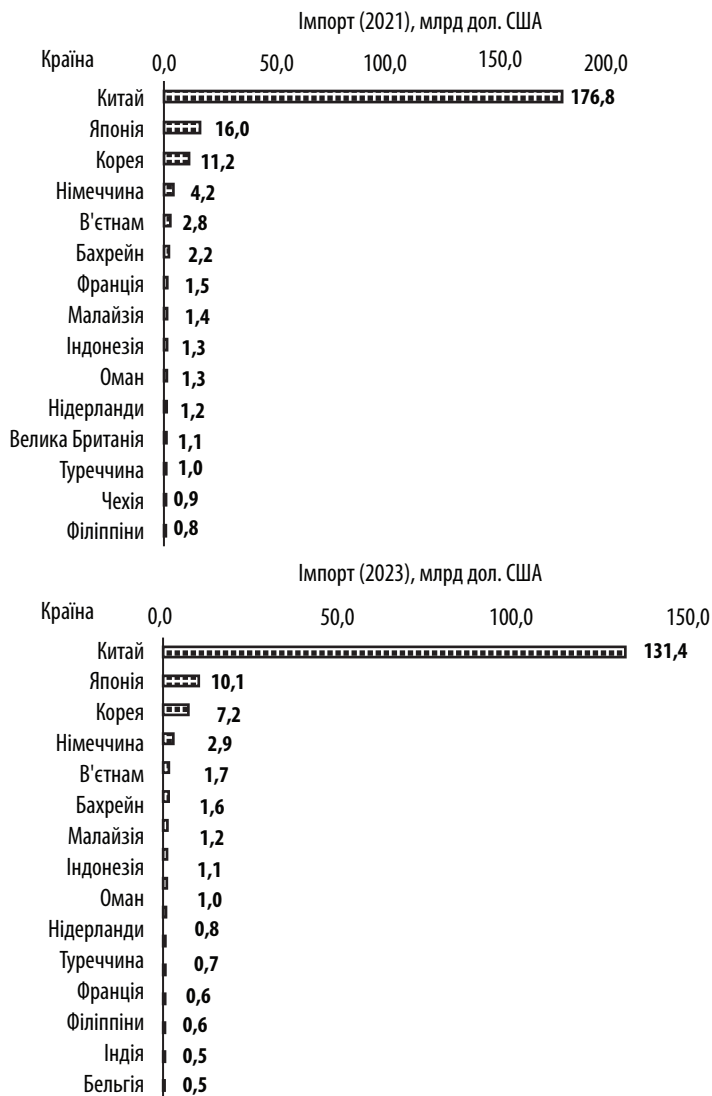


Рис. 1.4. ТОП-15 країн-імпортерів залізної руди у 2021 р. і 2023 р.

Джерело: складено за [6]

серед ТОП-15 країн-імпортерів пережила Франція – на 60 %, тоді як країни Близького Сходу та Південно-Східної Азії, такі як Бахрейн, Малайзія, Індонезія та Оман, продемонстрували відносно менше падіння порівняно з промислово розвиненими країнами.

Ціни на залізну руду на світовому ринку визначаються спотовою вартістю та фрахтом за поставку в китайський порт Тяньцзін. Їх динаміка позначалася надзвичайною волатильністю у 2021 р., тоді як у 2022–2024 рр. спостерігалось зниження середньої ціни, незважаючи на короточасні відскоки (рис. 1.5).

2021 р. став періодом рекордної волатильності та пікових цін, спричинених фазою постпандемічного відновлення. Середня ціна за рік становила 159,42 дол. США/т. Ціни досягли історичного максимуму 214,2 дол. США/т у липні 2021 р., що було зумовлено високим попитом з боку китайської металургійної промисловості. Однак після цього піку ціни різко знизилися, досягши мінімуму в 94,0 дол. США/т вже у листопаді 2021 р. Цей обвал був викликаний урядовою ініціативою Китаю щодо скорочення виробництва сталі задля досягнення цілей зі зменшення викидів.

У 2022 р. сформувався чіткий ціновий тренд на зниження. Середня річна ціна впала до 123,12 дол. США/т. Основні чинники тиску включали слабкий попит з Китаю (через політику Zero-COVID та кризу на ринку нерухомості), а також надмірну світову пропозицію. Це призвело до того, що мінімальна ціна була зафіксована у листопаді 2022 р. на рівні 90,0 дол. США/тонну.

Період 2023–2024 рр. характеризується низькою волатильністю. У 2023 р. ціни демонстрували поступовий зростаючий рух, склавши наприкінці року 118,35 дол. США/т. Це було підтримано очікуваннями стимулюючих заходів уряду Китаю та відновленням у виробничому секторі. Однак у 2024 р. середня ціна знову знизилася до 110,92 дол. США/т. Ціни розпочали рік із 141,4 дол. США/т у січні, але потім знизилися до 91,9 дол. США/т у вересні. Це зниження було спричинене стійким браком попиту на готову сталь і негативною маржею сталеливарних заводів.

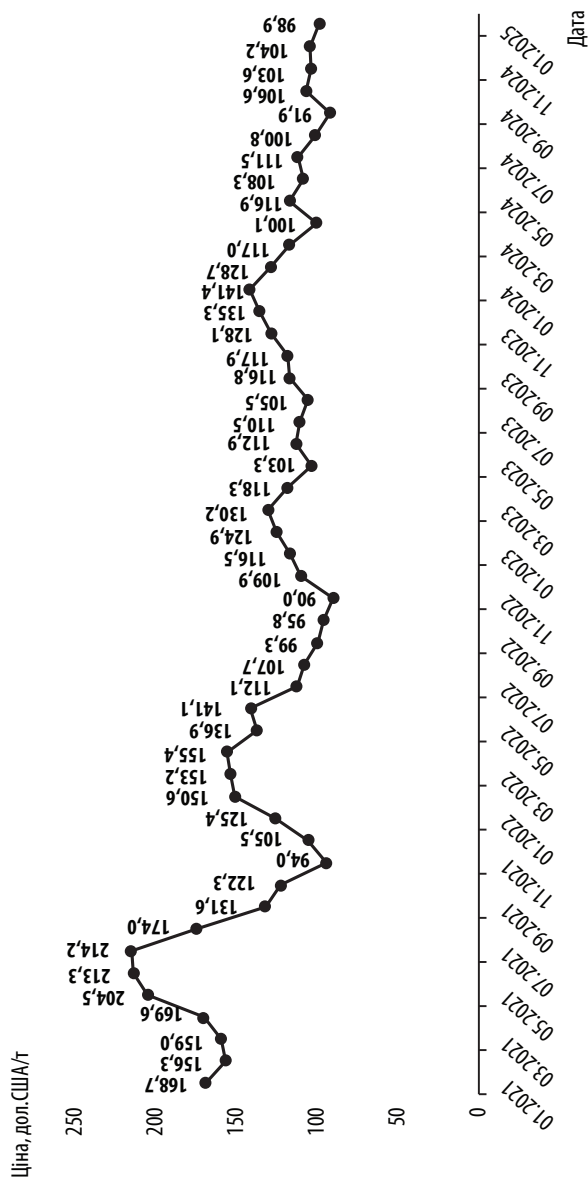


Рис. 1.5. Динаміка спотових цін на залізну руду у 2021-2024 рр.

Джерело: складено за [7]

Загальна тенденція на 2025 р. очікується як стабільна з помірним зниженням. Прогнози більшості аналітиків зосереджуються на діапазоні 90–110 дол. США/т. Основним фактором, що чинитиме тиск на ціни, є очікуваний запуск нових великих проєктів, зокрема родовища Сіманду в Гвінеї. Консенсус-прогнози, підготовлені провідними аналітичними агентствами, вказують на помірне, але стійке зниження цін на залізну руду протягом 2025–2030 рр. Це зниження переважно зумовлене очікуваним структурним профіцитом у глобальному балансі торгівлі та спадом китайського попиту. Scotiabank прогнозував середню ціну 95 дол. США/т у 2025 р. з подальшим зниженням до 90 дол. США/т у 2026 р. [8]. ING Think передбачав 100 дол. США/т у 2025 р., падаючи до 95 дол. США/т у 2026 р. [9]. Світовий Банк також прогнозував середній показник 95 дол. США/т у 2025 році та 88 дол. США/т у 2026 р. [10]. Goldman Sachs утримує свій прогноз на 2025 р. на рівні 80 дол. США/т [11].

S&P Global очікує, що ціни знижуватимуться поступово, досягаючи прогнозованого мінімуму 80,00 дол. США/т за сухометричну тонну до 2029 р. Діапазон консенсус-прогнозу на 2030 рік становить від 70 до 88 дол. США/т. Ці прогнози відображають очікування, що зростання пропозиції (зокрема, за рахунок нових великих проєктів, як-от Simandou) буде випереджати попит, який повільно коригується. Після періоду структурного надлишку, S&P Global очікує, що ціни відновляться до 95,00 дол. США/т до 2035 р., оскільки торговий баланс почне вирівнюватися після витіснення високозатратних потужностей [12].

Світове виробництво чавуну досягло пікового значення 1,35 млрд т у 2021 р., після чого у 2022–2024 рр. спостерігалася слабка, але стратегічно значуща тенденція до скорочення (табл. 1.3), що корелює із загальним зниженням виробництва сирової сталі та відображає макроекономічні тенденції.

Традиційний інтегрований цикл «доменна піч – кисневий конвертер» (BF/BOF), що базується на чавуні, історично має перевагу у прямих витратах порівняно з електросталеплавильними циклами, будучи найдешевшим методом виробництва сталі [13].

Таблиця 1.3

Динаміка виробництва чавуну в світі у 2014–2024 рр., млн т

Регіон	2014	2021	2022	2023	2024	Тренд у 2014–2024 рр.	ТЗ у 2014–2024 рр., %	СТП у 2014–2024 рр., %
Світ	1186,8	1350,1	1300,8	1312,3	1293,5		109,0	0,9
ЄС-27	85,2	79,0	70,9	64,4	65,8		77,2	-2,6
Інша Європа	20,6	18,6	15,8	15,0	16,1		78,2	-2,4
СНД + Східна Європа	79,5	78,3	60,9	63,3	61,2		77,0	-2,6
Північна Америка	41,2	31,1	28,3	29,3	26,9		65,3	-4,2
Південна Америка	30,7	31,6	29,7	28,5	28,8		93,9	-0,6
Африка	5,3	3,2	2,7	3,2	3,0		57,1	-5,4
Близький Схід	2,8	2,7	3,5	3,5	3,6		129,4	2,6
Азія	917,7	1101,1	1084,6	1100,9	1086,1		118,4	1,7
Океанія	4,0	4,4	4,3	4,1	3,4		85,8	-1,5

Примітка: ТЗ – темп зростання, СТП – середньорічний темп приросту

Ажерело: складено за [14; 15]

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

Виходячи з аналізу світового виробництва чавуну за 2014–2024 рр., глобальна динаміка характеризується помірним зростанням (+0,9 %/рік) із піком у 2021 р., що відповідає піковим показникам Азії (+1,7 %/рік). Водночас більшість традиційних індустріальних регіонів демонструють значне скорочення виробництва чавуну протягом усього аналізованого періоду, що свідчить про структурний перехід: найрізкіше падіння зафіксовано в Африці (-5,4 %/рік) та Північній Америці (-4,2 %/рік). Європейські регіони також суттєво скоротили виробництво під тиском вуглецевого ціноутворення та регуляторних змін: ЄС-27 (-2,6 %/рік) та інші європейські країни (-2,4 %/рік) досягли своїх мінімальних значень у 2023 р. Країни СНД і Східна Європа (Світова асоціація сталі до них відносить Україну, Казахстан і РФ) продемонстрували стрімке падіння до мінімуму у 2022 р. (-2,6 %/рік). Єдиним регіоном, який демонструє стійке зростання виробництва чавуну, є Близький Схід (+2,6 %/рік), що підкреслює розширення його виробничих потужностей.

Світовий ринок чавуну характеризується регіональною асиметрією виробництва, яка протягом 2014–2024 рр. стрімко посилилася (рис. 1.6). Частка Азії як домінуючого виробника зросла з 77 % у 2014 р. до 82 % у 2021 р. та до 84 % у 2024 р., що підкреслює концентрацію виробничих потужностей в цьому регіоні. Водночас частки усіх традиційних виробничих центрів суттєво скоротилися: частка ЄС-27 впала на 2,1 в. п., СНД і Східна Європа — на 2,0 в. п., а Північна Америка — на 1,4 в. п. Єдиним помітним винятком є Близький Схід, чия частка зросла з 0,2 % до 0,3 % на тлі стійкого зростання обсягів виробництва. Такі зрушення засвідчують географічне зміщення центрів виробництва вуглецево-інтенсивного чавуну.

Структурні зрушення у рейтингу ТОП-15 виробників чавуну у період 2021–2024 рр. полягали у прискоренні географічної концентрації виробництва в Азії та технологічного зсуву в розвинених країнах світу, тоді як геополітичні потрясіння спричинили перерозподіл торговельних потоків і посилення ролі нових виробників (рис. 1.7).

Глобальний ринок чавуну характеризується екстремальною асиметрією виробництва, де Китай залишається безумовним лідером, забезпечуючи 64,3 % світового виробництва у піковому 2021 р. та 65,8 %

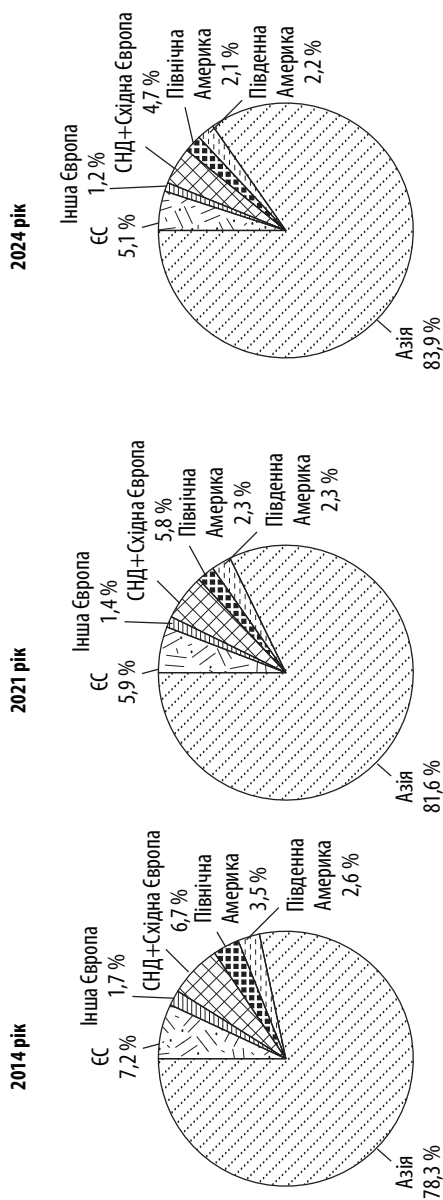


Рис. 1.6. Регіональна структура виробництва чавуну у 2014–2024 рр.

Джерело: складено за [14; 15]

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

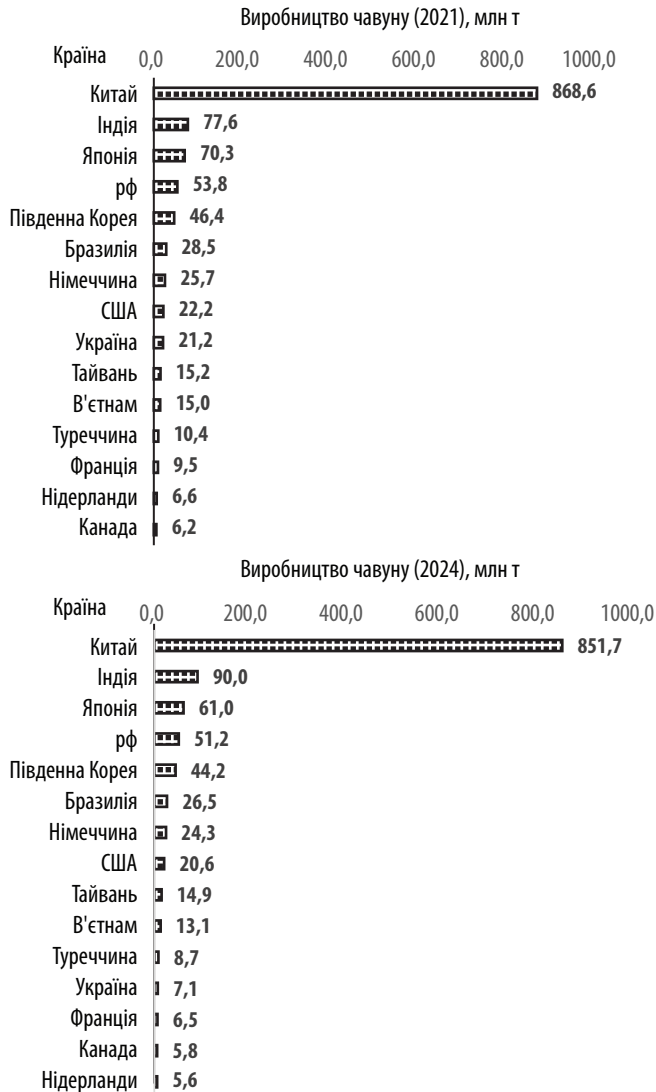


Рис. 1.7. ТОП-15 країн-виробників чавуну у 2021 р. та 2024 р.

Джерело: складено за [14; 15]

у 2024 р. Проте орієнтація на внутрішнє споживання чавуну обмежує його прямий вплив на світовий ринок, динаміка якого визначається змінами у виробництві інших країн. Ключовою структурною зміною є посилення ролі Індії (+12,4 млн т за 3 роки або +5,0 % /рік протягом останніх 10 років), чия частка у світовому виробництві чавуну зросла з 5,7 % у 2021 р. до 7,0 %. Екстремальне зростання виробництва чавуну було також зафіксовано у В'єтнамі (з 1,4 млн т у 2014 р. до 13,1 млн т у 2024 р.) завдяки швидкій індустріалізації та будівництву нових потужностей.

Водночас у 2014–2024 рр. розвинені економіки, зокрема країни Європи, Північної Америки та Японія, прагнуть до скорочення виробництва чавуну (СТП у Франції – -5 %/рік, Великій Британії – -11 %/рік, Японії – -3,1 %/рік та США – -3,5 %/рік), що є наслідком стратегічного галузевого переходу до менш вуглецево-інтенсивних виробництв.

Геополітичні зрушення призвели до перерозподілу експортних потоків товарного чавуну (рис. 1.8).

Геополітична криза 2022 р. призвела до суттєвої дестабілізації світового ринку чавуну, про що свідчить скорочення загального обсягу експорту з 13,7 млн т у 2021 р. до 12,0 млн т у 2023 р., що становить падіння на 12,6 %.

Найбільш різкі зміни в рейтингу були спричинені геополітичними факторами, що призвели до розриву традиційних ланцюгів постачання: виробництво України зазнало катастрофічного падіння (на 69,8 % у 2022 р.), що призвело до її зміщення з 10-го у 2021 р. на 16-те місце у 2023 р. у світовому рейтингу, і санкційне скорочення виробництва в Росії на -14,8 %, – це створило критичний вакуум на світовому ринку товарного чавуну. Проте українська металургія продемонструвала стійкість і відновлення у 2024 р., зафіксувавши найвищі у світі темпи зростання та повернувшись на 13-те місце у світовому рейтингу, що разом із відновленням морської логістики посилило її роль як важливого експортера на ринки США та ЄС. Таким чином, обидва найбільші постачальники Чорноморського регіону одночасно зазнали обвалу експортних показників, що і стало причиною глобального перерозподілу.

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

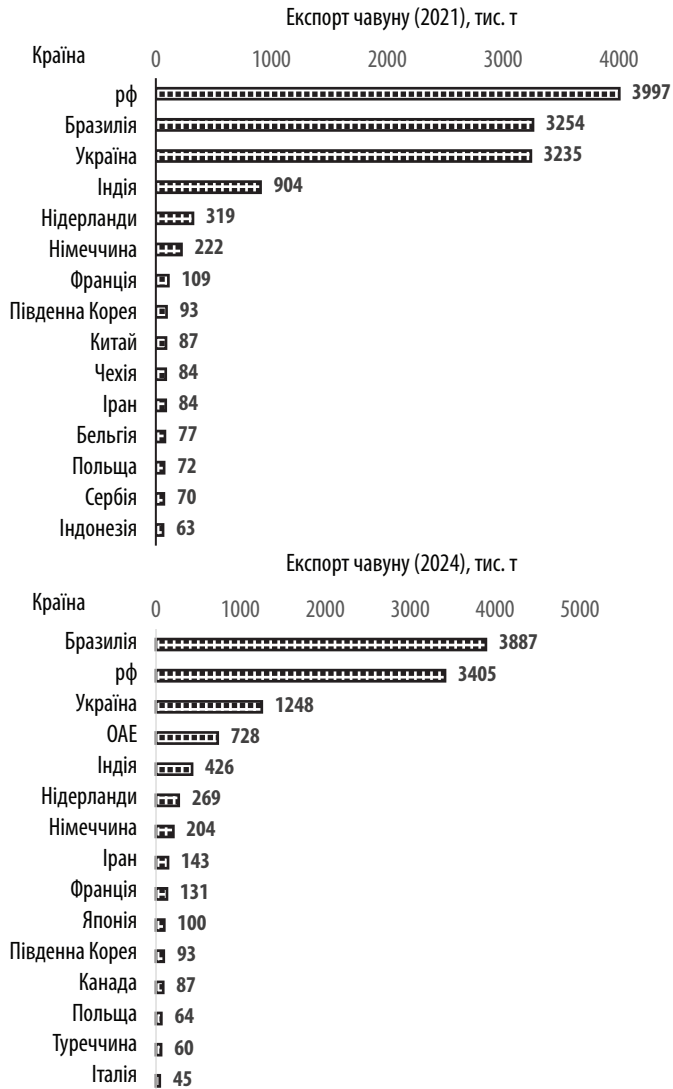


Рис. 1.8. ТОП-15 країн-експортерів чавуну у 2021 р. та 2023 р.

Джерело: складено за [14; 15]

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

Як наслідок, Бразилія наростила свій експорт на 19,5 % (до 3,9 млн т), очоливши світовий рейтинг. Паралельно відбулося стрімке входження нових гравців, зокрема ОАЕ, які збільшили експорт майже у 23 рази, посівши 4-те місце з обсягом 728 тис. т. Також відбулося суттєве нарощування обсягів експорту Іраном (на 70 % – 8-ме місце у рейтингу 2023 р.) та Японією (у 2,6 разу, 10-те місце у рейтингу 2023 р.).

Продуктовий аналіз експорту чавуну засвідчує, що в аналізований період відбулися суттєві структурні зрушення (рис. 1.9).

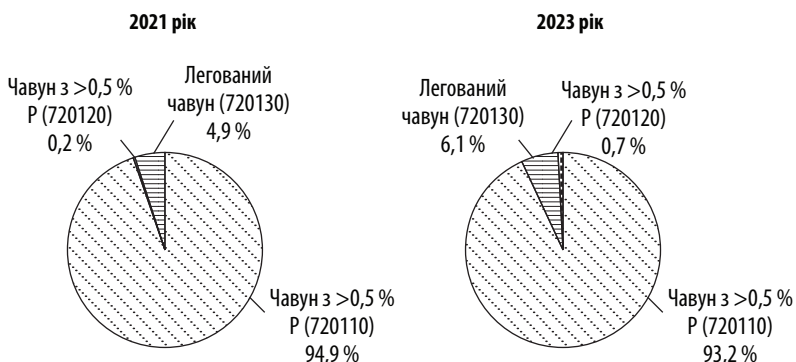


Рис. 1.9. Продуктова структура експорту чавуну у 2021 р. та 2023 р.

Джерело: складено за [13]

Чавун із вмістом фосфору понад 0,5 % (код 720110) зберіг своє домінуюче положення в продуктивній корзині, проте втратив 1,7 в.п. Найбільш помітним структурним зрушенням стало відносне зростання частки легованого чавуну (720130) – високотехнологічного та більш маржинального продукту. Його частка зросла на 1,2 в.п. Низькофосфористий чавун (код 720120), незважаючи на незначну частку в загальному обсязі, продемонстрував найбільш виражене зростання – з 0,2 % до 0,7 %, що вказує на зростання на міжнародних ринках попиту на високоякісну сталь.

Світовий імпорт чавуну, після піку у 2018 р. на рівні 15,4 млн т, продемонстрував тенденцію до зниження, перервану безпрецедентним

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

сплеском у ковідному 2020 р. (15,1 млн т), що було спричинено винятково різким зростанням попиту з боку Китаю (через його швидке відновлення після локдауну та глобальний дефіцит металобрухту). У період 2021–2023 рр. низхідна тенденція посилювалася, призвівши до зниження імпорту чавуну до 11,5 млн т у 2023 р. У регіональному розрізі рушійними силами цього стали:

- 1) державне регулювання в Китаї – через посилення екологічних норм та скорочення виробництва сталі, а також нормалізацію ланцюгів постачання металобрухту;
- 2) звуження економічної активності в Північній Америці – розвантаження надлишкових запасів, уповільнення кінцевих секторів економіки (здебільшого машинобудування) та зростання внутрішнього виробництва заліза прямого відновлення DRI/HBI;
- 3) енергетична криза в ЄС, що призвела до скорочення виробництва сталі та загальної економічної стагнації;
- 4) переміщення світових торговельних потоків до Південно-Східної Азії, оскільки жорсткі екологічні обмеження в Китаї стимулювали стратегічне переміщення сталеливарних інвестицій та виробничих потужностей до Індонезії, В'єтнаму, що призвело до зростання імпорту.

Регіональна переорієнтація світових торговельних потоків товарного чавуну обумовила суттєві рейтингові зрушення серед ключових країн-імпортерів (рис. 1.10).

США, Італія та Туреччина продемонстрували найбільшу стійкість, зберігши своє лідерство за попитом на чавун, незважаючи на коливання обсягів. Китай здійснив найбільший стрибок у рейтингу (+8 позицій) і продемонстрував перехід від масового імпорту чавуну до його витіснення внутрішніми джерелами та альтернативною продукцією. Водночас Південна Корея втратила 4 позиції. Промислово розвинуті країни суттєво втратили свої позиції серед ключових імпортерів, зокрема Німеччина (-5 позицій) та Бельгія (-4), Південна Корея (-4), тоді як Японія, Таїланд та Мексика вибули з рейтингу. Індонезія та ОАЕ стали новими великими імпортерами чавуну, 7-ме та 12-те місце серед ТОП-

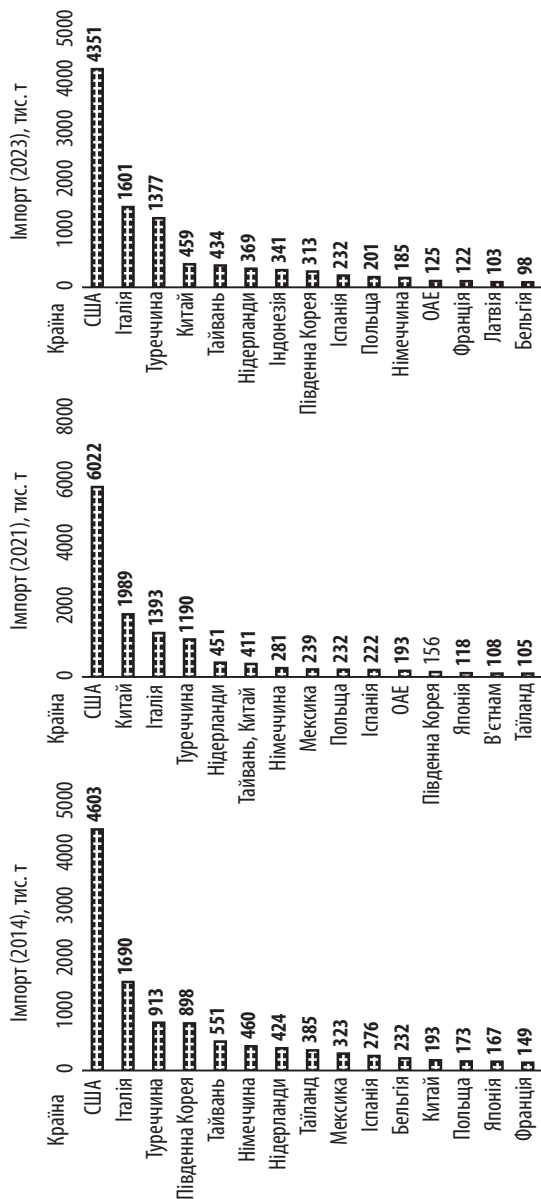


Рис. 1.10. ТОП-15 країн-імпортерів чавуну у 2014 р., 2021 р. та 2023 р.

Ажерело: складено за [14; 15]

15 імпортерів у 2023 р. Це засвідчує тенденцію про переміщення чавунного виробництва до Південно-Східної Азії.

Традиційний виробничий цикл від виробництва чавуну для киснево-конверторного виробництва сталі (цикл BF/BOF), що базується на вугіллі та коксі, є високоінтенсивним за викидами CO_2 . Для забезпечення відповідності глобальному кліматичному шляху $1,5^\circ\text{C}$ та досягнення майже нульових викидів, викиди від виробництва сталі мають бути знижені на 90 % [16]. Виробничий цикл від заліза прямого відновлення для електросталеплавильного виробництва (цикл DRI/EAF) вважається найбільш реалістичним і перевіреним шляхом до декарбонізації. Залізо прямого відновлення (Direct Reduced Iron, DRI) є високоякісним проміжним продуктом, а його ущільнена форма, гарячебрикетоване залізо (Hot Briquetted Iron, HBI) є ключовим експортним товаром. Висока чистота DRI/HBI продуктів, що зазвичай досягає 90–94 % вмісту заліза, є критичною для виробництва високоякісних марок сталі [17]. Світовий ринок DRI/HBI демонструє стабільну траєкторію зростання, що спричинене декарбонізацією та експансією виробничого циклу «залізо прямого відновлення – електросталеплавильне виробництво» (DRI/EAF), однак його регіональна динаміка неоднорідна (табл. 1.4).

Загальний світовий обсяг виробництва DRI зріс з 82,5 млн т у 2021 р. до 144,1 млн т у 2024 р., демонструючи середньорічний темп приросту у 5,7 % за період 2014–2024 рр. Понад 61 % нових потужностей сталеплавильної промисловості додається через маршрут електросталеплавильного виробництва, де DRI/HBI використовується як високоякісний замітник металобрухту [18].

За прогнозами [19], ринок DRI/HBI (у грошовому вимірі) зросте з приблизно 21,5 млрд дол. США у 2024 р. до 39,4 млрд дол. США до 2033 р., що відповідає СТП 6,2 % (2025–2033 рр.). Ринок HBI, який є ключовим експортним товаром, оцінювався в 4,4 млрд дол. США у 2024 р. та, за прогнозами, досягне 8,1 млрд дол. США до кінця 2035 р. при СТП у 5,8 % [19].

Історично Близький Схід є світовим центром виробництва DRI/HBI із часткою у 35 % від світового виробництва в 2024 р. та СТП у 5,6 % на рік протягом останніх 10 років. Його домінування зумовлено

Таблиця 1.4

Динаміка виробництва заліза прямого відновлення у світі у 2014–2024 рр., млн т

Регіон	2021	2022	2023	2024	Тренд 2014–2024 рр.	ТЗ у 2014–2024 рр., %	СТП у 2014–2024 рр., %
ЄС-27	0,6	0,3	0,2	0,1		14,9	-17,3
СНД	7,8	7,7	7,8	8,0		149,5	4,1
Північна Америка	14,1	14,0	14,4	13,2		109,4	0,9
Південна Америка	2,2	2,4	2,2	1,4		40,8	-8,6
Африка	9,7	11,5	14,8	14,8		269,5	10,4
Близький Схід	44,2	47,9	48,8	49,9		173,1	5,6
Азія	39,4	43,3	50,8	56,8		212,7	7,8
Світ	118,0	127,1	138,8	144,1		174,6	5,7

Примітка: див. пояснення до табл. 1.3

Джерело: складено за [14; 15]

наявністю значних запасів дешевого природного газу, який використовується для газових технологій виробництва DRI/HBI. Азія є найбільшим регіональним центром виробництва DRI/HBI у світі, утримуючи близько 39 % світової частки при СТП 7,8 % на рік завдяки прискореній урбанізації та інфраструктурному розвитку. У 2023 р. азієське виробництво випередило близькосхідне. Африка демонструє найвищий СТП у 10,4 % у 2014–2024 р., що відображає інвестиції у великі проекти відповідно до концепції «зелених залізних коридорів», маючи високоякісну руду та потенціал для конкурентоспроможної відновлюваної енергії [20].

Північна Америка має низький СТП у 0,9 % на рік, але високі стабільні обсяги (12–14 млн т на рік). США є найбільш зрілим ринком електросталі у світі, де 70 % сталі вже виробляється електросталеплавильним способом. Низький показник СТП свідчить про те, що основна хвиля переходу на виробничий цикл DRI/ЕАF вже відбулася. Поточні обсяги підтримуються експлуатацією сланцевого газу (починаючи з 2012 р.) та державними ініціативами, як-от Закон про інвестиції в інфраструктуру (ІІА), що стимулює попит на електросталь [21].

ЄС-27 має найбільш негативний СТП у -17,3 % та найменші обсяги. Це відображає історичну відсутність масових інвестицій у DRI через брак конкурентоспроможних залізрудних і газових ресурсів. Проте ЄС є головним світовим рушієм попиту на низьковуглецеву сталь, і регіон активно інвестує у нові потужності H_2 -DRI (проекти H_2 Green Steel у Швеції та Salzgitter у Німеччині) [22; 23].

У СНД виробництво заліза прямого відновлення локалізовано в РФ, яка у 2018–2024 рр. вийшла на плато у 7,8–8 млн т. Однак інші країни регіону активно інвестують у нове покоління H_2 -ready HBI-потужностей (наприклад, проект ERG у Казахстані [24]).

Південна Америка, незважаючи на помітне зниження обсягів виробництва DRI (СТП -8,6 %), зберігає довгостроковий стратегічний потенціал як майбутній глобальний хаб для «зеленого» заліза завдяки наявності високоякісної залізної руди та конкурентоспроможної відновлюваної енергії [20].

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

Виробництво DRI ґрунтується на кількох комерційно перевірених технологіях, які класифікуються за типом використовуваного відновлювача (редуктанта). Світова структура виробництва DRI демонструє домінування газових процесів, хоча частка вугільних технологій зростає, особливо в Азії (рис. 1.11).

Частка технології
у світовому виробництві DRI, %

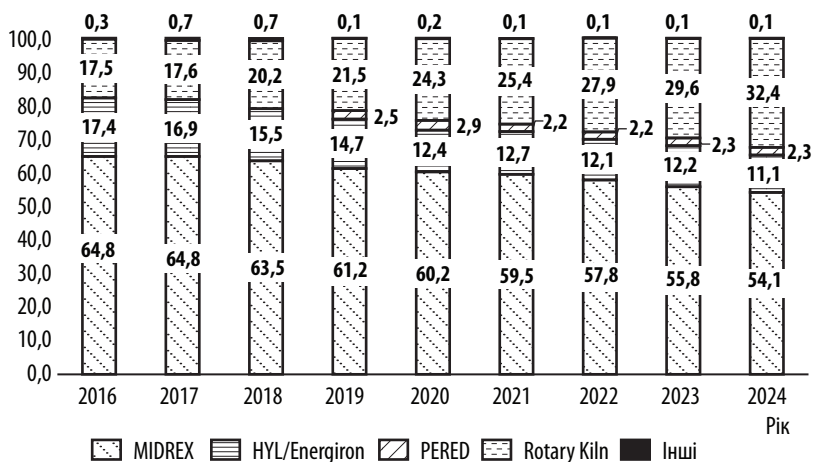


Рис. 1.11. Структура виробництва DRI за технологіями у 2016–2024 рр.

Джерело: складено за [25–28]

Газові процеси використовують природний газ для виробництва відновного газу (який складається з H_2 та CO) та забезпечують виробництво DRI з нижчими викидами CO_2 і є основою для майбутнього переходу на чистий водень. У 2024 р. приблизно 65,7 % світового виробництва DRI було побудовано на використанні природного газу. Дві ключові технології, що домінують у цьому сегменті:

- MIDREX є безумовним світовим лідером, охоплюючи 54,1 % світового виробництва DRI у 2024 р.;
- HYL/Energiron – становить 11,1 % світового виробництва DRI у 2024 р.

Вугільні процеси (Rotary Kiln) використовують вугілля як основний редуктант, який є технічно і комерційно перевіреним, але вважається більш вуглецево-інтенсивним.

Менша частка світового виробництва припадає на інші технології, включаючи PERED (2,3% світового виробництва у 2024 р.) та інші процеси (FINMET, CIRCORED, FIOR), та інші методи.

Виробництво заліза прямого відновлення здійснюється у трьох формах [29–31]:

- CDRI – звичайний DRI, охолоджений до 50–200 °C і поданий у виді грудок, вразливих до окиснення та самозаймання, тому виробляється поруч із EAF;
- HDRI – DRI, поданий у піч гарячим 600–700 °C без охолодження, краща енергетоефективність і металізація, низькі втрати, виробляється на єдиному DRI → EAF майданчику;
- HBI – гарячопресовані брикети DRI, які мають високу щільність і низьку пористість, тому безпечні для транспортування і зберігання і є основною формою для міжнародного експорту DRI.

Динаміка виробництва DRI чітко відображає стратегічний зсув у світовій металургії заліза: відбувається прискорена інтеграція CDRI та HDRI у національні ланцюги виробництва сталі, проте існують уповільнені тенденції щодо виробництва його експортної форми HBI (рис. 1.12).

CDRI залишається безумовним лідером, зберігаючи свою частку на рівні близько 80 % від загального світового виробництва протягом усього періоду (+99,0 % у 2010–2024 рр.). Зростання CDRI відповідає за бум будівництва нових EAF у світовому масштабі.

Виробництво HDRI продемонструвало найвищі темпи зростання – понад 162 % , а його частка у загальному виробництві зросла з 9,2 % до 12,1 %.

Виробництво HBI зросло найменше – на 55,2 % і, як наслідок, його частка у світовому виробництві впала з 10,3 % до 7,9 %. Отже, попри свою високу щільність, HBI є менш вигідним, ніж безпосереднє використання HDRI.

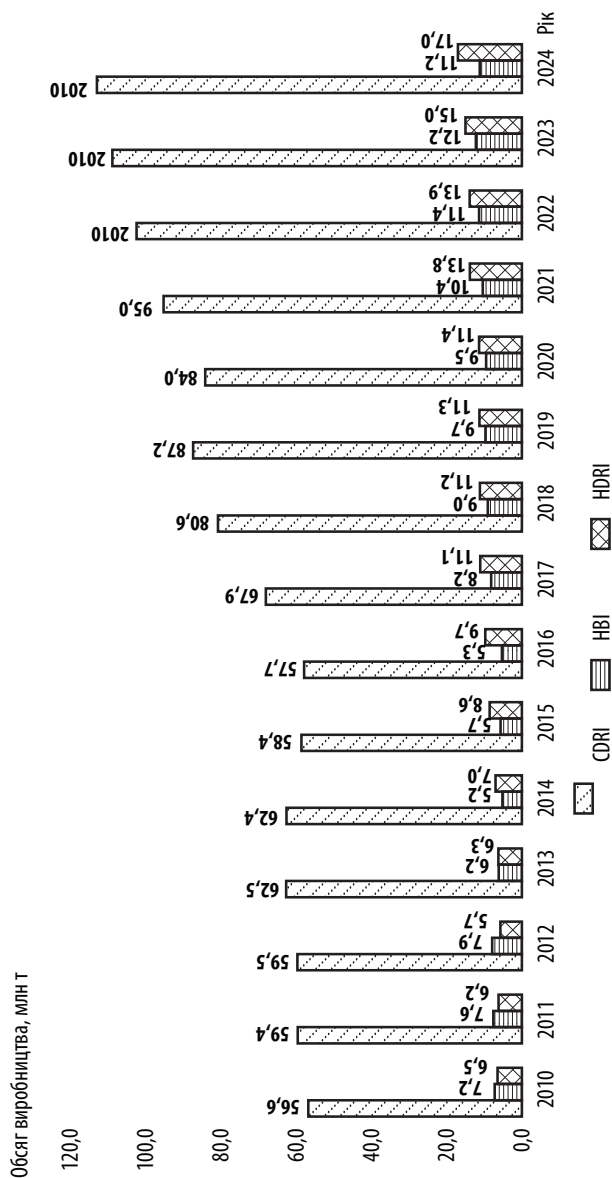


Рис. 1.12. Динаміка виробництва DRI за видами у 2010–2024 рр.

Джерело: складено за [25–28]

Світове виробництво заліза прямого відновлення зосереджено в 25 країнах світу. Зміни у рейтингу ТОП-15 країн-виробників DRI за 2014, 2021 та 2023 рр. відображають ключові структурні зрушення, спричинені доступністю енергетичних ресурсів (природного газу та вугілля) та прискороною експансією електросталеплавильного виробництва у світі (рис. 1.13).

Індія та Іран є світовими лідерами у виробництві DRI: Індія подвоїла виробництво, що призвело до зростання її частки у світовому виробництві з 29,7 % у 2014 р. до 35,7 % у 2023 р., а Іран, збільшивши понад удвічі обсяги виробництва, збільшив свою частку у світовому виробництві з 17,6 % до 24,1 % відповідно. Зростання Індії значною мірою обумовлене її успішною адаптацією до місцевої сировинної бази. Індія є світовим лідером у використанні вугільних процесів (Rotary Kiln), попри те, що це більш вуглецево-інтенсивний маршрут [32]. Іран історично зосередив виробництво на газових процесах (Midrex/Energiron) завдяки доступності та низькій вартості природного газу, що забезпечує йому стійку конкурентну перевагу [33].

Найбільш вражаючим є підйом США з 14-го місця (1,3 млн т) на 5-те місце (5,4 млн т) завдяки зрілому електросталеплавильному виробництву. Розробка родовищ сланцевого газу дала новий потужний імпульс газовим процесам DRI у країні [35].

Саудівська Аравія (перейшла з 3-го на 4-те місце), ОАЕ (зміцнила свої позиції – з 8-го на 7-ме місце), Оман та Бахрейн зберегли свої позиції завдяки послідовним інвестиціям, підтримуючи високу частку газових технологій. Поява Алжиру (6-те місце) та Лівії (12-те місце) у ТОП-15 2023 року відображає загальну тенденцію зростання виробництва DRI в африканському регіоні, який має найвищий середньорічний темп приросту, що свідчить про використання місцевих газових і рудних ресурсів.

Виробництво заліза прямого відновлення в ЄС зосереджено в Німеччині та Швеції, але у світовому обсязі вони незначні та складали 80 тис. т та 100 тис. т у 2023 р.

Основними етапами еволюції технології MIDREX є такі – *табл. 1.5* (обсяг встановлених потужностей за цією технологією складає 110 млн т/рік).

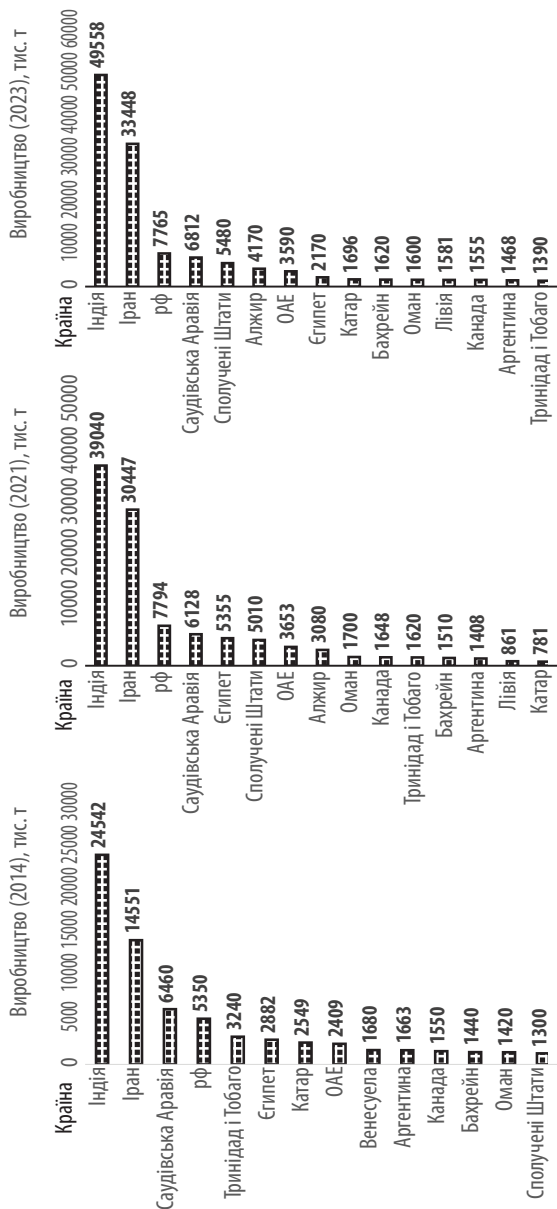


Рис. 1.13. ТОП-15 країн-виробників заліза прямого відновлення у 2014 р., 2021 р. і 2023 р.

Ажерело: складено за [14]

Таблиця 1.5

Етапи еволюції технології MIDREX

Період часу	Сутність етапу
Початковий етап (до 1980-х)	Основний акцент зосереджено на локальних, малих CDRI модулях. Перша промислова установка з'явилася у 1971 р. на заводі Hamburger Stahlwerke (м. Гамбург, Німеччина) потужністю 0,40 млн т/рік
1980–2010 рр.	Експансія стандартних одномодульних заводів, включаючи появу першого HBI-виробництва (перший завод Hadeed A & B, Al-Jubail у Саудівській Аравії запущено 1984 р. потужністю 0,65 млн т/рік), а також CDRI/HDRI-виробництво (перший завод AM/NS India I & II, Hazira в Індії в 1990 р. потужністю 0,88 млн т/рік)
1979–2012 рр.	Експансія багатомодульних установок MIDREX, що дозволило виробникам значно масштабувати виробництво та підвищити його гнучкість без інвестицій у надвеликі одиничні модулі (перший багатомодульний завод Sidor із 3 модулів у Венесуелі в 1979 р., сумарною потужністю 1,28 млн т/рік) Найбільші багатомодульні установки (Mobarakeh Steel A–E в Ірані, запущена у 1992–1994 рр.), що мали 5 модулів із сумарною потужністю 3,2 млн т/рік
Сучасний етап (з 2012 р.)	Значне зростання одиничної потужності модуля (до 2,5 млн т/рік) та перехід на HDRI для підвищення енергоефективності, а також на HBI для світової торгівлі, що відображає підготовку до ери водневої металургії
Підготовчий етап до ери «зеленої» сталі (початок 2020-х років)	Будівництво H ₂ -DRI модулів. Основні потужності проєктуються в ЄС та Північній Америці з можливістю повного або часткового заміщення природного газу чистим воднем, який отримується за допомогою відновлюваних джерел енергії

Джерело: складено авторами за [25–28]

Еволюція потужностей HYL/Energiron (сумарна встановлена потужність для цієї технології складає 27 млн т/рік) фокусується на зміні продукту, що відображає перехід від базового DRI до енергоефективних форм (табл. 1.6).

Наступною є вугільна технологія Rotary Kiln, яка, незважаючи на значні глобальні зусилля, спрямовані на декарбонізацію металургії, де-

Таблиця 1.6

Етапи розвитку технології HYL/Energiron

Період часу	Сутність етапу
Початковий етап (1983–1998 рр.)	Основний акцент зосереджено на локальних, малих CDRI модулях із середньою потужністю 0,53 млн т/рік. Перша установка, що використовує процес HYL/Energiron, з'явилася у 1983 р. на заводі Ternium 3M5 у Монтеррей, Мексика, потужністю 0,50 млн т/рік. Цей етап характеризувався надійністю та орієнтацією на внутрішні потреби Мексики та інших країн регіону
1993–2000 рр.	Відбулася поява та розвиток експортної орієнтації HBI із середньою потужністю модуля 0,81 млн т/рік. Ключові виробництва HBI були запущені на заводі JSW Salav у Райгаді, Індія, у 1993 р. (0,90 млн т/рік) та на заводі LGOK HBI-1 у Губкіні, рф, у 1999 р. (0,90 млн т/рік). Це дозволило постачати безпечні брикети за межі регіонів виробництва, сприяючи глобалізації ринку DRI
Сучасний етап	Значне зростання одиничної потужності модуля (до 2,50 млн т/рік) та перехід на виробництво HDRI для підвищення енергоефективності. У 2009 р. було запущено завод Emirates Steel I (GHC) в Абу-Дабі, ОАЕ, потужністю 2,00 млн т/рік, який став прикладом інтегрованого гарячого завантаження. На заводі Nucor Steel Louisiana у США в 2013 р. було запущено модуль потужністю 2,50 млн т/рік, що встановив новий галузевий стандарт масштабу
Майбутні проекти (з 2023 р. та за- контраговані)	Зосередженість на виході на нові ринки (Китай, Болівія) та підготовці до ери водневої металургії (H_2 -DRI). Найбільш амбітним є проект Salzgitter AG у Німеччині (контракт), запланований на 2,10 млн т/рік, який є ключовим елементом європейської стратегії декарбонізації та демонструє технологічну готовність HYL/Energiron до використання чистого водню

Джерело: складено авторами за [25–28]

монструє значну динаміку зростання. Еволюцію технології Rotary Kiln можна також умовно розділити на 3 етапи, кожен з яких характеризується різними технологічними пріоритетами, географічним фокусом та економічними умовами (табл. 1.7).

Аналіз потужностей DRI за альтернативними технологіями наведено у табл. 1.8.

Таблиця 1.7

Групування потужностей Rotary Kiln за етапами розвитку

Період часу	Сутність етапу
Перші розробки (1960–1980 рр.)	Створення перших РК-установок з продуктом CDRI та R-Iron. Середня одинична потужність була близько 0,10 млн т/рік (300 т/добу). Загальна встановлена потужність була < 5,0 млн т/рік. Ключові розробники: Metso (SL/RN) та Krupp (CODIR). Країни-піонери: Канада, Нова Зеландія, Німеччина, ПАР
Багатомодульні заводи 1980–2005 рр.)	Поширення багатомодульних заводів, що дозволило збільшити загальну потужність, хоча одинична потужність модуля зросла незначно (прибл. 0,12 млн т/рік). Продукт залишався переважно CDRI. Сумарна встановлена потужність досягла ~ 15,0 млн т/рік. Продовжують роботу: Metso та Primetals Technologies (правонаступник CODIR). Експансія в Індонезію, Малайзію, Індію
Експансія (2005 р. – дотепер)	Значне зростання загальної встановленої потужності до 45,65 млн т/рік. Невелике збільшення середньої одиничної потужності до 0,15 млн т/рік (450 т/добу). Індія стала головним виробником, разом із Китаєм. Ключові компанії: Sponge Iron Manufacturers Association (SIMA), KINC Group, Classic Technomes. Цей етап характеризується широким застосуванням вугілля як відновника, що робить технологію популярною в регіонах із його значними запасами.

Джерело: складено за даними [35–37]

Таблиця 1.8

Альтернативні технології виробництва DRI

Показник	PERED	FINMET	CIRCORED	FIOR
1	2	3	4	5
Роки будівництва	2017–2024 рр. та за- контраговані	2000 р.	1999 р.	1976 р.
Продукт	CDRI, CDRI/HDRI	HBI	HBI	HBI
Середня потужність на 1 модуль (млн т/рік)	0,97	0,55	0,5	0,4
Мінімальна потужність на 1 модуль (млн т/рік)	0,3	0,55	0,5	0,4

Закінчення табл. 1.8

1	2	3	4	5
Максимальна потужність на 1 модуль (млн т/рік)	1,7	0,55	0,5	0,4
Сумарна встановлена потужність (млн т/рік)	6,8	2,2	0,5	0,4
Приклади країн	Іран (домінує), Китай.	Венесуела.	Тринідад і Тобаго.	Венесуела.
Ключові компанії	Shadegan Steel, Setareh Simin Hormoz.	BriqOri.	ArcelorMittal.	Operaciones RDI.

Джерело: складено авторами за [25–28]

Єдина технологія в цій групі, яка активно будується у 2020-х рр., – PERED, орієнтована на CDRI та активний розвиток HDRI, є ключовою технологією Ірану. Інші альтернативні технології (FINMET, CIRCORED, FIOR) були розміщені в регіонах з дешевим газом та орієнтацією на експорт – Венесуела, Тринідад, Тобаго, які мають високу волатильність. Окрім FINMET, інші заводи часто перебувають у статусі неактивних.

Світовий експорт DRI зріс із 6,9 млн т у 2014 р. до 10,8 млн т у 2023 р., при цьому його частка від світового виробництва коливалася від 7,8 % до 14,8 % протягом 10 років. Означене свідчить, що споживання DRI залишається внутрішнім пріоритетом, хоча стратегічна важливість НВІ як експортного товару зростає. Світовий експорт DRI вказує на значну диференціацію країн світу за роллю в світовій торгівлі (рис. 1.14).

Країни, орієнтовані на внутрішнє споживання, такі як Індія (частка експорту у виробництві 2,7 % у 2023 р.), Іран (1,3 %), Катар (1,4 %). Саудівська Аравія (0,4 %), США (3,1 %), Канада (3,5 %), маючи розвинуте власне виробництво DRI, використовують його як стратегічну внутрішню сировину для забезпечення своїх зростаючих електросталеплавильних виробництв.

Країни-експортні хаби, такі як Оман (132,8 %), Тринідад і Тобаго (109,7 %), Венесуела (336,2 %), спеціалізуються на виробництві DRI,

переважно у формі HBI на експорт, що робить їх ключовими постачальниками високоякісної сировини для електросталеплавильних виробництв країн, які не мають власних DRI-потужностей.

Торговельні вузли, такі як Південна Корея, Бельгія, Нідерланди, не є виробниками DRI, але відіграють роль логістичних і торговельних хабів, реекспортуючи сировину до центрів кінцевого попиту в Європі та Азії.

Динаміка світового імпорту DRI/HBI розкриває критичні регіональні дисбаланси у світовій металургії заліза, підтверджуючи, що попит на високоякісну сировину для декарбонізації є масовим, але виробничі потужності залишаються географічно обмеженими (рис. 1.15).

Ключовими імпортерами DRI/HBI є Саудівська Аравія (49 % від світового імпорту), країни ЄС (20 %) та США (9 %), оскільки їхня сталеплавильна промисловість прискорює перехід на електросталеплавильних виробництв та вимагає високоякісного DRI/HBI як преміального замінильника металобрухту.

Зростання імпорту Індії з 178 тис. т у 2014 р. до 617 тис. т у 2023 р. (4 % від світового імпорту) свідчить про те, що, незважаючи на своє лідерство у виробництві, вона також потребує високоякісного імпортованого HBI для доповнення власного вугільного виробництва преміальних марок сталі. Демонструє значне зростання імпорту DRI/HBI Туреччина у 2021–2023 рр. (з 68 тис. т до 627 тис. т).

Імпорт у Африці та Південній Америці залишається незначним і нерегулярним, що вказує на нерозвиненість електросталеплавильних виробництв регіону.

Кінцевою (споживчою) ланкою у вертикально інтегрованому ланцюгу металургії заліза є виробництво сталі, яке виступає основним споживачем продуктів заліза. Попит та динаміка виробництва сталі безпосередньо визначають тенденції розвитку й обсяги виробництва всіх попередніх ланок цього ланцюга. Обсяги споживання продуктів металургії заліза різняться залежно від обраного технологічного циклу виробництва сталі: традиційний вуглецево-інтенсивний виробничий цикл, заснований на доменному виробництві чавуну та киснево-конверторне

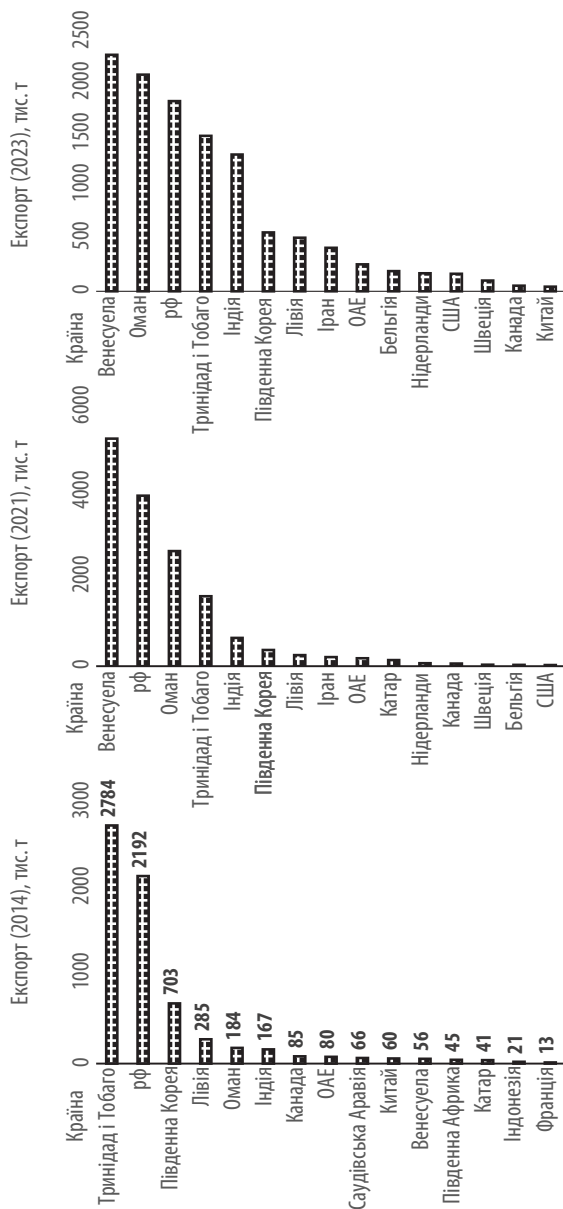


Рис. 1.14. ТОП-15 країн-експортерів заліза прямого відновлення в 2014 р., 2021 р. та 2023 р.

Джерело: складено за [14]

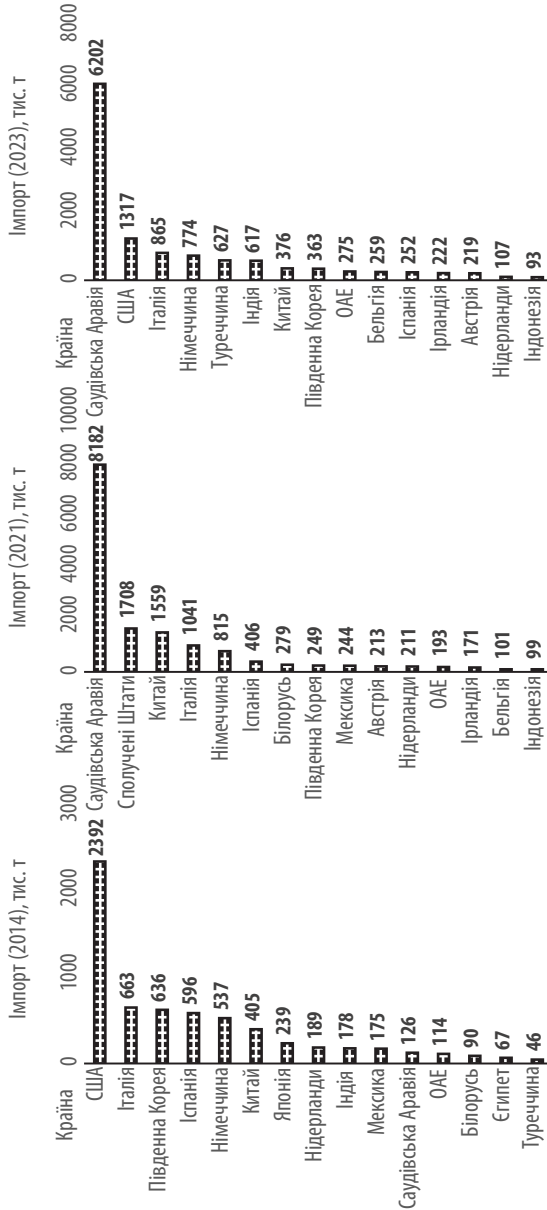


Рис. 1.15. ТОП-15 країн-імпортерів заліза прямого відновлення у 2014 р., 2021 р. та 2023 р.

Джерело: складено за [36]

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

виробництві сталі (BF/BOF) або низьковуглецевий «зелений» цикл, який спирається на виробництво заліза прямого відновлення та електросталеплавильне виробництво сталі (DRI/EAF).

Виробництво сирової сталі в кисневих конвертерах (BF/BOF), яке використовує чавун як основну сировину, зросло у світі на 8,1 % за період 2014–2024 рр., досягнувши 1326,8 млн т у 2024 р. У 2021 році зафіксовано рекордне значення виробництва сталі у розмірі 1404,6 млн т, після чого намітився розворот світової динаміки (табл. 1.9). Динаміка BF/BOF сталі повністю корелює з динамікою виробництва чавуну.

Зростання виробництва сталі BF/BOF у світі майже повністю забезпечене Азією, яка демонструє стабільне зростання виробництва сталі на 1,6 %/рік, що підкреслює її роль як глобального центру вуглецево-інтенсивного металургійного виробництва.

Найглибше падіння виробництва чавуну і сталі BF/BOF у Північній Америці (на -4,2 %/рік та -4,3 %/рік відповідно) та ЄС-27 (на -2,5 %/рік та -2,6 %/рік) підтверджує галузевий перехід цих регіонів, які свідомо скорочують виробництво, що базується на чавуні, на користь менш вуглецево-інтенсивного циклу DRI/EAF для забезпечення відповідності кліматичним цілям.

СНД і Україна демонструють значне скорочення за обома продуктами (близько -2,6 %/рік та -2,9 %/рік), що є геополітичним наслідком розриву традиційних ланцюгів постачання.

Високе зростання виробництва чавуну на Близькому Сході (+2,6 %/рік) при стагнації BF/BOF сталі (-0,8%/рік) свідчить про дивергенцію виробничого циклу, де чавун стає експортоорієнтованим продуктом.

У 2014–2024 рр. світова металургія BF/BOF продемонструвала посилення географічної концентрації в Азії та системне ослаблення позицій традиційних розвинених країн (США, Німеччина, Франція, Японія) через тренди декарбонізації. Одночасно відбувся кардинальний перерозподіл позицій через геополітичні чинники, що призвело до вибуття України з рейтингу ТОП-15 виробників (16-те місце у 2024 р.) та значних змін у рейтингу інших країн СНД (рис. 1.16).

Таблиця 1.9

Динаміка виробництва сталі в кисневих конвертерах у світі у 2014–2024 рр., млн т

Регіон	2021	2022	2023	2024	Тренд у 2014–2024 рр.	ТЗ (2024 до 2014 року), %	СТП, (2024 до 2014 року), т%
ЄС-27	85,6	77,5	70,3	72,1		77,6	-2,5
Інша Європа	19,5	16,7	15,8	15,6		71,8	-3,3
СНД + Україна	66,7	54,7	56,3	53,0		74,6	-2,9
Північна Америка	36,5	34,2	33,9	29,9		64,5	-4,3
Південна Америка	31,0	28,8	27,4	27,9		95,3	-0,5
Африка	3,4	2,8	3,2	3,6		78,4	-2,4
Близький Схід	2,7	3,2	2,4	2,5		92,5	-0,8
Азія	1154,3	1131,5	1141,3	1117,8		117,1	1,6
Океанія	4,9	4,7	4,6	3,8		91,8	-0,9
Світ	1404,6	1354,1	1355,1	1326,8		108,1	0,8

Ажерело: складено за [14; 15]

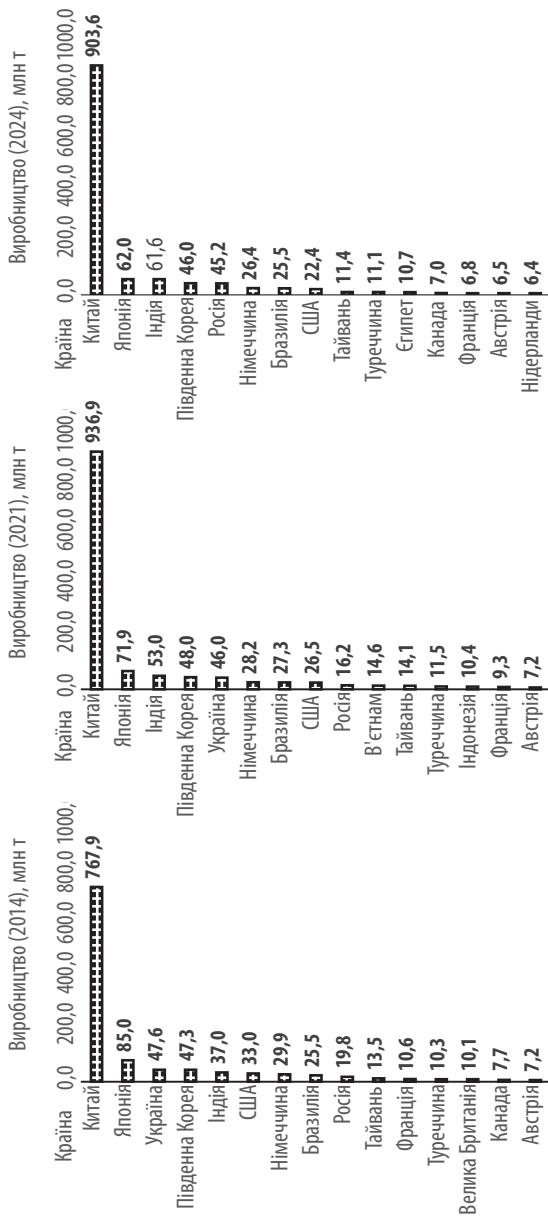


Рис. 1.16. ТОП-15 країн-виробників сталі в кисневих конвертерах у 2014 р., 2021 р. та 2024 р.

Ажерело: складено за [14; 15]

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

Порівняння рейтингів виробників чавуну та сталі свідчить про посилення географічної концентрації вуглецево-інтенсивного металургійного виробництва у двох азієських країнах. Китай зберіг безумовне 1-ше місце в обох рейтингах, навіть наростивши свою частку у світовому виробництві сталі з 62,6 % до 68,1 %, тоді як його частка за чавуном зросла з 60,1 % у 2014 р. до 65,8 % у 2024 р. Індія демонструє найбільш узгоджений та стрімкий підйом, значно збільшивши свою частку і піднявшись на 3-тє місце серед світових виробників сталі (частка зросла з 3,0 % у 2014 р. до 4,6 % у 2024 р.), а частка за чавуном зросла з 4,7 % у 2014 р. до 7,0 % у 2024 р. Це підтверджує, що ці 2 країни є головними драйверами зростання та концентрації традиційного інтегрованого циклу BF/BOF.

Рейтингові зміни у розвинених економіках ЄС-27 та Північної Америки є ідентично узгодженими і відображають стратегічне скорочення металургії заліза традиційного циклу. США синхронно знизилися з 6-го на 8-ме місце в обох рейтингах, втративши частку у світовому виробництві сталі з 2,7 % (2014 р.) до 1,7 % (2024 р.) та частку у виробництві чавуну з 2,5 % до 1,6 % відповідно. Німеччина та Франція також зафіксували падіння позицій, а їхні частки знизилися: Німеччина у світовому виробництві сталі – з 2,4 % до 2,0 % (виробництв чавуну з 2,3 % до 1,9 %), Франція з 0,9 % до 0,5 % (0,9 % до 0,7 %). Значущим наслідком цього тренду стало вибуття з ТОП-15 як виробників чавуну, так і виробників сталі Великої Британії (частка у виробництві сталі впала з 0,8 % до <0,5 %, а частка чавуну – з 0,8 % до < 0,4 % у 2014–2024 рр.

Геополітичні чинники спричинили катастрофічне падіння обсягів виробництва сталі та чавуну в Україні: вона перемістилася у світовому рейтингу виробництва чавуну з 9-го місця у 2014 р. на 12-те місце у 2024 р. (втратила 1,5 % світового ринку чавуну), а сталі – із 3-го місця у 2014 р. до 16-го місця у 2024 р. (втратила 3,6 % світового ринку традиційної сталі).

Перехід від традиційного циклу BF/BOF до циклу DRI/EGF є ключовою світовою тенденцією у металургії заліза та сталі для декарбонізації галузі. У 2014–2024 рр. світовий обсяг виробництва сталі електросталеплавильним способом зріс на 26,4 % році, досягши 556 млн т

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

у 2024 р., що доводить посилення ролі цієї технології у світовій металургії як найбільш гнучкої, енергоефективної і екологічної порівняно з киснево-конверторним виробництвом. Однак ці тенденції диференційовані за регіонами світу (табл. 1.10).

Найвищі темпи зростання серед усіх регіонів фіксується в Африці: 7,8 %/рік – стрімка урбанізація цього регіону вимагає значних інвестицій в інфраструктуру, що зумовлює посилений попит на сталеву продукцію і потребує масштабної розбудови металургійного сектора. Сприятливі кліматичні умови, а також значний обсяг накопиченого металобрухту дозволяє розбудовувати на цьому континенті гнучкі «зелені» міні-заводи.

Азія залишається найбільшим у світі виробником EOF-сталі (48 % у 2024 р.), демонструючи щорічне зростання на 3,5 %/рік, що є результатом цілеспрямованої екологічної політики Китаю щодо скорочення викидів CO₂, а також активного залучення іноземних інвестицій у металургійний сектор (Індія, Індонезія).

Помірний приріст виробництва сталі в електросталеплавильних печах у Північній Америці – 0,2 %/рік – та високий загальний обсяг у 76,6 млн т відображають ситуацію на зрілому, насиченому та високотехнологічному ринку, де EOF-технологія вже давно є домінуючою. EOF-виробництво значною мірою залежить від доступності якісного металобрухту в умовах жорсткої конкуренції за нього.

Тенденція скорочення обсягів виробництва EOF-сталі в ЄС-27 (СТП складає -1,1 %/рік) відображає вплив кліматичної політики, високих витрат на електроенергію (через ціни на газ та відмову від атомної енергетики в деяких країнах) та повільне економічне зростання. Замість розширення наявних EOF-потужностей, значні інвестиції в ЄС спрямовані на фундаментальну декарбонізацію через перехід на «зелений» водень та DRI.

Спад виробництва EOF-сталі в Південній Америці (СТП складає -1,15 %/рік) зумовлений макроекономічною нестабільністю та хронічною кризою у ключових економіках регіону, що призводить до скорочення інвестицій, низького внутрішнього попиту на сталь та високої інфляції, яка стримує виробництво.

Таблиця 1.10

Динаміка виробництва сталі в електросталеплавильних печах в світі у 2014–2024 рр., млн т

Країна / Регіон	2021	2022	2023	2024	Тренд у 2014–2024 рр.	ТЗ (2024 до 2014 року), %	СТП, (2024 до 2014 року), т%
ЄС-27	67,2	58,9	56,0	57,6		89,6	-1,1
Інша Європа	32,8	28,8	27,8	29,4		103,0	0,3
СНД + Україна	35,2	28,3	29,3	29,4		107,1	0,7
Північна Америка	81,4	77,4	76,6	76,2		102,0	0,2
Південна Америка	14,1	14,9	13,8	13,6		89,1	-1,1
Африка	19,4	20,2	23,4	24,5		211,8	7,8
Азія	248,8	247,1	259,7	264,9		140,5	3,5
Океанія	1,5	1,5	1,5	1,5		113,5	1,3
Світ	547,3	528,2	540,1	556,0		126,4	2,4

Джерело: складено за [14; 15]

Незважаючи на загальне зростання до 2021 р., виробництво EOF-сталі у СНД та Україні (хоча СТП за 10 років склав 0,7 %) зазнало значних коливань через вплив геополітичних чинників та прямі руйнування виробничих потужностей в Україні.

Рейтинг ТОП-15 країн-виробників EOF-сталі за 2014, 2021 та 2024 рр. демонструють глибоку трансформацію світового ринку та переміщення виробничого центрів виробництва з розвинених країн до країн Азії, Близького Сходу та Африки (рис. 1.17).

Китай перетворився на беззаперечного світового лідера, збільшивши свою частку у світовому виробництві EOF-сталі з 12,4 % у 2014 р. до 18,4 % у 2024 р. Індія продемонструвала найбільший відносний приріст, піднявшись із 3-го на 2-ге місце та збільшивши свою частку з 11,4 % до 15,8 %. Ці дві країни акумулюють понад 1/3 світового виробництва EOF-сталі у 2024 р. Натомість США опустилися з 1-го місця (12,5 %) у 2014 р. на 3-тє (10,3 %) у 2024 р.

Стрімке зростання виробництва EOF-сталі відбулося в країнах Близького Сходу та Африки, чий прогрес відображає доступ до дешевої енергії (газу та ВДЕ) і швидко зростаючий внутрішній попит на сталь: Іран піднявся з 9-го місця у 2014 р. на 4-те місце у 2024 р., збільшивши свою частку до 5,2 % у світовому виробництві; Єгипет увійшов до ТОП-15 у 2021 р. та посів 12-те місце у 2024 р.; Саудівська Аравія покращила свою позицію з 15-го на 13-те місце.

Значний спад виробництва EOF-сталі мав місце в країнах ЄС та Східної Азії через високі ціни на енергоносії (електроенергію та газ) та жорсткі умови внутрішньої конкуренції при уповільненні внутрішнього попиту на сталь. Європейські виробники втратили свої частки: частка Німеччини скоротилася з 3,0 % до 1,9 %; Іспанія опустилася з 12-го на 14-те місце. Також Японія та Південна Корея суттєво втратили свої частки: Японія – з 5,8 % до 4,0 %, Південна Корея – з 5,5 % до 3,2 % (у т. ч. через посилення конкуренції з боку Китаю).

Таким чином, регіони з великими запасами природного газу та/або потенціалом ВДЕ (зокрема, Близький Схід, Африка та Азія) стають глобальними центрами виробництва DRI та EOF-сталі. DRI стає висо-

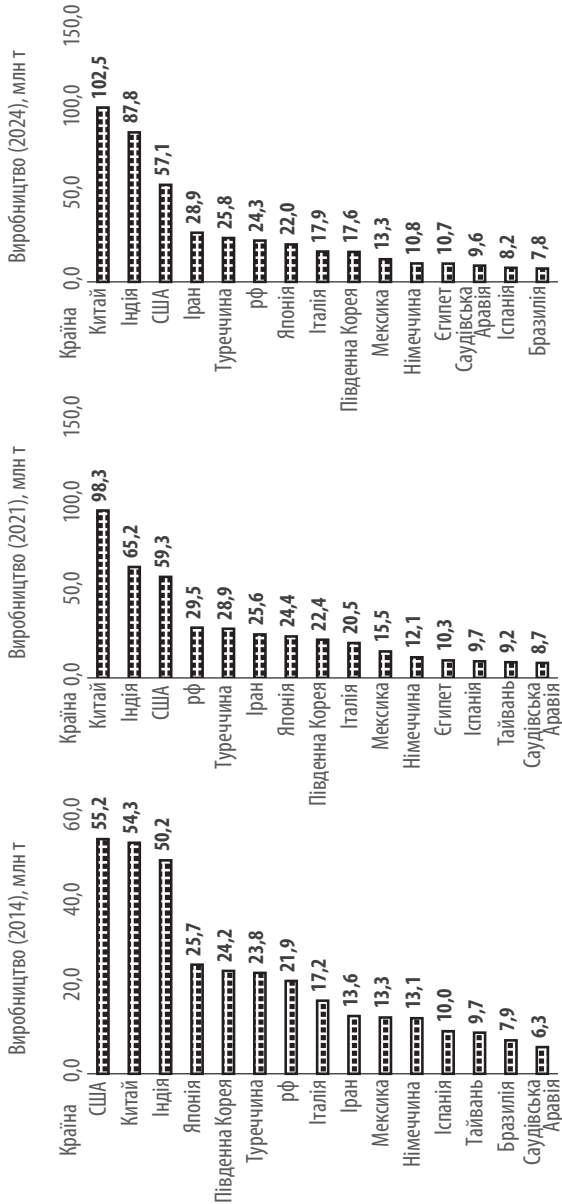


Рис. 1.17. ТОП-15 країн-виробників сталі в електросталеплавильних печах у 2014 р., 2021 р. та 2024 р.

Джерело: складено за [14; 15]

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

коякісною низьковуглецевою заміною металобрухту або чавуну, а його виробництво вимагає багато дешевої енергії. З іншого боку, зрілі ринки (ЄС-27 та Південна Америка) скорочують обидва виробництва через високі витрати на енергоносії та жорсткий кліматичний тиск, оскільки вони імпортують DRI для подальшої переробки. Світ загалом демонструє, що зростання DRI (СТП складає 5,7 %/рік) понад удвічі випереджає зростання виробництва EOF-сталі (2,4 %/рік), що підкреслює, що DRI позиціонується як ключова преміальна сировина «зеленого» металургійного ланцюга.

Порівняння тенденцій розвитку для двох напрямів розвитку металургії заліза наведено у *табл. 1.11*.

Таблиця 1.11

Порівняння регіональних тенденцій розвитку металургії заліза за середньорічними темпами розвитку у 2014–2024 рр.

Регіон	BF, %	BOF, %	DRI, %	EOF, %
ЄС-27	-2,6	-2,5	-17,3	-1,1
Інша Європа	-2,4	-3,3	---	0,3
СНД + Україна	-2,6	-2,9	4,1	0,7
Північна Америка	-4,2	-4,3	0,9	0,2
Південна Америка	-0,6	-0,5	-8,6	-1,1
Африка	-5,4	-2,4	10,4	7,8
Азія	2,6	1,6	7,8	3,5
Океанія	1,7	-0,9	---	1,3
Близький Схід	-1,5	-0,8	5,6	6,4
Світ	0,9	0,8	5,7	2,4

Примітка: BF – доменне виробництво чавуну; BOF – киснево-конверторне виробництво сталі; DRI – виробництво заліза прямого відновлення; EOF – електросталеплавильне виробництво сталі

Джерело: авторські розрахунки

Азія є світовим лідером за обсягами виробництва сталі та демонструє, як зростає виробництво за всіма чотирма продуктами. Це під-

тверджується позитивним СТП як традиційного виробництва BF/BOF (СТП BF складає +2,6 %/рік, а BOF – +1,6 %/рік), так і виробництва DRI/EAF (СТП DRI становить +7,8 % / рік, а EAF – +3,5 %/рік). Такий двоїстий шлях розвитку зумовлений масштабом індустріалізації країн регіону (Китай, Індія, Індонезія тощо), а також стратегічною модернізацією, спрямованою на нарощування потужностей DRI для забезпечення більш екологічної та більш якісної сировини (Китай) та підтримкою зростання EAF на місцевій сировині (Індія, Індонезія, Малайзія).

Країни Африки та Близького Сходу використовують свої енергетичні переваги (ВДЕ, газ) для локалізації виробництва, нарощуючи виробництво (СТП складає 10,4 %/рік та 5,6 %/рік відповідно) та розширюючи власне виробництво EOF-сталі (7,8 % / рік та 6,4 %/рік відповідно).

Африка демонструє найбільш радикальний і стрімкий перехід до «зеленої» металургії, оминаючи традиційні, високовуглецеві технології. Це підтверджується різким скороченням традиційного виробництва BF/BOF (СТП BF складає -5,4 %/рік, а BOF – -2,4 %/рік) на тлі гіперзростання виробництва DRI/EAF (СТП DRI становить +10,4 %/рік, а EAF – +7,8 %/рік). Це робить її абсолютним світовим лідером за темпами приросту, яке обумовлене низкою чинників: високим внутрішнім попитом на сталь через стрімку урбанізацію та інфраструктурний розвиток; стратегічною перевагою завдяки дешевим джерелам енергії, що робить регіон високо привабливим для виробництва H_2 -DRI; наявністю великих обсягів дешевого металобрухту.

Близький Схід демонструє тенденцію формування статусу світового центру для металургії, заснований на використанні природного газу та виробництва сталі. Традиційне виробництво BF/BOF поступово скорочується (СТП BF складає -1,5 %/рік, а BOF – -0,8 %/рік). Натомість спостерігається швидке розгортання виробництва DRI/EAF (СТП DRI становить +5,6 %/рік, а EAF – +6,4 %/рік). Означене обумовлене: наявністю значних запасів дешевого природного газу, високою інтеграцією виробничого ланцюга, де CDRI/HDRI одразу переробляється на сталь в EAF: високим внутрішнім і регіональним попитом на сталь, що підтримується будівельними мегапроектами.

Північна Америка демонструє тенденції зрілого, насиченого ринку, що характеризується завершенням переходу від традиційного BF/BOF виробництва (СТП BF складає -4,2 %/рік, а BOF – -4,3 %/рік) до «зеленого» DRI/EAF виробництва (СТП EAF становить +0,2 %/рік, а DRI – +0,9 %/рік). Водночас можна стверджувати, що DRI/EAF виробництво перебуває у стані стагнації, де мінімальне зростання DRI використовується переважно для підтримки якості EAF-сталі. Це обумовлено низкою чинників: дефіцитом традиційної сировини (високоякісного металобрухту); достатнім розвитком внутрішнього виробництва DRI, нерозвиненістю світового ринку HBI, який стримує подальше нарощування регіональних потужностей DRI/EAF.

Найбільш скрутне становище склалося для країн ЄС. У рамках Європейської системи торгівлі викидами (ETS) та запровадження СВАМ (Carbon Border Adjustment Mechanism – механізм вуглецевого коригування імпорту) вони змушені скорочувати як традиційне виробництво BF/BOF (СТП BF складає -2,6 %/рік, а BOF – -2,5 %/рік), так і виробництво DRI/EAF (СТП EAF становив -1,1 %/рік, а DRI – -1,7 %/рік). Це скорочення спричинене енергетичною кризою, викликаною стрімким зростанням цін на електроенергію та газ, які є основою європейської енергетики.

1.2. Наявний стан металургійної промисловості України

Металургія в Україні представлена традиційним виробничим циклом: видобутком і збагаченням залізної руди, виробництвом чавуну та киснево-конверторним виробництвом сталі. Тому в цьому підрозділі проведено послідовний аналіз складових цього циклу.

Україна посідає одне з провідних місць у залізорудній промисловості світу та, за останніми геологічними оцінками, підтверджені запаси залізних руд в Україні становлять 28 млрд т (приблизно 18 % світових запасів, що у перерахунку на вміст чистого заліза становить 10–11 % від світових запасів). Наразі залізна руда виявлена на 88 родовищах, з яких 60 перебувають на державному обліку, з яких активна експлуатація на-

разі здійснюється на 26. Ще 28 родовищ – це перспективні родовища, які потребують дорозвідки та оцінки, встановлення промислового та комерційного значення, тому їх віднесено до позабалансових запасів. Запаси залізних руд сконцентровані переважно у трьох основних басейнах: Криворізькому, Кременчуцькому та Білозірському. Географічна концентрація цих ресурсів є надзвичайно високою: 75 % усіх запасів залізних руд України знаходиться у Дніпропетровській області, 18 % – у Полтавській, 4 % – у Кіровоградській, і 3 % – у Запорізькій [37].

Динаміку видобутку й експорту залізної руди у 2014–2024 рр. України наведено на *рис. 1.18*.

Після анексії АРК і втрати контролю над частиною територій Донецької та Луганської областей видобуток залізної руди знаходився в діапазоні 74–84 млн т/рік. Зниження у 2016 р. на 8,5 % порівняно із 2014 р. відображало вплив конфлікту на Донбасі, а також зниження цін на залізну руду у світі. У 2017–2021 рр. відбулося поступове відновлення галузі із зростанням до 83,9 млн т 2021 р., що було спричинено високим глобальним попитом на залізну руду та її масовим експортом через морські порти України. Внаслідок повномасштабного вторгнення РФ в Україну, блокади її морських портів, видобуток залізної руди впав у 2022 р. до 38,2 млн т. Виробники переорієнтовувалися на залізничний експорт до Європи, який був значно дорожчим, що призвело до скорочення виробництва через неможливість відвантаження. У 2023 р. відбулося подальше скорочення до 27 млн т через проблеми енергозабезпечення, дорогу логістику та брак робочої сили. Зростання видобутку на 65,3 % у 2024 р. порівняно з попереднім роком є найбільш значним позитивним стрибком з початку повномасштабного вторгнення. Головною причиною відновлення видобутку та експорту залізної руди стало відкриття морського експортного коридору для вантажів гірничо-металургійного комплексу з січня 2024 р. [38].

Аналіз даних національного балансу залізної руди у 2014–2024 рр. показує, що українська залізнорудна галузь є експортоорієнтованою, виробничо надлишковою та критично залежною від логістичних каналів.

У довоєнний період (2014–2021 рр.) 49–59 % видобутої залізної руди експортувалося щороку. У 2022 р. видобуток залізної руди впав на

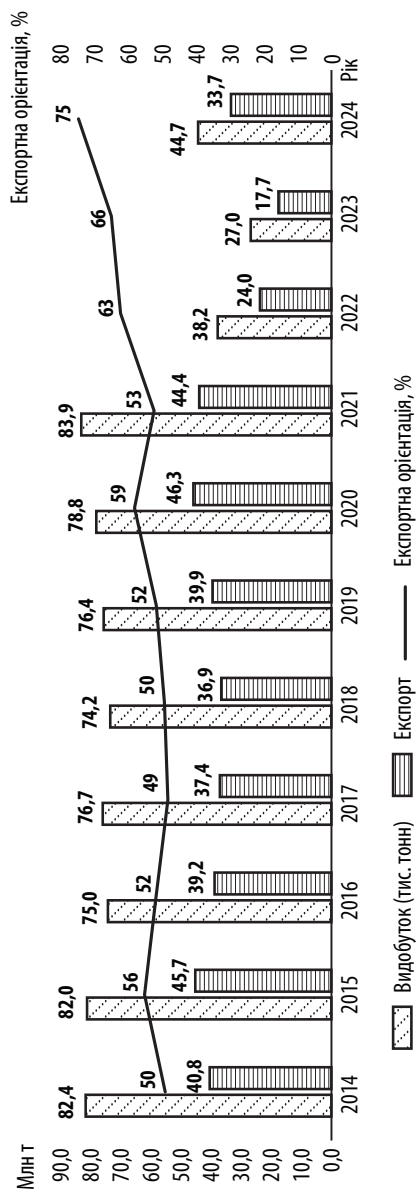


Рис. 1.18. Динаміка видобутку та експорту залізної руди України у 2014–2024 рр.

Джерело: складено за [14; 15]

54,5 %, а у 2023 р. скоротився ще на 29,2 %. Однак частка експорту зростає до 63 % у 2022 р. та 66 % у 2023 році. Втрата металургійних заводів на сході України (ПрАТ «Азовсталь», ПрАТ «ММК ім. Ілліча») зумовила те, що експорт став життєво необхідним для мінімальної роботи гірничо-збагачувального комплексу. Після відновлення морського експортного коридору у 2024 р. експортна орієнтація досягла рекордних 75 %, що є свідченням значного звуження внутрішнього ринку металургії заліза після втрати підприємств на сході України.

Крім того, спостерігається фінансовий дисбаланс: хоча фізичні обсяги експорту (33,7 млн т) відновлюються, дохід від експорту (2,8 млрд дол. США за 2024 р.) значно відстає від довоєнних показників (7 млрд дол. США за 44,5 млн т у 2014 р.). Це вказує на значне зниження світових цін, що підриває загальну рентабельність галузі.

Преміалізація високоякісної руди є ключовим напрямом підвищення ефективності виробництва та експорту залізорудної сировини України. За даними фахівців GMK Center [39], при підвищенні вмісту заліза в продукті вище 62 % за кожен додатковий відсоток заліза в готовому продукті ціна зростає на 3–9 дол. США/т. Ця премія дозволяє українським виробникам (наприклад, Ferrexpo), які активно працюють над підвищенням якісних характеристик своїх окатків (до 65–67 % Fe), зберегти свої позиції на ринку та посилити їх у сегменті преміальної сировини. Споживачі, особливо в Європі та Північній Африці, готові платити підвищену премію за високоякісну сировину (BF-окатки з високим вмістом заліза) [40].

Потужності з видобутку і збагачення залізної руди потерпали значно менше від російської агресії. Єдине підприємство з видобутку залізної руди, над яким Україна тимчасово втратила контроль, це ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат» (м. Дніпрорудне, Запорізька обл.). Наразі потужність діючих підприємств зі збагачення руди та виробництва залізорудних концентратів складає 88,3 млн т/рік (без врахування ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат»), що достатньо для отримання щонайменше 57,4 млн т заліза/рік. Дані про проєкту потужність діючих гірничо-збагачувальних підприємств наведено в *табл. 1.12.*

Таблиця 1.12

**Потужність гірничо-збагачувальних підприємств-виробників
залізорудної сировини**

Гірничодобувне підприємство	Потужність, тис. т	Товарна продукція, вміст заліза (загальний), %
1	2	3
Група METINVEST		
ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» (3 кар'єри + шахта)	З видобутку руди – 15400; Зі збагачення руди – 6000 З огрудування – 2000	Концентрат, 68,24; Не офлюсовані окатки, > 65,5
ПрАТ «Інгuleцький гірничо-збагачувальний комбінат» (1 кар'єр, 2 збагачувальні фабрики)	З видобутку руди – 70000; Зі збагачення руди – 14500	Концентрат (ММС, МФО, МФО+) – 65,0-68,5 %
ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» (2 кар'єри, 2 збагачувальні фабрики)	Зі збагачення руди – 14200; З огрудування – 11100	Концентрат, 65,4; Не офлюсовані окатки, >65,0
АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» *) (рудоуправління, 2 збагачувальні фабрики)	З видобутку – 35500; Зі збагачення руди – 17200	Концентрат, >65,0
Група FERREXPO		
ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат»	Руда – 28000 тис. т; Збагачення – 13000 тис. т; 12000 тис. т окатків	Окатки >65
ТОВ Єривівський ГЗК	З видобування руди – 28500; 3 виробництва концентрату – 10000; З виробництва окатків – 6000 (планується)	Окатки >65
Група DCH		
ПрАТ «Суха Балка» (2 шахти)	З видобування руди – 3715; З виробництва товарної руди – 3100	Залізна руда, 55-60

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

Продовження табл. 1.12

1	2	3
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»		
Рудоуправління, 4 дробильні фабрики, 2 рудозбагачувальні фабрики	3 видобування руди – 26000; 3 виробництва концентрату – 10300	Концентрат – 65,3-68,0
Інші		
ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат» (4 шахти)	6000	Руда залізна агломерована, >56,0; Руда доменна, 47 %
ПРАТ «Запорізький залізорудний комбінат»	Знаходиться на тимчасово окупованій території Запорізької області	

Примітка *) – Знаходиться в операційному управлінні Групи ТОВ «МЕТІН-ВЕСТХОЛДІНГ», якій належить 45,9 % акцій

Джерело: складено [41–45]

У стадії будівництва знаходиться Біланівський ГЗК з проектною потужністю з видобування руди 45 млн т/рік (група Ferrexpo). У передвоєнні роки канадська компанія Black Iron почала реалізацію проекту з розробки Шиманівського родовища (м. Кривий Ріг), яким передбачалося будівництво потужностей з виробництва до 8 млн т/рік залізорудної сировини з вмістом заліза 68 % [39].

Потенційним потужним гравцем на ринку залізорудної сировини може стати продукція Криворізького комбінату окислених руд (м. Долинське Кіровоградської обл.), проектна потужність якого становить 24,2 млн т залізної руди, 10,8 млн т концентрату, 9,9 млн т окатків щороку [46]. Сировиною для споруджених потужностей комбінату визначалося використання відвалів Криворізького басейну, які накопичилися за тривалий час, вичерпання з них залишків руди з метою покращання екологічної ситуації у регіоні [47]. Будівництво комбінату почалося ще в 1986 р. за кошти СРСР, Болгарії, НДР, Румунії та Чехословаччини. Загальну вартість спорудження комбінату визначено в обсязі 2,4 млрд дол. США, з якої українська частка становить 1,36 млрд дол., або 56,4 % [47]. Після розпаду СРСР будівництво припинилося, Німеччина, Чехія, Бол-

гарія розірвали договір, тоді як представники Румунії та Словаччини охороняють свої недобудовані об'єкти [47]. Наприкінці 2021 р. компанія ТОВ «Рудомайн» виграла аукціон і придбала частину майна української частки будівництва гірничо-збагачувального комбінату окислених руд [48]. Щодо іншої частки майна Регіональним відділенням Фонду державного майна України наприкінці вересня 2023 р. прийнято рішення про приватизацію [49].

На момент купівлі ТОВ «Рудомайн» планував запуск підприємства на повну потужність протягом двох найближчих років з переробкою 12,5 млн т залізної руди і випуском близько 3 млн т готової продукції на рік.

Наявні виробничі потужності перевищують потреби країни в залізорудній сировині, що обумовлює значний експортний потенціал агломерованого та неагломерованого концентрату, динаміку використання якого наведено на *рис. 1.19*.

Як свідчать наведені на *рис. 1.19* дані, у структурі експорту переважає сировина з меншою доданою вартістю – така, що не пройшла стадію агломерації (спікання). Змін такої структури експорту є одним із ключових завдань гірничо-збагачувальних підприємств. Такий висновок впливає із зіставлення динаміки експортних цін на ці види сировини (*рис. 1.20*). Протягом 2013–2024 рр. ціна на агломерований концентрат перевищувала ціну на неагломерований на 33–73 %.

Отже, одним із напрямів подальшого вдосконалення асортименту продукції, що виробляється, є випуск збагаченого концентрату у вигляді окатків – сферичного грудкованого матеріалу, сформованого скочуванням у грудку дрібнозернистих руд (зазвичай із частками меншими за 0,1 мм) з різними добавками; процес інколи супроводжується гарячим або холодним з'єднанням способом стверднення [53].

Перевагами окатків є їх велика міцність, що полегшує подальше транспортування без утворення дрібних фракцій. Крім того, однорідний гранулометричний склад полегшує їх подальше використання в доменному виробництві чи при металізації (прямого відновленні заліза).

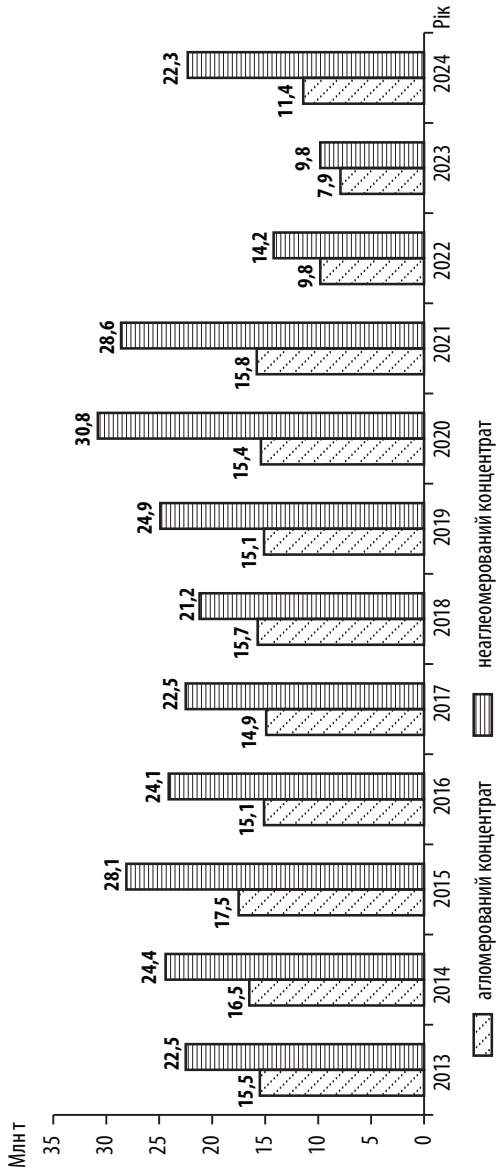


Рис. 1.19. Динаміка обсягів експорту агломерованих і неагломерованих концентратів у 2013–2024 рр.

Джерело: складено за [50; 51]

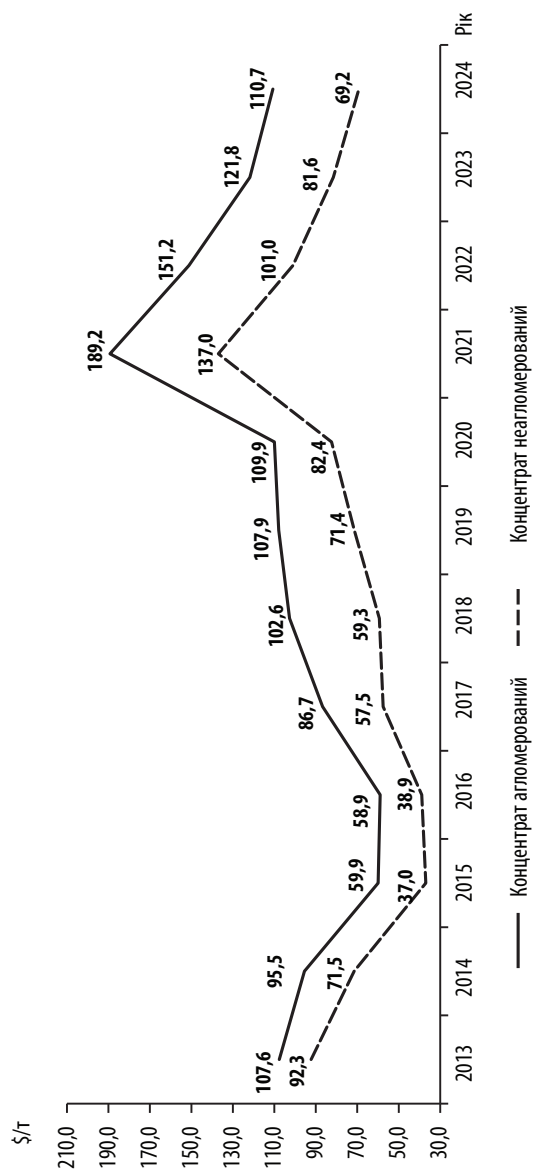


Рис. 1.20. Динаміка експортних цін на агломерований і неагломерований концентрат у 2013–2024 рр.

Джерело: складено за [52]

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

Перспективним напрямом використання окатків з вмістом заліза більше 66 % є виробництво заліза прямого відновлення (DRI або HBI) – так звана безкоксова металургія. Розвиток цього напрямку в сучасних умовах визнається пріоритетним в зв'язку з тим, що відмова від коксу і заміна його іншим відновником (у перспективі воднем) дозволяє суттєво скоротити викиди парникового газу – діоксиду вуглецю, що відповідає кліматичним цілям людства. Цим пояснюється орієнтація ведучих українських виробників на збільшення обсягів виробництва цього виду залізорудної продукції (табл. 1.13).

Таблиця 1.13

Наявні та потенційні потужності з виробництва сировини для DRI в Україні

Компанія	Продукт	Потужність, млн т/рік	Статус
ТОВ МЕТІНВЕСТХОЛДІНГ (Центральний ГЗК)	Окатки	1,0 ¹	Працює
Ferrexpo	Окатки	3,0-5,0 ¹	Працює
ТОВ МЕТІНВЕСТХОЛДІНГ (Північний ГЗК)	Окатки	6,0	Проект
ТОВ МЕТІНВЕСТХОЛДІНГ	Концентрат Fe 68-70 %	19,0	Проект
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	Окатки	6,0	Проект
Black Iron	Концентрат Fe 68 %	4,0-8,0	Проект
АТ Південний ГЗК	Окатки	3,01	Анонсований

Примітка: ¹ Оцінки GMK Center

Джерело: складено за [54]

Наявність значних запасів магнетитової руди (зосереджена переважно в межах Українського кристалічного щита), яка є сировиною для DRI, надає Україні стратегічні переваги для інтеграції у європейські ланцюги доданої вартості «зеленої» металургії. За оцінками аналітиків, потенційні комерційні постачання сировини для DRI з України у середньостроковій перспективі становлять 20–25 млн т [55]. Отже, при реалізації задекларованих планів українські виробники окатків мають

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

потенціал стати потужним учасником європейського ринку «зеленої» металургії заліза.

На сьогодні чавун є основою металургії заліза України та стратегічним проміжним товаром для національного виробництва сталі киснево-конверторним способом. Станом на кінець 2013 р. (до початку військової агресії РФ проти України) у сфері виробництва чавуну діяли 9 підприємств (табл. 1.14).

Таблиця 1.14

Виробничі потужності з виробництва чавуну на кінець 2013 р.

Підприємство	Річна потужність, тис. т
ТОВ «МЕТІНВЕСТХОЛДІНГ»	
1. ПрАТ «МК «Азовсталь»	5700
2. ПрАТ «ММК ім. Ілліча»	4300
3. ПрАТ «Єнакієвський металургійний завод»	2065
4. ПрАТ «Каметсталь»	4350
5. ПАТ «Запоріжсталь»	4000
Група DCH	
6. ПрАТ «Дніпровський металургійний завод»	1795
ArcelorMittal	
7. ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	11450
Інші	
8. ПАТ «Алчевський металургійний комбінат»	5320
9. ПрАТ «Донецьксталь-металургійний завод»	1450

Примітка: назви підприємств надані станом на 2025 р.

Джерело: складено за даними [41; 42; 56]

Після початку військової агресії росії Україна в 2017 р. втратила контроль над низкою металургійних підприємств: ПрАТ «Єнакієвський металургійний завод», ПАТ «Алчевський металургійний комбінат», ПрАТ «Донецьксталь-металургійний завод». Повномасштабна агресія росії проти України із 2022 р. призвела до втрати таких великих підприємств, як ПрАТ «Азовсталь» та ПрАТ «Металургійний комбінат ім. Ілліча». Отже, з 9 українських металургійних підприємств, які

у своєму складі мали доменне виробництво чавуну, станом на початок 2025 р. на підконтрольній Україні території залишилося тільки 4.

Потужність за чавуном станом на 2013 р. складала 40 230 тис. т/рік. На цей час підприємства, що діють на підконтрольній Україні території, мають сумарну потужність з виробництва чавуну 21 595 тис. т/рік. Динаміка виробництва та експорту чавуну українськими металургійними підприємствами у 2013–2024 рр. демонструє значне звуження обсягів (рис. 1.21).

У 2013–2021 рр. обсяги виробництва чавуну в Україні поступово знижувалися, стабілізувавшись на рівні близько 20 млн т/рік у 2018–2021 рр. У 2013–2017 рр. виробництво впало з 29,1 млн т до 19,8 млн т, що було спричинене початком військового конфлікту на Сході України, який призвів до втрати частини виробничих потужностей та порушення логістичних ланцюгів. У 2018–2021 рр. галузь працювала на потужностях, що залишилися під контролем України, тримаючи рівень виробництва в діапазоні 20–21 млн т. У 2022 р. виробництво чавуну впало до 5 810 тис. т. У 2023–2024 рр. виробництво чавуну в Україні продемонструвало ознаки адаптації та відновлення (на +18 % у 2024 р. проти рівня 2023 р.), незважаючи на продовження військових дій, що вказує на стабілізацію роботи віцілих підприємств, переважно в центральних регіонах України. Так, за підсумками 2024 р., ПАТ «Запоріжсталь» збільшило виробництво чавуну на 14,2 % порівняно з 2023 р., досягнувши обсягу 3,1063 млн т [57], а ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» – 2,16 млн т [58]. Однак обсяг у 7 090 тис. т у 2024 р. становить лише близько 34 % від рівня 2021 р., що відображає постійні проблеми, такі як енергетична вразливість, дефіцит кадрів і зростання логістичних витрат.

Всі доменні печі були побудовані ще в минулому сторіччі і на цей час потребують реконструкції та/або модернізації. Наймолодша за віком – доменна піч № 9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», введена в експлуатацію 30 грудня 1974 р. і в 2021 р. виведена з експлуатації на реконструкцію [56]. Для відновлення виробництва у 2024 р. підприємство вивело з простою додаткові потужності – доменні печі № 3, 4 та 6 [58]. Однак через зростання цін на енергоносії і збитковість

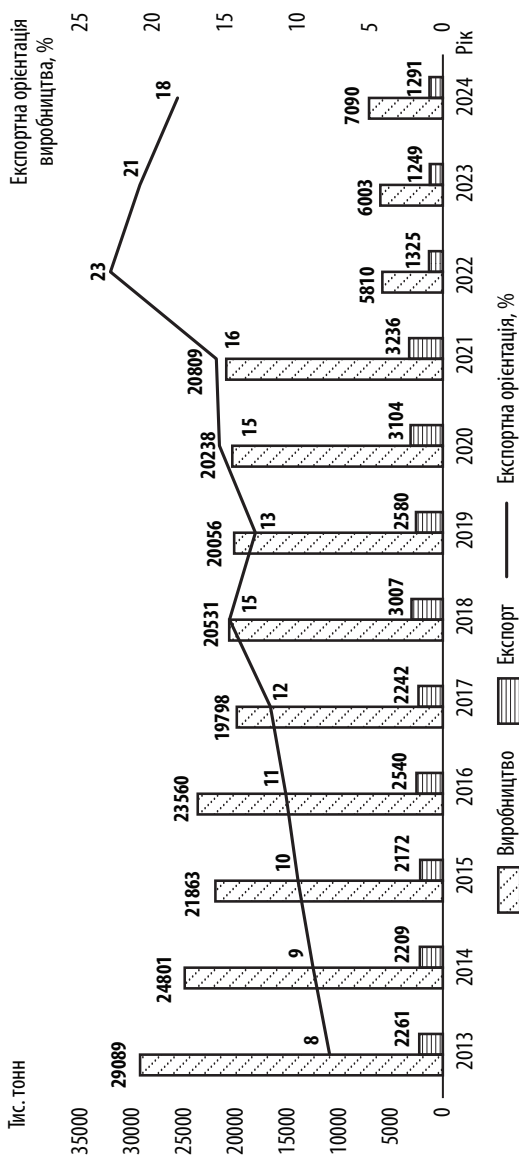


Рис. 1.21. Динаміка обсягів виробництва й експорту чавуну українськими металургійними підприємствами у 2013–2024 рр.

Джерело: складено за даними [14; 15; 50–52]

підприємства вже у 2025 р. запланована робота лише однієї доменної печі [59].

У 2013–2021 рр. переважна більшість виробленого чавуну (84–92 %, або близько 17–27 млн т) залишалася в Україні для внутрішнього споживання, для подальшого виробництва сталі та прокату на металургійних комбінатах. У 2022 р., в умовах критичної втрати внутрішнього попиту через руйнування великих металургійних заводів та пошкодження логістичних ланцюгів переробки, виробництво і споживання чавуну скоротилося на 72 %, а експортна орієнтація, незважаючи на дорогу логістику, зросла до 23 %. У 2024 р. експортна орієнтація знизилася до 18 %, що свідчить про пріоритетність його внутрішньої переробки та відновлення морської логістики сталевою продукцією.

Аналіз структури експорту чавуну з України у 2014, 2021, 2023, 2024 рр. демонструє кардинальну трансформацію географії зовнішньої торгівлі, спричинену військовими діями та зміною логістичних пріоритетів (рис. 1.22).

По-перше, США перетворилися на критично важливий ринок збуту (з 25 % у 2014 р. до 68 % у 2024 р.). Чавун є єдиним металургійним товаром з України, на який у США не накладено антидемпінгових мит [60]. У 2021 р. США вже посідали перше місце у структурі українського експорту чавуну (50 %), а після повномасштабного вторгнення, в умовах блокади морських портів України, частка поставок до США зросла до 75 % у 2023 р. Через заблоковану морську логістику невеликі обсяги експорту чавуну були пріоритезовані для маржинального американського ринку збуту. Чавун експортувався транзитом через порти Румунії (Констанца), Болгарії (Бургас), Польщі (Гдиня, Гданськ, Щецин, Свіноуйсьце), а також Хорватії та Німеччини. При цьому середня відстань до порту відправлення для українських експортерів збільшилася у 5 разів, а вартість доставки до порту призначення зросла в середньому у 3–4 рази [61; 62]. Після відновлення українського морського коридору у 2024 р. частка експорту до США знизилася до 68 % через перенаправлення частини обсягів на європейські ринки.

Експорт чавуну до ЄС, який був головним ринком збуту для України у 2014 р. (47 %), зазнав значного скорочення, досягши частки у 15 %

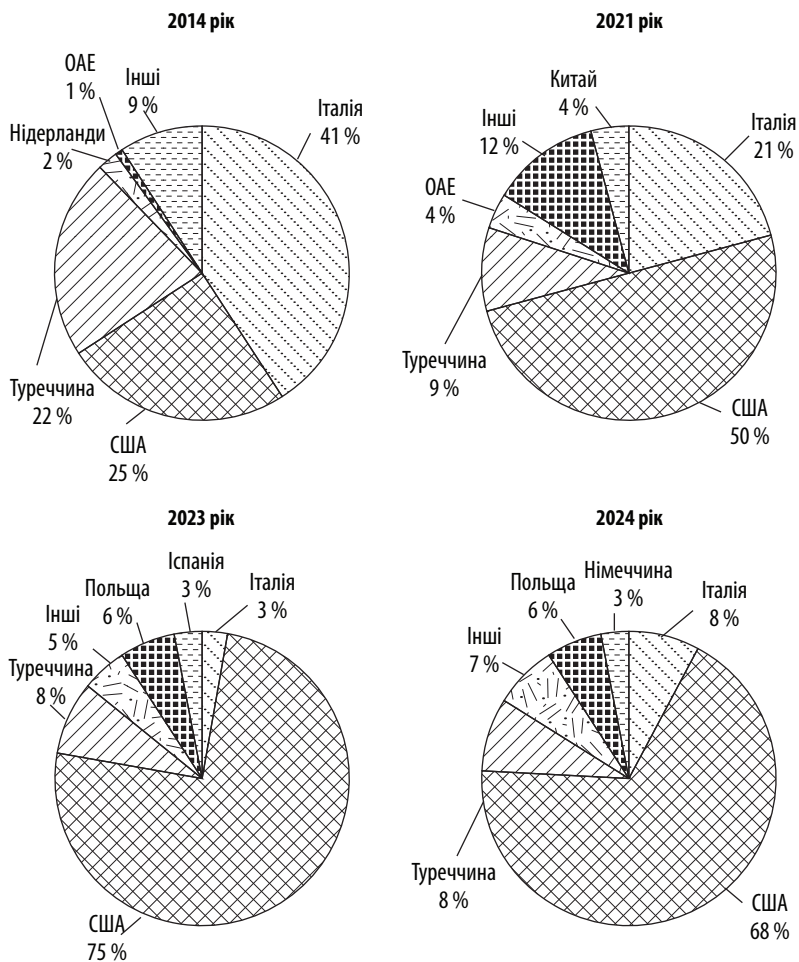


Рис. 1.22. Структура експорту чавуну з України у 2014, 2021, 2023 та 2024 рр.

Джерело: складено за [6]

у 2023 р. Польща стала тимчасовим логістичним хабом (6 % експорту у 2022–2024 рр.). У 2024 р. частка ЄС зросла до 19 % за рахунок часткового відновлення експорту до Італії (7 %) та появи Німеччини (3 %). Водночас це відбувалося на тлі стагнації європейського ринку сталі.

Серед інших країн Туреччина демонструє відносну стабільну частку в експорті українського чавуну (8–9 % у 2021–2024 рр.), що свідчить про відносну доступність цього ринку в умовах обмеженої логістики.

Основною проблемою, що обмежує потенціал нарощування українського виробництва чавуну, є відсутність видобутку вітчизняного спіктивного коксівного вугілля і обмежені можливості його імпорту. Неспроможність коксохімічних підприємств завантажити виробничі потужності призводить до збільшення імпорту доменного коксу.

Основна база вугільних ресурсів України сконцентрована у Донецькому вугільному басейні (Донбасі). Згідно з геологічними оцінками, запаси коксівного вугілля становлять 16,1 млрд т, що відповідає 31,0 % від загальних балансових запасів вугілля Донбасу [63]. Внаслідок військових дій у 2013–2024 рр. видобуток коксівного вугілля зазнав скорочення на 74 % [64], тоді як імпорт його скоротився на 98 % (рис. 1.23).

7 вересня 2022 р. уряд ухвалив постанову про внесення коксівного вугілля до переліку товарів, експорт яких заборонено. Згодом експорт було відновлено, але під контролем квотування, щоб уникнути дефіциту критичної сировини для внутрішніх потреб металургії України. На 2024 р. уряд встановлював квоту обсягом 0,9 млн т на експорт коксівного вугілля, на 2025 р. квоту було підвищено до 1,3 млн тонн. [65]. Баланс видимого споживання коксівного вугілля в Україні у 2020–2024 рр. наведено в табл. 1.15.

Отже, катастрофічне падіння попиту з боку ключових споживачів коксівного вугілля – коксохімічних підприємств – призвів до того, що навіть невеликий залишок внутрішнього видобутку став домінуючим.

Особливого значення після початку повномасштабної агресії, набуло Шахтоуправління «Покровське» (ПУГ), що входить до Групи «МЕТІНВЕСТХОЛДІНГ». Це шахтоуправління було єдиним джерелом видобутку якісного коксівного вугілля марки К на підконтрольній

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

Млн т

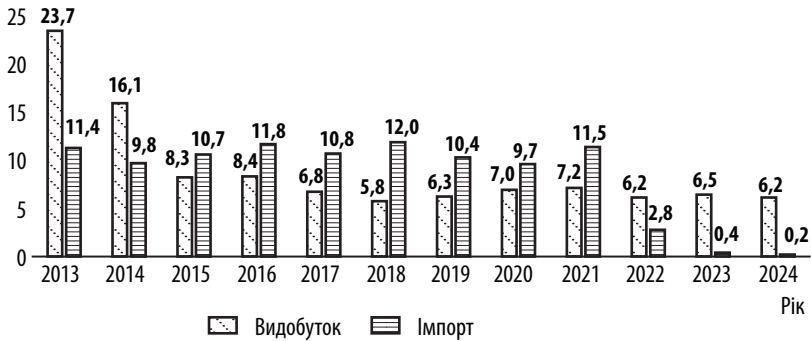


Рис. 1.23. Видобуток та імпорт коксівного вугілля в Україні у 2013–2024 рр.

Джерело: складено за [64]

Таблиця 1.15

**Баланс видимого споживання коксівного вугілля в Україні
у 2020–2024 р., млн т**

Рік	Видобуток	Імпорт	Експорт	Видиме споживання	Імпортна залежність, %
2020	7	9,7	0,0001	16,7	58,1
2021	7,2	11,5	0,005	18,7	61,5
2022	6,2	2,8	0,50	8,5	32,9
2023	6,5	0,4	0,67	6,2	6,4
2024	6,2	0,2	0,40	6,0	3,3

Джерело: складено за [50–52; 64]

території України. Зупинка Шахтоуправління «Покровське» відбулася в січні 2025 р. [66]. Отже, єдиним джерелом виробництва коксу залишився імпорт вугілля та частково – вугілля марки ДГЮ, яке видобувається на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». За 8 місяців 2025 р. Україна імпортувала 4,6 млн т коксівного вугілля на суму 1,1 млрд дол. США, структуру імпорту якого наведено на рис. 1.24. Отже, коксохімічні підприємства були змушені переорієнтуватися на морські логістичні ланцюги з США та Австралії, що дозволило їм забезпечити мінімально

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

життєздатність. Проте це досягається ціною високої вразливості та значного фінансового навантаження. Повна залежність від імпорту робить їх чутливою до геополітичних ризиків, пов'язаних з безпекою морських коридорів, а також до коливань світових цін на преміальне коксівне вугілля, обумовлюючи високі логістичні витрати на фрахт з віддалених морських ринків.

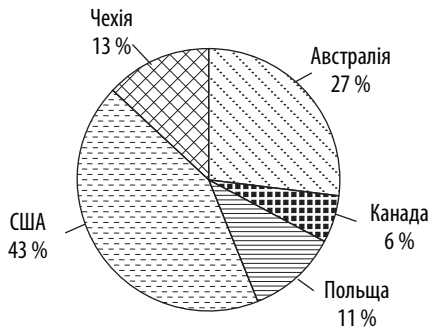


Рис. 1.24. Структура імпорту коксівного вугілля в Україну за 8 міс. 2025 р.

Джерело: складено за [64]

До початку військової агресії росії у 2014 р. в Україні налічувалося 13 самостійних підприємств і коксохімічних виробництв у складі металургійних підприємств (табл. 1.16). У таблиці назви окремих підприємств наведено станом на початок 2025 р., тобто враховано такі обставини:

- у 2017 р. український бізнес втратив контроль над частиною активів, розташованих в окремих районах Луганської та Донецької області;
- окремі підприємства за останнє десятиріччя втратили статус юридичної особи і реорганізовані в коксохімічні виробництва металургійних підприємств (Дніпропетровський коксохімічний завод – перетворено на коксохімічне виробництво ПрАТ «Дніпровський металургійний завод, Дніпродзержинський коксохімічний завод – на коксохімічне виробництво ПрАТ «Каметсталь»).

Таблиця 1.16

**Виробнича потужність коксохімічних підприємств України
станом на 01.01.2017 р., тис. т**

Підприємство	Річна виробнича потужність за валовим коксом	Примітки
1	2	3
Самостійні підприємства		
1. ПрАТ «Авдіївський КХЗ»	3603,6	Зупинено у 2022 р. внаслідок бойових дій; контроль над активами втрачено
2. ПрАТ «Єнакієвський коксохімпром»	574,3	Контроль над активами втрачено в березні 2017 р.
3. ПрАТ «Макіївкокс»	1289,3	Контроль над активами втрачено в березні 2017 р.
4. ПрАТ «Ясинівський КХЗ»	936,3	Контроль над активами втрачено в березні 2017 р.
5. ПрАТ «Южкокс»	1263,9	Підприємство здійснює господарську діяльність у складі групи ТОВ «Метінвест»
6. ПрАТ «Запоріжжкокс»	911,5	
7. ТОВ Коксовий завод «Новомет» (колишній ПрАТ «Харківський коксовий завод»)	148,2	Діяльність припинено в 2020 р. у зв'язку з порушенням вимог екологічного законодавства
8. Філія «Горлівський коксовий завод» ООО «Істек»	445,9	Контроль над активами втрачено в 2017 р.
Коксохімічні виробництва у складі металургійних підприємств		
9. КХВ ПрАТ «Алчевський МК»	2721,7	Контроль над активами втрачено в 2017 р.
10. КХВ ПрАТ «МК Азовсталь»	1517,8	Зупинено у 2022 р. внаслідок бойових дій; контроль над активами втрачено
11. КХВ ПрАТ «Каметсталь» (колишній ПрАТ «Дніпродзержинський КХЗ»)	659,6	Підприємство здійснює господарську діяльність у складі групи ТОВ «Метінвест»
12. КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	2041,8	Підприємство здійснює господарську діяльність у складі групи ArcelorMittal

Продовження табл. 1.16

1	2	3
13. КХВ ПрАТ «Дніпровський металургійний завод (колишній ПрАТ «Дніпрококс»)	801,0	Коксохімічне виробництво зупинено і виведено з експлуатації за рішенням власника в травні 2025 р. [67]

Джерело: виробнича потужність – Звіт УНПА «Укркокс» за 2016 р. [68]; назва підприємства і можливість контролю – офіційні сайти керуючих компаній

Отже, станом на II півріччя 2025 р. в Україні здійснюють діяльність 2 коксохімічні підприємства і 2 коксохімічні виробництва у складі металургійних підприємств. За період з 2017 р. виведено з експлуатації 2 коксових батареї та введено в експлуатацію 2 нових на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» [45].

Перспективи відновлення виробництва на підприємствах, що знаходяться на тимчасово окупованій території, на цей час є не визначеними: виробничі комплекси ПрАТ «Азовсталь» і ПрАТ «Авдіївський КХЗ» зруйновані внаслідок активних бойових дій. Відновлення виробництва на цих виробничих потужностях є малоймовірним. Стан інших підприємств достеменно невідомий.

Динаміка виробництва й імпорту коксу в Україну у 2013–2024 рр. чітко демонструє вплив геополітичних і військових чинників на українську коксохімічну промисловість (рис. 1.25).

У 2014–2015 рр. внутрішнє виробництво коксу впало на 34 %, а його імпорт зріс понад у 2 рази, що було спричинене втратою контролю над частиною коксохімічних заводів і шахт із видобутку коксівного вугілля на непідконтрольних територіях Сходу України. У 2018–2021 рр. відбулося подальше повільне скорочення внутрішнього виробництва коксу, однак імпорт готового коксу залишався порівняно низьким (у середньому 0,7 млн т/рік). Вертикально-інтегровані металургійні концерни намагалися підтримувати роботу своїх коксохімічних виробництв, імпортуючи коксівне вугілля. У 2022–2024 рр. відбулися катастрофічний обвал виробництва та структурна зміна ринку, виробництво скоротилося на 59 %. Це прямий наслідок повномасштабного вторгнення, втрати найбільшого виробника коксу в Україні – Авдіївського КХЗ та

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

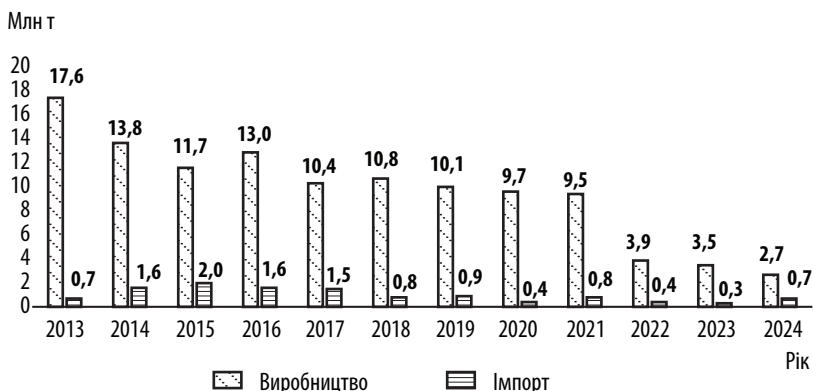


Рис. 1.25. Динаміка виробництва та імпорту коксу в Україні у 2013–2024 рр.

Джерело: складено за [64]

різкого зниження попиту з боку металургійних комбінатів через втрату ПрАТ «Азовсталь» та ПрАТ «Металургійний комбінат ім. Ілліча» та зниження завантаження інших підприємств металургійної галузі. У 2024 р. виробництво коксу впало до мінімального рівня 2,7 млн т, а загальне скорочення виробництва коксу за період 2013–2024 рр. оцінюється у 85 %.

На тлі втрати єдиного видобувника спіктивного коксівного вугілля в країні – Шахтоуправління «Покровське» (ПУГ) – очікується подальше зростання імпорту готового коксу в Україні. За 8 міс. 2025 р. було імпортовано 433 тис. т готового коксу на суму 145 млн дол. США, структуру імпорту якого наведено на рис. 1.26.

Після блокування морських шляхів і припинення поставок зі сходу Польща стала основним сухопутним імпортером готового коксу в Україну (92 %). Водночас Індонезія стала другим за величиною постачальником коксу (27,7 тис. тонн), що є свідченням того, що великі українські металургійні групи, такі як «МЕТІНВЕСТХОЛДІНГ», активно шукають морські маршрути через порти країн ЄС для його імпорту в Україну, диверсифікуючись від обмежених сухопутних маршрутів і європейських виробників. Потенційно привабливим розглядається

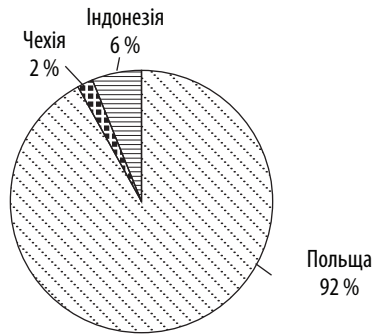


Рис. 1.26. Структура імпорту готового коксу в Україну за 8 міс. 2025 р.

Джерело: складено за [64]

імпорту коксу з Індонезії, як і потенційні поставки зі США або Австралії, що забезпечить доступ до світового ринку сировини, що допомагає знизити середню ціну імпорту коксу.

Попит на металургію заліза визначається виробництвом сталі, яка в Україні виробляється переважно киснево-конверторним способом із чавуну (частка електросталеплавильного виробництва у 2024 р. складала лише 12,3 % [15]). Динаміку виробництва сталі в Україні у 2014–2024 рр. киснево-конверторним способом наведено на рис. 1.27.

Динаміка виробництва сталі є індикатором незворотних змін у металургійній галузі України. У 2014–2021 рр. відбулося скорочення обсягів виробництва, зокрема у 2014–2015 рр. на 16 % через втрату виробничих потужностей на окупованих територіях Донецької та Луганської областей. У 2016–2021 рр. мала місце стагнація виробництва на рівні 15–16 млн т через стабілізацію роботи основних потужностей, які залишилися під контролем України, зокрема у Кривому Розі, Запоріжжі та Маріуполі.

У 2022 р. відбулося падіння виробництва на 74 %, зокрема були знищені та окуповані ПрАТ «Азовсталь» та ПрАТ «ММК ім. Ілліча» в м. Маріуполь, які сукупно виробляли до 9,5 млн т сталі на рік. Через масовані обстріли енергетичної інфраструктури роботу решти підприємств було вкрай ускладнено, що призвело до суттєвого недозаванта-

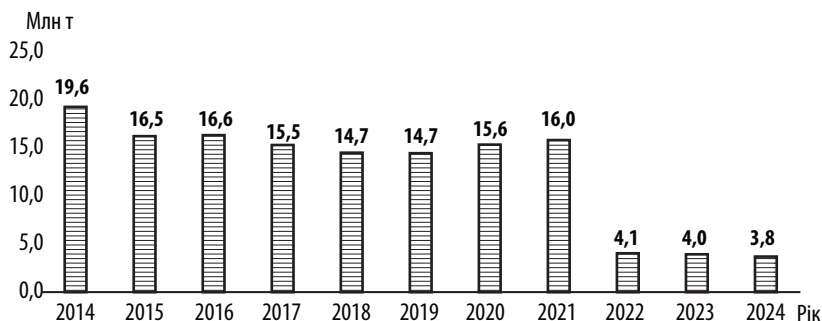


Рис. 1.27. Динаміка виробництва сталі киснево-конверторним способом в Україні у 2014–2024 рр.

Джерело: складено за [14; 15]

ження потужностей. У 2023–2024 рр. мала місце стабілізація виробництва на низькому рівні та структурний перехід до нового балансу виробничих потужностей. Основними виробниками сталі стали ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Каметсталь» та ПАТ «Запоріжсталь», які працюють в умовах критичних обмежень: високі тарифи на енергоносії, дорога логістика та, головне, дефіцит кваліфікованого персоналу через мобілізацію.

Слід зауважити, що хоча загальне виробництво сталі в Україні у 2024 р. зросло на 21,6 % (до 7,58 млн т, включаючи всі способи), виробництво саме киснево-конверторним способом продовжує знижуватися (з 3,995 млн т до 3,752 млн т). Загальне зростання виробництва сталі у 2024 р. відбувається завдяки порівняно кращій стійкості інших технологій (зокрема, електросталеплавильне виробництво, що використовується ТОВ «Інтерпайп Україна») та за рахунок збільшення виробництва й експорту іншої металургійної продукції попередніх переділів (залізної руди, концентратів та чавуну). Порівняння даних виробництва основних продуктів металургійного циклу в Україні за 2014 та 2024 рр. дозволяє зробити висновки, зокрема:

- втрата виробничих потужностей наступних переділів призвела до значного звуження внутрішнього ринку, що змусило гірничо-

збагачувальні комбінати різко наростити експортну орієнтацію. Про це свідчить рекордний показник експортної орієнтації залізної руди у 2024 р. (75 %), а сам видобуток залізної руди зазнав найменший відсоток падіння (-46 %);

- повна втрата видобутку спікливого коксівного вугілля призвела до повної залежності від імпорту як самого вугілля, так і готового коксу, вимагаючи кардинальної перебудови логістичних ланцюгів та переорієнтації на морські поставки;
- виробництво чавуну (-71 %) та сталі (-81 %) найбільше постраждали від прямої втрати ключових металургійних комбінатів на сході України;
- через втрату традиційних ринків збуту та внутрішнього попиту відбулася переорієнтація експорту чавуну, де США стали важливим ринком збуту (до 68 % у 2024 р.), оскільки це єдиний металургійний товар без антидемпінгових мит;
- робота вцілілих киснево-конверторних металургійних підприємств (ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та ПАТ «Запоріжсталь») ускладнена критичними обмеженнями: високими тарифами на енергоносії, дорогою логістикою та дефіцитом кваліфікованого персоналу.

За таких умов формується нова структурна модель металургії заліза в Україні, яка має переваги для інтеграції у європейські ланцюги доданої вартості «зеленої» металургії завдяки наявності близько 5 млрд т запасів магнетитової залізної руди – основної сировини для DRI, а також розширенню виробництва преміальних високоякісних концентратів (окатків) із вмістом заліза понад 66 %.

Наразі українські виробники мають потенціал стати потужним учасником європейського ринку «зеленої» металургії заліза, з очікуваними комерційними постачаннями сировини для DRI у середньостроковій перспективі на рівні 20–25 млн т. За таких умов постає стратегічна необхідність поглиблення циклу металургії заліза для забезпечення сировинної стійкості та відповідності світовим кліматичним цілям. Це висуває вимогу розвивати не лише виробництво високоякісної сирови-

ни для DRI, а й власне виробництво DRI в Україні. Це дозволить поступово замінити доменне виробництво чавуну, яке залежить від імпорту коксу, та перейти до сучасної, більш екологічної та гнучкої електросталеплавильної технології, використовуючи DRI та металобрухт як основну сировинну базу. Такий перехід посилить інтеграцію України у європейські ланцюги доданої вартості «зеленої» металургії, зменшуючи вразливість галузі та закладаючи основу для її сталого відновлення.

1.3. Аналіз сировинного потенціалу та наявних потужностей металургійної промисловості України

Основні сировинні ресурси металургійної промисловості наведені на рис. 1.28. Основними корисними копалинами, необхідними для функціонування металургійних підприємств, є залізородна сировина, коксівне вугілля (для доменного способу виробництва), сировина для виробництва вогнетривів і легкоплавкі мінерали – так звані флюси (вапняки, доломіти).

Отже, розглянемо запаси і потенціал видобутку сировинних ресурсів і виробництва окремих видів продукції.

Виробництво чавуну.

Як зазначалося в п. 1.2 монографії, на цей час виробничі потужності з виробництва чавуну на контрольованих підприємствах сягають 21,6 млн т (табл. 1.14). У середньостроковій перспективі очікується вивід з експлуатації потужностей з виробництва чавуну на ПрАТ «Дніпровський МЗ» (1,8 млн т – табл. 1.16), на якому в травні 2025 р. зупинено коксове виробництво і почата реконструкція підприємства з метою переходу на електроплавильне виробництво сталі [67].

Ще один чинник, який необхідно враховувати при визначенні потенційних можливостей з виробництва чавуну, – значний термін експлуатації доменних печей і необхідність виконання капітальних ремонтів кожні 4–5 років, під час яких здійснюється часткова або повна заміна футеровки. Без урахування доменного виробництва на ПрАТ «Дніпровський МЗ» на контрольованій території України за умови забезпеченості сировинними ресурсами і наявності доступних ринків збуту

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

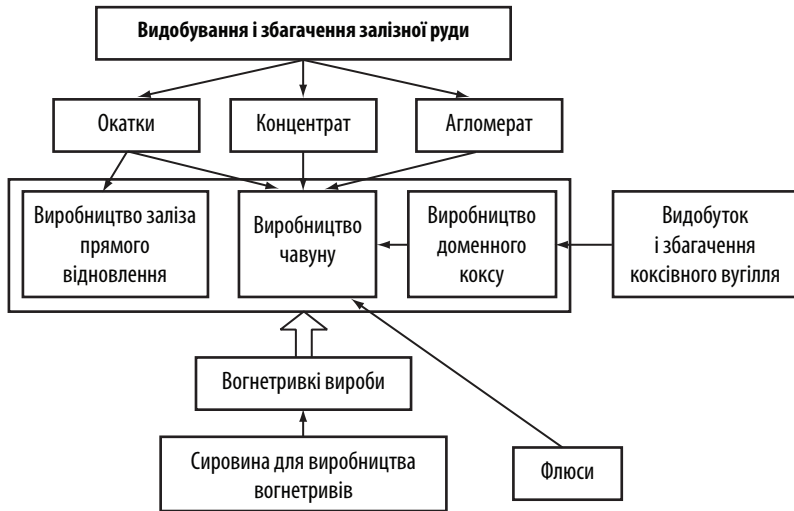


Рис. 1.28. Корисні копалини та продукти їх переробки, необхідні для функціонування металургійних підприємств

Джерело: авторська розробка

готової продукції можуть працювати 13 доменних печей (ПАТ «Запоріжсталь» – 4, ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» – 6, ПрАТ «Камет-сталь» – 3 [42]). Тобто кожен рік з експлуатації на капітальний ремонт буде виводитися орієнтовно 3 доменних печі.

За нашими оцінками діюча виробнича потужність 10 доменних печей в середньостроковій перспективі не буде перевищувати 16,8 млн т на рік.

Для забезпечення такого обсягу виробництва чавуну потрібні такі обсяги ресурсів (табл. 1.17).

Отже, розглянемо можливості забезпечення вітчизняною сировиною потреб доменного виробництва.

Залізорудна сировина. До залізорудної сировини відносять гірські породи, переробка яких з вилученням заліза економічно доцільна на цій стадії розвитку техніки та технології. Ці руди, як і всі гірські породи, не є хімічно однорідними, а містять кілька складових: рудну частину,

Таблиця 1.17

Розрахунок потреб у сировинних ресурсах для виробництва чавуну 16,8 млн т на рік

Сировинний ресурс	Чинники, що впливають на потребу в сировинному ресурсі	Річна потреба, млн т
Залізорудна сировина	Загальний вміст заліза в залізорудній сировині – 65-68 %, вміст вуглецю в чавуні – 2 %	24,2–25,3
Доменний кокс	Витрати доменного коксу на виробництво чавуну – 0,35-0,4 т/т; Вихід доменного коксу від валового – 90,8 %	5,9–6,7 (6,9–7,8 валового коксу 6 % вологості)
Коксівне вугілля	Вихід валового коксу від шихти – 76,0 %	9,3–9,7
Вогнетривкі вироби	Потреба для капітальних ремонтів з заміною футеровки – 3 кг/т чавуну	0,05
Сировина для виробництва вогнетривких виробів	Коефіцієнт використання сировини – 0,8	0,06
Флюси	Витрати флюсів – 0,5 т/т чавуну	8,4

Джерело: авторські розрахунки

порожню породу та домішки. Класифікацію залізних руд наведено на рис. 1.29.

В Україні видобувається так звана «багата» руда (загальний вміст заліза >50 %). Родовища залізної руди в Україні містять переважно магнетити і гематити, максимальний вміст заліза в яких складає 66,1–72,4 %.

Україна в цілому забезпечена достатніми покладами залізної руди, запаси якої є п'ятими в світі та найкрупнішими серед європейських країн. Згідно з даними ДНВП «Геоінформ України», балансові запаси руд заліза становили 18,1 млрд т станом на 01.01.2021 р. [70], в т.ч. на балансі діючих гірничо-видобувних підприємств знаходиться близько 5 млрд т. Кількість родовищ руд заліза у 2020 році становила 60. Найбільший обсяг балансових запасів руд заліза знаходиться у Дніпропетровській області (48,61 %), Полтавській (27,89 %), Запорізькій (15,25 %) областях, Автономній Республіці Крим (4,61 %), Кіровоградській (1,71 %) та Донецькій (1,51 %) областях.

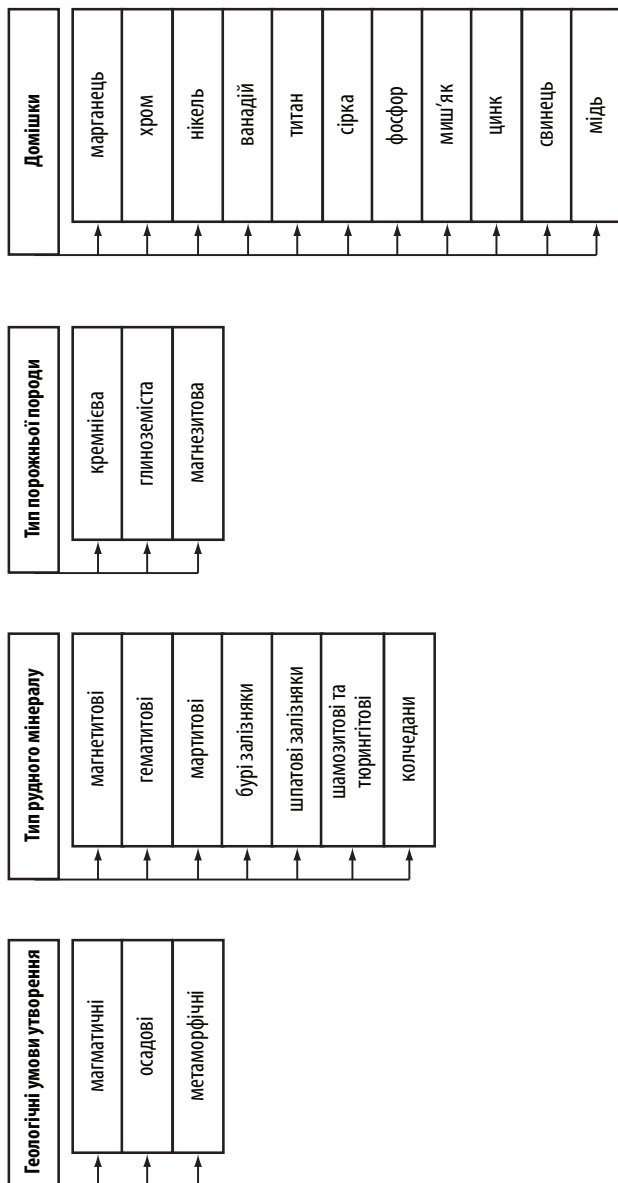


Рис. 1.29. Класифікація залізних руд

Джерело: складено за даними [69]

Наявна проєктна потужність діючих гірничо-збагачувальних комбінатів суттєво перевищує фактичний рівень видобутку і збагачення. Так, за проєктної потужності гірничо-збагачувальних комбінатів з видобутку руди 241,6 млн т (табл. 1.12) фактичний видобуток в 2014–2021 рр. складав 74,2-82,4 млн. т – рис. 1.18 (без урахування ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат», який знаходиться на тимчасово окупованій території).

Таким чином, забезпеченість української металургії залізорудною сировиною є цілком задовільною: наявність геологічних запасів і виробничих потужностей для їх видобутку дозволяє не лише забезпечити вітчизняне виробництво, але й має значний експортний потенціал, в тому числі не лише за видобутою рудою, а і за продуктами її збагачення – залізорудним концентратом, агломератом та окатишами.

Доменний кокс

Згідно з даними табл. 1.16 виробнича потужність (далі – ВП) коксохімічних підприємств (ПрАТ «Южкокс», ПАрАТ «Запоріжкокс») і виробництв на металургійних комбінатах (ПрАТ «Каметсталь, ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг») станом на 01.01.2017 р. сягала 4876,8 тис. т валового коксу 6 % вологості. В останні передвоєнні роки введено 2 коксових батареї на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» сумарною ВП 2000 тис. т на рік.

Однією із специфічних особливостей коксохімічного виробництва є те, що ВП підприємства з виробництва валового коксу не є постійною величиною. Згідно з «Інструкцією з розрахунку виробничих потужностей коксохімічних підприємств і коксохімічних виробництв» [71] ВП з виробництва валового коксу (6 % вологості) залежить, зокрема, від таких чинників (табл. 1.18).

Вплив зміни кількості робочих печей на зміну ВП можна оцінити на основі дослідження [72]. Згідно з наведеними даними за період з 2010–2020 рр. кількість робочих печей зменшилася з 1838 до 1715 шт., тобто в середньому на 12 печей/рік. Якщо враховувати тільки печний фонд підприємств, що працюють на контрольованій території, то зменшення пічного фонду оцінюється величиною 4,5 печей/рік, що рівноцінно зменшенню ВП на 25,4 тис. т валового коксу.

Таблиця 1.18

Чинники, що впливають на ВП з виробництва валового коксу

Чинник, що впливає на ВП	Характеристика впливу	Спрямованість впливу
Розрахункова кількість робочих коксових печей у батареї, шт.	При тривалій експлуатації кількість зменшується внаслідок порушень вогнетривкої кладки	Кожна непрацююча піч зменшує ВП $\approx 1,5$ %
Вихід сухого валового коксу з сухої шихти, %	Залежить від якості сировинної бази	При збільшенні (зменшенні) виходу летких речовин шихти на суху масу ВП зменшується (збільшується) на 0,7 %
Оборот серійно працюючих печей, годин	Збільшення обороту печей (проміжок часу між завантаженнями шихти у піч) зменшує кількість пече-видач за рік	При експлуатації коксової батареї понад 20 років оборот щорічно збільшується на 0,5 години, що призводить до зменшення ВП на 1,5–3,0 % (залежно від віку коксової батареї)

Джерело: розраховано за даними [71]

Вплив зміни обороту коксових печей можна оцінити за даними [68; 73]. Згідно з наведеними даними середній оборот коксових печей станом на 01.01.2017 р. складав 25, годин. Тобто за період з 2017 по перше півріччя 2025 р. оборот збільшився на 4,5 годин, що рівноцінно середньорічному зниженню ВП на 70,6 тис. т.

Отже, при незмінності сировинної бази і виходу валового коксу за рахунок погіршення стану коксових батарей середньорічне зменшення потужності можна оцінити на рівні 96,0 тис. т. Наведені розрахунки дозволяють спрогнозувати наступний рівень виробничої потужності станом на початок 2026 р.:

- ВП з виробництва коксу підприємств, що розташовані на контрольованій території (станом на 01.01.2017 р.) – 4876,8 тис. т;
- зменшення ВП за рахунок зменшення кількості робочих печей і збільшення їх обороту (з 2017 до кінця 2025 р.) – 9 років $\times \times 96,0$ тис. т/рік = -864 тис. т;

- збільшення ВП за рахунок введення в експлуатацію коксових ба-
тарей на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» +2000 тис. т/рік.

ВП станом на початок 2026 р – 6012,8 тис. т валового коксу 6 % на рік.

За такої ВП потенційне виробництво доменного коксу складає 5132 тис. т на рік.

Отже, діючі ВП коксохімічних підприємств не спроможні забез-
печити повне завантаження доменних печей, для якого потрібно 6,9–
7,8 млн т. Але таке виробництво валового коксу потребує більше 9 млн т
коксівного вугілля на рік.

Кам'яне вугілля. Загальні геологічні балансові запаси вугілля склада-
ють в Україні 44784,3 млн т, в тому числі кам'яного – 41164,7 млн т [74].
Викопне вугілля різних родовищ і пластів має неоднакові властивості.
Його класифікація для умов України стандартизована ДСТУ 3472:2015
«Вугілля буре, кам'яне, антрацит. Класифікація» [75] – *табл. 1.19*.

Марочну структуру наявних в Україні покладів викопного вугілля
згідно з [76] наведено на *рис. 1.30*.

З усіх марок кам'яного вугілля лише коксове вугілля (марка К) дає
можливість отримувати високоякісний кокс, що і спричинило назву цієї
марки. Решта ж марок коксівного вугілля використовуються для коксу-
вання в складі вугільних шихт (сумішей різних марок).

Поклади вугілля, придатного для коксування (марки ГЖ, Ж, К,
ПС), зосереджені в Центральному Донбасі і практично всі знахо-
дяться (станом на кінець 2025 р.) або на тимчасово окупованих те-
риторіях, або в зоні активних бойових дій. Можливості відновлення
видобутку вугілля на цій території можуть бути оцінені тільки після
їх деокупації.

Певні перспективи розвитку видобутку коксівного вугілля можуть
бути пов'язані з розвитком вугледобування у Львівсько-Волинському
басейну в межах Любельського і Тягівського родовищ. Досліджен-
ня властивостей вугілля Любельського родовища проводились ДП
«УХІН» в період 2009–2015 рр. Технологічні характеристики вугіль-
ного концентрату, отриманого з керованих проб поля майбутньої шахти
Любельська № 1-2 [77], дозволяють віднести вугілля шахти Любельська

Таблиця 1.19

Класифікація українського вугілля за ДСТУ 3472:2015

Вид вугілля	Марка вугілля	Позначка		Класифікаційні показники				
		Марка	Група	Середній довольний показник відбиття вітринту $<R_0, r>$, %	Вихід легких речовин на сухий знезолений стан $Vdaf$, %	Товщина пластичного шару u , мм	Індекс R_{gr} RI, од.	Висота теплота згорання на сухий знезолений стан Q_{sdaf} , МДж/кг
Буре	Буре	Б		$<0,4$	50-70	-	-	$Q_{sdaf} < 24$
	Довгополум'яне	Д		0,4-0,59	35-50	<6	-	-
	Довгополум'яне газове	ДГ		0,5-0,69	35-44	6-9	-	-
	Газове	Г	Г1	0,6-0,69	38-44	10-16	-	-
	Газове	Г	Г2	0,7-0,79	36-42	10-24	-	-
	Газове жирне піснувате	ГЖП		0,8-0,89	33-39	10-16	-	-
	Газове жирне	ГЖ		0,8-0,89	33-38	>17	-	-
	Жирне	Ж		0,9-1,19	28-36	>17	-	-
	Коксове	К	К1	1,04-1,19	28-30	13-16	-	-
	Коксове	К	К2	1,2-1,49	18-28	13-28	-	-
Антрацит	Піснувате спікливе	ПС		1,5-1,69	14-22	6-12	13-50	-
	Пісне	П		1,7-2,59	8-18	<6	<13	-
	Антрацит	А		2,6-6	<8	-	-	33,1-35,2

Джерело: [72]

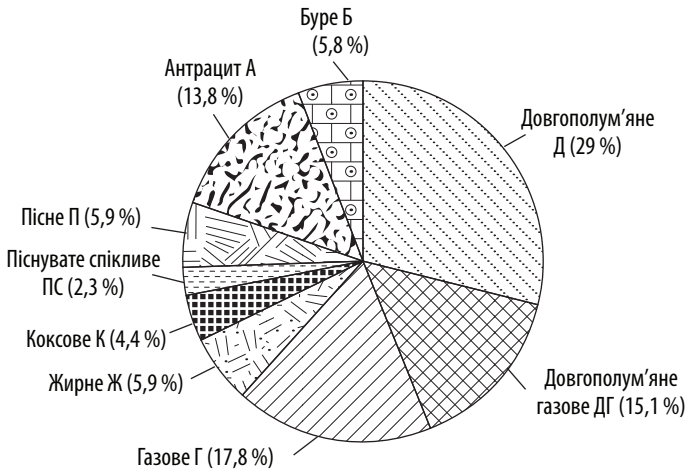


Рис. 1.30. Марочна структура запасів викопного вугілля в Україні

Джерело: [76]

до марки К. Було встановлено, що вугілля шахти Любельська № 1-2 дещо переважає аналогічне українське вугілля шахтоуправління «Покровське» та шахти «Суходільська-Східна» (табл. 1.20). Зокрема, за показниками зольності та сірчистості концентрату кернових проб це вугілля є кращим, ніж вітчизняні та зарубіжні аналоги. Менший, порівняно з аналогами, вихід летких речовин забезпечує більший вихід валового коксу.

Наявні проробки з питань освоєння Тягівського родовища показують, що воно містить кам'яне вугілля марок Г, ГЖ та Ж [78], а балансові запаси складають приблизно 300 млн т. На цей час завершено проєкт будівництва шахти «Тягівська № 1». Балансові запаси на її ділянці становлять 71,4 млн т, а проєктна виробнича потужність – 1,2 млн т вугілля на рік. Безпосередньо до ділянки шахти № 1 прилягає ділянка шахти «Тягівська № 2» з попередньо розвіданими запасами 96,4 млн т. Передбачається також проєктування шахти «Тягівська» № 3, що дозволить створити в Західній Україні новий центр вугільної промисловості.

Таблиця 1.20

**Порівняння якості вугільного концентрату кернових проб
Любелського родовища з показниками підприємств-аналогів**

Шахта, країна	Марка за ДСТУ 3472	Технічний аналіз, %		
		Зольність A^d , %	Сірчистість S^d , %	Вихід летких речовин V^{daf} , %
Любелська № 1-2, Україна	К	4,7	0,54	23,0
Шахтоуправління «Покровське», Україна	К	8,4	0,80	27,9
Суходольська-Східна, Україна	К	9,6	1,28	25,8
Oaky North, Австралія	К	9,5	0,60	24,5
Teck Premium, Канада	К	8,9	0,57	27,0

Джерело: [77]

Будівництво цих шахт дозволить частково задовільнити потреби коксохімічних підприємств у якісній вітчизняній сировині. Але при цьому не вирішується глобальна проблема раціонального використання вітчизняної сировинної бази, а саме: невідповідність запасів вугілля структурі їх видобування і використання. Дві третини наявних запасів представлені малометаморфованим вугіллям (марки Б, Д, ДГ, Г) – *рис. 1.30*. Саме вугілля цих марок (крім бурого вугілля) видобувається на цей час в Україні для потреб вугільної електрогенерації.

Вразливість вугільних ТЕС у часи військової агресії та міжнародні зобов'язання України щодо скорочення викидів парникових газів від спалювання вугілля не електростанціях висувують перед державою дилему: згортання вугледобувної промисловості чи пошук інших напрямів використання вугілля, так званих енергетичних марок (передусім Д, ДГ, Г).

Перспективним напрямом використання вугілля цих марок є їх газифікація з подальшим використанням отриманого синтез-газу для виробництва заліза прямого відновлення (наприклад, за процесом Rotary Kiln, застосування якого охарактеризовано в п. 1.1 цієї монографії).

На користь такої переорієнтації використання малометаморфованого вугілля свідчить те, що для хімічної переробки саме це вугілля

(з високим вмістом кисню і з великою кількістю карбонільних $=C=O$, гідроксильних $-OH$ та карбоксильних $-COOH$ функціональних груп в макромолекулах вугільної речовини) є найціннішим для подальшого отримання синтез-газу, оскільки енергії зв'язку атомів у таких групах нижчі за аналогічні величини для вуглець-вуглецевого та вуглець-водневого зв'язків. Отже, з погляду хімії та технології горючих копалин для отримання з вугілля синтез-газу доцільне використання саме мало-метаморфованого вугілля.

Запаси такого вугілля зосереджені на підконтрольній території України (Західний Донбас і Львівсько-Волинський вугільний басейн).

Вогнетривкі вироби

До початку російської агресії 2014 р. в Україні діяло 15 підприємств з виробництва вогнетривких виробів (цегла, блоки, плитки тощо) [79], більшість з яких були розташовані на території Донецької області. Ще до початку повномасштабної агресії втрачено контроль на тимчасово окупованих територіях за ПАТ «Пантелеймонівський вогнетривкий завод» (м. Горлівка, Донецька обл.), ТОВ «Гірничодобувна компанія „Мінерал“» (м. Пологи, Запорізька обл.), ПрАТ «Великоанадольський вогнетривкий комбінат» (сmt Володимірівка, Донецька обл.). Такі зміни пояснюють від'ємну динаміку виробництва вогнетривких виробів в Україні в 2013–2019 рр. (рис. 1.31).

Після початку повномасштабної агресії у 2022 р. в зоні активних бойових дій опинилися виробничі потужності основного виробника шамотних вогнетривів (ПАТ «Часівоярський вогнетривкий комбінат») та динасових вогнетривів (ПрАТ «Покровський динасовий завод» і ПрАТ «Красногорівський вогнетривкий завод»).

Отже, наразі виробництво власних дінасових і шамотних вогнетривів в Україні практично повністю припинено. На підконтрольній Україні території діють виробники мулітокорундових високоглиноземистих виробів (ПрАТ «Запоріжжвогнетрив» (м. Запоріжжя) та ВАТ «Павлівські мінерали» (колишній Христофорівський завод вогнетривких бетонів та блоків, Дніпропетровська обл.).

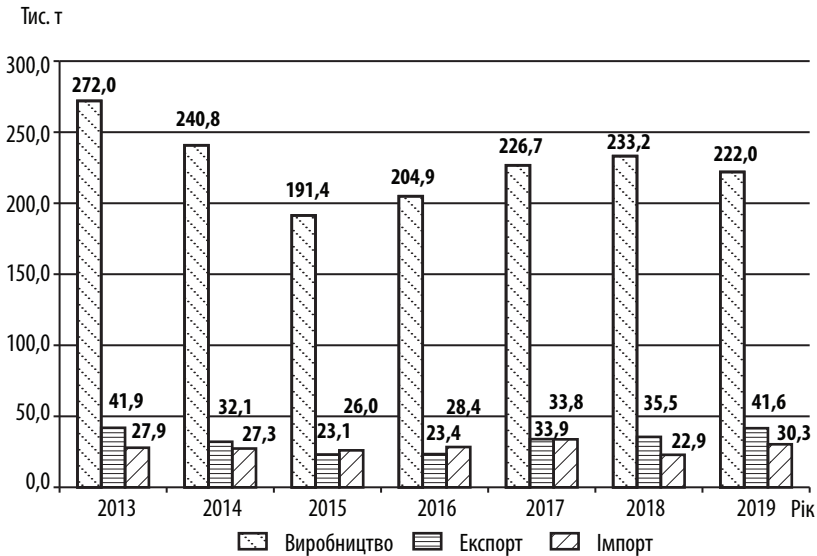


Рис. 1.31. Обсяги виробництва та експортно-імпорتنних операцій за товарною позицією «Цегла вогнетривка, блоки, плитки та аналогічні вогнетривкі керамічні будівельні матеріали, крім виробів з кремнеземистого кам'яного борошна або з аналогічних кремнеземистих порід» у 2013–2019 рр.

Джерело: складено за [50–52]

Скорочення кількості виробників вогнетривких виробів, а також їх споживачів (внаслідок втрати великих підприємств) призвело до скорочення зовнішньоекономічної діяльності. Так, експорт вогнетривких виробів зменшився з 43,1 тис. т в 2020 р. до 2,8 тис. т в 2024 р. Імпорт скоротився з 26–33 тис. т в 2013–2019 рр. до 9,3–18,7 тис. т в 2022–2024 рр. [52].

Оцінка потреб у вогнетривких виробих металургійних підприємств повинна враховувати не тільки потреби доменного виробництва, а й суміжних переділів (виробництво коксу, конверторне, прокатне, електросталеплавильне виробництво). За деякими оцінками, в Україні середня витрата вогнетривків становить 13,8... 16 кг/т сталі [80].

Втрата основних виробничих потужностей з виробництва вогнетривів ставить Україну перед вибором:

- орієнтація на імпорт;
- розвиток власного виробництва на територіях, які знаходяться на відносно безпечній території країни.

На середньострокову перспективу єдиним джерелом забезпечення металургії вогнетривкими виробами є імпорт. Протягом останніх років, після розриву економічних взаємовідносин з росією, основними постачальниками таких виробів, за даними Державної служби статистики [52], були Китай, Австрія, в окремі роки – Німеччина і Польща (рис. 1.32).

Орієнтація на власне виробництво потребує значних інвестицій у створення нових виробництв, але більш привабливим з точки зору національної безпеки та наявності вітчизняних родовищ необхідної сировини.

Сировиною для вогнетривких виробів є піски кременисті та кварцові, каолін (вогнетривка і тугоплавка глини). В минулі роки Україна не тільки повністю забезпечувала свої потреби в цих видах сировини, а й експортувала частку видобутку. На рис. 1.33 наведено динаміку виробництва та експорту вогнетривкої сировини за товарними позиціями «Піски кремнеземні і піски кварцові» і «Каолін та інші глини каолінові, кальциновані або не кальциновані» в 2013–2021 рр. Слід зауважити, що імпорт у цьому ж періоді коливався в межах 8,0–17,0 тис. т, тобто потреби країни у вогнетривких výroбах забезпечувалися за рахунок перероблення вітчизняної сировини.

На цей час в Україні видано і діє 30 спеціальних дозволів на видобуток вогнетривкої та тугоплавкої глини, яка може використовуватися як сировина для виробництва вогнетривких виробів [81] – рис. 1.34. Основні поклади такої сировини розташовані на території Донецької області і на сьогодні є недоступними внаслідок військової агресії росії.

Ще у 2006 р. зазначалося, що найбільші родовища (Часів'ярське, Донецька обл., Новоселицьке, Черкаська обл.) майже виснажені, а на інших родовищах знижується сортність сировини, що добувається, і на

Розділ 1. Сучасний стан чорної металургії світу та України

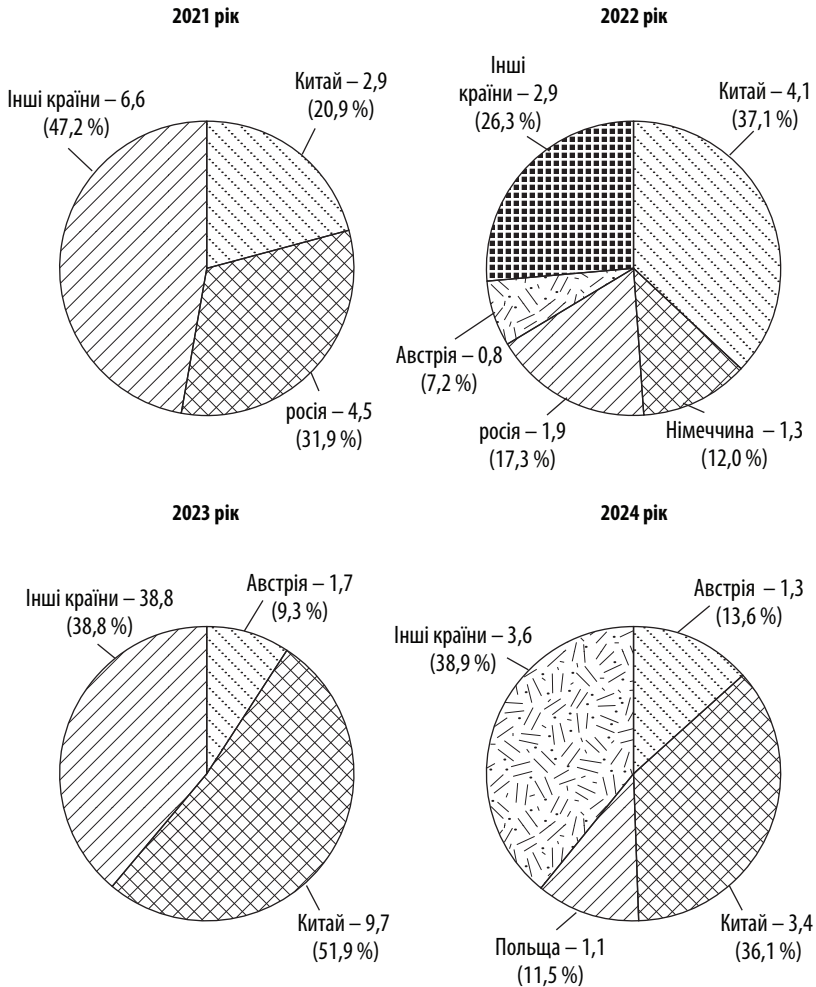


Рис. 1.32. Структура імпорту вогнетривких виробів у розрізі окремих країн у 2021–2024 рр., тис. т

Джерело: складено за даними [52]

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

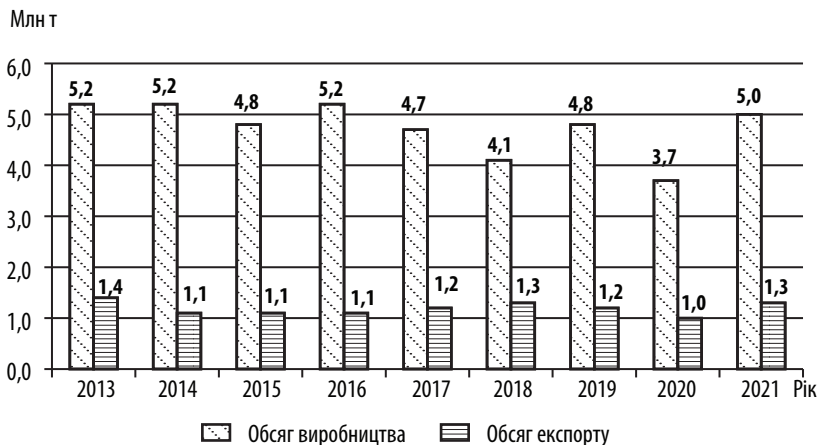


Рис. 1.33. Динаміка виробництва й експорту сировини для виробництва вогнетривких виробів у 2013–2021 рр.

Джерело: складено за [50–52]



Рис. 1.34. Кількість виданих дозволів на видобуток сировини для вогнетривів за регіонами України

Джерело: складено за даними [81]

інших родовищах погіршуються гірничо-геологічні умови, збільшується глибина кар'єрів, зростає собівартість добування сировини [82].

Враховуючи виснаженість основних родовищ Донецької обл. та виходячи з безпекових питань в майбутньому, слід звернути увагу на можливості організації виробництва вогнетривких виробів на базі сировини, що знаходиться на територіях Житомирської, Кіровоградської Хмельницької та Черкаської областей України.

Перспективним напрямом розвитку видобування вогнетривкої сировини в «Загальнодержавній програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2010 року» було визначено, зокрема, проведення розвідки Рижанівського (Черкаська область) і Балашівського (Кіровоградська область) родовищ з очікуваними запасами відповідно 20 і 10 млн тонн для збільшення запасів вторинних каолінів, завершення розвідки Західної лінзи Рижанівського родовища, проведення пошукових робіт щодо виявлення високоякісних вторинних каолінів у районі діючих підприємств (ділянки, прилеглі до Новоселицького та Обознівського родовищ) у Черкаській та Кіровоградській областях [82].

Але можливості залучення цих родовищ до сировинної бази вітчизняної вогнетривкої промисловості потребують додаткових геолого-розвідувальних робіт, техніко-економічних обґрунтувань тощо.

Флюси (вапняки)

Флюсами називають матеріали, які вводять в металургійну шихту для зниження температури плавлення пустої породи, ошлакування золи коксу, надання отримуваному шлаку необхідного хімічного складу та фізичних властивостей, які забезпечують його високу рідко-рухливість, сірко-поглинальну здатність, а отже, рівний хід плавки. Оскільки порожня порода залізних руд переважно кремнеземиста (кисла), то роль флюсу звичайно виконують основні оксиди кальцію та магнію.

Оксид кальцію входить до складу мінералу кальциту CaCO_3 , що називається вапняком. В чистому вигляді вапняк містить 56 % CaO та 44 % CO_2 . Вміст CaO в технічному вапняку, що видобувається на гірничих підприємствах, становить 50–52 %. Доломітизований вапняк

складається з суміші кальциту та доломіту ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), вміст MgO сягає в ньому 14 %. Доломітизований вапняк використовують для зниження в'язкості та підвищення плинності доменного шлаку, доводячи за його допомогою вміст MgO в шлаці до 8–10 %. Найважливішою вимогою до основних флюсів є низький вміст в них кремнезему та глинозему, а також шкідливих домішок – сірки та фосфору.

За даними Геологічної інвестиційної групи GeoGroup [83], родовища вапняку є практично в усіх регіонах України. Найкрупнішим з них є Каракубське в Донецькій області, де розташоване найкрупніше в Європі Комсомольське рудоуправління. До нього примикають Оленівське та Новотроїцьке родовища, де розташовані Докучаєвський флюсо-доломітний комбінат та Новотроїцьке рудоуправління. В Криму знаходяться Балаклавське та Камиш-Бурунське родовища поблизу відповідно Севастополя та Керчі. Вапняк Балаклавського рудоуправління високоякісний, натомість камиш-бурунський вапняк є ракушниковим – дрібним та недостатньо міцним, який може використовуватись лише для агломерації.

Тимчасова окупація росією основних родовищ вапняка призвела до скорочення обсягів його виробництва понад у 2 рази з одночасним зростанням імпорту (рис. 1.35).

Загалом, незважаючи на наявність в Україні достатніх покладів вапняку, ситуація з його постачанням на металургійні підприємства суттєво ускладнена через те, що родовища з найкращими властивостями знаходяться на тимчасово непідконтрольних територіях. Вапняк, що постачається з Кашперівського кар'єра Миколаївської області та Максимівського родовища Збаразького району Тернопільської області, є дрібним та недостатньо міцним. Тому деякі металургійні підприємства вдаються до імпорту вапняку з інших країн, зокрема Молдови. В цілому у 2023 рр. поставки флюсів з Молдови сягали 91–97 % від загального імпорту (розраховано за даними [52]).

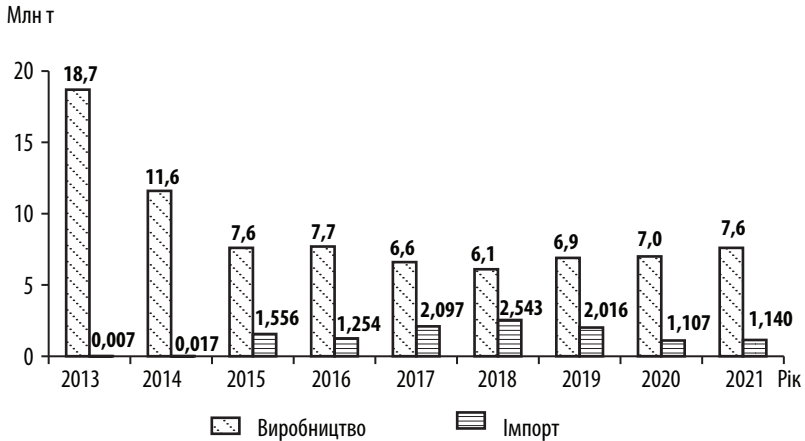


Рис. 1.35. Динаміка виробництва й імпорту вогнетривких виробів у довоєнні роки

Джерело: складено за даними [50–52]

Висновки до розділу 1

1. Аналіз світових тенденцій розвитку металургії заліза дозволив виявити кардинальні структурні зрушення у його технологічних циклах, спричинені необхідністю декарбонізації промисловості, які обумовлюють перехід від вуглецево-інтенсивного циклу BF/BOF (доменна піч / кисневий конвертер) до більш екологічного «зеленого» циклу DRI/EAF (залізо прямого відновлення / електросталеплавильна піч). Ці зрушення характеризуються регіональною дивергенцією: країни, що розвиваються, демонструють прискорений перехід до циклу DRI/EAF та стають новими центрами виробництва DRI, тоді як розвинені країни світу залишаються центрами попиту на імпортоване DRI для подальшої переробки.
2. Аналіз національних тенденцій розвитку металургії заліза в Україні дозволив виявити, що через втрату вітчизняного видобутку коксівного вугілля та неможливість його заміщення імпортом традиційний цикл BF/BOF демонструє зростання імпортозалежності. Крім того, зростання експорту залізорудної сировини

закріплює за Україною роль постачальника низької ланки ланцюга доданої вартості, перешкоджаючи розвитку власної маржинальної металургії заліза. Водночас наявність значних запасів магнетитових руд і потенціал для виробництва високоякісних окатишів є стратегічною перевагою, що створює сировинну базу для розвитку власного виробництва DRI.

3. До початку збройної агресії росії та окупації частини території Україна була однією з небагатьох країн світу, яка мала власні ресурси усіх видів сировини, які є стратегічно важливими для металургійної промисловості. Українські гірничо-добувні та переробні підприємства повністю задовольняли потреби металургійного виробництва у залізній руді, флюсах, вогнетривих і вогнетривких виробках і частково – у коксівному вугіллі. На цей час після окупації та руйнації росією значної частини підприємств гірничо-металургійного комплексу за рахунок імпорту задовольняються потреби у флюсах, коксівному вугіллі спікливих марок, вогнетривих і вогнетривких виробках. Зменшення імпортних поставок флюсів і сировини для виробництва вогнетривів можливе за рахунок освоєння родовищ відповідних корисних копалин, які розташовані на контрольованій території України. Подальший розвиток вугледобувної промисловості може бути пов'язаний як з розробкою родовищ коксівного вугілля, розташованих у Львівській області, так і нарощуванням видобування вугілля енергетичних марок для їх подальшої газифікації, отримання синтез-газу і його використання в процесі прямого відновлення заліза.

Перелік використаних джерел до розділу 1

1. Iron Ore // U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. January 2021. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-iron-ore.pdf>
2. Iron Ore // U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. January 2022. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-iron-ore.pdf>

3. Iron Ore // U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. January 2023. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-iron-ore.pdf>

4. Iron Ore // U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. January 2024. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-iron-ore.pdf>

5. Єрмоленко Г. Проект Simandou змінить динаміку на світовому ринку залізної руди // GMK Center. URL: <https://gmk.center/ua/news/proiekt-simandou-zminit-dinamiku-na-svitovomu-rinku-zaliznoi-rudi/>

6. Trade Statistics by Product (HS 6-digit) // WITS, World Bank. URL: <https://wits.worldbank.org/trade/country-byhs6product.aspx?lang=en>

7. Iron Ore // Trading Economics. URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/iron-ore>

8. Forecast Snapshot // Scotiabank. URL: <https://www.scotiabank.com/ca/en/about/economics/forecast-snapshot.html>

9. Turner C., Manthey E. Latam FX Outlook 2026: Full metal jacket // ING Think. 10.11.2025. URL: <https://think.ing.com/articles/latam-fx-outlook-2026/>

10. Commodity Markets // World Bank. URL: <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>

11. Goldman Sachs raises iron ore price forecast for 2026 to \$93/t // GMK Center. URL: <https://gmk.center/en/news/goldman-sachs-raises-iron-ore-price-forecast-for-2026-to-93-t/>

12. Iron ore to play key role in a decarbonized future // S&P Global Market Intelligence. URL: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/iron-ore-to-play-key-role-in-a-decarbonized-future>

13. Steel Overview // Climate Knowledge Initiative, Columbia Business School. URL: <https://business.columbia.edu/insights/climate/cki/steel/overview>

14. Steel Statistical Yearbook 2024 // World Steel Association. URL: https://worldsteel.org/media/publications/ssy_subscription-2024/

15. Crude steel production by process 2024 // World Steel in Figures 2025. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2025/#crude-steel-production-by-process-2024>

16. 1.5C Steel: decarbonising the steel sector in Paris-compatible pathways // E3G. 2021. URL: https://www.e3g.org/wp-content/uploads/1.5C-Steel-Report_E3G-PNNL-1.pdf

17. Texas HBI // ArcelorMittal. URL: <https://northamerica.arcelormittal.com/our-operations/arcelormittal-texas-hbi>

18. Hot Briquetted Iron (HBI) Market // Global Growth Insights. URL: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/hot-briquetted-iron-hbi-market-102933>

19. Direct Reduced Iron (DRI) and Hot Briquetted Iron (HBI) Market // DataHorizon Research. URL: <https://datahorizonresearch.com/direct-reduced-iron-dri-and-hot-briquetted-iron-hbi-market-44846>

20. Green iron corridors: A new way to transform the steel business // RMI. URL: <https://rmi.org/green-iron-corridors-a-new-way-to-transform-the-steel-business>

21. Unlocking the First Wave of Breakthrough Steel Investments: International Opportunities // Energy Transitions Commission. 2023. URL: <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/Unlocking-the-First-Wave-of-Breakthrough-Steel-Investments-International-Opportunities-April-2023.pdf>

22. Decarbonisation timeline // Steelonthenet.com. URL: <https://www.steelonthenet.com/resources/kb/decarbonisation-timeline.htm>

23. Eurasian Resources Group to become global supplier of HBI Following Major Deal with Primetals Technologies and Midrex Technologies // Midrex. URL: <https://www.midrex.com/press-release/eurasian-resources-group-to-become-global-supplier-of-hbi-following-major-deal-with-primetals-technologies-and-midrex-technologies>

24. Midrex STATS Book 2021 // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2021.pdf>

25. Midrex STATS Book 2022 // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf>

26. Midrex STATS Book 2023 // Midrex Technologies, Inc. URL: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2023.Final_.pdf

27. Midrex STATS Book 2024 // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexStatsBook2024.pdf>

28. Ramakgala C., Danha G. A review of ironmaking by direct reduction processes: Quality requirements and sustainability. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 35. P. 242–245. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919306705>

29. Yang L. Z. et al. A review on production and application of direct reduced iron in gas-based shaft furnace–electric arc furnace route. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2025. Vol. 32. No. 3. P. 485–518. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01377-1>

30. Nyakudya Ncube R. Y., Ayomoh M. Optimisation strategies and Technological Advancements for Sustainable Direct Reduction Iron Production—A Systematic Review. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No. 5. P. 2266. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052266>

31. Sponge Iron India. May 2023. URL: <http://www.spongeironindia.com/images/publications/May-2023.pdf>

32. Joulazadeh M. H., Etemad A. Evaluation of the production of DRI in the world and Iran in 2021. *International Journal of Iron & Steel Society of Iran*. 2022. Vol. 19. No. 1. P. 55–66. URL: https://www.researchgate.net/publication/390815775_Evaluation_of_the_production_of_DRI_in_the_world_and_Iran_in_2021

33. Texas HBI // ArcelorMittal. URL: <https://northamerica.arcelormittal.com/our-operations/arcelormittal-texas-hbi>

34. Rotary Kiln Manufacturers in India // Classic Technomec. URL: <https://www.classictechnomec.com/rotary-kiln-manufacturers-in-india.php>

35. Chhattisgarh Environment Conservation Board. Raipur. URL: <https://www.enviscecb.org/523/English.pdf>

36. Direct Reduction of Iron Process (Sponge Iron Plants) // TERI. URL: <https://www.teriin.org/sites/default/files/2021-08/Direct%20Reduction%20of%20Iron%20Process.pdf>

37. Бабій К. В., Бубнова О. А., Малєєв Є. В., Рюміна Д. М., Левченко К. С., Ікол О. О. Ресурси стратегічних корисних копалин України : монографія. Дніпро : ПБП «Економіка», 2024. 324 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/390199010_Resursi_strategicnih_korisnih_kopalin_Ukraini

38. Україна в жовтні збільшила експорт залізної руди на 31,5% м./м // GMK Center. URL: <https://gmk.center/ua/news/ukraina-v-zhovtni-zbilshila-eksport-zaliznoi-rudi-na-31-5-m-m/>

39. Григоренко Ю. Невловимий Black: історія запуску нового родовища залізної руди // GMK Center. URL: <https://gmk.center/ua/posts/nevlovimiy-black-istoriya-zapusku-novogo-rodovishha-zaliznoi-rudi/>

40. Залізний бонус: український ГМК пробивається на ринок преміальної сировини // GMK Center. URL: <https://gmk.center/ua/posts/zaliznij-bonus-ukrainskij-gmk-probivaietsya-na-rinok-premialnoi-sirovini/>

41. ТОВ «МЕТІНВЕСТХОЛДІНГ». URL: <https://ucc.metinvestholding.com/en-us/>

42. GMK Center. Центр експертизи про промисловість та ГМК. URL: <https://gmk.center/ua/>

43. Звіт про управління АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат» за 2022 рік. URL: <https://drive.google.com/file/d/1i3fSS3EhdL804ryT96MAN9ujmCLeeAvz/view?usp=sharing>

44. ПрАТ «Суха балка». URL: <https://sukhabalka.com/ru/production.html>

45. Видобуток і збагачення руди // ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». URL: <https://ukraine.arcelormittal.com/production-sycle/iron-ore-mining-and-processing>

46. Криворізький гірничозбагачувальний комбінат окислених руд // Енциклопедія сучасної України. URL: <https://esu.com.ua/article-650>

47. Криворізький гірничо-збагачувальний комбінат окислених руд: технічні, міжнародні, правові, майнові аспекти // Комітет з питань промислової політики і підприємництва. URL: <https://www.rada.gov.ua/print/6474.html>

48. У багатостраждального гірничого комбінату з'явився інвестор // Persha.kr.ua. URL: <https://persha.kr.ua/news/economy/205322-u-bagatostrazhdalnogo-girnychogo-kombinatu-z-yavyvsya-investor/>

49. Єдиний майновий комплекс ДП «Дирекція Криворізького ГЗКОР» // Фонд державного майна України. URL: <https://privatization.gov.ua/product/yedynyj-majnovyj-kompleks-derzhavnogo-pidpryyemstva-dyreksiya-kryvorizkogo-girnycho-zbagachuvalnogo-kombinatu-okyslenyh-rud-2/>

50. Статистичний щорічник України. 2018 рік // Державна служба статистики України. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2019/zb/11/zb_yearbook_2018.pdf

51. Статистичний щорічник України. 2022 рік // Державна служба статистики України. URL: <https://stat.gov.ua/sites/default/files/2024-2/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D1%89%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8%202022%20%D1%80%D1%96%D0%BA.pdf>

52. Зовнішня торгівля окремими видами товарів за країнами світу // Державна служба статистики України. URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2024/zd/e_iovt/arh_iovt2024.htm

53. ДСТУ ISO 11323:2016 Руда залізна і залізо прямого відновлення. Словник термінів // УкрНДНЦ. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=68073

54. Вклад ГМК в економіку країни. 2024 рік // GMK Center. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2025/04/ukr_2025_Econ_Steel-impact.pdf

55. Україна може стати основним постачальником DRI до ЄС // Дніпропетровська обласна державна адміністрація. URL: <https://dia.dp.gov.ua/ukra%D1%97na-mozhe-stati-osnovnim-postachalnikom-dri-do-yes/>

56. Наша історія // ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». URL: <https://ukraine.arcelormittal.com/about/nasha-istoriia>

57. «Запоріжсталь» у 2024 році збільшила виробництво прокату на 18,3% р./р // GMK Center. URL: <https://gmk.center/ua/news/zaporizhstal-u-2024-roci-zbilshila-virobnictvo-prokату-na-18-3-r-r/>

58. «АрселорМіттал Кривий Ріг» підбив підсумки виробництва за 2024 рік // Delo.ua. URL: <https://delo.ua/news/arselormittal-krivii-rig-pidbiv-pidsumki-virobnictva-za-2024-rik-440695/>

59. «АрселорМіттал Кривий Ріг» вивів з простою додаткові потужності // Економічна правда. 13.05.2024. URL: <https://epravda.com.ua/news/2024/05/13/713602/>

60. Експорт чавуну з України у 2024 році сягнув 1,29 млн т // Дніпропетровська обласна державна адміністрація. URL: <https://dia.dp.gov.ua/eksport-chavunu-z-ukra%D1%97ni-u-2024-roci-syagnuv-129-mln-t/>

61. Собкевич О. Криза української металургії: основні чинники // Національний інститут стратегічних досліджень. URL: <https://niss.gov.ua/news/komentari-ekspertiv/kryza-ukrayinskoyi-metallurhiyi-osnovni-chnynyky>

62. Український ГМК в умовах війни: проблеми логістики : аналітичний звіт. 2022 рік // GMK Center. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2022/11/Ukr-GMK-logistic_2022-web.pdf

63. Бала В. В. Геолого-економічні критерії оцінки вугільних родовищ із незначними запасами : дис. ... канд. геол. наук : 04.00.19. Київ, 2021 // Київський національний університет ім. Т. Шевченка. URL: https://scc.knu.ua/upload/iblock/d48/rw1vdn0zawsw6oeuyxv22k5wqsg02vuud/dis_Bala_V.V..pdf

64. Внаслідок війни Україна втратила 74% видобутку коксівного вугілля : інфографіка // GMK Center. URL: <https://gmk.center/ua/infographic/vnaslidok-vijni-ukraina-vtratila-74-vidobutku-koksivnogo-vugillya/>

65. Про затвердження переліків товарів, експорт та імпорт яких підлягає ліцензуванню, та квот на 2025 рік : Постанова КМУ від 24.12.2024

№ 1481 // Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1481-2024-%D0%BF#Text>

66. В Україні більше не добувають коксівне вугілля: наслідки // The Page. URL: <https://thepage.ua/ua/economy/v-ukrayini-bilshe-nedobuvayut-koksivne-vugillya-naslidk>

67. ПрАТ «Дніпровський металургійний завод». URL: <https://www.dmz-petrovka.dp.ua/index.php?page=news&id=157>

68. Підсумки роботи підприємств УНПА «Укркокс». Дніпро : УНПА «Укркокс», 2017. 85 с.

69. Смирнов В. О., Білецький В. С., Фізичні та хімічні основи га-лузевого виробництва. Львів : Новий Світ-2000, ФОП Піча С. В., 2022. 148 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/5e20b5ce-b797-41bf-9a87-19e495bbaa73/content>

70. Руди заліза // Портал даних видобувної галузі України. URL: https://eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/rudi-zaliza_2022/

71. Інструкція з розрахунку виробничих потужностей коксохімічних підприємств і коксохімічних виробництв. Затверджено наказом Генерального директора УНПА «Укркокс» № 6 від 11 березня 2014 р.

72. Кравченко С. О., Старовойт А. Г., Туркіна О. В., Чаплянко С. В. Аналіз півного фонду коксохімічних виробництв України станом на 01.01.2021. *Вуглехімічний журнал*. 2022. № 3. С. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2022-0-3-23-28>

73. Кравченко С. О., Старовойт А. Г., Туркіна О. В., Чаплянко С. В. Аналіз обсягу виробництва та якості коксу у 2020 році українських коксохімічних підприємств. *Вуглехімічний журнал*. 2022. № 4. С. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2022-0-4-16-21>

74. Вугілля кам'яне // Портал даних видобувної галузі України. URL: https://eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/kamyane-vugillya_2022/

75. ДСТУ 3472:2015 Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 8 с.

76. Дроздник І. Д., Старовойт А. Г., Гусак В. Г. Вугілля для коксування та пилувугільного палива. Харків : Контраст, 2011. 188 с.

77. Дроздник І. Д., Кафтан Ю. С., Шульга І. В. та ін. Аналіз і узагальнення результатів дослідження кернових проб поля шахти Любелська № 1–2 з метою визначення технологічної цінності вугілля цієї шахти як сировини для коксування // Звіт з НДР № 263.2009. Харків : ДП «УХІН», 2009.

78. Савчук В. С. Склад та якість вугілля окремих марок Львівсько-Волинського басейну. *Вісник Дніпропетровського національного університету. Сер.: Геологія, географія*. 2003. Вип. 5. С. 3–11.

79. Вогнетривких матеріалів промисловість // Енциклопедія сучасної України. URL: <https://esu.com.ua/article-35277>

80. Кириченко О. Г., Прутцьков Д. В., Вогнетриви металургійного виробництва : навч.-метод. посіб. / Запорізький національний університет. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi85/0064837.pdf>

81. База даних спеціальних дозволів на користування надрами // Портал відкритих даних України. URL: <https://data.gov.ua/dataset/f0b36102-1b92-4442-895d-a0d839c4d86b/resource/c3166170-18df-44cb-8c17-b61aa5c13cc6>

82. Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2010 року : Закон України від 22.06.2006 № 3458-IV // Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3458-15/ed20060222#n16>

83. Офіційний сайт Геологічної інвестиційної групи GeoGroup. URL: <https://geogroup.com.ua/blog/vapnyak-vydobuvannya-vapnyaku-vykorystannya-jogo-poshyrennya-v-ukrayini/>

Розділ 2

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ НАЯВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ

2.1. Оцінка впливу наявних технологій на довкілля

Видобуток корисних копалин, необхідних для металургійного виробництва, їх переробка і подальше використання в процесі виробництва чавуну за наявних технологій пов'язані з негативним впливом на всі складові біосфери планети: атмосферу, гідросферу та літосферу. Конкретизацію такого впливу за окремими секторами гірничо-металургійного комплексу (далі – ГМК), задіяними у виробництві чавуну, наведено в *табл. 2.1*.

Таблиця 2.1

Вплив окремих підгалузей гірничо-металургійного комплексу на довкілля

Сектор ГМК	Вплив на біосферу		
	Літосфера	Гідросфера	Атмосфера
Коксохімічне виробництво	Розміщення відходів на спеціальних полігонах промислових відходів	Можливі скиди забруднюючих речовин з промисловими стоками	Викиди вугільного та коксового пилу, CO ₂ , CO, NO _x , H ₂ S, SO ₂
Виробництво залізорудної сировини	Порушення цілісності ґрунтів при видобуванні корисних копалин, розміщення відходів на спеціальних полігонах		
Виробництво флюсів		–	Викиди пилу при видобуванні та подрібненні
Виробництво вогнетривів		–	
Виробництво чавуну	Розміщення відходів на спеціальних полігонах промислових відходів	–	Викиди коксового та рудного пилу, CO ₂ , CO, NO _x , SO ₂

Джерело: розроблено авторами

З такого впливу технологій на окремі складові біосфери випливають напрями технологічних перетворень, спрямовані на зменшення техногенного впливу на довкілля підприємств ГМК (рис. 2.1).

У найбільш узагальненому вигляді всі викиди забруднювальних речовин можуть бути поділені на:

- *організовані* – з вихлопних труб систем аспірації об'єктів транспортування, подрібнення, сепарації, сушки, з викидних отворів систем централізованого відведення стічних вод, за розміщення твердих відходів на полігонах, а також за перевантажень і розсіву сировини, напівфабрикатів і кінцевої продукції, тобто ті, які значною мірою можуть бути локалізовані;
- *неорганізовані* – які не можуть бути локалізовані.

Боротьба з неорганізованими викидами має на меті захист довкілля від забруднення і, як правило, здійснюється за допомогою технологічних заходів або переведенням неорганізованих викидів в організовані шляхом спорудження спеціальних установок. Організовані викиди зменшують через очищення в різних апаратах. Заходи зі зменшення викидів, окрім захисту довкілля, одночасно поліпшують і умови праці.

Розглядаючи напрями і можливості зменшення впливу підприємств ГМК на біосферу, необхідно зазначити таке.

Зменшення впливу підприємств ГМК на літосферу може бути досягнуто за рахунок організаційно-технологічних заходів, приклади яких наведено в табл. 2.2.

Найбільший вплив на гідросферу (водні об'єкти) серед підприємств ГМК здійснюють коксохімічні підприємства, найменший – гірничо-збагачувальні комбінати при збагаченні залізної руди флотаційним методом і агломераційне виробництво.

Основним джерелом забрудненої води на коксохімічних підприємствах є волога, яка міститься у вугіллі (10–12 % і більше); певна кількість забрудненої води утворюється в процесах завантаження коксових печей (додатковий конденсат від системи парової інжекції), охолодження і очищення коксового газу (сепараторні води та продувні води циклу кінцевих газових холодильників). Стічні води коксохімічних підпри-

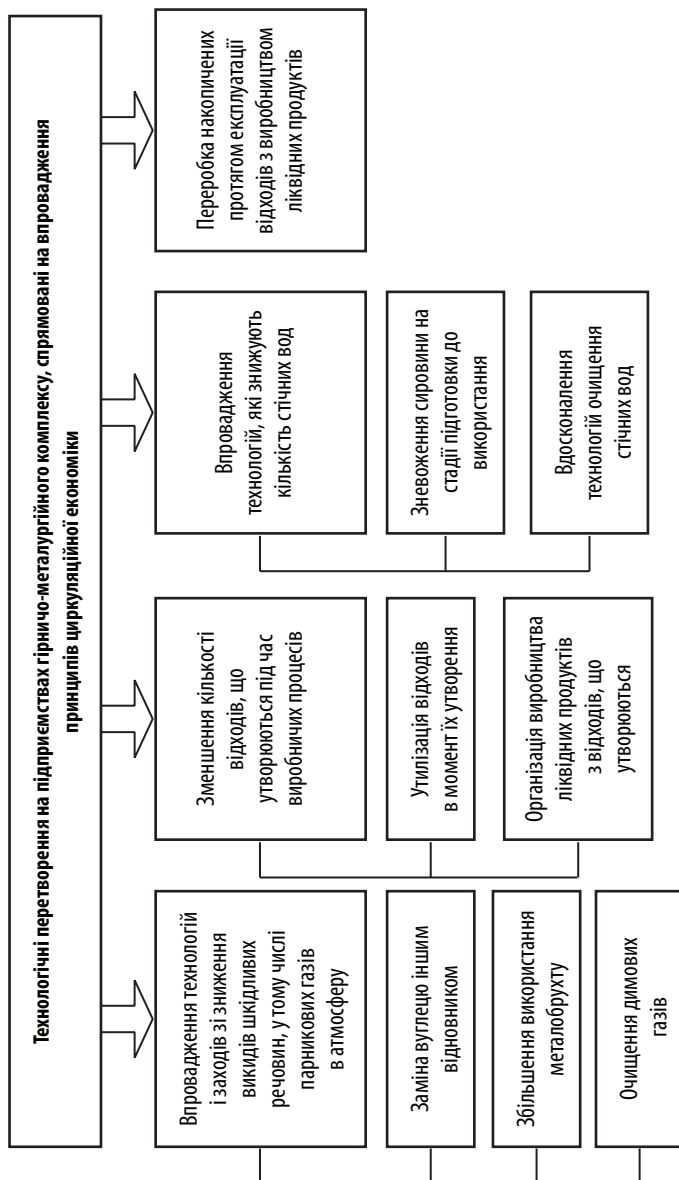


Рис. 2.1. Напрями технологічних перетворень у гірничо-металургійному комплексі, спрямовані на зменшення впливу на довкілля

Ажерело: складено авторами

Таблиця 2.2

Організаційно-технологічні заходи, спрямовані на зменшення техногенного навантаження на літосферу

Організаційно-технологічний захід	Сутність і приклади зменшення техногенного впливу
1	2
Зменшення кількості відходів, що утворюються під час виробничих процесів	Використання більш якісної залізорудної сировини (за вмістом заліза) зменшує потребу у флюсах і в подальшому зменшує кількість відходу (доменного шлаку), що утворюється при отриманні чавуну. Наприклад, при підвищенні вмісту заліза в залізорудній сировині з 65 % до 68 % кількість шлаку, що утворюється за рахунок мінеральної частини сировини, зменшується (в розрахунку на 1 т чавуну з 151,2 кг до 86,1 кг. Пропорційно зменшується потреба у флюсах для отримання шлаку
Утилізація відходів у момент їх утворення	Розробка технологічних регламентів використання відходів, що утворюються в технологічному процесі, в цьому ж технологічному процесі. Наприклад, розроблені в ДП «УХІН» технологічні регламенти додавання до шихти речовин, що утворюються одночасно з цільовими продуктами, дозволили виключити такі речовини з Державного класифікатора відходів ДК 005-96 [1]: смола кисла від сірчаноокислотної обробки фракцій бензолних вуглеводнів; конденсат від очищення парою сховищ, обладнання, трубопроводів та апаратів; фуси кам'яновугільні; розчин, який містить миш'як, сульфід, роданід, миш'яково-содового очищення газу коксового відпрацьований; розчин, який містить сульфід, роданід, відпрацьований від вакуумно-карбонатного очищення від сірки коксового газу; смоли та масла від механічного очищення стічних вод коксохімічного виробництва; продукція неліквідна; продукція виробництва коксопродуктів неліквідна
Організація виробництва ліквідних продуктів із відходів, що утворюються	Приклади: 1. Переробка доменного шлаку, який у гранульованому вигляді може використовуватися як сировина для виробництва шлакопортландцементу. Окремі фракції доменного шлаку можуть використовуватися при будівництві доріг як аналог щебню;

Закінчення табл. 2.2

1	2
Переробка накопичених протягом експлуатації відходів з виробництвом ліквідних продуктів	2. Збагачення раніше накопичених відходів вуглезнагачення – так званих шламів (хвостів флотації). Сучасні технології збагачення дозволяють вилучати вугілля з цих відходів для подальшого використання як сировини для коксування

Джерело: розроблено авторами

емств містять широкий спектр шкідливих сполук (амоній, роданіди, феноли й інші небезпечні речовини).

Тобто зниження впливу стічних вод на довкілля може бути досягнуте як за рахунок зменшення їх утворення, так і за рахунок підвищення якості очищення.

Одним із напрямів зниження кількості стічних вод, що утворюються, є зменшення вологості вихідного вугілля, яке постачається на коксування. Досягти цього можна шляхом включення до технологічної схеми вуглезнагачувальних фабрик установок з підсушування збагаченого вугілля (як це було поширено в минулі роки). Економічну доцільність організації підсушення вугільного концентрату безпосередньо після збагачення на вуглезнагачувальних фабриках обґрунтовано в роботі [2].

Зневоднення шихти на самому коксохімічному підприємстві можна досягти шляхом спеціальної технології – термopідготовки шихти перед завантаженням у коксові печі. Сутність цієї технології полягає у нагріві шихти до температури 150 °C і подачі в камеру коксування вже нагрітої і зневодненої шихти. При цьому збільшується густина насипної маси шихти і скорочується період коксування (тобто збільшується продуктивність коксової батареї). Така технологія мала промислове впровадження на коксовій батареї № 4 ПрАТ «Ясинівський КХЗ». Експлуатація цього промислового комплексу була зупинена після початку бойових дій на Донбасі в 2014 р. Але накопичений промисловий досвід свідчить про певні переваги цієї технології, зокрема в частині зниження утворення стічних вод коксохімічних підприємств [3].

Очищення стічних вод коксохімічних підприємств передбачає переробку надсмольної води (відгонка з неї леткого аміаку та подальше

знефенолювання води паровим методом) та її подальше доочищення на біохімічній установці.

Технологічна схема тріступінчастої біохімічної установки ДП «ГИПРОКОКС» передбачає:

I ступінь – знефенолювання води;

II ступінь – видалення тіоціанідів;

III ступінь – доочищення стічної води разом із побутовими водами.

Згідно з вимогами «Правил технічної експлуатації коксохімічних підприємств» [4] вміст шкідливих речовин у біохімічно очищеній воді складає: аміаку – не більше 2 г/дм^3 , органічних речовин – не більше $0,001 \text{ г/дм}^3$. Більш глибоке очищення можливе за рахунок впровадження мембранних технологій очищення і доочищення стоків після біохімічної установки [5-7].

Вплив коксохімічних підприємств на гідросферу зменшується у випадку, коли застосовується спосіб мокрого гасіння коксу, за яким валовий кокс, виданий з коксовий печі, охолоджується стічною водою після біохімічного очищення, і пари цієї води спрямовуються в атмосферу.

Перевагами мокрого гасіння коксу є незначні капітальні витрати, відсутність пиління коксу під час сортування та відвантаження, а також можливість зробити водний цикл коксохімічного підприємства замкненим і дефіцитним, що означає відсутність скидів стічних вод у довкілля.

Але цей спосіб лише змінює напрям впливу: замість забруднення ґрунту чи водних об'єктів шкідливі речовини (коковий пил, феноли, аміак, оксиди сірки та вуглецю, які утворюються внаслідок хімічних реакцій за гасіння коксу водою) потрапляють у повітря.

В агломераційному виробництві воду використовують на зволоження руди, охолодження устаткування, очищення відхідних газів, вентильованого повітря тощо. Загальна витрата води складає $3,5\text{--}7,0 \text{ м}^3$ на 1 т агломерату (в т. ч. $3\text{--}5 \text{ м}^3$ води забруднюється феромагнітними домішками руди). Стічні води містять: хлориди Cl^- , сульфідів S^{2-} , іони кальцію Ca^{2+} , магнію Mg^{2+} , гідроксил-іони OH^- , оксиди заліза FeO , Fe_2O_3 , малорозчинний гідроксид кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$, вуглець С. Вміст зваженої часток у стічних водах аглофабрик коливається в межах $12\text{--}20 \text{ г/дм}^3$.

У них міститься до 7 % феромагнітних шламів, що є сумішшю руди та вапнякового пилу. Крім того, забруднені стічні води утворюються під час гідротранспортування пилу, уловленого в очисних апаратах, просипів з обпалювальних машин та пилових мішків, а також унаслідок змулювання осаду в зумпах – ємностях для збору шламу.

Для зниження обсягу стічних вод на аглофабриках застосовують системи оборотного водопостачання з підживленням систем свіжою технічною водою для компенсації випаровування, що виключає скид забруднених стоків до природних водних басейнів. Для очищення стічних вод аглофабрик головним чином застосовують процеси відстоювання (освітлення), які здійснюються у радіальних відстійниках або апаратах гідроциклонного типу. Для інтенсифікації процесу освітлення застосовують синтетичні флокулянти, призначені для загрублення механічних домішок.

Під час виробництва чавуну на охолодження доменної печі, де розвиваються дуже високі температури, витрачається величезна кількість води – до $30 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну, що спричиняє теплове забруднення довкілля. Забруднені стічні води утворюються також під час очищення доменного газу, на машинах для розливки чавуну, в газопроводах, під час грануляції доменного шлаку, гідралічного прибирання пилу в підбункерних приміщеннях.

Під час очищення 1000 м^3 газу утворюється $4\text{--}6 \text{ м}^3$ стічних вод, які містять пил (частки руди, коксу, флюсів, агломерату), хімічні сполуки (сульфати SO_4^{2-} , хлориди Cl^-), а також розчинені гази. Загальна кількість стічних вод, утворюваних від змиву просипів та пилу, сягає $300\text{--}360 \text{ м}^3/\text{годину}$ на кожну доменну піч.

Витрата води на одну машину для розливки чавуну складає $\approx 350 \text{ м}^3/\text{годину}$. У стічних водах від цих машин містяться уламки застиглого чавуну, окалина Fe_2O_3 , коксовий дрібняк, графіт, вапно $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та вапняковий шлам CaCO_3 , що призводить до утворення лужних стоків. Кількість стічних вод при цьому сягає 70–80 % від спожитої води. Внаслідок охолодження насиченого водяною парою газу в газопроводах утворюється конденсат у кількості $20\text{--}40 \text{ дм}^3/1000 \text{ м}^3$ газу. Він містить феноли $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, ціаніди CN , нафталін C_{10}H_8 , оливи, смоли, сірку.

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

Під час грануляції доменного шлаку витрачається до 2 м³ води/т рідкого чавуну. Стічні води містять сульфати, хлориди та розчинений сірководень H₂S.

Забруднені стічні води доменного виробництва, як правило, не скидають до природних водойм, а використовують в оборотному водопостачанні. Вода очищується від шкідливих домішок у радіальних відстійниках, охолоджується на градирнях та знов повертається в оборот. Для поліпшення освітлення води застосовують реагентні методи освітлення.

На відміну від літо- і гідросфери, негативний вплив на атмосферу діяльності металургійних підприємств є більш масштабним. Найбільшими за масою забруднюючими атмосферу речовинами є такі (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Забруднюючі речовини, що викидаються в атмосферу при роботі підприємств ГМК

Забруднююча речовина	Характеристика, джерела утворення	Технічні рішення, спрямовані на зменшення викидів забруднюючої речовини
1	2	3
Пил (гірничо-збагачувальні, коксохімічні, металургійні підприємства)	Тонкодисперсні тверді частки вихідних матеріалів (вугілля, коксу, залізної руди, вогнетривкої глини і піску тощо), які утворюються під час видобування, перероблення, транспортування та використання цих матеріалів	Впровадження систем аспірації повітря. Використання очищення повітря у виробничій зоні за допомогою рукавних фільтрів, електрофільтрів тощо
Діоксид вуглецю – CO ₂ (коксохімічні та металургійні підприємства)	Утворюється під час спалювання палива та відновлення заліза з залізної руди	Комерційно привабливі технології уловлювання діоксиду вуглецю на цей час відсутні. Запобігання утворенню цієї речовини можливо тільки шляхом заміни вуглецю не-вуглецевим паливом та відновником

Розділ 2. Екологічні аспекти наявних технологій чорної металургії

Закінчення табл. 2.3

1	2	3
Монооксид вуглецю – CO (коксохімічні та металургійні підприємства)	Утворюється під час спалювання палива та відновлення заліза з залізної руди	Регулювання режимів спалювання палива (передусім режиму подачі повітря)
Оксиди азоту – NO _x (коксохімічні та металургійні підприємства)	Утворюються під час спалювання палива	
Сірководень – H ₂ S (коксохімічні підприємства)	Утворюється під час піролізу вугілля в процесі виробництва коксу	Використання палива з меншим вмістом сірки. Запровадження технологій очищення коксового газу від сірководню
Діоксид сірки – SO ₂ (коксохімічні та металургійні підприємства)	Утворюється під час спалювання палива, яке містить у своєму складі сірковмісні речовини	Використання палива з меншим вмістом сірки

Джерело: розроблено авторами

Усі ці речовини (крім діоксиду вуглецю) є токсичними, тобто такими, які здатні негативно впливати не тільки на довкілля, а й на здоров'я людини. Діоксид вуглецю є парниковим газом, накопичення якого в атмосфері призводить до таких глобальних негативних кліматичних змін, які за наслідками перевищують ту шкоду, яку здійснюють інші забруднюючі речовини.

На коксохімічних підприємствах викиди пилу відбуваються під час розвантаження з залізничних вагонів вугілля та завантаження в вагони товарних фракцій коксу, а також при мокрому гасінні коксу.

Головна частка забруднень атмосферного повітря пилом безпосередньо на металургійних підприємствах припадає на агломераційне виробництво [8]. Джерелами забруднень є агломераційні стрічки, барабанні та чашкові охолоджувачі агломерату, обпалювальні печі, вузли пересипання, транспортування, сортування за крупністю агломерату та

компонентів агломераційної шихти (руди, коксового дрібняку, вапняку тощо). Виділення пилу відбувається як безпосередньо на устаткуванні, так і в аспіраційних системах дробарок, грохотів і бункерів відвантаження агломерату. Сумарне виділення пилу становить ≥ 11 кг/т агломерату.

Для зменшення викидів пилу в атмосферу в агломераційному виробництві піддають очищенню: гази агломераційних машин (до 7 кг пилу на 1 т агломерату), викиди охолоджувачів агломерату (до 1,2 кг пилу на 1 т агломерату), викиди обпалювальних печей, вентиляційні викиди дробарок, грохотів, бункерів, транспортерів.

У доменному виробництві, крім санітарного очищення газових викидів перед скиданням їх до атмосфери, першочергове значення має очищення технологічне. Утворений доменний газ завжди забруднений колошниковим пилом, що є сумішшю дрібних часток руди, коксу, агломерату, вапняку та інших матеріалів, завантажених у доменну піч. Цей пил утворюється внаслідок механічного подрібнення матеріалів під час їх підготовки, транспортування, завантаження та стирання під час руху в шахті печі.

Питомий вихід пилу становить за нормального тиску на колошнику 50–150 кг/т чавуну, а під час роботи за підвищеного тиску — 25–75 кг/т під час виплавки передільного чавуну, призначеного для переплавки на сталь. Щоб запобігти засміченню горілочних пристроїв та утворенню відкладень у газопроводах, доменний газ має бути попередньо очищений від пилу. Використовують кілька ступенів очищення:

- *грубе* – в сухих пиловловлювачах до вмісту пилу в газі не більше 3–10 г/м³;
- *напівтонке* – у мокрих пиловловлювачах (звичайних скруберах і скруберах Вентурі) до вмісту пилу в газі не більше 0,5 г/м³;
- *тонке* – у дросельній групі або мокрих трубчастих електрофільтрах до вмісту пилу менше 10 мг/м³.

Найбільшими за масою викидами в атмосферу є викиди парникового газу – діоксиду вуглецю (CO₂). Основною причиною є те, що саме вуглець використовується в металургійних процесах як висококалорійне паливо (для досягнення необхідних температур) і одночасно – як

Розділ 2. Екологічні аспекти наявних технологій чорної металургії

відновник (для отримання металу з його оксидів). За оцінками Міжнародної енергетичної агенції, у 2020 р. світова металургія 74 % усіх енерговитрат задовольняла за рахунок вугілля, внаслідок чого вона продукувала 7 % загальних світових щорічних викидів діоксиду вуглецю [9].

Масовість викидів діоксиду вуглецю пояснюється передусім сутністю хімічної реакції окислення вуглецю (приєднання до атому вуглецю двох атомів кисню: чи то при спалюванні (приєднується атмосферний кисень: $C + O_2 \rightarrow CO_2$), чи то при використанні як відновника (кисень, що міститься в молекулі оксиду, який відновлюється: $3C + Fe_2O_3 \rightarrow 2Fe + 3CO_2$). Отже, з огляду на атомні маси елементів, під час використання 12 т вуглецю утворюється 44 т його діоксиду.

Додатковим джерелом утворення діоксиду вуглецю у доменному виробництві є використання флюсів (вапняку чи доломіту). Наприклад, вапняк (хімічна формула $CaCO_3$) за високих температур розкладається на оксид металу (CaO) та власне – діоксид вуглецю.

Використання вуглецю та його монооксиду (CO) практично у всіх секторах ГМК призводить до відповідних викидів парникового газу. У табл. 2.4 наведено джерела утворення викидів CO_2 на стадіях підготовки сировини і напівфабрикатів для отримання чавуну і сталі

Таблиця 2.4

Утворення діоксиду вуглецю на окремих стадіях металургійного виробництва

Стадії металургійного виробництва	Характеристика процесу	Утворення діоксиду вуглецю, кг/т продукції
1	2	3
Виробництво доменного коксу	Процес коксування (піролізу) вугілля протікає за високих температур. У процесі піролізу, крім твердого залишку – коксу, отримується коксовий газ, який після очищення спалюється в опалювальних простінках коксових печей для досягнення необхідної температури піролізу. Коксовий газ містить у своєму складі монооксид вуглецю (CO) і діоксид (CO_2) вуглецю, а також значну кількість водню (близько 60 %)	90–140

Закінчення табл. 2.4

1	2	3
Виробництво агломерату	Процес застосовується для огрудкування дрібних фракцій залізорудного концентрату за високих температур, які досягаються шляхом спалювання коксового дрібняку (фракція коксу 0–10 мм)	183,1÷327
Виробництво феросплавів	Процес застосовується для виробництва сплавів заліза з легуючими елементами (кремній, марганець, хром тощо); процес отримання феросплавів протікає за високих температур, які досягаються за рахунок електричного нагріву. Коксовий горіх (фракція коксу 10–25 мм), що використовується як відновник, утворює оксид вуглецю CO, який за подальшого спалювання утворює діоксид вуглецю	1171÷2240

Примітка: діапазон викидів діоксиду вуглецю пояснюється якістю сировини, що перероблюється.

Джерело: розроблено авторами

Але основна кількість діоксиду вуглецю утворюється саме на стадії отримання чавуну. У табл. 2.5 наведено розрахунок викидів діоксиду вуглецю як безпосередньо в доменному виробництві, так і з урахуванням тих, що утворюються на попередніх стадіях.

Таблиця 2.5

Розрахунок викидів діоксиду вуглецю під час виробництва 1 т чавуну з урахуванням викидів, пов'язаних із виробництвом сировини та напівфабрикатів

Показники	На одиницю продукції	На 1 т чавуну
1	2	3
Вихідні дані		
Витрати коксового газу на отримання доменного коксу*)	144-167 м³/т доменного коксу	
Викиди діоксиду вуглецю під час спалювання 1 тис. м³ коксового газу *)	639-817 кг/тис. м³ газу	
Витрати доменного коксу на виробництво чавуну *)		400-450 кг/т

Закінчення табл. 2.5

1	2	3
Витрати пиловугільного палива на виробництво чавуну *)		200-100 кг/т
Викиди діоксиду вуглецю під час використання пиловугільного палива	2800 кг/т палива	
Витрати флюсів на 1 т чавуну (табл. 1.17)		0,5 т/т
Викиди діоксиду вуглецю при використанні 1 т флюсів (вапняку)	440 кг/т флюсів	
Розрахунок		
Викиди діоксиду вуглецю під час отримання 1 т доменного коксу	90-140 кг/т	
Викиди діоксиду вуглецю під час використання коксу як палива і відновника (з урахуванням викидів під час виробництва коксу і подальшого спалювання доменного газу)		1452-1615 кг/т чавуну
Викиди діоксиду вуглецю під час використання пиловугільного палива		297-594 кг/т чавуну
Утворення діоксиду вуглецю при розкладі 1 т флюсів (вапняку)		220 кг/т чавуну
Усього викиди діоксиду вуглецю в розрахунку на 1 т чавуну		2132-2266 кг/т

Примітка: *) – за даними ДП «УХІН»

Джерело: розраховано авторами

З табл. 2.5 впливають основні напрями зменшення «вуглецевого сліду» під час виробництва сталевих виробів:

1. Відмова від використання чавуну під час виплавки сталі з його заміною металобрухтом.
2. Заміна вуглецю іншим паливом і відновником.

Відмова від доменного виробництва і орієнтація сталеплавильного виробництва на використання металобрухту є відносно екологічно чис-

тим процесом: реакції відновлення за таким процесом майже не протікають, а необхідна температура для переплавки металобрухту на сталь досягається за рахунок використання електроенергії в спеціальних електродугових сталеплавильних печах. Але кліматична нейтральність отримання сталі досягається тільки під час використання «зеленої» електроенергії чи електроенергії, отриманої на атомних електростанціях. Якщо електроенергія виробляється з викопних (тобто вуглецевмісних) видів палива, значні обсяги викидів діоксиду вуглецю утворюються не на стадії металургійного виробництва, а на стадії виробництва електроенергії.

Ще однією перевагою використання металобрухту є те, що відповідає необхідність у використанні флюсів (які є джерелом утворення CO_2) для зрідження мінеральних речовин, що містяться в коксі та залізорудній сировині.

Стимувальним фактором поширення такої технології є дефіцит металобрухту. Згідно зі сценаріями Mission Possible Partnership, IEA та E3G, очікується, що частка металобрухту в залізовмісній сировині зросте приблизно з сьогоднішніх 30 % до 45 % у 2050 р. [10]. Крім того, необхідно враховувати постійно зростаючу потребу людства у сталі і сталевих виробах.

Навіть за умови 100 % повторного використання у сталеплавильному виробництві відпрацьованих металевих виробів металобрухт не може повністю задовольнити зростаючу глобальну потребу в металопрокаті. Отже, переробка металобрухту може розглядатися як додаткова технологія задоволення потреб у металопрокаті. Більш перспективним напрямом зниження викидів парникового газу є заміна вуглецевого відновника іншим.

Замінником відновника-вуглецю може бути водень, або синтез-газ (суміш водню та монооксиду вуглецю). У табл. 2.6 наведено порівняння кількості стехіометрично утворюваного діоксиду вуглецю під час використання різних відновників, а також кількість парникового газу, що утворюється при спалюванні відновника для досягнення необхідних температур.

Таблиця 2.6

Утворення діоксиду вуглецю при використанні різних відновників

Хімічна реакція	Стехіометричне утворення CO ₂ за реакцією, т/т заліза	Витрати відновника як палива для досягнення температур реакції, т/т заліза	Утворення CO ₂ під час спалювання відновника, т/т заліза	Сумарні викиди CO ₂ , т/т заліза
Відновлення заліза вуглецем				
$2\text{FeO} + \text{C} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{CO}_2$	0,393	0,053	0,193	0,586
$2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 4\text{Fe} + 3\text{CO}_2$	0,589	0,096	0,352	0,941
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + 2\text{CO}_2$	0,524	0,100	0,297	0,821
Відновлення заліза воднем				
$\text{FeO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	-	0,018	-	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$	-	0,032	-	-
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2 \rightarrow 3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O}$	-	0,033	-	-
Відновлення заліза синтез-газом (співвідношення H ₂ : CO = 1 : 1)				
$6\text{FeO} + 3\text{H}_2 + 3\text{CO} \rightarrow 6\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2$	0,393	0,239	0,818	1,211
$2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 + 3\text{CO} \rightarrow 4\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2$	0,589	0,432	1,478	2,067
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{H}_2 + 2\text{CO} \rightarrow 3\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$	0,524	0,450	1,539	2,063
Відновлення заліза синтез-газом (співвідношення H ₂ : CO = 4 : 1)				
$5\text{FeO} + 4\text{H}_2 + \text{CO} \rightarrow 5\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	0,157	0,064	0,183	0,340
$5\text{Fe}_2\text{O}_3 + 12\text{H}_2 + 3\text{CO} \rightarrow 10\text{Fe} + 12\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO}_2$	0,236	0,115	0,328	0,564
$5\text{Fe}_3\text{O}_4 + 16\text{H}_2 + 4\text{CO} \rightarrow 15\text{Fe} + 16\text{H}_2\text{O} + 4\text{CO}_2$	0,210	0,120	0,342	0,552

Джерело: розраховано авторами

Наведені в табл. 2.6 значення є теоретично мінімальними і не враховують викиди діоксиду вуглецю, які утворюються під час здійснення

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

інших допоміжних процесів, зокрема під час розкладу карбонатів, які входять до складу флюсів.

Отже, дієвим напрямом зниження викидів діоксиду вуглецю під час виробництва металопродукції є заміна вуглецю воднем, або синтез-газом, який містить високу концентрацію водню.

Отримання водню в промислових масштабах можливо різними способами (табл. 2.7).

Таблиця 2.7

Основні промислові способи отримання водню

Спосіб	Сутність	Переваги та недоліки
1	2	3
Парова каталітична конверсія метану природного газу	Нагрів метану з водяною парою і збагачення суміші повітрям і киснем; подача до конвектора, в якому протікає процес отримання водню за узагальненою реакцією: $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	<i>Переваги:</i> отримуваний синтез-газ містить 75 % (об.) водню, що робить спосіб привабливим для прямого відновлення заліза. <i>Недоліки:</i> потребує ресурсів недорогого природного газу, які відсутні в Україні
Виділення водню з коксового газу	Розділення коксового газу шляхом короткоциклової абсорбції або послідовного зрідження усіх компонентів газової суміші, окрім водню	<i>Переваги:</i> сировиною є недорогий коксовий газ, який містить близько 60 % (об.) H_2 ; <i>Недоліки:</i> відсутність вільних ресурсів коксового газу внаслідок недозавантаженості виробничої потужності коксохімічних виробництв
Газифікація вугілля	Взаємодія вугілля з водяною парою або водою і киснем з отриманням суміші водню, оксиду і діоксиду вуглецю	<i>Переваги:</i> сировиною є малометаморфоване вугілля, яке здобувається в Україні. <i>Недоліки:</i> значна кількість вугілля перетворюється на оксиди вуглецю і в подальшому скидається в атмосферу у вигляді діоксиду вуглецю

Закінчення табл. 2.7

1	2	3
Електроліз води	Розклад води на окремі складові під впливом постійного струму: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	Переваги: екологічно чисте виробництво; Недоліки: спосіб потребує значних витрат електроенергії

Джерело: розроблено авторами з урахуванням [11]

Розвиток безкоксової металургії у світі пов'язаний саме з використанням як відновника синтез-газу, який отримується шляхом парової каталітичної конверсії метану природного газу. Перевагою такого відновника є високий вміст водню – 75–80 % (об.), тобто основна частка заліза відновлюється саме воднем, без додаткового утворення діоксиду вуглецю. Спосіб знайшов поширення в країнах, де є достатні ресурси недорогого природного газу. Але такий напрям є непридатним для українських реалій внаслідок недостатнього видобутку вітчизняного природного газу і високих цін на імпортерне паливо.

Отримання водню з коксового газу є привабливим, коли коксохімічні підприємства працюють на рівні, близькому до 100 % використання виробничої потужності. За таких умов близько 40 % коксового газу, що утворюється при коксуванні вугілля, є надлишковими та можуть бути спрямовані на отримання водню. На цей час значна кількість потужностей вітчизняної коксохімії зруйнована або тимчасово окупована. Підприємства, які знаходяться на контрольованій території, відчувають дефіцит сировини і через низький рівень використання виробничої потужності не мають надлишкових ресурсів коксового газу.

Отже, для сучасних умов України єдиним напрямом розвитку безкоксової металургії є пряме відновлення заліза воднем, який отримується шляхом газифікації вугілля або шляхом електролізу.

Недоліком відомих процесів газифікації вугілля є висока концентрація оксиду вуглецю в синтез-газі (співвідношення водень : монооксид вуглецю орієнтовно 1 : 1,5–2), що отримується. Це не дозволяє досягнути значного зниження викидів діоксиду вуглецю в атмосферу. На відміну від цього способу, електроліз є екологічно чистою технологією (за

умови, що виробництво необхідної електроенергії не супроводжується викидами парникових газів).

Отже, перспективним є поєднання процесу газифікації з електролізом води, як це запропоновано нами у [12] для виробництва синтетичного моторного палива. Сутність пропозиції полягає у використанні для газифікації вугілля процесу Техасо (прямоточна киснева газифікація в потоці водовугільної пульпи). Відмінністю процесу Техасо від інших процесів газифікації є те, що він передбачає супутнє виробництво водяної пари у такій кількості та з такими параметрами, які дають змогу спрямувати її на енергоустановку для виробництва електроенергії. Кількість електроенергії, що отримується, суттєво перевищує технологічні потреби як газифікації вугілля, так і подальшої переробки синтез-газу. Цю електроенергію запропоновано спрямувати на електроліз води з отриманням додаткових ресурсів водню.

Раніше в [13] нами було розроблено техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування такого способу для подальшого виробництва синтетичного моторного палива.

Виконані нами розрахунки [14] показують, що під час застосування газифікації вугілля, суміщеної з електролізом води, і спрямування збагаченого воднем синтез-газу на виробництво заліза прямого відновлення викиди діоксиду вуглецю очікуються на рівні не більше 0,5 т/т заліза. Такий рівень є суттєво нижчим, ніж фактичний рівень українських металургійних підприємств – 2,0-2,3 т/т чавуну (табл. 2.5).

На користь такого напрямку декарбонізації металургійного виробництва свідчить таке. Ресурси кам'яного вугілля, придатного для газифікації, оцінюються на рівні 22,4 млрд т [21], а потенційні ресурси окотишу для виробництва заліза прямого відновлення – на рівні 41–47 млн т/рік [22].

Отже, Україна має потенційні можливості відмовитися від доменного виробництва, як превалюючого способу отримання заліза, і перейти на безкоксову металургію.

Водночас повністю відмовитися від доменного виробництва неможливо, принаймні з тієї причини, що існує потреба саме в чавуні,

який використовується у ливарному виробництві та має попит на світовому ринку. Крім того, феросплавна промисловість також потребує саме коксу як відновника.

Це робить актуальними подальші дослідження щодо декарбонізації коксового виробництва.

2.2. Законодавче регулювання викидів парникових газів металургійними підприємствами в країнах ЄС

У 2020 році Європейський Союз (ЄС) вирішив зробити значний крок уперед у боротьбі зі зміною клімату, підвищивши свої кліматичні цілі до щонайменше 55 % чистого скорочення викидів парникових газів (ПГ) до 2030 року порівняно з викидами 1990 року, та зобов'язався досягти вуглецевої нейтральності до 2050 року [17].

У квітні 2023 року ЄС прийняв пакет заходів «Fit for 55», який містив масштабну реформу Системи торгівлі викидами Європейського Союзу (EU ETS). Пакет передбачає швидше скорочення обмежень на викиди та поступове скасування безкоштовних квот у період з 2025 по 2034 рр. Ці заходи посилили занепокоєння щодо витоку вуглецю, коли впровадження внутрішньої кліматичної політики частково переносить виробництво та викиди до країн з менш суворими політиками. Щоб зменшити цей ризик, ЄС запровадив механізм коригування вуглецевих кордонів (СВАМ), за яким передбачається сплата коригування за викиди, пов'язані з їх імпортом (ціна квот в рамках EU ETS за вирахуванням будь-якої внутрішньої ціни на вуглець, вже сплаченої в третій країні).

ЄС не є єдиним учасником цих зусиль: понад 100 країн у всьому світі взяли на себе зобов'язання досягти цілей вуглецевої нейтральності до середини століття.

Основним інструментом управління викидами парникових газів традиційно вважаються квоти на викиди вуглецю, які розглядаються як товар і в багатьох країнах виступають об'єктом купівлі-продажу. Вартість цих квот у різних країнах коливається в широких діапазонах. Наприклад, у 2023 році квоти на викиди вуглецю в EU ETS становили

майже 100 євро за тону, тоді як у рамках Регіональної ініціативи щодо парникових газів (RGGI), яка охоплює 11 східних штатів США, їхня ціна була близько 14 доларів США за тону. У Китайській Народній Республіці в цей же час вартість квоти сягала 8 доларів США за тону [18].

У разі відсутності міжнародної координації щодо ціноутворення на вуглець відмінності у суворості внутрішньої кліматичної політики створюють ризики негативних міжнародних наслідків: витрати на дотримання вимог вітчизняними підприємствами можуть призвести до того, що імпорт з країн з менш амбіційними нормами отримає перевагу у виробничих витратах над вітчизняними товарами [19]. Ця втрата конкурентоспроможності для вітчизняних підприємств з високим рівнем викидів, що залежать від торгівлі, створює ризик зменшення підтримки промисловості та громадськості щодо кліматичної політики. Паралельною проблемою є витік вуглецю, коли іноземні викиди збільшуються після запровадження або посилення внутрішньої кліматичної політики, що підриває глобальну ефективність зусиль із пом'якшення наслідків зміни клімату [20]. У рамках ЄС ETS ці проблеми переважно вирішувалися шляхом розподілу безкоштовних квот. У 2005–2007 рр. безкоштовні квоти розподілялися на основі історичних викидів підприємств.

Починаючи з 2013 р. розподіл перейшов на конкретні для кожного продукту еталонні значення, з поступовим зменшенням загальної кількості безкоштовних квот, за винятком підприємств у секторах, класифікованих як такі, що мають «значний ризик витоку вуглецю», а саме в галузях з високим рівнем викидів, що піддаються впливу торгівлі. Обґрунтування безкоштовних квот є інструментом запобігання переміщенню виробництва та викидів до країн з менш суворими екологічними нормами [21]. Аналогічно, міркування конкурентоспроможності часто слугують підставою для звільнення від енергетичного податку в країнах ЄС, особливо для великих енергоємних компаній. Однак і безкоштовні квоти, і звільнення від енергетичного податку послаблюють стимули до скорочення викидів і несумісні з довгостроковими амбіціями ЄС щодо досягнення нульового рівня викидів [22; 23].

Прикордонне коригування викидів вуглецю (Carbon Border Adjustment Mechanism (СВАМ)) є альтернативним варіантом політики для усунення ризику витоку викидів вуглецю. Мета полягає у вирівнюванні умов конкуренції між підприємствами, розташованими в країнах, що впроваджують найамбітнішу політику ціноутворення на викиди вуглецю, та підприємствами, що діють у більш м'яких юрисдикціях. СВАМ фактично є зборами на імпортні товари, що базуються на ціні викидів вуглецю, яку вони мали б сплатити, якби були вироблені всередині країни. Дослідження показують, що СВАМ теоретично можуть ефективно зменшити витік вуглецю та сприяти впровадженню більш амбітної кліматичної політики в інших країнах [24; 25]. Однак СВАМ також піддаються критиці через те, що вони можуть виступати формою протекціонізму [26] і можуть створювати напруженість у відносинах із глобальними торговельними правилами. Крім того, розробка ефективного та реалістичного СВАМ є складним завданням [27]. Проте у грудні 2022 року Рада ЄС та Європейський парламент оголосили про запровадження Європейського механізму коригування вуглецевих кордонів (СВАМ), який має на меті усунути ризик обходу європейськими компаніями кліматичної політики ЄС шляхом аутсорсингу та сприяти більш чистому промисловому виробництву в країнах, що не входять до ЄС. Після перехідного періоду імпортери певних енергоємних товарів до ЄС будуть зобов'язані сплачувати на європейському кордоні коригування за викиди, пов'язані з їх імпортом, що відповідає ціні квот за системою EU ETS за вирахуванням будь-якої явної ціни на вуглець, вже сплаченої в країні-експортері. СВАМ ЄС буде першим у своєму роді: єдиним наявним подібним механізмом є каліфорнійський вуглецевий податок, що застосовується до певних імпортних поставок електроенергії [28]. Однак кілька країн, таких як Канада та Велика Британія, планують запровадити подібні механізми прикордонного коригування, а Австралія наразі вивчає варіанти політики. Влада Великої Британії оголосила про введення СВАМ у 2027 році.

Хоча СВАМ може вирішити проблему витоку вуглецю, залишаються відкритими важливі питання щодо структури та впливу СВАМ ЄС. Згідно з переглянутою Системою торгівлі викидами ЄС, загальне об-

меження викидів компаній, що підпадають під дію Системи торгівлі викидами ЄС, знижуватиметься швидше, ніж раніше, що підвищить ціни на вуглець для виробників ЄС. Водночас безкоштовні квоти на викиди, які енергоємні галузі промисловості, що зазнають міжнародної конкуренції, отримували протягом багатьох років, будуть поступово скасовані, а це означає, що ці галузі почнуть платити більше за свої викиди вуглецю. Ці вищі витрати на вуглець створюють ризик переорієнтації виробництва, а отже, і викидів, за кордон, що підриває економічну конкурентоспроможність ЄС та глобальні зусилля зі скорочення викидів вуглецю.

Очікується, що подолати ці ризики дозволить запровадження СВАМ, що вимагає від імпортерів ЄС купувати «сертифікати СВАМ», що відображають вміст вуглецю. Спочатку СВАМ охоплює перелік із 303 енергоємних продуктів (залізо та сталь, цемент, добрива, алюміній, електроенергія та водень). Разом ці продукти становлять близько 3 % імпорту ЄС [29]. СВАМ – це новий регламент ЄС, спрямований на вирішення проблеми витоку викидів вуглецю та створення стимулів для виробників з країн, що не входять до ЄС, для скорочення викидів [30; 31].

Необхідність заміни безкоштовних квот на механізм транскордонного регулювання викидів пояснюється необхідністю вирівнювання граничних витрат на скорочення викидів серед підприємств і більш справедливого розподілу тягаря кліматичної політики відповідно до цілей соціальної ефективності [32]. На практиці квоти на викиди можуть розподілятися неоптимально. Це може бути пов'язано з трансакційними витратами [33], недосконалою конкуренцією [34] та поведінковими аномаліями, такими як ефект наділення [35; 36], що призводить до неоптимальних результатів [37; 38]. Крім того, надмірний розподіл дозволів може відбуватися, коли розподіл базується на принципі «grandfathering», який спирається на історичні викиди підприємств; коли еталони є застарілими або не мають достатньої деталізації; або коли існує обмежена реакція на макроекономічні або технологічні шоки в поєднанні з мінімальними коригуваннями на основі обсягів виробництва. На початку впровадження (2005–2007 рр.) ЄС ETS розподіл без-

коштовно розподілених квот був пов'язаний з історичними еталонними показниками [39], що є практикою, яка демонструє обмежену реакцію на зовнішні шоки або зміни в технології та продуктивності. Як наслідок, такий підхід призвів до значного надлишку безкоштовних квот, що зменшило передбачуваний сигнал щодо ціни на вуглець і послабило стимул для сприяння інвестиціям у низьковуглецеві виробничі процеси [40]). Отже, хоча викиди в секторі енергетики зменшилися на 29,4 % між 2012 і 2022 роками, скорочення викидів у промислових секторах (які отримують безкоштовні квоти) склало, за даними Європейського агентства з охорони навколишнього середовища, лише 13,7 %. У тому ж ключі [41] зазначають, що вплив EU ETS на викиди вуглецю негативно корелює з щедрістю розподілу безкоштовних квот серед регульованих об'єктів. Правила розподілу безкоштовних квот зазнали суттєвих покращень протягом терміну дії EU ETS. У контексті наступної фази торгівлі викидами (2021–2030 рр.) було внесено кілька змін для розподілу безкоштовних квот на основі більш актуальних рівнів виробництва [42; 43]. До них належать щорічні коригування розподілу, періодичні п'ятирічні перегляди переліку об'єктів, що мають право на безкоштовні квоти, та оновлення 54 еталонних значень, які визначають рівень безкоштовних квот для кожної установки.

Все це пояснює об'єктивну необхідність впровадження альтернативи безкоштовним квотам, а саме – введення СВАМ, метою якого є запобігання ризику витоку вуглецю та заохочення чистішого промислового виробництва в країнах, що не входять до ЄС. СВАМ вирівнює ціноутворення за викиди парникових газів під час виробництва вуглецевих товарів, які імпортуються до ЄС. Імпортери купуватимуть вуглецеві сертифікати, що відповідають ціні вуглецю, яка була б сплачена, якби товари були вироблені в ЄС. Ціна буде розраховуватися як середня аукціонна ціна квот ЄС ETS в євро/тонну CO₂ за попередній тиждень [44; 45]. Впровадження СВАМ передбачає перехідний період до 31 грудня 2025 року для забезпечення плавного впровадження. Цей початковий період спрямований на збір даних і передбачає лише зобов'язання щодо звітності. Фінансове коригування, спричинене СВАМ, буде поступово впроваджуватися в тому ж темпі, що і скасування безкоштовних квот у секторах СВАМ протягом періоду 2026–2034 рр.

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

На цьому першому етапі СВММ зосереджуватиметься лише на певних товарах, обраних на основі їх високих викидів вуглецю, високого ризику витоку вуглецю та технічної здійсненності. До них належать залізо, сталь, цемент, добрива, алюміній, електроенергія та водень (табл. 2.8).

Таблиця 2.8

Опис товарів, на які поширюється дія СВММ

Категорія	Конкретні товари, на які поширюється дія	ІСІО Сектори
Цемент	Каолінові глини; Цементний клінкер; Портландцемент; Алюмінієвий цемент; Гідравлічні цементи	Видобуток неенергетичних, неметалевих мінералів
Добрива	Азотна кислота, сульфазотні кислоти; Аміак; Нітрати калію; Мінеральні або хімічні добрива	Хімічні речовини
Алюміній	Необроблений алюміній; алюмінієвий порошок, пластівці, прутки, профілі, дріт, пластини, листи, стрічки, фольга, труби та трубопроводи, фітинги для труб або трубопроводів, конструкції, резервуари, цистерни, чани, бочки, барабани, банки, ящики та подібні контейнери, кабелі, плетені стрічки; інші вироби з алюмінію	Недорогоцінні метали. \= Металеві вироби
Залізо та сталь	Залізо та сталь; агломеровані залізні руди та концентрати; вироби з заліза або сталі, такі як шпунтові палі, зварні кутники, профілі та секції, матеріали для будівництва залізничних або трамвайних колій, труби, порожнисті профілі, безшовні, конструкції, пластини, прутки, кутники, профілі, секції, резервуари, цистерни, чани, бочки, барабани, банки, коробки, гвинти, болти, гайки, гвинти для вагонів, гвинтові гаки, заклепки, шплінти, шайби; Інші вироби з чавуну або сталі	Недорогоцінні метали та металеві вироби
Електроенергія	Електрична енергія	Електроенергія
Водень	Водень	Хімічні речовини

Джерело: складено на основі [44]

Товари СВАМ у секторі основних металів становлять найбільшу частку в імпорті, на який поширюється СВАМ, з вартістю 78 млрд доларів США, за ними йдуть металеві вироби з імпортом на суму 25 млрд доларів США. Загалом СВАМ охоплює імпорт на суму приблизно 132 млрд доларів США.

СВАМ визначає зобов'язання щодо імпорту вуглецевосміхних товарів, серед яких основними є:

- одержання статусу уповноваженого декларанта СВАМ. Починаючи з 31 грудня 2024 року лише уповноважений декларант матиме право вводити імпорتنі товари на ринок ЄС. Європейська Комісія повинна створити електронний Реєстр СВАМ, через який подається заявка на одержання цього статусу, саму ж реєстрацію здійснюватиме компетентний орган держави-члена ЄС. Окрім того, в реєстрі створюється обліковий запис з інформацією про кожного уповноваженого декларанта СВАМ;
- подання Декларації СВАМ. Декларації повинні містити інформацію про: (а) загальну кількість кожного виду імпортованих товарів, (б) загальний обсяг викидів вбудованих парникових газів, (в) загальну кількість сертифікатів СВАМ, що підлягають поверненню, (г) копії звітів про верифікацію, виданих акредитованими верифікаторами. Декларації вперше мають бути подані у 2027 році (за 2026 рік) і в подальшому щорічно до 31 травня за попередній рік. Декларації подаються через Реєстр СВАМ;
- купівля необхідної кількості сертифікатів СВАМ. Сертифікат СВАМ відповідає одній тонні CO₂ вбудованих викидів (embedded emissions) парникових газів в імпортованих товарах. Вбудовані викиди складаються із прямих викидів (викидів парникових газів, що вивільняються під час виробництва товарів) та непрямих викидів (викидів парникових газів від виробництва електроенергії, яка споживається під час виробничих процесів). Викиди розраховуються відповідно до методів, передбачених Додатком IV Регламенту, та додатково будуть уточнені імплементаційними актами Європейської Комісії.

Ціна сертифіката визначатиметься середньотижневою аукціонною вартістю квот на викиди парникових газів у рамках СТВ ЄС. Фактично сертифікати СВАМ покривають різницю між ціною вуглецю в країні виробництва та ціною в ЄС. Якщо вуглецева ціна вже була сплачена під час виробництва імпортованого товару, відповідна сума вираховується з остаточного розрахунку. До 31 травня кожного року та вперше у 2027 році (для 2026 року) уповноважений декларант СВАМ повинен здати через Реєстр СВАМ кількість сертифікатів СВАМ, що відповідає вбудованим викидам. Кількість сертифікатів СВАМ на його рахунок в Реєстрі СВАМ наприкінці кожного кварталу щонайменше повинна становити 80 % вбудованих викидів. Регламент також встановлює процедуру викупу та анулювання сертифікатів СВАМ [46].

СВАМ застосовуватиметься до прямих (Score 1) викидів парникових газів, що утворюються під час виробничого процесу для всіх товарів, та до непрямих викидів, що утворюються під час виробництва електроенергії (Score 2) для певної групи товарів (цемент та добрива). Вбудовані викиди від вихідних матеріалів («вище за ланцюгом» Score 3) будуть включені, якщо ці вихідні матеріали самі підпадають під дію СВАМ. Наприклад, СВАМ охоплює не тільки сиру сталь, але й вироби з чавуну. Тому при імпорті сталевих виробів також будуть охоплені вбудовані викиди від сирової сталі, що використовується як сировина. Вбудовані викиди в товарах, крім електроенергії, повинні визначатися на основі фактичних викидів на заводі-виробнику. Якщо фактичні викиди не можуть бути визначені, а також для оцінювання непрямих викидів застосовуються стандартні значення, встановлені на основі середньої інтенсивності викидів для країни або регіону. Протягом перехідного періоду зібрані дані сприятимуть вдосконаленню методології, що використовується для розрахунку викидів.

Якщо імпортер може довести, що в країні походження вже сплачено ціну на вуглець за викиди парникових газів, пов'язані з товарами, декларант СВАМ може вимагати зменшення кількості сертифікатів СВАМ на суму, що дорівнює ціні на вуглець, вже сплаченій у третій країні. Через відмінності у практиках ціноутворення на вуглець у різних країнах світу ЄС доведеться уточнити підхід до оцінки ефективної ціни на вуглець,

сплаченої за кордоном [47]. Треті країни, які беруть участь в ETS, тобто члени Європейської економічної зони та Швейцарія, звільняються від СВАМ. До закінчення перехідного періоду угода передбачає перегляд загального функціонування СВАМ, а також аналіз переліку товарів, для яких включені непрямі викиди. Крім того, буде переглянуто доцільність включення інших товарів, що підпадають під дію EU ETS, до переліку товарів. Остання редакція регламенту СВАМ [44] має на меті забезпечити сумісність із законодавством СОТ. У численних літературних джерелах обговорюється сумісність різних моделей СВАМ з правилами СОТ [40]. СВАМ супроводжуватиметься адміністративними витратами, пов'язаними з витратами на дотримання вимог для підприємств та витратами на забезпечення дотримання вимог для органів влади. Для підприємств витрати на дотримання вимог виникнуть для імпортерів, розташованих в ЄС, які повинні будуть сплачувати зобов'язання СВАМ. Ці витрати, ймовірно, залежатимуть від того, чи будуть вбудовані викиди розраховуватися на основі стандартного значення, чи на основі перевірених даних про фактичні викиди. Для органів влади виникнуть витрати, пов'язані з взаємодією систем моніторингу, верифікації та звітності, що надаються економічними операторами.

СВАМ може бути ефективним у запобіганні витоку вуглецю та може сприяти зменшенню глобальних викидів, але він лише частково пом'якшує негативні наслідки підвищення цін на вуглець і скасування безкоштовних квот для доданої вартості галузей, захищених СВАМ, і, що важливо, негативно впливає на галузі, що знаходяться нижче та вище за ланцюгом створення вартості. Впровадження СВАМ у поєднанні зі збільшенням ціни на вуглець в EU ETS та скасуванням безкоштовних квот матиме відносно незначний вплив на загальну додану вартість як у країнах ЄС, так і в країнах, що не входять до ЄС.

СВАМ пом'якшує втрату доданої вартості для галузей ЄС, але лише частково. Таке зниження конкурентоспроможності секторів ЄС ETS, незважаючи на впровадження СВАМ, є очікуваним, оскільки галузі СВАМ також споживають ресурси, що підпадають під СВАМ (ціна на які зростає), а СВАМ не вирівнює умови на експортних ринках. Перерозподіл зібраних доходів може ще більше зменшити загальний вплив на

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

додану вартість ЄС. Аналіз показує, що хоча підвищення цін на вуглець і скасування безкоштовних квот призведуть до скорочення викидів на 11,7 % у галузях ЄС, що підпадають під СВАМ, вони також спричинять невелике зростання викидів за межами ЄС, що свідчить про витік викидів вуглецю. Скорочення викидів CO₂ на 175 млн тонн у ЄС буде частково компенсоване збільшенням викидів у країнах-партнерах на 34 млн тонн, що відповідає рівню витоку викидів вуглецю 19,2 %. Однак запровадження СВАМ призведе до зниження викидів як у ЄС, так і за його межами завдяки переорієнтації імпорту ЄС на джерела з меншою інтенсивністю викидів.

Ця зміна в структурі торгівлі призведе до скорочення виробництва в економіках з високим рівнем викидів, що призведе до 36 % збільшення глобального скорочення викидів порівняно зі сценарієм без СВАМ (і скасування безкоштовних квот) та до 29 % збільшення порівняно зі сценарієм, за якого безкоштовні квоти зберігаються (а СВАМ не впроваджується). У всіх галузях промисловості сукупні заходи призводять до скорочення глобальних викидів на 0,5 %.

Регламент СВАМ охоплює незначну частину глобальних викидів і торгівлі. Цільові продукти охоплюють 0,37 % вартості світової торгівлі товарами та послугами та 3 % імпорту ЄС з країн, що не входять до ЄС, у 2022 році. Викиди, пов'язані з імпортованими продуктами, що підпадають під дію СВАМ, становлять 0,31 % глобальних викидів парникових газів (ПГ) у 2022 році.

З ціною на вуглець 80 євро за тону CO₂ (станом на 1 січня 2024 року) та без змін у торговельних потоках СВАМ приносить 14,7 млрд євро доходу щорічно.

Моделювання показує, що більшість економік, що не входять до ЄС, виграють від впровадження реформи EU ETS, прийнятої в рамках пакета «Fit for 55», незважаючи на впровадження СВАМ, оскільки їхні відносні виробничі витрати зменшуються. Однак СВАМ означає, що країни з вищими інтенсивностями викидів у виробництві отримують менші вигоди, ніж відносно «чистіші» економіки. Це підкреслює потенціал СВАМ для заохочення більш чистого експортно-орієнтованого виробництва в усьому світі.

Аналіз на рівні країн показує значні відмінності у впливі СВАМ на різні країни, що зумовлено інтенсивністю викидів у виробництві та наявністю внутрішніх механізмів ціноутворення на вуглець. З упровадженням СВАМ європейські імпортери віддають перевагу країнам з нижчою інтенсивністю викидів і наявним ціноутворенням на вуглець, оскільки це призводить до нижчих зборів порівняно з імпортом з альтернативних джерел з більш інтенсивними викидами. В результаті, хоча майже всі країни, що не входять до ЄС, отримують незначні вигоди після впровадження трьох політик, найбільше виграють країни з низьким рівнем викидів, такі як Чилі. І навпаки, країни з високою інтенсивністю викидів у виробництві, такі як Південна Африка, Індія та Туніс, спостерігають незначне зниження доданої вартості, хоча вплив залишається обмеженим (близько 0,25 %). Загалом цей результат підкреслює, як СВАМ може вирішити проблему витоку вуглецю, переорієнтувавши європейські джерела постачання сировини на більш чисті джерела виробництва. У країнах, що не входять до ЄС, середній вплив впровадження всіх політик на додану вартість є помірним і позитивним для більшості країн, оскільки їхні відносні виробничі витрати зменшуються. Проте вплив варіюється між країнами залежно від інтенсивності викидів у виробництві та переважаючих механізмів ціноутворення на вуглець. Оскільки імпорт з країн, де застосовується ціноутворення на викиди вуглецю та нижча інтенсивність викидів, підлягає меншому збору при ввезенні на спільний ринок, ці країни отримують більші вигоди, ніж економіки з більш інтенсивними викидами. Це підкреслює потенціал СВАМ для заохочення більш чистого експортно-орієнтованого виробництва в усьому світі.

У нещодавньому робочому документі ОЕСР використовуються таблиці міжкраїнних витрат і випуску ОЕСР та інші дані для аналізу впливу впровадження реформ системи торгівлі викидами ЄС, з урахуванням СВАМ та без нього:

- без СВАМ на кожну тонну викидів CO₂, яких вдалося уникнути в межах ЄС (завдяки жорсткішій системі торгівлі викидами ЄС), приблизно 0,19 тонни викидів «витікали б» за кордон. З урахуванням збільшення цих викидів за межами ЄС реформа системи

торгівлі викидами ЄС призвела б до скорочення глобальних викидів на 0,39 %;

- завдяки СВАМ показник витоків не лише зменшиться, а й зміниться на протилежний. Це пояснюється тим, що імпортери ЄС перенаправляють постачання на чистіших виробників, часто в країнах з наявними цінами на вуглець або нижчою інтенсивністю викидів. В результаті глобальні викиди скоротяться більше – на 0,54 %.

За межами ЄС вплив СВАМ залежить головним чином від торговельних зв'язків країни з ЄС та вуглецевої інтенсивності її експорту:

- загальні тенденції: більшість країн, що не входять до ЄС, спостерігають дещо позитивний або нейтральний вплив (від 0 % до 0,5 %) після спільного впровадження двох політик;
- країни з чистішим виробництвом: такі економіки, як Чилі, Мексика та Туреччина, які мають відносно низьку інтенсивність викидів вуглецю в секторах СВАМ, можуть незначно виграти, оскільки імпортери ЄС відмовляться від більш вуглецевомістких джерел;
- виробники з високим рівнем викидів: такі країни, як Південна Африка та Індія, де виробництво, що охоплюється СВАМ, є більш вуглецевомістким, можуть відчувати незначний негативний вплив від скорочення експорту (~0,20 %).

Хоча ЄС планує розширити застосування СВАМ на більшу кількість продуктів до 2030 року, дослідження ОЕСР показують, що це може не мати значного додаткового ефекту. Додавання ще 1400 продуктів лише незначно зменшить глобальні викиди (-0,02 %), що свідчить про те, що поточна сфера охоплення вже спрямована на найважливіші джерела витоку вуглецю. Однак вплив розширення буде різним для різних продуктів, залежно від їхньої вуглецевої інтенсивності, впливу на торгівлю, подальшого використання та можливості вимірювати викиди, що містяться у складних товарах [42].

Нагальна проблема полягає в точному вимірюванні та перевірці викидів від імпорту. Багатьом торговельним партнерам потрібно буде оновити свій облік викидів, щоб відповідати стандартам ЄС. Існує також ризик творчого дотримання вимог – країни постачають свої найчистіші

продукти до Європи, споживаючи при цьому товари з вищим вмістом викидів у себе вдома, – що знизить ефективність політики у скороченні глобальних викидів.

Заглядаючи у майбутнє, успіх залежить від того, як адаптуються підприємства та країни. Компанії, які можуть інвестувати в чистіші технології, отримають конкурентну перевагу, тоді як ті, хто не може, можуть зіткнутися з труднощами. Ця політика також створює потужний стимул для інших країн запровадити ціноутворення на викиди вуглецю та самостійно збирати доходи, а не сплачувати їх на кордоні ЄС. Інші юрисдикції (зокрема Велика Британія, Канада та Австралія) вже вивчають аналогічні заходи на кордоні [42].

Механізм коригування (СВАМ) передбачає сплату платежу, який розраховується за формулою:

$$\text{СВАМ-платіж} = \text{вбудовані викиди товару} \times \text{частка, що підпадає під СВАМ} \times \text{ціна EUA (визнана ціна вуглецю, сплачена в Україні)}.$$

Передбачено, що покупка / погашення необхідних сертифікатів відбуватиметься на централізованій платформі ЄК [48].

Для умов України за оцінками експертів негативний вплив СВАМ зростатиме з часом, оскільки кількість вільних квот зменшуватиметься, а ціна CO₂ зростатиме, а отже, зростатиме вартість СВАМ-сертифікатів. За підрахунками [48], ця вартість може сягнути майже 150 дол. США/т CO₂ у 2030 р., а втрати українського експорту у цьому ж році через СВАМ можуть скласти 1,8 млрд дол. США. Сумарні втрати експорту за 2026–2030 рр. прогнозуються на рівні 4,7 млрд дол. США.

Супутнім негативним наслідком є те, що Україна через вплив цього механізму за 2026–2030 роки ризикує втратити майже 3 млрд дол. США потенційних інвестицій у промисловість у зв'язку зі скороченням експорту.

Попри статус кандидата на членство в ЄС і поступову інтеграцію до європейської економіки, у сфері торгівлі механізм вуглецевого коригування імпорту (СВАМ) фактично ставить Україну в один ряд із третіми країнами – такими як Туреччина чи Китай. Це означає, що українські

експортери вже сьогодні розглядаються як зовнішні гравці, на яких поширюються усі вимоги та обмеження нової кліматичної політики ЄС.

Якщо українські виробники не зможуть витримати навантаження СВАМ, вони будуть змушені переорієнтовувати поставки на інші ринки. Такий сценарій загрожує поступовою дезінтеграцією економіки України з ЄС. Таким чином, СВАМ може негативно вплинути на економічну інтеграцію України в європейський простір.

Щоб уникнути ризику віддалення від європейського ринку, ставлення до українських підприємств в ЄС має бути таким самим, як до внутрішніх виробників. Натомість сьогоднішній стан справ показує, що СВАМ перетворюється на фактор, який уповільнює інтеграцію.

В умовах, що склалися в Україні, актуальним стане створення власного механізму вуглецевого коригування імпорту для захисту внутрішнього ринку. У цьому сенсі показовим є приклад Норвегії. Хоча ця країна не входить до складу ЄС, вона вже ухвалила рішення про запровадження національного СВАМ. Метою цього кроку є збереження конкурентоспроможності місцевих виробників і недопущення обходу європейських кліматичних вимог через її територію. Для України ухвалення аналогічного механізму мало б подвійний ефект. По-перше, це забезпечило б захист власного ринку. По-друге, стало б вагомим аргументом у переговорах із ЄС, демонструючи, що Україна здатна контролювати вуглецевий баланс і не допускати використання своєї території як «лазівки» для обходу правил ЄС.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що вже сьогодні українським компаніям варто розробляти стратегії адаптації до сучасних вимог кліматичної політики ЄС. Навіть на етапі звітності СВАМ зачіпає більшість підприємств, змушуючи їх вести облік викидів і впроваджувати систему верифікації даних. У майбутньому цей процес стане ще більш вимогливим і витратним [49]. Україна має активно долучатися до формування правил СВАМ на міжнародному рівні, що означає необхідність:

- вибудовувати діалог із європейськими партнерами;
- формувати власні ініціативи у сфері вуглецевого регулювання;

- захищати інтереси українських виробників у міжнародних організаціях.

Активна участь у цьому процесі дозволить не лише зменшити негативні наслідки для українського бізнесу, а й закріпити за Україною статус надійного та інтегрованого партнера ЄС.

Висновки до розділу 2

1. Виконаний аналіз оцінки впливу наявних металургійних технологій на довкілля показує, що практично всі переділи металургійного виробництва є джерелами забруднення. Для зменшення впливу на довкілля на металургійних підприємствах впроваджуються різноманітні технічні рішення, такі як уловлювання пилу, створення і використання замкнутих циклів водопостачання. Але основною проблемою металургії є негативний вплив на атмосферу внаслідок утворення викидів великих обсягів парникового газу – діоксиду вуглецю. Виконані розрахунки показують, що на українських металургійних підприємствах викиди цього парникового газу сягають 2,1–2,3 т на кожен тону чавуну, що суттєво перевищує цільові показники Міжнародної енергетичної агенції (0,4 т/т сталі).
2. Необхідність зменшення обсягів шкідливих викидів і вуглецевого сліду в металургійному виробництві робить нагальною розробку технологій «безкоксової» металургії – отримання заліза з руд із використанням не лише вуглецю, а й інших відновників, зокрема водню. Йдеться про пряме відновлення заліза генераторним газом, отриманим у процесі газифікації вугілля, із подальшим використанням скидного енергетичного потенціалу цього газу для виробництва електроенергії та збагачення відновного газу електролізним воднем.
3. Перехід на безкоксову металургію не означає повну відмову від переробки вугілля для виробництва коксу. В майбутньому коксохімічне виробництво збереже своє значення не стільки для забезпечення доменного виробництва, скільки для отримання

спеціальних видів коксу, головним чином для феросплавного та ливарного виробництва.

4. Механізм транскордонного коригування викидів вуглецю (СВАМ) є серйозним викликом для України, оскільки може загальмувати інтеграцію в європейську економіку. Водночас цей механізм створює і можливість стимулювати модернізацію виробництва, підвищити енергоефективність і стати частиною нового глобального ринку, де ключову роль відіграватимуть «зелені» технології.

Україна має шанс використати СВАМ як точку входу в нову економічну реальність Європи. Для цього потрібна комплексна стратегія: від національного механізму вуглецевого регулювання до активної дипломатії та глибокої трансформації виробничих секторів. Складовою такої стратегії може бути організація виробництва заліза прямого відновлення з низьким вуглецевим слідом.

Перелік використаних джерел до розділу 2

1. Зміна № 2 до Класифікатора відходів (КВ) ДК 005-96 : Наказ Держспоживстандарту України від 22.01.2008 № 18. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va018609-08#Text>

2. Ярошевський С. А., Ємченко А. В., Шульга І. В. та ін. Ресурсозберігаючі технології металургійного виробництва на основі використання українського вугілля. Харків : Контраст, 2012. 204 с.

3. Васильєв Ю. С., Гордієнко А. І., Долгарєв Г. В. та ін. Перша промислова коксова батарея з установкою термічної підготовки шихти в Україні як спосіб підвищення ресурсо- та енергоефективності металургійної галузі. *УглеХімічний журнал*. 2010. № 3–4. С. 48–52. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukhj_2010_3-4_9/

4. Правила технічної експлуатації коксохімічних підприємств (ПТЕ-2017). Харків : ДП «ГИПРОКОКС», 2018. 283 с.

5. Бессонов С. В., Волох В. М., Супрун В. В., Борисенко А. А., Близнюкова М. І. Очищення стоку цеху миш'яково-содової сіркоочист-

ки методом зворотного осмосу. *УглеХімічний журнал*. 2014. № 1–2. С. 56–61.

6. Борисенко А. Л., Близнюкова М. І., Белонощенко В. П. та ін. Розробка способів видалення завислих речовин із води після біохімічестки ПАТ «ЗАПОРІЖКОКС». *УглеХімічний журнал*. 2016. № 2. С. 24–32.

7. Ковальов Є. Т., Борисенко А. Л., Близнюкова М. І. Очищення фенольних стічних вод методом зворотного осмосу ПАТ «ЗАПОРІЖКОКС». *УглеХімічний журнал*. 2015. № 4. С. 37–42..

8. Ковальов Є. Т., Борисенко А. Л., Близнюкова М. І. Очищення фенольних стічних вод методом зворотного осмосу ПАТ «ЗАПОРІЖКОКС». *УглеХімічний журнал*. 2015. № 4. С. 37–42..

9. International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking. Paris : IEA, 2020. 190 p. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf

10. Обмеження на експорт брухту у світі – 2025 // GMK Center. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2025/04/Scrap-Restrict-2025_ukr-2.pdf

11. Шульга І. В., Кизим М. О., Котляров Є. І. Напрямки удосконалення технологій конверсії вугілля в синтетичні рідкі палива. *Вуглехімічний журнал*. 2023. № 6. С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-6-37-44>

12. Патент України на корисну модель 56530 Україна. Спосіб отримання синтетичних моторних палив з вугілля / [І. В. Шульга, М. О. Кизим, В. Є. Хаустова, Є. І. Котляров]. *Бюлетень ДП УКРПОВІ*. 2024. № 27.

13. Обґрунтування створення виробництва синтетичного моторного палива з вугілля в Україні : кол. моногр. / за ред. В. Є. Хаустової ; авт. кол. : В. Є. Хаустова, М. О. Кизим, Є. І. Котляров, І. В. Шульга, І. О. Губарева, В. В. Шпілевський, Т. І. Салашенко, Д. М. Костенко, М. М. Хаустов. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2024. 514 с. DOI: <https://doi.org/10.32983/978-617-7801-49-7>

14. Кизим М. О., Хаустова В. Є., Котляров Є. І., Шульга І. В. Аналіз напрямків трансформації гірничо-металургійного комплексу України. *Бізнес Інформ*. 2024. № 6. С. 217–225. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-6-217-225>.

15. Шульга І. В., Котляров Є. І., Кизим М. О., Хаустова В. Є. Перспективна сировинна база процесів виробництва синтетичного рідкого палива з українського вугілля. *Вуглехімічний журнал*. 2023. № 5. С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-5-3-11>

16. Внесок ГМК в економіку України. 2024 // GMK Center. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2025/04/ukr_2025_Econ_Steel-impact.pdf

17. Stepping up Europe's 2030 climate ambition: Investing in a climateneutral future for the benefit of our people // European Commission (2020). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0562>

18. Carbon Pricing Dashboard // World Bank (2023). https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data

19. Condon M., Ignaciuk A. Border carbon adjustment and international trade: A literature review. *OECD Working Paper*. 2013. Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2693236>

20. Fowlie M., Reguant M. Challenges in the measurement of leakage risk. *AEA Papers and Proceedings*. 2018. Vol. 108. P. 124–129. DOI: <https://doi.org/10.1257/pandp.20181087>

21. Böhringer C., Carbone J., Rutherford T. Unilateral climate policy design: Efficiency and equity implications of alternative instruments to reduce carbon leakage. *Energy Economics*. 2012. Vol. 34. P. S208–S217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.09.011>

22. Flues F., van Dender K. Permit allocation rules and investment incentives in emissions trading systems. *OECD Taxation Working Papers*. No. 33. OECD Publishing, Paris, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1787/c3acf05e-en>

23. Dechezleprêtre A., Nachtigall D., Venmans F. The joint impact of the European Union emissions trading system on carbon emissions

and economic performance. *OECD Economics Department Working Papers*. No. 1515. OECD Publishing, Paris, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1787/4819b016-en>

24. Clausing K., Wolfram C. Carbon border adjustments, climate clubs, and subsidy races when climate policies vary. *National Bureau of Economic Research Working Paper*. No. w31310. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3386/w31310>

25. Jakob M., et al. How trade policy can support the climate agenda. *Science*. 2022. Vol. 376 (6600). P. 1401–1403. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abo4207>

26. Horn H., Sapir A. Can border carbon taxes fit into the global trade regime? *Policy Briefs Bruegel*. 2013. Vol. 805. URL: https://www.bruegel.org/wpcontent/uploads/imported/publications/pb_2013_06__01.pdf

27. OECD. Climate Policy Leadership in an Interconnected World: What Role for Border Carbon Adjustments? OECD Publishing, Paris, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1787/8008e7f4-en>

28. Fowlie M., Petersen C., Reguant M. Border Carbon Adjustments When Carbon Intensity Varies across Producers: Evidence from California. *AEA Papers and Proceedings*. 2021. Vol. 111. P. 401–405. DOI: <https://doi.org/10.1257/pandp.20211073>

29. Dechezleprêtre A., Haramboure A. EU Carbon Border Adjustment Mechanism: What is it, how does it work and what are the effects? // OECD. URL: <https://www.oecd.org/en/blogs/2025/03/eu-carbon-border-adjustment-mechanism-what-is-it-how-does-it-work-and-what-are-the-effects.html>

30. Bellora C., Fontagné L. EU in search of a Carbon Border Adjustment Mechanism. *Energy Economics*. 2023. Vol. 123. Article 106673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106673>

31. Baudry M., Cameron A. The case for a Carbon Border Adjustment: Where do economists stand? *EconomiX Working Papers University of Paris Nanterre*. 2022. Vol. 1.

32. Coase R. The Problem of Social Cost. *The Journal of Law & Economics*. 1960. Vol. 3. P. 1–44. URL: <https://www.jstor.org/stable/724810>

33. Stavins R. Transaction costs and tradeable permits. *Journal of Environmental Economics and Management*. 1995. Vol. 29(2). P. 133–148. DOI: <https://doi.org/10.1006/jeem.1995.1036>
34. Hahn R. Market power and transferable property rights. *The Quarterly Journal of Economics*. 1984. Vol. 99(4). P. 753–765. DOI: <https://doi.org/10.2307/1883124>
35. Kahneman D., Knetsch J., Thaler R. Experimental Tests of the Endowment Effect and the Coase Theorem. *Journal of Political Economy*. 1990. Vol. 98(6). P. 1325–1348. DOI: <https://doi.org/10.1086/261737>
36. Venmans F. The effect of allocation above emissions and price uncertainty on abatement investments under the EU ETS. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 126. P. 595–606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.108>
37. De Vivo N., Marin G. How neutral is the choice of the allocation mechanism in cap-and-trade schemes? Evidence from the EU-ETS. *Argomenti*. 2018. Vol. 9. P. 21–44. DOI: <https://doi.org/10.14276/1971-8357.1062>
38. Zaklan A. Free Allocation and the Endowment Effect in Cap-and-Trade Systems: Evidence from the European Electricity Sector. *Beiträge zur Jahrestagung des Vereins für Socialpolitik 2016: Demographischer Wandel – Session: Energy Markets*. No. C02-V2. URL: <http://hdl.handle.net/10419/145682>
39. EU Emissions Trading System (EU ETS) Factsheet // ICAP. URL: <https://icapcarbonaction.com/en/ets/eu-emissions-trading-system-eu-ets>
40. No more free lunch. Ending free allowances in the EU ETS to the benefit of innovation // Jacques Delors Institute. URL: <https://institutdelors.eu/en/publications/no-more-free-lunch-ending-free-allowances-in-the-euets-to-the-benefit-of-innovation/>
41. Dechezleprêtre A., Nachtigall D., Venmans F. The joint impact of the European Union emissions trading system on carbon emissions and economic performance. *Journal of Environmental Economics and Management*. 2023. Vol. 118. Article 102758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102758>

42. Quirion P. Historic versus output-based allocation of GHG tradable allowances: a comparison. *Climate Policy*. 2009. Vol. 9 (6). P. 575–592. DOI: <https://doi.org/10.3763/cpol.2008.0618>

43. Heilmayr R., Bradbury J. Effective, efficient or equitable: using allowance allocations to mitigate emissions leakage. *Climate Policy*. 2011. Vol. 11 (4). P. 1113–1130. DOI: <https://doi.org/10.1080/14693062.2011.579291>

44. Regulation (EU) 2023/956 establishing a carbon border adjustment mechanism // Official Journal of the European Union. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956>

45. Commission Implementing Regulation (EU) 2023/1773 // Official Journal of the European Union. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1773>

46. Як працюватиме механізм вуглецевого коригування імпорту // DiXi Group. URL: <https://dixigroup.org/comment/yak-praczuvatyme-mehanizm-vugleczevogo-koryguvannya-importu/>

47. Carbon Border Adjustment Mechanism. The EU's environmental policy tool for fair carbon emissions pricing // European Commission. URL: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en

48. СВАМ – транскордонний вуглецевий податок ЄС. Що це і як вплине на бізнес? // Європейська Бізнес Асоціація. URL: <https://eba.com.ua/cbam-transkordonnyj-vugletsevyj-podatok-yes-shho-tse-i-yak-vplyne-na-biznes/>

49. Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) // European Commission. URL: <https://trade.ec.europa.eu/access-to-markets/en/news/carbon-border-adjustment-mechanism-cbam>

Розділ 3

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ УКРАЇНСЬКОЇ МЕТАЛУРГІЇ ЗАЛІЗА З УРАХУВАННЯМ ЦІЛЕЙ КЛІМАТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ

3.1. Технології прямого і непрямого відновлення заліза

Залізо – найбільш поширений після алюмінію метал на земній кулі: його кларк (вміст у земній корі) складає 4 % (мас.) [1]. У вільному стані залізо в природі знаходять лише у позаземних умовах – у метеоритах. У природних умовах зустрічається у вигляді різних сполук (руд): оксидів (FeO та Fe_2O_3), сульфідів (FeS , Fe_2S_3) та силікатів (FeSiO_3 , $\text{Fe}_2(\text{SiO}_3)_3$). Температура плавлення заліза дорівнює 1539 ± 5 °C.

Найбільш поширеною формою, в якій залізо зустрічається в природних умовах – оксиди FeO та Fe_2O_3 . У рудах ці оксиди містяться в різних співвідношеннях, тому склад руди часто записують як хімічну сполуку змінного складу – FeO_x . Для отримання металопродукції залізо слід відновити з руди:



Залізо мало промислове значення ще до нашої ери. У давні часи його отримували в розм'якшеному пластичному стані (так зване «губчасте залізо») в кричному процесі в горнах, використовуючи як паливо та відновник деревинне вугілля [2]:



Шлак (розплавлені оксиди інших елементів, що містяться в залізній руді, – кремнію, алюмінію тощо) відділяли, вичавлюючи його з губчастого заліза ударами молоту. З розвитком техніки виробництва заліза

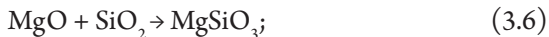
поступово підвищувалась температура, за якої здійснювався процес. Метал та шлак почали плавити, що дало можливість розділяти їх значно повніше за щільністю розплавів. Але одночасно в металі підвищувався вміст вуглецю та інших домішок. Так отримували чавун – крихкий та нековкий сплав заліза із 2,14-6,67 % вуглецю.

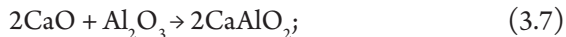
Згодом чавун почали переробляти на сталь, зменшуючи вміст вуглецю у сплаві («розкислюючи» його) до рівня нижче 2,14 %. Так з'явився двостадійний спосіб виробництва заліза з руди. Принципово він зберігається дотепер: сучасна схема отримання сталі здебільшого складається з доменного процесу, за якого з руди отримують чавун, та сталеплавильного переділу, у якому в металі зменшують вміст вуглецю та інших домішок. Сучасний достатньо високий рівень металургійного виробництва ґрунтується на теоретичних дослідженнях і відкриттях, зроблених у різних країнах, і на багатому практичному досвіді.

Сутність виплавки чавуну полягає у відновленні заліза з його оксидів, що містяться в рудних матеріалах. Процес здійснюється в домні – вертикальній печі шахтного типу, викладеній зсередини вогнетривкою цеглою [3].

Доменну піч завантажують спочатку коксом, а потім пошарово у визначеній послідовності: агломератом (рудною, огрудкованою внаслідок спікання) або окатишами (рудною, огрудкованою під дією відцентрових сил), коксом та флюсами (легкоплавкими домішками). Необхідна для виплавки чавуну температура підтримується вдюванням у горн підігрітого повітря (можливо, збагаченого киснем), у якому згорає кокс.

Пуста порода в руді утворена головним чином діоксидом кремнію SiO_2 (кварцем) та оксидом алюмінію Al_2O_3 (корундом). Це – тугоплавкі речовини. Для зниження температури плавлення шлаку до руди додають флюси – карбонати кальцію та магнію (вапняк CaCO_3 та доломіт $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). За взаємодії продуктів розкладу карбонатів із речовинами породи утворюються легкоплавкі сполуки (силікати, алюмінати тощо), які легко відділяються у вигляді шлаку:



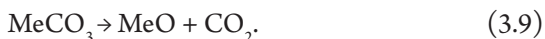


Найдорожчим компонентом, що використовується в доменному процесі, є кокс. У доменній печі він виконує три головні функції:

- джерело тепла для здійснення хімічних реакцій та фазових перетворень матеріалів доменної шихти;
- відновник у хімічних реакціях;
- розпушувач стовпа шихтових матеріалів, оскільки кокс – єдиний компонент доменної шихти, який залишається в твердій фазі на нижніх горизонтах печі в зоні найвищих температур і забезпечує потрібну газопроникність засипки та дренаж рідких продуктів плавлення.

У верхніх горизонтах доменної печі відбуваються:

- випаровування води з компонентів доменної шихти;
- виділення залишкових летких речовин з коксу;
- розклад карбонатів, що містяться в руді та флюсах:

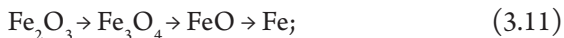


Ці процеси вимагають значних витрат тепла (2,5 МДж/кг випарованої води, 2,0-4,1 МДж/кг утвореного діоксиду вуглецю). Виділений діоксид вуглецю за температури вище 1000 °С реагує з вуглецем коксу також із значним поглинанням теплоти:



У міру опускання засипки шихтових матеріалів в шахті доменної печі розвиваються процеси відновлення оксидів заліза за схемами:

- при $t > 570^\circ\text{C}$:



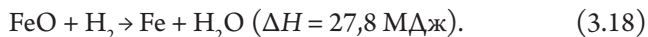
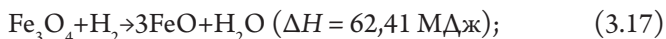
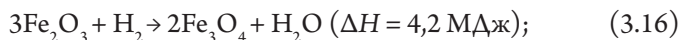
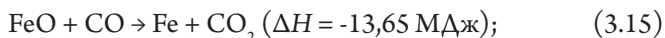
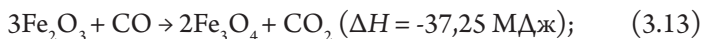
- при $t < 570^\circ\text{C}$:



Відновлення оксидів заліза оксидом вуглецю СО або воднем з утворенням діоксиду вуглецю та водяної пари називають у доменному ви-

Розділ 3. Перспективні напрями розвитку української металургії заліза з урахуванням цілей ...

робництві непрямим відновленням, а відновлення за допомогою вуглецю з утворенням CO – прямим. Непряме відновлення оксидів заліза газоподібними відновниками здійснюється за реакціями:



Переважний напрямок протікання реакції визначається максимальним зменшенням енергії Гіббса в Дж:

$$G = H - TS, \quad (3.19)$$

де H – ентальпія, Дж;

T – абсолютна температура, К;

S – ентропія, Дж/К.

Ця зміна в реакції в Дж/моль становить:

$$\Delta G = \sum \nu_n \times G_n - \sum \nu_p \times G_p, \quad (3.20)$$

де ν_n – стехіометричний коефіцієнт кожного з отримуваних продуктів у рівнянні реакції;

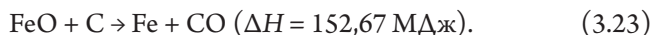
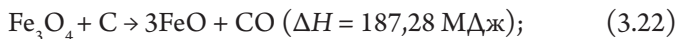
G_n – енергія Гіббса утворення кожного з отримуваних в реакції продуктів згідно з довідковими даними [4], Дж/моль;

ν_p – стехіометричний коефіцієнт кожного з реагентів в рівнянні реакції;

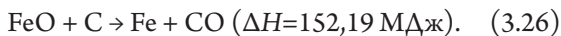
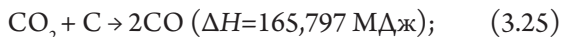
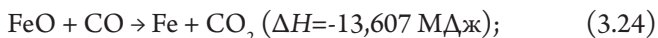
G_p – енергія Гіббса утворення кожного з реагентів за довідковими даними [4], Дж/моль.

Згідно із термодинамічними розрахунками за температури нижче 810 °С активність водню як відновника менша активності оксиду вуглецю, а вище 810 °С – більша, особливо за подальшого підвищення температури.

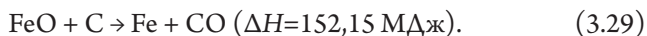
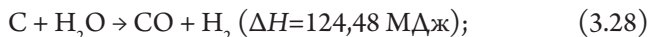
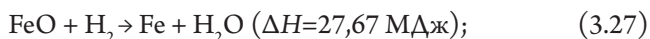
Пряме відновлення оксидів заліза твердим вуглецем можливе за реакціями:



За наявності твердого вуглецю під час аналізу відновлення оксидів заліза слід враховувати реакцію Белла–Будуара (газифікацію вуглецю). З урахуванням цього відновлення вуглецем фактично відбувається у дві стадії: спочатку — відновлення оксидом вуглецю з утворенням діоксиду вуглецю, а потім — розклад останнього на вуглеці. Наприклад, відновлення оксиду заліза (II) FeO здійснюється за такими рівняннями:



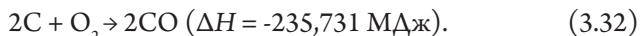
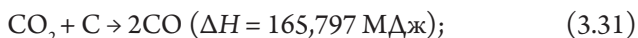
Також прямим відновленням є реакція оксидів заліза з воднем за температури вище 1000 °С:



У нормально працюючій доменній печі прямим шляхом відбувається відновлення лише деякої частини FeO. Відновлення решти FeO та всього оксиду заліза (III) Fe₂O₃ здійснюється непрямым шляхом за взаємодії з воднем та монооксидом вуглецю в протитоці під час руху доменної шихти згори донизу від колошника до зон з температурами ~1000 °С, де розвивається пряме відновлення.

Найважливішим процесом, що здійснюється в горні доменної печі, є горіння вуглецю за його взаємодії з киснем дуття, яке подається крізь фурми.

Процеси горіння вуглецю в горні записуються такими рівняннями реакцій:



Одночасно з цим горить атомарний або молекулярний водень, який входить до складу різних видів доменного палива:



Утворені продукти (оксид вуглецю та водень) рухаються догори, де і вступають в реакції непрямого відновлення.

За відновлення руди залізо отримується в твердому стані. Поступово воно опускається до більш гарячої частини печі – розпару – та розчиняє в собі вуглець, утворюючи чавун:



Отриманий чавун плавиться та стікає до нижньої частини горна, а рідкі шлаки збираються на поверхні чавуну, убезпечуючи його таким чином від окиснення. Чавун та шлаки випускають у міру накопичення крізь особливі отвори (льотки), замазані в інший час вогнетривкою глиною.

Зрештою весь вуглець коксу, використаний для відновлення, вміст якого в органічній (сухій знезоленій) масі коксу становить 97–98 % [5], переходить в доменний газ, а за його спалювання утворюється парниковий діоксид вуглецю – вуглекислий газ CO_2 , що зумовляє так званий «вуглецевий слід» від виплавки чавуну.

Доменна піч працює безперервно. У міру того, як верхні шари руди та коксу опускаються, в піч завантажують їх нові порції. Руда, кокс та флюси у визначеній черговості завантажуються у скіп та за допомогою скіпового підйомника надходять на верхній майданчик печі, де завантажуються у засипний апарат – чавунну воронку, знизу закриту колошниковим затвором. За опускання затвору суміш потрапляє до печі. Кампанія печі (її безперервна робота) триває кілька років доти, поки піч не вимагатиме капітального ремонту.

Кокс є найдорожчим компонентом доменної шихти, тому в сучасному доменному виробництві у великих масштабах використовують інші види палива, які надходять в доменну піч разом із нагрітим дуттям або коксом. Протягом XX ст. питома витрата коксу за виплавки чавуну на провідних підприємствах знизилась з 800–1000 до 250–300 кг/т чавуну. Головним видом заміни коксу у світі є пиловугільне паливо.

Вперше у Європі можливість та ефективність промислового використання пиловугільного палива в доменному процесі доведена роботами українського вченого С.Л. Ярошевського (ДонНДІчормет), виконаними в 60-х рр. XX ст. на Донецькому металургійному заводі [6]. В Україні пиловугільне паливо (пісне вугілля, подрібнене до 0,08–0,1 мм) використовували в доменній печі № 2 ВАТ «ДМЗ» у кількості 100–200 кг/т чавуну [7]. Це дозволило знизити витрату коксу до найнижчого в Україні рівня – 390 кг/т чавуну без використання природного газу. Були створені і працювали установки для використання пиловугільного палива на ПрАТ «Алчевський МК», «Запоріжсталь», «Азовсталь», «ЄМЗ», ММК ім. Ілліча, «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Загалом використання заміників коксу дозволяє знизити його витрату на 200–250 кг/т чавуну – до 300–350 кг/т. Мінімальна витрата коксу у світовій практиці досягнута на двох доменних печах заводу Bao Steel в Китаї – 250 кг/т чавуну [8]. При цьому для плавки використовують кокс класу крупності 40–80 мм. Така витрата коксу досить близька до мінімально можливої, оскільки всі його заміники можуть виконувати функції лише відновника та джерела тепла, але неспроможні замінити кокс як розпушувач стовпа шихтових матеріалів, бо саме кокс, як вже наголошувалось, – єдиний компонент доменної шихти, який залишається в твердій фазі на нижніх горизонтах доменної печі.

Однак використання як заміника коксу пісного вугілля, що містить в свій органічний масі лише кілька відсотків водню [9], порівняно з коксом, де цей показник знаходиться на рівні 0,5 %, все одно призводить до використання як відновника переважно з'єднань вуглецю, тобто вуглецевий слід за часткової заміни коксу пісним вугіллем знижується також лише на кілька відсотків. Тому зараз у світі значну увагу приділяють розвитку безкоксової технології прямого відновлення заліза відновними

газами не в доменній печі, а в спеціальних шахтних реакторах прямого відновлення.

Відома промислова технологія прямого відновлення заліза COREX (провідний розробник – австрійський концерн Voest-Alpine). Її сутність полягає у прямому відновленні заліза вугіллям у дві стадії в об'єднаному комплексі, що складається з двох частин, розташованих одна над одною. Верхня частина – відновний реактор, до якого завантажують залізорудну сировину – окатиші та флюс. Ці матеріали рухаються донизу в протитоці з відновними газами, які надходять з нижньої частини та рухаються догори. При цьому відбувається розклад флюсів (карбонатів кальцію і, можливо, магнію) з утворенням оксидів відповідних металів та вуглекислого газу і відновлення заліза з рудних матеріалів з отриманням губчастого заліза, яке передається до нижньої частини апарату – плавильника-газифікатора.

До нижньої частини апарату завантажується сортове вугілля великого розміру – до 50 мм, і крізь фурми подається кисневе дуття в кількості, стехіометрично недостатній для спалювання вугілля. За таких умов відбувається газифікація вугілля з отриманням відновних газів – водню та монооксиду вуглецю, а також вуглекислого газу, отримання якого зі спалюванням частини вуглецю зумовлено необхідністю підтримання теплового балансу процесу. Отриманий відновний газ надходить до верхньої частини (відновного реактора) для здійснення хімічних реакцій відновлення заліза з рудних матеріалів.

Губчасте залізо, що надходить з верхньої частини (реактора), в його нижній частині під впливом виділеного тепла змінює свій агрегатний стан і плавиться. При цьому воно розділяється за щільністю на два шари – верхній з меншою щільністю (шлак) та нижній з більшою щільністю (залізо). Ці шари по чергово випускаються знизу апарату крізь льотку. Шлак охолоджується та утилізується або спрямовується у відвал, а залізо, що містить ≈ 1 % вуглецю, надходить до електрометалургійної печі, де переплавляється на кінцеву металопродукцію з потрібними властивостями.

Установки, побудовані за цією технологією, працюють у багатьох промислово розвинених країнах світу – Китаї, Індії, Кореї, ПАР. Перші

установки мали одиничну виробничу потужність на рівні 0,5 млн т заліза прямого відновлення на рік, згодом цей показник зріс до 1,3 млн т/ рік.

Як одне з удосконалень технології відомий розроблений фірмою Voest-Alpine процес виробництва заліза з оптимізацією енергії та викидів, а також установка для здійснення цього процесу [10]. Частина генераторного газу, що виробляється в плавильному газогенераторі, використовується як перший відновний газ у першій зоні відновлення. Інша частина подається принаймні в одну додаткову зону відновлення як другий відновний газ. Крім того, після очищення від CO_2 частина колошникового газу, видаленого з першої зони відновлення, змішується з генераторним газом після того, як останній залишає плавильний газогенератор, для охолодження генераторного газу. Однак це технічне рішення, повторно використовуючи газ, отриманий безпосередньо в процесі прямого відновлення, принципово не може повністю забезпечити відновником технологічний процес загалом.

У технології MIDREX (розробник – фірма Midland-Ross Corporation, США) як відновник використовується природний газ. Зокрема, фірмою Midrex Technologies (США) запатентований в Україні спосіб відновлення оксиду заліза до металевого заліза [11], за якого зовнішні джерела відновників є коксовим газом та/або газом, що відходить з кисневої конвертерної печі. З суміші відхідних газів шахтної печі та конвертерного газу видаляють діоксид вуглецю, змішують з чистим коксовим газом, зволожують, нагрівають і знов спрямовують до шахтної печі для використання. Відпрацьований гарячий відновний газ виходить з шахтної печі. Частина його спрямовується до нагрівальних пальників, а решта охолоджується з утворенням пари в котлі-утилізаторі надлишкового тепла, очищується в скрубєрі-холодильнику та рециркулює для об'єднання зі свіжим конвертерним газом.

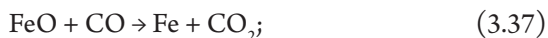
Як головні недоліки цього способу вбачаємо такі:

- пряме відновлення заліза є альтернативою традиційному доменному процесу, що використовує кокс, а коксовий газ отримують одночасно з коксом. Отже, цей спосіб прямого відновлення може лише частково замінити доменний процес;

- використання газу від кисневих конвертерів також не дозволяє забезпечити сировиною пряме відновлення, оскільки відновний газ – монооксид вуглецю – утворюється за виплавки сталі в конвертері за реакцією:



Водночас пряме відновлення заліза монооксидом вуглецю відбувається згідно з рівняннями:



З цих реакцій видно, що кількість утворюваного відновника значно (у 3–4,5 разу) менша за потребу в цьому відновнику для отримання заліза.

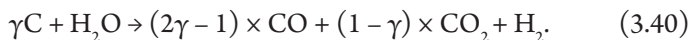
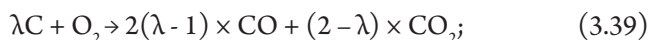
Загалом у світі за технологією прямого відновлення отримують ≈ 125 млн т/рік заліза прямого відновлення, що забезпечує $\approx 7\%$ світового виробництва металопродукції. Особливістю цієї технології є необхідність використання (принаймні у верхній частині апарату) лише грубо-кускових матеріалів для забезпечення стабільного гідравлічного режиму руху газів. Через це як залізорудну сировину використовують лише окатиші, які, на відміну від агломерату, мають правильну геометричну форму, а також в процесі COREX лише дефіцитне сортове вугілля великої крупності – до 50 мм. Цим же зумовлене і використання в цьому процесі запуску установки та виводу її на стабільний технологічний режим коксу, витрата якого становить $\approx 15\%$ від загальної кількості відновника. Крім цього, недоліком процесу MIDREX є використання як відновника природного газу, якого в Україні не вистачає.

Також відомий запропонований фахівцями Маріупольського державного технічного університету комплекс для прямого відновлення заліза [12], який містить у собі склад сировини та матеріалів, бункери для шихтових компонентів, збірний конвеєр, устаткування для подрібнення шихтових компонентів та їх брикетування, сушарку брикетів, піч для відновлення брикетів, пилоочисне обладнання. Як сировину використовують сталевий пил та/або шлам, а також окалину від прокатного виробництва, тобто комплекс не дає можливості отримувати

залізо безпосередньо з руди, яка є головним джерелом для виплавки металів. Як відновник використовується антрацитовий штиб, отже, як і в традиційному доменному процесі, відновлення супроводжується значним вуглецевим слідом, а використання твердого відновника уповільнює процес, оскільки за інших рівних умов швидкість реакції в твердій фазі, яка відбувається лише на поверхнях контакту кусків окисненого матеріалу та відновника, завжди менша, ніж реакції з газовим відновником, який оточує усю доступну поверхню окисненого матеріалу та контактує з нею.

Технічну задачу побудови низьковуглецевої технологічної схеми виробництва заліза прямого відновлення ми пропонуємо вирішити прямим відновленням заліза відновним синтез-газом, отримуваним за кисневої газифікації вугілля.

Узагальнені рівняння отримання генераторних газів [15]:



Тут λ та γ – числові коефіцієнти, що характеризують співвідношення кількостей CO та CO₂ в продуктах реакції. Їх значення залежать від умов проведення процесу та знаходяться у таких межах:

$$1 \leq \lambda \leq 2, 0,5 \leq \gamma \leq 1. \quad (3.41)$$

Тобто отримуваний за газифікації вугілля генераторний газ містить два компоненти, що мають відновні властивості – монооксид вуглецю CO та водень H₂. За умов відновлення заліза, де температура значно перевищує 1000 °C, згідно із наведеними вище результатами термодинамічного аналізу за енергією Гіббса, насамперед реагуватиме водень, а надлишковий газ міститиме монооксид вуглецю. Надлишковий газ, що не прореагував, допалують:



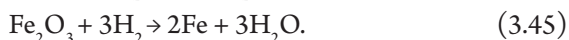
Це призводить до суттєвих викидів у доквілля парникового вуглекислого газу, хоча і у менших кількостях, аніж у доменному процесі. Слід зазначити, що ця негативна особливість є невід'ємною частиною отримання водню з будь-яких видів викопного палива, які обов'язково

містять вуглець, тобто отримується так званий «чорний» або принаймні «сірий» водень [14].

Згідно із запропонованим нами технічним рішенням [15] тепло продуктів спалювання разом з теплом одержаного з вугілля газу використовується для отримання електроенергії. За допомогою цієї електроенергії здійснюється електроліз води:



Отриманий водень додається до відновного газу та бере участь у процесах відновлення:



Отримання відновного газу шляхом газифікації вугілля дає змогу відмовитися від використання для цієї мети імпортного та дороговартісного природного газу [16] і застосовувати викопне вугілля, сумарні геологічні запаси якого у світі становлять 1,16 трлн т [17]. Дійсні геологічні запаси викопного вугілля (сумарно за категоріями А+В+С₁) становлять в нашій країні майже 45 млрд т, або 3,9 % від загальних світових запасів.

При цьому близько 2/3 запасів складає малометаморфоване вугілля – буре, довгополум'яне та газове [18], особливістю будови якого є наявність великої кількості кисневмісних функціональних груп – гідроксильних –ОН, карбонільних >C=O та карбоксильних –COОН, що зумовляють підвищену реакційну здатність вугілля, бажану для його термохімічної переробки, зокрема, шляхом газифікації [18, 19].

Україна загалом забезпечена достатніми покладами і залізної руди, запаси якої є п'ятими в світі та найкрупнішими серед європейських країн. Згідно з даними ДНВП «Геоінформ України», балансові запаси руд заліза становили 18 065,04 млн т станом на 01.01.2021 р. [19], у тому числі на балансі діючих гірничо-видобувних підприємств знаходилось близько 5 млрд т руди. Кількість родовищ руд заліза у 2020 році становила 60. Найбільший обсяг балансових запасів руд заліза знаходиться у Дніпропетровській (48,61 %), Полтавській (27,89 %), Запорізькій (15,25 %) областях.

Таким чином, обґрунтовані такі технологічні засади низьковуглецевого відновлення заліза з його руд:

1. Для відновлення слід використовувати не технологію доменного виробництва з відновленням заліза коксом, а пряме відновлення залізородних окатишів генераторним відновним газом, отримуваним за газифікації вугілля.
2. Технологія прямого відновлення надійно забезпечена основними видами вітчизняної сировини (залізною рудою та малометаморфованим вугіллям).
3. З метою зменшення витрати відновного газу та утворюваного вуглецевого сліду доцільно збагачувати відновний газ воднем.
4. Джерело отримання водню – електроліз води з використанням електроенергії, одержуваної за утилізації тепла генераторного газу високоенергетичних процесів газифікації (Техасо, Сопосо-Philpps тощо) та допалювання залишкового відновного газу, який не прореагував у реакціях відновлення.

Розроблену принципову блок-схему виробництва заліза прямого відновлення наведено на *рис. 3.1*. Для газифікації використовують малометаморфоване довгополум'яне вугілля Західного Донбасу, оскільки саме таке вугілля складає майже дві третини в наявних геологічних запасах нашої країни. Характеристику вугілля наведено в *табл. 3.1*.

Вугілля подрібнюють в кульовому млині мокрого подрібнення до крупності $<0,08$ мм з отриманням водовугільної пульпи, для приготування якої використовують прісну воду без особливих вимог до її якості. Можливе використання води з органічними забруднювачами, які потім піддаються газифікації (стічні води нафтопереробних, коксохімічних виробництв, підприємств органічного синтезу, господарсько-фекальні води тощо).

Отримана пульпа вприскується у верхню частину реактора крізь центр спеціальної форсунки, за периферією якої подається кисень, кількість якого є меншою, ніж потрібно для спалювання вугілля.

Температура реакції в газогенераторах з прямою кисневою газифікацією водо-вугільної пульпи сягає $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, тому отриманий

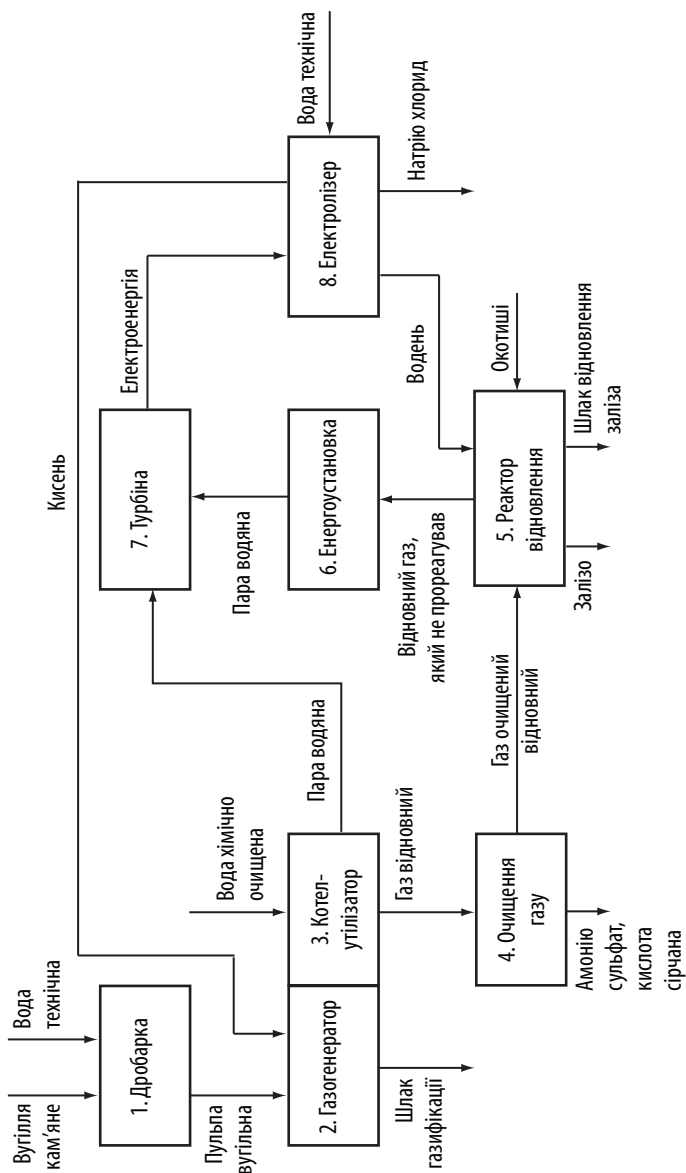


Рис. 3.1. Принципова схема матеріальних потоків

Джерело: авторська розробка

Таблиця 3.1

Характеристика вугілля

Показники та позначення	Одиниці виміру	Числові значення
Технічний аналіз:	%	
Вологість робочої маси W_t^r		10,0
Зольність сухої маси A^d		15,0
Вихід летких речовин із сухої знезоленої (горючої) маси V^{daf}		44,1
Сірчистість загальна сухої маси S_t^d		1,4
Елементний склад органічної маси:	%	
Вуглець C^{daf}		80,9
Водень H^{daf}		5,3
Сірка загальна S_t^{daf}		1,7
Азот N^{daf}		1,1
Кисень O_d^{daf}		11,0

Джерело: банк результатів дослідження вугілля ДП «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут»

газ охолоджується в міжтрубному просторі двоступеневого котла-утилізатора, до трубок якого подається хімічно очищена вода, яка перетворюється на перегріту пару високого тиску з параметрами 4,0 МПа та 440 °С. З нижньої частини котельної установки відводиться гранульований шлак, на який перетворюється мінеральна частина вугілля. Цей шлак використовується в будівництві та для інших цілей.

Охолоджений до 180 °С газ очищується від шкідливих домішок (сполук сірки та азоту – сірководню H_2S і аміаку NH_3). Вилучені домішки використовуються для отримання сірчаної кислоти для потреб хімічної промисловості, а частина кислоти за взаємодії з аміаком газу утворює сульфат амонію – сільськогосподарське добриво:



Очищений газ надходить до нижньої частини реактора відновлення, у верхню частину якого завантажується залізорудна сировина – офлюсовані окатиші Південного ГЗК (Полтавська обл.) із вмістом заліза 55 %. Сталий розмір окатишів (10–15 мм) дає можливість досягти рівномірного розподілу відновного газу за перерізом реактора та здійснення реакцій відновлення.

Залишок газу після відновлення, який, окрім вуглекислого газу, містить гази-відновники, які не прореагували (переважно монооксид вуглецю), надходить до енергетичної установки, де спалюється. Продукти спалювання віддають своє тепло хімічно очищеній воді, яка перетворюється на пару, та скидаються в атмосферу крізь димар (на схемі не показаний).

Пара з котлів-утилізаторів та енергетичної установки надходить до турбіни, де кінетична та внутрішня енергія пари трансформуються в електричну енергію, яка живить електролізер, де відбувається електроліз технічної води з отриманням кисню (використовується для забезпечення потреб газифікації) та водню, який надходить до реактора відновлення для збагачення відновного газу. Залишок після електролізу – розсіл – відводиться на переробку для отримання шляхом випарювання технічного хлориду натрію, який після очищення шляхом перекристалізації може використовуватись як харчова кухонна сіль.

Порівняльну характеристику результатів, отриманих при застосуванні розробленої схеми порівняно з наявною технологією, наведено в табл. 3.2. Ці дані свідчать, що застосування запропонованого технічного рішення дозволяє внаслідок використання для відновлення заліза з руди отриманого електролітичного водню значно (майже в 40 разів) збільшити вихід заліза прямого відновлення в розрахунку на 1 т вугілля, а отже, зменшити кількість використаного вуглецю та утвореного парникового вуглекислого газу.

Наведені дані свідчать про технічну, екологічну та економічну ефективність запропонованого способу.

Таблиця 3.2

Порівняльна характеристика результатів, отриманих при застосуванні
пропонованого способу та прототипу

Показники	Одиниці виміру	Числові значення:	
		Прототип	Пропонований спосіб
Розрахункова одиниця переробки вугілля	т	1,0	1,0
Витратні коефіцієнти на газифікацію:			
кисень (за 0 °С та 101,3 кПа)	м ³	0,856	0,856
вода на утворення пульпи	м ³	4,28	4,28
електроенергія	кВтхгодин	124	124
Кількість отриманого газу (за 0 °С та 101,3 кПа)	м ³ /т	2140	2140
Склад газу:	% об.		
CO ₂		11	11
CO		55	55
H ₂		30	30
N ₂ +Ar та сполуки азоту		2	2
CH ₄		1	1
H ₂ S		1	1
Кількість електроенергії, отримуваної за газифікації (за вирахуванням споживання на власні потреби)	кВтхгодин	4996	4996
Кількість електроенергії, отримуваної за допалювання залишку відновного газу, що не прореагував	кВтхгодин	1260	1260
Кількість водню, отримуваного за електролізу води (за 0 °С та 101,3 кПа)	м ³	-	9930
Кількість отриманого заліза прямого відновлення	кг	2486	98311
Кількість відновлених окатишів	кг	4475	176978
Витрата вуглецю на отримання заліза прямого відновлення	т/т	0,248	0,00629
Кількість утвореного CO ₂ за отримання заліза прямого відновлення	т/т	0,909	0,0231

Джерело: розраховано авторами

3.2. Технологія виробництва коксу без уловлювання хімічних продуктів коксування

В останні роки у світі (США, Австралія, Німеччина, Індія, Китай та інші країни) відроджується інтерес до промислової технології отримання коксу в печах без уловлювання хімічних продуктів. Спричинене це кількома факторами: підвищеною увагою до екологічних проблем, пов'язаних з викидами забруднюючих речовин в довкілля при виробництві коксу; недостатньою конкурентоспроможністю низки багатотоннажних продуктів, отримуваних у хімічних цехах коксохімічного виробництва, порівняно з аналогічними речовинами, отримуваними на підприємствах хімічної та нафтогазопереробної промисловості; підвищенням вартості трудових ресурсів у розвинутих країнах.

Історично печі без уловлювання були характерні для виробництва коксу в XIX столітті. Відновлення розробок у цьому напрямку аж ніяк не є ознакою технічного регресу. Адже вже тоді постала проблема використання енергії утворюваних при коксуванні парогазових продуктів. Були розроблені технічні рішення утилізації теплової енергії парогазових продуктів, утворюваних в печах без уловлювання, для виробництва пари – головного енергетичного ресурсу того часу. Але бурхливий розвиток хімічної промисловості зумовив зростання потреби перш за все у хімічній сировині, яку недостатньо розвинені хімічна та нафтогазопереробна промисловості того часу задовольнити не могли. Це й спричинило розвиток техніки коксування в напрямку уловлювання хімічних продуктів.

Зараз ситуація протилежна – багато хімічних продуктів коксування не витримують конкуренції з аналогічними продуктами високорозвиненої хімічної та нафтогазопереробної промисловості. Тому зараз є можливість і необхідність на новій технічній основі повернутись до технології виробництва коксу в печах без уловлювання. При цьому енергія парогазових продуктів не повинна безповоротно втрачатися, як це було характерно для більшості коксових печей минулого. Ця енергія повинна перетворюватись у найрозповсюдженіший енергетичний ресурс сьогодення – електричну енергію, що дає можливість

забезпечити високу теплотехнічну ефективність виробництва коксу в печах без уловлювання.

Водночас слід зазначити, що наявні на сьогодні у світі промислові агрегати з виробництва коксу без уловлювання, перш за все печі фірми Сан Коук (США), у яких сьогодні у світі виробляється близько 3 млн т коксу на рік, характеризуються певними негативними рисами:

- низькі швидкості коксування, які за інших рівних умов є фактором, який зменшує продуктивність промислових установок, а також зумовлюють використання найдефіцитнішої вугільної сировини підвищеної спікливості;
- високий рівень угару коксу та теплових втрат у доквілля;
- недостатній теплотехнічний коефіцієнт корисної дії (ККД);
- великі площі, які займають ці установки.

До переваг технології виробництва коксу без уловлювання хімічних продуктів коксування порівняно з традиційною технологією коксування в регенеративних печах з наступним уловлюванням хімічних продуктів слід віднести [20]:

- менші питомі капіталовкладення – батареї печей без уловлювання значно простіші за своєю конструкцією порівняно з традиційними регенеративними печами (кількість типорозмірів вогнетривів понад утричі менша), відсутність хімічних цехів уловлювання і переробки хімічних продуктів коксування;
- більша екологічність процесу: оскільки печі працюють під розрідженням, практично відсутні викиди в атмосферу шкідливих речовин;
- можливість отримання електроенергії (у тому числі товарної) за рахунок використання скидного енергетичного потенціалу продуктів спалювання, що залишають опалювальну систему печей з температурою ≈ 1100 °С. Середній склад продуктів спалювання (об. %): CO_2 – 5,6; H_2O – 16,5; O_2 – 8,0; N_2 – 69,9. Загальна кількість отримуваної електроенергії оцінюється нами на рівні ≈ 830 кВт·годин/т валового коксу;

Інтерес до цієї технології підсилюється через недостатню конкурентоспроможність низки хімічних продуктів коксохімічних підприємств, а також у зв'язку з безперервним зростанням вимог до охорони довкілля.

Сутність технології. Принципову блок-схему запропонованої технології для умовної продуктивності 300 тис. т валового коксу на рік наведено на *рис. 3.2*.

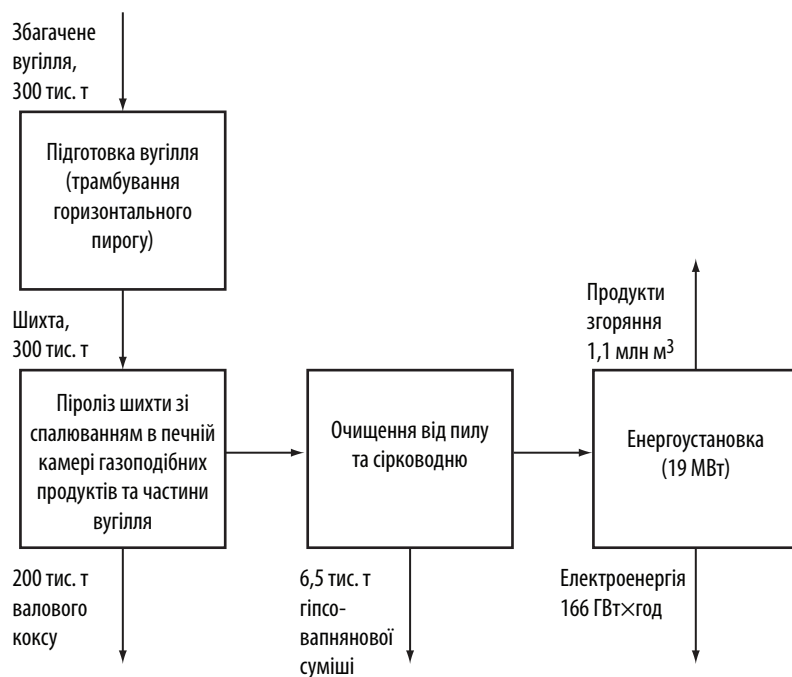


Рис. 3.2. Принципова блок-схема виробництва коксу без уловлювання хімічних продуктів коксування

Джерело: розроблено авторами

До під-склепінного простору камери коксування (*рис. 3.3*) надходить повітря, яке взаємодіє з поверхнею засипки (висотою 0,6-1,0 м, шириною 2,4-4,0 м) та запалює виділені парогазові продукти термічної де-

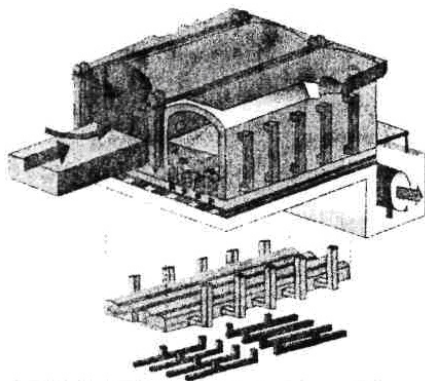


Рис. 3.3. Схема печей без уловлювання

Джерело: [21]

струкції, що відходять з під-склепінного простору до бічних та подових опалювальних каналів [21]. До цих каналів надходить вторинне повітря для допалювання парогазових продуктів. Обігрів засипки ведеться за рахунок утилізації частини ентальпії продуктів спалювання, температура яких на виході з опалювальної системи становить 1000-1100 °С. Подальше використання ентальпії здійснюється на енергетичній установці шляхом перетворення на теплову енергію пари та електроенергію. Перед скиданням до атмосфери через димар продукти спалювання з температурою 180 °С надходять на очищення від з'єднань сірки за допомогою вапнякового молока аналогічно відпрацьованим газам агломеративного виробництва.

Завантаження камери здійснюється збоку крізь двері трамбованою або насипною шихтою. В останньому випадку використовують водоохолоджувані конвеєри. Тривалість операції завантаження при цьому складає 6–7 хв.

До **переваг** такої технології слід віднести:

- більш просту технологічну схему (відпадає необхідність у потужностях охолодження і очищення коксового газу, а також подальших переділів з виробництва низьколіквідних продуктів ректифікації сирого бензолу та переробки кам'яновугільної смоли);

- скорочення викидів шкідливих речовин в оточуюче середовище;
- виробництво електроенергії в кількості, що перевищу потреби підприємства.

Але запропонована технологія має деякі **недоліки**.

- через зменшені швидкості коксування шихта повинна мати достатню спікливість, а безпосередній контакт коксівної засипки з повітрям призводить до помітного угару коксу в камері: за коксування насипних шихт ця величина складає 2,5–3,0 %; для трамбованих шихт – 0,8–1,0 % [22];
- очищення продуктів спалювання від з'єднань сірки сухим способом можливе лише за сірчистості шихти не вище 1 %. За більшої сірчистості треба використовувати значно складніший мокрий спосіб. Отримуваний гіпс, як і у випадку з очищенням газів агломераційного виробництва, має низькі споживацькі властивості, і його реалізація є вельми складною;
- низька корисна висота камери коксування (не більше 1,0 м та 0,6 м на більшості промислових установок) збільшує площу розміщення батареї. Навіть за розміщення двох батарей, що працюють на трамбованій шихті, одна навпроти одної із загальними машинами для завантаження шихти та виштовхування коксу за нашими оцінками загальна площа установки (об'єкти вуглепідготовки, батарея, коксосортировка, енергетична установка, ділянка газоочищення) на 60 % більша, ніж площа заводу тієї ж продуктивності для коксування насипної шихти в печах з уловлюванням хімічних продуктів.

Сировинна база коксування має, як зазначалось вище, забезпечувати достатню спікливість шихти. Товщина пластичного шару повинна бути не менше 15 мм за коксування трамбованої шихти та не менш ніж 16 мм для насипних шихт. Тому перспективи розширення сировинної бази за використання цієї технології певною мірою обмежені, незважаючи на виконані в останні роки дослідження в цьому напрямку [23], згідно з якими використання технології трамбування дає можливість ввести до шихти до 35 % малометаморфованого слабкоспікливого

газового вугілля. Також у роботі [23] зазначено можливість утилізації в складі шихти відходів виробництва та споживання: відпрацьованих моторних оливі і полімерних відходів. Це збігається з результатами багаторічних досліджень ДП «УХІН» з використання в шихтах для коксування органічних добавок [24; 25], а також полімерних відходів, першою стадією переробки яких є саме піроліз, тобто нагрівання без доступу повітря [26].

Отримувані продукти за використання технології – кокс та енергетичні ресурси. Властивості коксу, як і практично для всіх технологій коксування, насамперед визначаються властивостями шихти. Тривале перебування в зоні високих температур (найпоширеніший період коксування 48 годин) сприяють впорядкованості структури отриманого коксу, його зміцненню, поліпшенню показників реакційної здатності (на 5–7 %) та післяреакційної міцності (на 8–10 %). Водночас здійснюється надлишкове укрупнення коксу, тому необхідне подрібнення всього валового коксу (попередній відсів не є ефективним, оскільки вміст класу менше 80 мм не перевищує 20 %) в зубчастих або щоккових дробарках, що призводить до зниження виходу доменного коксу.

На енергетичній установці за утилізації надлишкового тепла продуктів спалювання, що утворюються при згорянні в під-склепінному просторі камери та в опалювальній системі прямого коксового газу та частини засипки, отримують електроенергію та перегріту пару (тиск 2,0 МПа, температура 370 °С). Питомий вихід пари становить 0,3 т/т коксу, електроенергії – 700 кВт·годин/т. За нашими оцінками, на підприємстві з потужністю 1,3 млн т коксу на рік завдяки утилізації надлишкового тепла можуть постійно працювати електрогенератори сумарною потужністю близько 100 МВт, а також вироблятися до 50 т пари на годину. Тобто вся основна продукція підприємства – кокс та енергетичні ресурси – є високоліквідною.

Зіставний техніко-економічний аналіз двопродуктової технології та коксування з уловлюванням хімічних продуктів коксування свідчить, що за будівництва заводу без уловлювання величина капітальних витрат знижується в середньому на 20 %: спрощується конструкція батареї, знижується кількість типорозмірів (так званих «марок») вогнетривких

виробів, не потрібно будівництво хімічних цехів, однак необхідні енергетична установка та ділянка очищення газу від діоксиду сірки.

Продуктивність праці порівняно з коксовими печами з уловлюванням хімічних продуктів зростає на 10 % внаслідок зменшення кількості працюючих та підвищення виходу коксу з однієї камери. Очікувана продуктивність праці прогнозується на рівні 7,3 тис. т коксу в рік на одного працюючого [27].

Технологія відпрацьована в промислових масштабах на низці підприємств США, Китаю, Індії, Австралії, Колумбії та інших країн. Провідні світові розробники в цьому напрямку – фірми Sun Coke (США) та UNDE GmbH (Німеччина) – є тримачами технічної документації та патентів, а також мають необхідне кадрове забезпечення.

ДП «ГИПРОКОКС» та ДП «УХІН» 2004–2006 рр. за рахунок коштів бюджетного фінансування згідно із завданням Мінпромполітики України були виконані дослідження та дослідно-конструкторські проробки з технології коксування в печах без уловлювання [28; 29]. На підставі цього були розроблені вихідні дані на проектування дослідно-промислової коксової батареї без уловлювання хімічних продуктів виробничою потужністю 200 тис. т/рік коксу валового 6 %-ї вологості [30].

Матеріальний баланс коксування в печах без уловлювання помітно відрізняється від матеріальних балансів коксування в печах з уловлюванням [30] насамперед тим, що в ньому відсутні утворювані при коксуванні коксовий газ та хімічні продукти, оскільки в печах без уловлювання (в камері коксування та опалювальній системі) вони перетворюються на продукти спалювання. При цьому до складу цих продуктів входить водяна пара – не лише та, що утворилася безпосередньо при спалюванні парогазових речовин та частини засипки, а й та, що випарена з шихти та утворилася в реакціях поліконденсації, які супроводжують процес утворення коксу (пірогенетична вода).

Загалом процес коксування в печах без уловлювання характеризується великими витратами повітря та кількістю продуктів спалювання. Так, витрата повітря становить 4,6–4,8 т/т сухої шихти (3,6–3,7 тис. м³/т). Зумовлено це тим, що при коксуванні виділяється поміт-

Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень

на кількість горючих парогазових речовин (понад 400 м³/т сухої шихти), утаром частини засипки та необхідності здійснення процесу з великим коефіцієнтом надлишку повітря. У розрахунку на отримуваний кокс кількість вологих продуктів спалювання ще більша – майже 6,5–7,0 т/т коксу (5,0–5,4 тис. м³/т).

Складники теплового балансу також суттєво відрізняються від тих, які характерні для печей з уловлюванням. Зокрема, в прибутковій частині балансу слід враховувати тепло спалювання газу та хімічних продуктів, а у витратах тепла – тепловміст продуктів спалювання, приховану теплоту випаровування вологи шихти та пірогенетичної води. Крім того, при розрахунку теплових втрат слід враховувати втрати не лише через конструктивні елементи печі та опалювальної системи, а й через поверхню колектора для продуктів спалювання, яким ці продукти надходять на котел.

Результати виконаних розрахунків теплового балансу та дані про термічний та теплотехнічний ККД печей без уловлювання наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Температури продуктів спалювання та коефіцієнти корисної дії печей без уловлювання

Показники	Одиниці виміру	Числові значення
Температура продуктів спалювання на виході з батареї до енергетичної установки	°C	988-1013
Теплотехнічний ККД	%	73,7-73,8
Термічний ККД	%	81,7-81,8

Джерело: розраховано авторами

Слід зазначити, що для горизонтальних печей використання трамбованої шихти дозволяє дуже помітно зменшити теплові втрати, що компенсує додаткову витрату теплоти на випаровування вологи.

Загалом вважаємо, що технологія коксування в печах без уловлювання може розглядатись як один із варіантів повоєнного відновлення на новій технічній основі виробництва коксу в необхідній кількості (зо-

крема, для потреб ливарного та феросплавного виробництва), оскільки дає можливість спростити конструкцію печей, знизити капітальні вкладення, відмовитись від створення комплексів хімічних цехів, значна частина продукції яких є неконкурентоспроможною, поліпшити екологічну обстановку на промислових майданчиках коксових підприємств та прилеглих територіях.

Висновки до розділу 3

1. Розглянуто перспективні напрями розвитку металургії заліза з урахуванням цілей кліматичної політики та захисту довкілля. Обґрунтовано необхідність і можливість переходу від технології відновлення заліза з рудних матеріалів в доменному виробництві з виплавою чавуну до відновлення газом з отриманням заліза прямого відновлення.
2. Сутністю запропонованої технології прямого відновлення є відновлення заліза генераторним газом, отримуваним за газифікації вугілля. З метою покращення техніко-економічних показників процесу доцільно збагачувати відновний газ воднем, отримуваним за електролізу води. Джерелом електроенергії для отримання водню є утилізація ентальпії генератного газу, отриманого за високотемпературних процесів газифікації (Техасо, Сопос-Philips). Таке рішення дозволяє зменшити кількість викидів парникового вуглекислого газу на тонну отриманого заліза у кілька разів до цільового рівня, встановленого Міжнародною економічною агенцією.
3. Розглянуто сутність, переваги та недоліки технології виробництва коксу в печах без уловлювання хімічних продуктів коксування. Показано, що ця технологія може розглядатись як один із варіантів повоєнного відновлення на новій технічній основі виробництва коксу в необхідній кількості (зокрема, для потреб ливарного та феросплавного виробництва), оскільки дає можливість спростити конструкцію печей, знизити капітальні вкладення, відмовитись від створення комплексів хімічних цехів, значна

частина продукції яких є неконкурентоспроможною, поліпшити екологічну обстановку на промислових майданчиках коксових підприємств та прилеглих територіях.

Перелік використаних джерел до розділу 3

1. Корогодська А. М., Асєєва І. В., Булавін В. І. та ін. Загальна хімія / за заг. ред. А. М. Корогодської ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2025. 407 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/91083>
2. Шульга І. В. Отримання відновників для виплавки заліза з руди (до середини XIX ст.). *Історія науки і техніки. Вісник НТУ ХПІ*. 2011. № 1. С. 177–189.
3. Ярошевський С. А., Ємченко А. В., Шульга І. В. та ін. Ресурсозбе-рігаючі технології металургійного виробництва на основі використан-ня українського вугілля. Харків : Контраст, 2012. 204 с. ISBN 978-966-8855-80-1.
4. Гороновський І. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Є. Ф. Короткий до-відник з хімії. Київ : Наук. думка, 1987. 833 с.
5. Шульга І. В., Мірошніченко Д. В., Богоявленська О. В. Основи технології коксування вугілля. Харків – Тернопіль : Крок, 2022. 128 с. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/57769>
6. Філатов Ю. В., Крикунов Б. П., Гордієнко А. І. та ін. Досвід ви-робництва доменного коксу поліпшеної якості з українського вугілля та випробування його в доменному плавленні з використанням ПУТ. *Угле-Хімічний журнал*. 2007. № 5. С. 11–18.
7. Ярошевський С. А., Голухін Н. В., Івлєв В. П. та ін. Ефективність пиловугільної технології завдяки повній і комплексній компенсації по-рушень технологічного процесу виплавки чавуну в доменній печі. *Ме-талургійні процеси та обладнання*. 2010. № 2. С. 9–17.
8. Філатов Ю. В., Ковальов Є. Т., Шульга І. В. Теорія і практика ви-робництва та застосування доменного коксу поліпшеної якості. Київ : Наук. думка, 2011. 128 с. ISBN 978-966-00-1193-9..

9. Шульга І. В., Мірошніченко Д. В. Фізика та хімія твердих горючих копалин. Харків – Тернопіль : Крок, 2022. 212 с. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/57770>

10. Kepplinger L. W., Mizelli H., Wurm J. Patentschrift Österreich 409634 B. Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Roheisen oder flüssigen Stahlvorprodukten aus eisenerzhaltigen Einsatzstoffen. Anmeldenummer A839/2000. Anmeldetag 15.05.2000. Beginn der Patentdauer 15.02.2002. Ausgabetag 25.09.2002.

11. Патент України № 117374, МПК C21B13/02, C21B11/02. Відновлення оксиду заліза до металевого заліза із застосуванням коксового газу та газу зіц сталеплавильної печі з подачею кисню / [Метіус Г. Е., МакКлілланд Д. М. Джр., Мейснер Д. К., Монтегю С. С.]. № a201601573; заявл. 05.08.2013; опубл. 25.07.2018. Бюл. № 14.

12. Патент України № 132369, МПК C21B13/02, C22B5/10. Комплекс для прямого відновлення заліза / [Ожогін В. В., Тарасюк Л. І., Ковалевський І. А. та ін.]. № u201809230; заявл. 10.09.2018; опубл. 25.02.2019. Бюл. № 4.

13. Шульга І. В., Мірошніченко Д. В. Устаткування підприємств з переробки твердих горючих копалин. Харків – Тернопіль : Крок, 2022. 209 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/57768>

14. Найдорожча енергетична помилка в світі: вчені пояснили, чому водень став чорним // Novyny.live. URL: <https://share.google/obdwoYtJvMRlrZ71h>

15. Шульга І. В., Кизим М. О., Хаустова В. Є., Котляров Є. І. Заявка України № u2025 05316 від 31.10.2025. Спосіб прямого відновлення заліза.

16. Шульга І. В., Кизим М. О., Котляров Є. І. Напрямки удосконалення технологій конверсії вугілля в синтетичні рідкі палива. *Вуглехімічний журнал*. 2023. № 6. С. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-6-37-44>

17. Яка країна світу має найбільші запаси вугілля // Novyny.live. URL: <https://novyny.live/industriyi/obignala-usikh-iaka-krayina-svitu-maie-naibilshi-zapasi-vugillia-280954.html>

18. Шульга І. В., Котляров Є. І., Кизим М. О., Хаустова В. Є. Перспективна сировинна база процесів виробництва синтетичного рідкого палива з українського вугілля. *Вуглехімічний журнал*. 2023. № 5. С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-5-3-11>

19. Руди заліза // Портал даних видобувної галузі України. URL: https://eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/rudi-zaliza_2022/

20. Хаустова В. Є., Кизим М. О., Котляров Є. І., Шульга І. В. Про напрями розвитку коксової та безкоксової металургії. *Вуглехімічний журнал*. 2025. № 4. С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.31081/1981-309X-2025-0-4-3-13>

21. Valia H. S. Nonrecovery and Heat Recovery Cokemaking Technology. *New Trends in Coal Conversion*. Woodhead Publishing, 2019. P. 263–292. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102201-6.00010-8>

22. Kumar P. P., Barman S., Ranjan M. et al. Maximization of non-coking coals in coke production from non-recovery coke ovens. *Ironmaking & Steelmaking*. 2008. Vol. 35 (1). P. 33–37. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328107X174762>

23. Тютюнников Ю. Б., Сінцєрова Л. Г., Грєчко Ю. І., Лялюк В. С. Органічні добавки у виробництві коксу. Київ : Техніка, 1971. 96 с.

24. Шульга І.В., Зеленський О.І. Розробки ДП «УХІН» щодо вдосконалення промислової технології коксування і розвитку хіміко-технологічних процесів переробки вугілля. *Вуглехімічний журнал*. 2020. № 3. С. 17-25. DOI: <https://doi.org/10.31081/1981-309X-2020-0-3-17-25>

25. Шульга І. В., Мещанін В. І., Котляров Є. І., Карєв А. І., Лебєдєв В. В. Термохімічна переробка відходів поліетилентерефталату. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2025. Т. 36(75). Ч. 1. С. 253–259. URL: <https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/36-75-4>

26. Mainar-Toledo M. D., González García I., Leiva H. et al. Environmental and Economic Benefits of Waste Heat Recovery as a Symbiotic Scenario in Sweden. *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 1636. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18071636>

27. Ковальов Є. Т., Торяник Е. І., Шульга І. В. Розробка принципів технічних рішень з нової технології отримання коксу без уловлювання хімічних продуктів коксування. Звіт з НДР 211.2004. Харків : УХІН, 2004. 80 с.

28. Ковальов Є. Т., Шульга І. В. Розрахунки елементів конструкції батареї коксових печей без уловлювання. Вибір технології очищення газів, що відводяться. Звіт з НДР 230.2005. Харків : УХІН, 2005. 64 с.

29. Ковальов Є. Т., Шульга І. В. Матеріали технологічного завдання для проектування дослідно-промислової установки коксування без уловлювання хімічних продуктів. Звіт з НДР 230.2006. Харків : УХІН, 2006. 161 с.

30. Шульга І. В., Мірошніченко Д. В. Розрахунок і проектування обладнання вуглепідготовчих і коксових цехів коксохімічних виробництв. Харків : Планета-Прінт, 2020. 319 с. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/52863>

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У світовій чорній металургії все більше проявляється тренд структурної технологічної трансформації, сутність якої полягає у переході від вуглецево-інтенсивного циклу доменного виробництва (BF/BOF) до циклу прямого відновлення заліза з електросталеплавильним переділом (DRI/EAF).

У країнах, які мають власні високорентабельні запаси природного газу, (наприклад, країни Перської затоки та північної Африки) або енергетичного вугілля (Індія) економічно вигідною стає відмова при виробництві заліза від використання коксу відновника при виробництві заліза) на користь синтез-газу (суміш монооксиду вуглецю і водню), або чистим воднем. Структурна трансформація чорної металургії має виразну регіональну асиметрію – країни, що розвиваються, нарощують потужності з виробництва заліза прямого відновлення, тоді як розвинені економіки перетворюються на імпортерів цього напівфабрикату.

Переорієнтація української металургії на технологію прямого відновлення заліза з електросталеплавильним переділом (DRI/EAF) є перспективним напрямом повоєнного відновлення, що пояснюється таким.

Українська чорна металургія, яка донедавна входила до топ-світових виробників чавуну і сталі внаслідок війни втратила значну частку активів і знаходиться у кризовому стані. Втрата власного видобутку коксівного вугілля спікливих марок і обмежені можливості його заміщення імпортом закріплюють за доменним циклом зростаючу імпортозалежність, а нарощування експорту залізорудної сировини консервує позицію постачальника найменш маржинальної ланки глобального ланцюга доданої вартості.

Безперспективність збереження наявної технології отримання заліза підтверджується кількісною оцінкою екологічного впливу: викиди діоксиду вуглецю на українських металургійних підприємствах сягають

2,1–2,3 т на тонну чавуну, що у 5–6 разів перевищує цільовий орієнтир Міжнародної енергетичної агенції (0,4 т на тонну сталі). Підвищення екологічності виробництва не усувається поступовою модернізацією доменного циклу – потрібна принципова зміна технологічного укладу галузі, оскільки саме використання вуглецю коксу як відновника є першопричиною проблеми.

Механізм транскордонного вуглецевого регулювання ЄС (СВАМ), який запрацював для України з 2026 р., є одночасно і найгострішим короткостроковим викликом, і стратегічним вікном можливостей. З одного боку, СВАМ вимагає підтвердження вбудованих викидів парникових газів для кожної партії металопродукції та обов'язкового придбання сертифікатів СВАМ, що напряму позначається на конкурентоспроможності українського експорту на ключовому ринку збуту. З іншого боку, цей регуляторний тиск може і повинен стати зовнішнім стимулом для модернізації, якої вітчизняна металургія потребувала б у будь-якому разі – з огляду на критичний знос основних засобів переважної більшості підприємств галузі.

Це формує головну проблему, на вирішення якої спрямовано дослідження, результати якого наведено в монографії: як забезпечити технологічне оновлення металургії, коли традиційний ресурс розвитку втрачено, а ключовий ринок збуту одночасно посилює вимоги до вуглецевого сліду продукції.

Україна наразі має вузьке, але реальне вікно можливостей, щоб уникнути одночасно двох пасток – імпортозалежності від коксівного вугілля та консервації сировинного профілю експорту. Дослідження обґрунтовує стратегічну доцільність організації власного виробництва заліза прямого відновлення (DRI) за технологією газифікації вугілля зі збагаченням генераторного газу електролітичним воднем. Це рішення ґрунтується на власній ресурсній базі: доведені запаси залізної руди (18 млрд т) та значні обсяги малометаморфованого вугілля (майже 45 млрд т) утворюють достатню основу для його реалізації. Головна перевага рішення – воно не потребує імпорту ні коксівного вугілля, ні природного газу, спираючись виключно на сировину, яка видобувається на контрольованій території країни.

Запропоноване рішення узгоджується також із принципами циркулярної економіки, у контексті якої виконувалося дослідження. Побічні продукти газифікації і очищення генераторного газу (гранульований шлак, сульфат амонію, сірчана кислота) мають власні ринки збуту, а утилізація ентальпії генераторного газу дозволяє отримати таку кількість електроенергії, якої достатньо для виробництва заліза прямого відновлення з використанням електролітичного водню. Таким чином, пряме відновлення заліза є не лише інструментом декарбонізації, а й кроком до ресурсоефективної моделі виробництва.

Паралельно, оскільки повна відмова від коксу найближчим часом неможлива через потреби феросплавного і ливарного виробництва, обґрунтовано доцільність переходу на технологію виробництва коксу і електроенергії без вловлювання хімічних продуктів коксування («двопродуктовий завод»). Це рішення дозволяє спростити конструкцію коксових батарей, відмовитися від витратних і здебільшого низькорентабельних хімічних цехів та поліпшити екологічну ситуацію на майданчиках коксохімічних підприємств – тобто є прагматичним місточком між нинішнім станом галузі та її повною технологічною трансформацією.

Реалізація запропонованих рішень вимагає координованих дій на трьох рівнях: підприємств (ТЕО пілотних установок прямого відновлення заліза, поетапне впровадження технології «двопродуктового заводу»), галузевої політики (національну систему торгівлі квотами, узгоджений з СВМ, підтримка видобутку сировини для флюсів і вогнетривів) та зовнішньої політики (синхронізація термінів вуглецевих обмежень з інвестиційними циклами модернізації галузі).

Викладені в монографії технічні рішення є завершеними на науково-прикладному рівні й потребують подальшої деталізації – насамперед техніко-економічних розрахунків витрат на спорудження дослідно-промислової установки прямого відновлення заліза, а також оцінки логістичних і кадрових обмежень впровадження технологій в умовах воєнного часу. Ці питання визначають перспективи подальших досліджень авторського колективу.

У підсумку, проведене дослідження засвідчує, що відновлення чорної металургії України на довоєнних технологічних та структурних засадах є обмежено можливим: технологічно – через втрату частини сировинної та виробничої бази, структурно – через посилення кліматичних вимог на ринку збуту ЄС. Водночас наявна ресурсна база у поєднанні з обґрунтованими в монографії технологічними рішеннями (виробництво заліза прямого відновлення за технологією газифікації вугілля та перехід на технологію двопродуктового коксохімічного виробництва) створює технологічну основу для формування низьковуглецевого профілю галузі, що узгоджується з екологічними вимогами ЄС щодо СВМ та довгостроковими економічними інтересами України.

Наукове видання

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Монографія

За ред. Є. І. Котлярова, Т. І. Салашенко

Підписано до друку 28.12.2025 р. Формат 60 x 84/16. Папір офсетний.

Гарнітура AgroPro. Друк цифровий. Ум. друк. арк. 10,5.

Обл.-вид. арк. 13,2. Наклад 50. прим. Зам. № 207.

ФОП Лібуркіна Л. М.

Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції

від 12.02.2003 р., серія ХК № 76

61003, м. Харків, Університетська, 3, к. 9.

Надруковано у ФОП Озеров Г. В.