

О.Л. Чайка, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. лаб., e-mail: chaykadp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1678-2580>

Б.В. Корнілов, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: balesan2209@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5544-3023>

О.Є. Меркулов, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр., e-mail: merkulov1@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7867-0659>

А.О. Москалина, канд. техн. наук, наук. співр., e-mail: moskalina.aa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9552-2853>

В.В. Лебідь, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: vitalii.lebid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3938-3785>

М.М. Ізюмський, мол. наук. співр., e-mail: izumnick@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5164-4450>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАНУ) (Дніпро, Україна)

Аналіз тенденцій розвитку уявлень та технологій, спрямованих на зменшення емісії діоксиду вуглецю в доменному виробництві

Розробка напрямів вдосконалення технології доменної плавки з метою підвищення енергоефективності та поліпшення екологічних показників шляхом скорочення викидів діоксиду вуглецю є актуальним завданням сьогоднішнього дня в світовій металургії. За прогнозом Міжнародного енергетичного агентства (IEA) до 2050 року доменне виробництво збережеться як домінуюча ланка в отриманні сталі, оскільки вона є найбільш економічно вигідною з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90 % і більше. В доменному виробництві споживається 40–75 % енергетичних ресурсів металургійного комбінату, тому доменна піч має найбільший потенціал до зменшення емісії діоксиду вуглецю.

У роботі наведено результати аналізу напрямів скорочення викидів діоксиду вуглецю та зменшення витрати вуглецю в доменному виробництві за рахунок вдосконалення існуючих технологій та впровадження інноваційних технологій зменшення викидів CO_2 , заснованих на вдуванні в горн доменної печі паливних добавок до дуття: водню; коксового газу; відмитого колошникового газу. Світовим лідером в розробці технічних та технологічних рішень щодо скорочення викидів CO_2 в доменному виробництві є компанії Paul Wurth, ThyssenKrupp і Primetals. Але рішення, які пропонують закордонні компанії, не завжди можливо застосувати для доменного виробництва України, вони вимагають наукового опрацювання та адаптації до умов України, в тому числі, і з урахуванням енергобалансу підприємств, сировинних умов, оснащеності доменних печей, рівня технології та конкурентоспроможності залізівуглецевого напівпродукту, наявності енергоносіїв.

В Україні необхідно розробити власну концепцію зменшення викидів CO_2 з урахуванням збереження конкурентоспроможності залізівуглецевого напівпродукту, яка залежить від енергоемності доменного виробництва. Тому дуже важливо оцінити та проаналізувати напрями скорочення викидів CO_2 в металургії за кордоном для подальшої розробки режимів доменної плавки, що забезпечують зменшення викидів діоксиду вуглецю стосовно до існуючих і перспективних умов функціонування металургійних підприємств України.

Ключові слова: доменна піч, технології, викиди CO_2 , екологія.

Вступ. У зв'язку з глобальним потеплінням та пов'язаними з ним негативними наслідками в майбутньому 195 країн світу та Європейський Союз ратифікували Паризьку угоду щодо клімату в 2015 р. [1], яка зобов'язує їх зменшити викиди CO_2 ,

у тому числі і в металургії, де ці показники дуже високі. Паризька угода, прийнята на конференції ООН із захисту клімату в 2015 році (COP-21), передбачає обмеження глобального потепління до рівня нижче 2 °C, за можливості до – 1,5 °C, в порівнянні з до-

індустріальним періодом. На думку вчених, цільового значення 1,5 градуси можна досягти лише у тому випадку, якщо у період з 2045 по 2060 рік знизити рівень шкідливих викидів до нуля.

У рамках 25-ї Конференції сторін Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату в 2019 р. у Мадриді (COP-25) та 25-ї Конференції сторін Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату в 2021 р. у Глазго (COP-26), були узгоджені положення, що доповнюють норми, прийняті в рамках COP-2015 р. у Парижі та COP-24 у Катовіце, спрямовані на досягнення мети Паризької угоди щодо обмеження зростання температури 1,5 °C [2, 3].

Україна стала однією з перших європейських країн, яка ратифікувала 14 липня 2016 р. Паризьку угоду, одним із аргументів чого стали питання суттєвих кліматичних змін на території України, що зумовлюють підвищення ризиків для здоров'я та життєдіяльності людини, природних екосистем та секторів економіки, а також питання забезпечення національної, екологічної, економічної та енергетичної безпеки України. У січні 2020 р. в Україні представлено Концепцію зеленого енергетичного переходу, де встановлена мета: досягти вуглецевої нейтральності української економіки до 2070 р. [4]. При цьому структура викидів в Україні відрізняється – якщо у світі на металургію припадає 6 % викидів CO₂, то в Україні – 26 % (рис. 1) [5–6]. Відповідно, роль металургії у декарбонізації української економіки суттєво вища, ніж у середньому у світі. Проте державної програми щодо зменшення викидів CO₂ у металургії України немає.

На металургійному підприємстві повного циклу на доменний цех припадає одна з найбільших часток (до 70 %) витрати енергоресурсів та викидів CO₂. Тому внесення змін до технології доменного виробництва є одним із пріоритетних напрямів скорочення викидів CO₂ та споживання первинних енергоресурсів.

За прогнозами Міжнародного Енергетичного Агентства (IEA) до 2050 р. доменне виробництво збережеться як домінуюча ланка в отриманні сталі, оскільки вона є найбільш економічно вигідною з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90 % і більше. Порівняно з іншими технологіями виробництва чавуну, доменні печі дозволяють гнучкіше і динамічніше працювати з рудою різної якості. Що ж до про-

дуктивності, то доменні печі значно випереджають інші технології. Завдяки цим перевагам на доменно-конвертерні технології припадає переважна частка (60–70 %) світового виробництва сталі. Нові технології одержання сталі почнуть активно впроваджуватися лише після 2030 року, і це до 2050 року може призвести до зменшення традиційного способу виробництва сталі на 50 %. Однак це можливе лише за умови значних, в десятки мільярдів доларів, інвестицій у реалізацію нових технологій.

Низьковуглецеві технології виробництва сталі з меншими на 25–60 % викидами CO₂ раніше не набули поширення, оскільки пов'язані з великими виробничими витратами – на 10–80 % дорожче, ніж за традиційним маршрутом «доменна піч – кисневий конвертер» [6, 7]. Безвуглецеві технології виробництва сталі зараз перебувають у стадії розробки.

За даними IEA, найважливіші технології зниження викидів парникових газів будуть готові для промислового впровадження не раніше 2030 р. Тому цілі щодо зниження викидів до 2030 р. можуть бути реалізовані в Україні лише за рахунок більшого використання металобрухту та заходів щодо підвищення енергоефективності традиційного маршруту виробництва сталі «доменна піч – кисневий конвертер».

На сьогоднішній день доменні печі є основним виробником чавуну по всьому світу, оскільки доменне виробництво є найбільш ефективним та економічно вигідним способом масового виробництва чавуну із застосуванням викопних енергоносіїв. Загальний обсяг виробництва чавуну становить близько 1,2 млрд тонн на рік.

У доменному виробництві ЄС викидається близько 1,3 т CO₂ на тону сталі [7]. В Україні викиди на ~ 8 % більші, тому що енергоємність технології доменного виробництва України поступається країнам ЄС [6].

Найближчим часом система торгівлі квотами на викиди CO₂ (EU ETS) може значно збільшити собівартість чавуну та сталі в Україні, що вимагатиме внесення змін до технології доменної плавки. Якщо українські виробники не скорочуватимуть викиди CO₂, то їхня продукція стане неконкурентоспроможною. Тому на найближчі 30 років розробка та реалізація технологій та режимів доменної плавки, спрямованих на

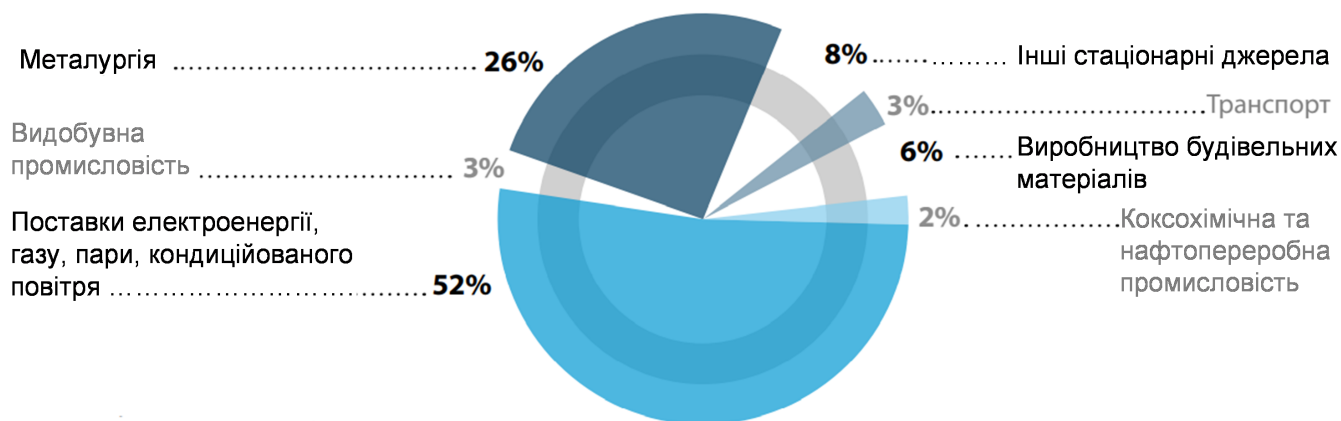


Рис. 1. Структура промислових викидів CO₂ у галузях України за 2019 рік [6] (переклад авт.)

зменшення викидів діоксиду вуглецю з доменної печі, є актуальною задачею.

Сучасні технології скорочення викидів CO_2 у доменному виробництві. Нижче наведено огляд важливих технологій скорочення викидів CO_2 , що є в області доменного виробництва чавуну [8–15].

Класичні технології скорочення викидів CO_2 . Менша витрата коксу, умовного палива, вуглецю та, відповідно, менші викиди CO_2 мають доменні печі, на яких реалізовані технології та технічні підходи:

- печі, що мають більший об'єм і, відповідно, менші питомі теплові втрати на тону чавуну, що виплавляється;
- безконусний завантажувальний пристрій (БЗП);
- більший тиск у печі;
- висока температура гарячого дуття;
- вдування додаткового палива, такого як пиловугільне паливо (ПВП), природний газ тощо;
- підвищення якості сировини;
- газова утилізаційна безкомпресорна турбіна (ГУБТ);
- краща оснащеність контрольно-вимірювальними приладами (КВП) та математичними моделями;
- підбір максимально ефективних технологічних параметрів ведення плавки (розподіл шихтових матеріалів на колошнику, газодуттєві параметри, перепади тиску, температури тощо).

За останні 100 років об'єм доменних печей (ДП) зріс майже в 10 разів і досяг об'єму понад 5000 м³ (рис. 2). За кількістю потужних ДП об'ємом понад 5000 м³ (9 доменних печей) Китай посідає друге місце у світі після Японії (15 доменних печей). Збільшення

об'єму доменних печей дозволяє скоротити витрати коксу на виплавку чавуну до 30 кг і вище [10].

Розробка БЗП стала важливим досягненням у сфері технологій доменного процесу [11]. Впровадження БЗП у конструкцію доменної печі призвело до скорочення витрати коксу та викидів CO_2 з реалізацією різних заходів, таких як оптимізація процесу доменної плавки, профілактика порушень у роботі печі, а також забезпечило можливість ефективного використання побічної продукції, такої як коксовий горішок, доменний шлак тощо у доменній печі.

У надійній та економічній роботі доменної печі робота системи подачі та нагрівання комбінованого дуття відіграють особливу роль. Система подачі дуття в доменну піч представляє складну комбінацію турбокомпресорів, повітрянагрівачів, трубопроводів, регулюючої та запірної апаратури, а характеристики повітрорудних машин багато в чому визначають параметри високоефективної роботи доменних печей: продуктивність печі, витрата коксу, рівність ходу печі та винос колошничого пилу. Це видно з практики комбінату «Криворіжсталь» та результатів дослідних плавок на комбінованому дутті, виконаних спільно з Інститутом чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України та інших публікацій [12].

Сучасні повітрянагрівачі Калугіна дозволяють забезпечити нагрівання доменного дуття до температур 1400–1500 °С. Підвищення температури дуття на кожні 10 °С дозволяє скоротити витрати коксу на 0,14–0,5 % [13].

Застосування технології ПВП допомогло скоротити викиди CO_2 , оскільки у ПВП нижчий коефіцієнт ви-

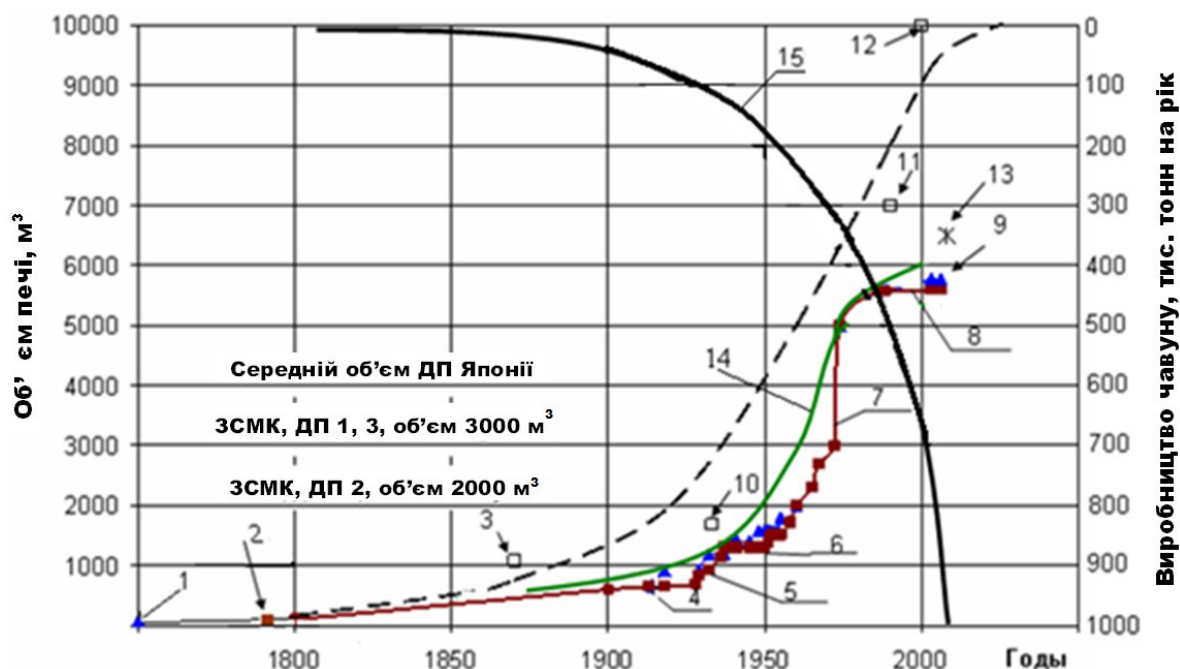


Рис. 2. Динаміка збільшення максимального об'єму доменних печей у світі (▲), СРСР, Україні, Росії (—■—) та у віртуальному просторі (---): проєкт В.І. Гулиги (10), пропозиція В.І. Логінова та С.М. Кутнера (11), прогноз Є.Ф. Вегмана (12). Іменні етапи розвитку обсягу доменних печей: платформа Революції (4), стежка Гулиги (5), притулок Павлова (6), комуністичний підйом (7), плоскогір'я «застою» (8), вершини світу, Японія (9). Шахтні печі «шулу» об'ємом 70 м³ у Китаї (1), домни П. Демидова 1740 р. (2) та Г. Кокрена об'ємом 1071 м³ (3). Експертна оцінка об'єму найбільшої печі, що будується у Китаї (13). Апроксимація динаміки зростання обсягу доменних печей за В.Ф. Вегманом (14), прогнозна кількість будівництва нових доменних печей (15) [10] (переклад авт.)

кидів CO_2 порівняно з коксом. На сьогоднішній день витрата ПВП досягає 200–250 кг/т, при цьому витрата коксу знаходиться в діапазоні від 300 до 250 кг/т, що є широко розповсюдженою практикою на деяких доменних печах у Західній Європі. В Україні витрата ПВП – 120–160 кг/т, а витрата коксу – 320–400 кг/т, що пов'язано з відмінностями у шихтових умовах та технології ведення доменної плавки.

Для природного газу (ПГ) характерний нижчий вміст вуглецю (на 10–15 %) в порівнянні з ПВП, отже, заміна ПВП природним газом створює потенційні можливості для поступового зниження викидів CO_2 з доменної печі у разі, якщо економічна перевага вдування ПВП компенсується підвищенням цін на сертифікати на викиди CO_2 . Максимальна витрата при вдуванні природного газу, досягнута на сьогоднішній день, становить 130 кг/т порівняно з 252 кг/т чавуну для ПВП [14]. Проте на сьогоднішній день доменне виробництво України повністю відмовилося від застосування природного газу та перейшло на технологію роботи з ПВП. Це пов'язано з тим, що природний газ коштує більш ніж у 3,5 рази дорожче за кокс і в 13 разів дорожчий за ПВП.

Газова утилізаційна безкомпресорна турбіна (ГУБТ) може рекуперувати значну частину кінетичної енергії колошникового газу в електроенергію. ГУБТ забезпечує рекуперацію приблизно однієї третини енергії, що використовується повітродувкою доменної печі. Навіть у разі, коли тиск доменного газу низький, більш високий тиск колошникового газу проти атмосферного тиску виправдовує використання ГУБТ. Завдяки такій установці можна отримувати 30–40 кВт·год електрики на кожній тонні чавуну при використанні системи мокрого пилоочищення газів, що відходять (обсяг генерації електроенергії можна збільшити до 50–60 кВт·год при використанні сухого видалення пилу).

Якість сировини істотно впливає на споживання енергоресурсів та витрату палива в доменній печі. На сьогоднішній день багато доменних печей у Європі працюють з високим вмістом агломерату в шихті доменної печі. Враховуючи, що для виробництва агломерату характерні більші викиди CO_2 , ніж для виробництва окатишів, збільшення частки високоякісних окатишів у шихті доменної печі є цікавою альтернативою для металургійних підприємств для зниження викидів CO_2 . Це може бути економічно рентабельно, якщо ціни на сертифікати на викиди CO_2 збалансують підвищену вартість шихти з високим вмістом окатишів.

Тим не менш, незважаючи на більш високі рівні викидів CO_2 , порівняно з процесом виробництва окатишів, процес агломерації має вкрай важливе значення для ефективного використання отриманого дріб'язку на металургійному підприємстві. Отже, агломерат повинен входити до складу суміші у мінімальній кількості порівняно з повторним використанням дріб'язку, що утворюється у процесі виробництва сталі.

Аналогічним чином, додавання попередньо відновленої сировини, такої як залізо прямого відновлення (ЗПВ) або заліза гарячого брикетованого (ЗГБ), може призвести до зниження витрати палива, а також

скорочення викидів CO_2 з доменної печі, і забезпечити інші переваги, такі як підвищення продуктивності, нижча витрата шлаку тощо. Додавання ЗПВ/ЗГБ зі ступенем металізації, що зазвичай перевищує 90 %, означає, що технологічний процес відновлення заліза буде здійснюватися поза доменною піччю, що призведе до зниження споживання енергії доменної печі.

Висока частка кислих рудних окатишів вимагає добавки великої кількості вапняку в шихту, що в кінцевому підсумку призводить до збільшення витрати палива, а також викидів CO_2 з доменної печі. Саме тому потрібна оптимізація складу шихти з погляду основності сировини та шлаку.

Збільшення масової частки заліза в шихті актуальне і з погляду зменшення викидів CO_2 [15]. Підвищення вмісту заліза на кожний 1 % зменшує витрату коксу на 1–1,4 % [13].

Перспективні технології скорочення викидів CO_2 у доменному виробництві. Інноваційні технології зменшення викидів CO_2 засновані на вдуванні в горн доменної печі паливних добавок до дуття: водню; коксового газу; відмитого колошникового газу.

Рівень викидів CO_2 на металургійних підприємствах може бути зменшений за рахунок застосування технологій, що дозволяють утилізувати в рамках доменного виробництва надлишкові гази, що відходять з технологічних промислових агрегатів.

Вдування коксового газу в доменну піч

Коксовий газ містить до 60 % водню у своєму складі. Тому ця паливна добавка до дуття має великий потенціал для зменшення викидів CO_2 у доменному виробництві.

Аналітичні дослідження впливу вдування коксового газу на процеси в доменній печі та показники доменної плавки виконані М.О. Шаповаловим, О.М. Рамом, Є.М. Локшиним, Ю.С. Борисовим та І.Г. Товаровським [16–19]. Однак у цих дослідженнях не враховано роль коксового газу декарбонізації доменного виробництва.

Перші на практиці доменного виробництва промислові дослідження з вдування коксового газу в горн доменної печі проведені на Кузнецькому металургійному комбінаті (КМК) в 1957–1958 рр. [20].

Промислове освоєння вдування коксового газу в Україні почалося з 1980 року на доменних печах Макіївського металургійного комбінату (МакМК) та тривало до 1988 року [16]. Надалі з економічних причин Макіївський металургійний комбінат (МакМК) було переведено працювати з природним газом.

На сьогоднішній день у світі застосування коксового газу в доменному виробництві не знайшло широкого застосування з економічних причин. Однак у світлі необхідності декарбонізації доменного виробництва, питання його застосування продовжує розглядатися.

Компанія PAUL WURTH активно працює над розробкою концепцій вдування коксового газу в шахту [21]. PAUL WURTH пропонує вдування коксового газу після установки риформінгу, нагрітого до температури 900–1000 °C в нижню частину шахти доменної печі та через фурми спільно з ПВП.

Дана технологія за прогнозами PAUL WURTH забезпечить можливість використання значного об'єму газів з технологічних промислових агрегатів у доменній печі, а також поетапного зниження викидів CO_2 з доменної печі з великим потенціалом для скорочення викидів CO_2 на 17–50 %.

На доцільності використання коксового газу вказують і японські фахівці, що розробляють спосіб виплавки чавуну з вдуванням в доменну піч коксового газу, підданого конверсії, що має високий вміст водню [22].

При цьому варто відзначити, що вдування коксового газу після риформінгу, нагрітого до температури 900–1000 °C, в нижню частину шахти доменної печі є не випробуваною технологією.

Компанія ROGESA Roheisengesellschaft Saar mbH (ROGESA) доручила компанії Paul Wurth розробити та поставити системи вдування коксового газу для доменних печей № 4 та 5, розташованих у Діплінгені (Земля Саар, Німеччина). Коксовий газ вдуватиметься через фурми доменної печі.

У Китаї в 2012 році компанія AnSteel розпочала вдування коксового газу в доменну піч № 1 у Баюцюані. Річний економічний ефект становив близько 100 млн юанів, а щорічне скорочення викидів CO_2 становило приблизно 650 тис. т [23].

Для умов України доцільно на першому етапі випробувати вдування коксового газу через фурми. Реалізація вдування коксового газу вимагає для спорудження комплексу тонкого очищення та його транспортування інвестицій 6–8 млн доларів [24].

Вдування відмитого колошникового газу в доменну піч

В 1920 р. Ланце перший запропонував вдувати гарячий відновлювальний газ через звичайні фурми доменної печі [25]. Для того, щоб компенсувати в цьому випадку менший об'єм дуття, що надходить через фурми, відновлювальний газ передбачалося вдувати через додаткові фурми на нижніх рівнях шахти.

Вперше у світі технологію вдування колошникового газу, відмитого від CO_2 за проектом ЦНДІЧерМет, було випробувано у промислових масштабах в 1987–1990 рр. на ДП № 2 об'ємом 1033 м³ БАТ «Тулачермет» [26].

У 1988–1989 рр. у технологічному супроводі вдування відмитого колошникового газу брав участь ІЧМ. Технологія вдування колошникового газу на ДП № 2 НВО «Тулачермет» включала в себе відмивання колошникового газу від CO_2 (виділений CO_2 викидався в атмосферу), компримування, нагрівання в штатних повітрянагрівачах до 1200 °C і вдування в горн доменної печі. Така технологія дозволяла зменшити витрати коксу до 367 кг/т чавуну та збільшити продуктивність печі на 25–30 %, зменшення викидів CO_2 в атмосферу не оцінювалося [26].

Установка (панцюг апаратів) з відмивання CO_2 із колошникового газу монометаноламіном (продукт хімічної галузі) розташовувалась на ділянці площею 6 гектарів, а штат обслуговуючого персоналу складався з 120 осіб (без урахування газорятувальників на всіх ділянках установки та доменної печі). Обладнан-

ня було демонтовано у 90-х роках через припинення бюджетного фінансування [27].

В даний час з метою зменшення викидів CO_2 західні металургійні концерни, такі як ArcelorMittal, ThyssenKrupp Steel Europe AG, Tata Steel Europe, Saarlouis, Dillinger Hütte GTS, Ilva, Rautaruukki Oyj, voestalpine Stahl, SSAB продовжують ці розробки ULCOS (Ultra Low CO_2 Steelmaking – металургійний процес із наднизьким виділенням CO_2) [28].

Амбітною метою програми ULCOS був значний прорив у технології металургійного виробництва, який дозволив би скоротити викиди CO_2 мінімум на 50 % порівняно із сучасними технологічними процесами. Як найбільш перспективні процеси, намічені для всебічного дослідження, було обрано чотири технології ULCOS: доменний процес ULCOS (ULCOS-BF); концепція відновлювальної плавки Hlsarna; процес прямого відновлення ULCORED та технології ULCO WIN/ULCOLYSIS, засновані на процесі електролізу [29]. До основних особливостей технології доменного процесу (ULCOS-BF) можна віднести:

- повторне вдування відновлювальних компонентів колошникового газу CO та H_2 ;
- використання чистого холодного кисню в фурмах горну замість гарячого дуття;
- скорочення використання коксного вуглецю з коксу та ПБП;
- повернення CO_2 з колошникового газу в підземні сховища.

Металургійні дослідження проводились у лабораторних умовах. Завершенням проекту ULCOS була перша кампанія ULCOS-BF на експериментальній доменній печі фірми LKAB у Мефосі, Швеція [30]. Результати роботи експериментальної доменної печі з рециклінгом колошникових газів показують, що викиди CO_2 можна скоротити на 26 %. Якщо поєднувати технологію рециклінгу колошникових газів з технологією CCS (уловлювання та зберігання CO_2) викиди CO_2 можна скоротити на 50–70 %.

До недоліків технології роботи доменної печі з рециклінгом колошникових газів можна віднести те, що при застосуванні цієї технології в промислових масштабах колошниковий газ у цьому випадку повністю використовується в доменній печі. Отже, частина колошникового газу, яку використовували в інших цехах підприємства, повинна бути замінена, наприклад, природним газом.

Проект ArcelorMittal – IGAR (Injection de Gaz Réformé) передбачає вловлювання CO_2 з доменної печі та перетворення його на синтез-газ, який може вводиться в доменну піч для відновлення заліза. Такий підхід дозволяє скоротити викиди вуглекислого газу двома шляхами: за рахунок уловлювання CO_2 та за рахунок використання CO_2 у сталеплавильному виробництві (отриманий із CO_2 синтез-газ частково заміщає кокс, відповідно, знижується потреба у виробництві коксу та видобутку вугілля). За попередніми розрахунками, IGAR потенційно здатний знизити викиди металургійного заводу на 0,1–0,3 т CO_2 у розрахунку на тону рідкої сталі. Синтез-газ складається з двох компонентів – монооксид вуглецю і водню. Для

отримання цих компонентів використовується процес сухого риформінгу – суміш CO_2 та природного газу (CH_4), які нагрівають до дуже високої температури, використовуючи «плазмовий факел». У перспективі ArcelorMittal розраховує використати замість природного газу біогаз чи відходи пластику.

Уловлювання та утилізація вуглекислого газу (Carbon capture and use, CCU) полягає в тому, що CO_2 не просто утримується у спеціальних сховищах, а використовується в інших виробничих процесах [31].

За оцінками University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership, вартість уловлювання та зберігання CO_2 може коливатися в діапазоні від \$25/т CO_2 до \$190/т CO_2 (сума включає витрати на уловлювання CO_2 з димових газів, транспортування до місця зберігання та зберігання). Витрати на уловлювання залежать від складу димових газів: що нижчий вміст CO_2 у викидах, то вище вартість його уловлювання.

За даними Global CCS Institute витрати на транспортування та зберігання уловленого CO_2 варіюються від \$7/т CO_2 до \$35/т CO_2 залежно від відстані між місцем уловлювання та місцем зберігання, типу сховища та його доступності. Стиснення CO_2 для транспортування та зберігання вимагає використання електрики. Обмежувальними факторами є дефіцит місць, придатних для зберігання уловленого CO_2 , а також зростання фінансових витрат, пов'язаних з підтримкою обладнання для уловлювання, транспортування та зберігання CO_2 .

Вдування водню в доменну піч

Ідея застосування водню та постановка проблеми його використання у промисловості була сформульована ще на початку 70-х років XX століття після першої нафтової паливної кризи. Варто зазначити, що в цей же час і вітчизняні дослідники займалися питаннями застосування водню в доменному виробництві [32].

Зараз на міжнародній арені все більше уваги привертається до розвитку водневого напрямку, та воднева енергетика отримує дедалі більшу підтримку як на корпоративному, так і на державному рівні. Воднева енергія з її різноманітними джерелами, низькими викидами вуглецю, високою ефективністю та широким спектром застосування вважається найбільш перспективною екологічно чистою енергією у 21 столітті та включена до національної стратегії розвитку енергетики багатьма країнами. Можна виділити такі країни:

- Азіатсько-Тихоокеанський регіон: Китай та Японія;
- Європейський союз: Німеччина та Норвегія;
- Північна Америка: Канада.

Багато перерахованих країн у числі перших закрипили цілі з декарбонізації галузей економіки шляхом переходу на водневу енергетику, а також визнали потенціал водню як носія енергії у виробництві чавуну і сталі [33]:

- виробництво чавуну з відновленням H_2 у Японії COURSE50 [34–35];
- ULCORED та виробництво сталі на водневій основі в Європі [36];

- воднева технологія виробництва чавуну США [37];
- HYBRIT у Скандинавії [38–41];
- Midrex H2TM від Midrex Technologies, Inc. (США) [42–45];
- H2FUTURE від Voestalpine (Австрія) [46–47];
- SALCOS від Salzgitter AG (Німеччина) [48–49].

Перспективність розвитку водневої металургії відзначається і європейськими доменниками за підсумками 7-го Європейського конгресу з аглодоменного виробництва [50]. Відзначається висока ефективність багатьох доменних печей світу, що наближається до термодинамічної межі, тому резерви зменшення викидів CO_2 за рахунок вдосконалення технології плавки є незначними. Значного зниження викидів CO_2 можна досягти за рахунок «водневої металургії заліза за умови отримання водню з використанням електроенергії, що виробляється за рахунок безвуглецевих та відновлюваних джерел енергії» [50].

Європейськими металургами проводяться активні роботи з переходу на водневу металургію. Так, наприклад, 12 європейських компаній виробників сталі працюють над реалізацією проекту створення великого водневого «хаба» в районі Гамбургу, в якому планується отримувати водень за допомогою енергії вітру і сонця. На даний момент такий водень обходиться вдвічі-втричі дорожче, ніж при отриманні його з природного газу, однак, зазначається, що за допомогою субсидування через 10–12 років він може стати конкурентоспроможним.

В даний час ця технологія тестується. ThyssenKrupp почала використовувати водень у доменній печі замість пиловугільного палива. У листопаді 2019 р. провели перший тест, у рамках якого водень вдували в одну із 28 фурм на доменній печі № 9 у Дуйсбурзі (Німеччина). У лютому 2021 р. компанія завершила перший етап випробувань та заявила про готовність провести у 2022 р. тестування на всіх 28 фурмах доменної печі. Водень для проекту постачає Air Liquide – світовий лідер у сфері виробництва промислових газів. На першому етапі випробувань водень постачався вантажним транспортом, на другому етапі знадобиться будівництво трубопроводу для водню. Використання водню дозволить знизити викиди CO_2 у розрахунку на тону чавуну на 19 %.

Таким чином, напрям досліджень із застосуванням водню в доменному виробництві є актуальним та перспективним.

Технології з використанням водню можуть зіткнутися з нестачею сировини, оскільки на даний момент немає рішень щодо виробництва водню у необхідних масштабах, а також систем зберігання та доставки.

В Україні найбільші перспективи виплавки чавуну із застосуванням водню має ПАТ «Запоріжсталь», оскільки комбінат знаходиться поблизу Запорізької АЕС та Дніпровської ГЕС, енергія яких може бути використана для виробництва водню.

Висновки

1. До 2050 року доменне виробництво збережить-ся як домінуюча ланка в отриманні сталі, оскільки вона є найбільш економічно вигідною з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90 % і більше. У порівнянні з іншими технологіями виробництва чавуну, доменні печі дозволяють гнучкіше і динамічніше працювати з рудою різної якості. А щодо продуктивності – доменні печі значно випереджають інші технології отримання металу. Завдяки цим перевагам на доменно-конвертерні технології припадає переважна частка (60–70 %) світового виробництва сталі.

2. На металургійному підприємстві повного циклу на доменний цех припадає одна з найбільших часток (до 70 %) витрати енергоресурсів та викидів CO_2 . Тому внесення змін до технології доменного виробництва є одним із пріоритетних напрямів скорочення викидів CO_2 та споживання первинних енергоресурсів.

3. Найближчим часом система торгівлі квотами на викиди CO_2 (EU ETS) може значно збільшити собівартість чавуну та сталі, що вимагатиме внесення змін до технології доменної плавки. Якщо українські виробники не скорочуватимуть викиди CO_2 , то їхня продукція стане неконкурентоспроможною. Тому важливим науково-практичним завданням є дослідження, оцінка та ранжування заходів щодо зменшення викидів CO_2 відносно сировинних та енергетичних умов роботи доменних печей України.

4. У доменному виробництві ЄС викидається близько 1,3 т CO_2 на тонну сталі. В Україні викиди на 8 % більші, тому що енергоємність технології доменного виробництва України поступається країнам ЄС.

5. Найменша витрата коксу, умовного палива, вуглецю та відповідно менші викиди CO_2 мають доменні печі, на яких реалізовані технології та технічні підходи:

– печі, що мають більший об'єм і відповідно менші питомі теплові втрати на тонну чавуну, що виплавляється;

– безконусний завантажувальний пристрій (БЗП);
– більший тиск у печі;
– висока температура горячого дуття;
– вдування додаткового палива, такого як ПВП, природний газ тощо;

– підвищення якості сировини;
– газова утилізаційна безкомпресорна турбіна (ГУБТ);

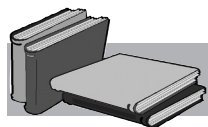
– краща оснащеність КВП та математичними моделями;

– підбір максимально ефективних технологічних параметрів ведення плавки (розподіл шихтових матеріалів на колошнику, газодуттєві параметри, перепади тиску, температури тощо).

6. Інноваційні технології зменшення викидів CO_2 до 50 % у доменному виробництві засновані на вдуванні в горн доменної печі паливних добавок до дуття: водню; коксового газу; відмитого колошниковога газу. Перспективним заходом щодо зменшення викидів CO_2 без зміни технології доменної плавки є уловлювання та утилізація вуглекислого газу.

7. Для умов України для скорочення викидів CO_2 доцільно на першому етапі випробувати вдування коксового газу через фурми. Реалізація вдування коксового газу потребує для спорудження комплексу тонкого очищення та його транспортування інвестицій 6–8 млн доларів.

8. Технологія з використанням водню в доменному виробництві є перспективною, вона почала випробуватись у Німеччині. Україна може зіткнутися з нестачею сировини, оскільки на даний момент немає рішень щодо виробництва водню у необхідних масштабах, а також систем зберігання та доставки. В Україні найбільші перспективи виплавки чавуну із застосуванням водню має ПАТ «Запоріжсталь», оскільки комбінат знаходиться поблизу Запорізької АЕС та Дніпровської ГЕС, енергія яких може бути використана для виробництва водню.



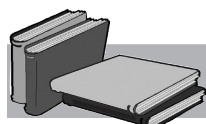
ЛІТЕРАТУРА

1. Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН. Париж. 2015. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf
2. 25-я сессия конференции ООН по изменению климата. Мадрид. 2019. URL: <https://unfccc.int/event/cop-25>
3. 26-я сессия конференции ООН по изменению климата. Глазго. 2021. URL: <https://unfccc.int/ru/peregovornyy-process-i-vstrechi/parizhskoe-soglasenie/klimaticheskii-pakt-glazgo/itogi-ks-26-voprosy-otchyotnosti#eq-9>
4. Концепція «зеленого» енергетичного переходу. Міністерство енергетики та захисту довкілля. 2021. URL: [https://mepr.gov.ua/files/images/news_2020/14022020/pdf_%D0%B7%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B0%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%BF%D1%86%D1%96%D1%8F%20\(2\).pdf](https://mepr.gov.ua/files/images/news_2020/14022020/pdf_%D0%B7%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B0%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%BF%D1%86%D1%96%D1%8F%20(2).pdf)
5. Економічна статистика. Навколишнє природне середовище. Держстат України. 2021. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/ns.htm
6. Украина четвертая в мире по сокращению выбросов парниковых газов. GMK Center. 9 сепня 2021. URL: <https://gmcenter.infographic/ukraina-chetvertaya-v-mire-po-sokrashheniju-vybrossov-parnikovyh-gazov/>
7. Buerger T., Kofler I. Direct Reduction Technology as a Flexible Tool to Reduce CO_2 Intensity of Iron and Steelmaking. *Berg Huetttenmaenn Monatsh.* 2017. Vol. 162. P. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00501-016-0567-2>

8. Агравал А.К., Кинзель К.П., Роснер Б., Каппес Х., Бермес П., Михелетти Л., Касталонья К. Доменное производство с учетом применения прошлых, современных и будущих технологий по сокращению выбросов CO₂. *METEC & 4th ESTAD (European Steel Technology and Application Days)*. 24–28 June 2019 – Congress Centre Düsseldorf, Germany. 2019.
9. Чайка А.Л., Лебедь В.В., Корнилов Б.В., Москалина А.А., Каригов С.А. Теплоэнергетический анализ технологий уменьшения выбросов диоксида углерода и повышения энергоэффективности доменного производства. *Сталь*. 2021. № 1. С. 81–84.
10. Бородулин А.В., Горбунов А.Д., Орел Г.И., Романенко В.И. Домна в энергетическом измерении. Кривой Рог: Издательство СП «Мира», 2004. 436 с.
11. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. Киев: Наукова думка, 2007. 412 с.
12. Романенко В.И., Швеиц А.Г., Листопадов В.С., Чайка А.Л., Швачка А.И., Бородулин А.В. Управление дутьевым режимом в доменной печи с автоматической стабилизацией параметров дутья. ОАО «Черметинформация». *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2006. № 2. С. 28–33.
13. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н. и др. Металлургия чугуна. Москва: Металлургия, 1989. 512 с.
14. Люнген Х.Б., Шмёле П. Сравнение режимов работы доменной печи в масштабах всего мира. 8-й Международный научно-технический конгресс по производству чугуна и стали – ICSTI 2018. 2018.
15. Калько А.А., Волков Е.А., Калько О.А., Хреева С.Н. Основные направления развития технологии первого передела ПАО «Северсталь» с учетом перспектив углеродного регулирования. *Металлург*. 2021. № 12. С. 4–10.
16. Пашинский В.Ф., Товаровский И.Г., Коваленко П.Е., Бойков Н.Г. Доменная плавка с вдуванием коксового газа. Киев: Техника. 1991. 104 с.
17. Шаповалов М.А. О вдувании восстановительных газов в горн доменной печи. *Сталь*. 1958. № 5. С. 385–389.
18. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. Москва: Металлургия, 1980. С. 229–235.
19. Товаровский И.Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки. Днепропетровск: Журфонд, 2015. 912 с.
20. Жеребин Б.Н., Дембовецкий В.П., Минкин В.М. и др. Применение коксового газа в доменных печах. *Кокс и химия*. 1987. № 10. С. 40–41.
21. Агравал А.К., Кинзел К.П., Бермес П., Кастаньола С. Поэтапная модернизация доменных печей для постепенного сокращения выбросов CO₂ на металлургических предприятиях полного цикла. 8-й Международный научно-технический конгресс по производству чугуна и стали – ICSTI 2018. 2018.
22. Shishido T., Okayama T., Hamaguchi M. et al. Development of high-performance coking additive in high strength coke making. *Zairyo to Prosesu. CAMP ISIJ*. 2009. Vol. 22. № 2. P. 777.
23. Zhang W., Wang Z.Y., Wang X.L., Zhang L.G. Experimental study of pulverized coal added dust injection into blast furnace. *The 9th CSM Steel Congress Proceeding*. Beijing. 2009.
24. Товаровский И.Г., Большаков В.И., Бень Т.Г., Меркулов А.Е., Лялюк О.В. Возможность замещения кокса углями и газами в доменных печах Украины. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр.* Дніпропетровськ: ІСМ НАН України. 2007. Вип. 15. С. 28–33.
25. Van der Stel J. et al. Developments of the ULCOS low CO₂ blast furnace process at the LKAB Experimental BF in Luleå. *1st Intern. Conf. on Energy Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry (EECR)*. Dusseldorf, Germany. 27 June – 1 July 2011.
26. Пухов А.П., Степин Г.М., Цейтлин М.А., Шведов В.С., Мкртчян Л.С., Гохман Ю.И. Освоение технологии доменной плавки с вдуванием горячих восстановительных газов. *Сталь*. 1991. № 8. С. 7–13.
27. Титов В.В., Мурат С.Г., Киселев Н.И. Опыт использования побочных продуктов аглодоменного производства ОАО «Тулachermet». *Экология и промышленность*. 2006. № 4 (9). С. 11–15.
28. Хирш А., Я. ван дер Стел, Серт Д. Доменная печь ULCOS с рециклином колошникового газа. *Черные металлы*. 2012. № 9. С. 33–39.
29. Birat J.P. CO₂-lean steelmaking: ULCOS, other international programs and emerging concepts. *1st Intern. Conf. on Energy Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry (EECR)*. 27 June – 1 July 2011. Dusseldorf, Germany.
30. Korthas B., Peters M., Schmole P. Back to the future – ideas for new blast furnace concepts. *5th European Coke and Ironmaking Congress (ECIC)*, 12–15 June 2005. Stockholm, Sweden.
31. Технологический обзор. Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS). Информационная служба Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций. 2021. URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_RU_final_0.pdf
32. Гольдштейн Н.Л. Водород в доменном процессе. Москва: Металлургия, 1971. 208 с.
33. Jue Tang, Mansheng Chu, Feng Li, Cong Feng, Zhenggen Liu, Yusheng Zhou. Development and progress on hydrogen metallurgy. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 2020. Vol. 27. No. 6. P. 713–723. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2021-4>
34. Tonomura S. Outline of course 50. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 37. P. 7160–7167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.653>
35. Watakabe S., Miyagawa K., Matsuzaki S., Inada T., Tomita Y., Saito K., Osame M., Sikström P., Ökvist L.S., Wikstrom J.-O. Operation trial of hydrogenous gas injection of COURSE50 project at an experimental blast furnace. *ISIJ Int.* 2013. Vol. 53. Iss. 12. P. 2065–2071. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.2065>
36. Abdul Quader M., Ahmed S., Dawal S.Z., Nukman Y. Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO₂) Steelmaking (ULCOS) program. *Renewable Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 55. P. 537–549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.101>

37. Wang Q., Li G.Q., Zhang W., Yang Y.X. An Investigation of Carburization Behavior of Molten Iron for the Flash Ironmaking Process. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2019. Vol. 50. Iss. 4. P. 2006–2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01594-0>
38. HYBRIT Brochure. 22 May 2020. URL: <http://www.hybritdevelopment.com/>
39. Vogl V., Åhman M., Nilsson L.J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossilfree steelmaking. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 203. P. 736–745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>
40. Duarte P. Trends in H₂-based steelmaking. *Steel Times International*. 2019. Vol. 43. No. 1. P. 27–32.
41. Kushnir D., Hansen T., Vogl V., Åhman M. Adopting hydrogen direct reduction for the Swedish steel industry: A technological innovation system (TIS) study. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 242. P. 118–185.
42. Midrex. 2018 World Direct Reduction Statistics. 22 May 2020. URL: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex_STATSbookprint_2018Final-1.pdf
43. Ying Z.W., Chu M.S., Tang J., Liu Z.G., Zhou Y.S. Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process. *Hebei Metals*. 2019. Vol. 282. No. 6. P. 1.
44. Cavaliere P. Clean Ironmaking and Steelmaking Processes. *Springer Nature Switzerland AG*. Switzerland, 2019. P. 596. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4>
45. ArcelorMittal Commissions Midrex to Design Demonstration Plant for Hydrogen Steel Production in Hamburg. 22 May 2020. URL: <https://www.midrex.com/press-release/arcelormittal-commissions-midrex-to-design-demonstration-plant-for-hydrogen-steel-production-in-hamburg/>
46. Buerger T., Prammer J. Hydrogen steelmaking: Technology options and R&D projects. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2019. Vol. 164. No. 11. P. 447. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00501-019-00908-8>
47. Mandova H., Patrizio P., Leduc S., Kjærstad J., Wang C., Wetterlund E., Kraxner F., Gale W. Achieving carbon-neutral iron and steelmaking in Europe through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 218. P. 118–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.247>
48. Posdziech O., Geißler T., Schwarze K., Blumentritt R. System Development and Demonstration of Large-Scale High-Temperature Electrolysis. *ECS Transactions*. 2019. Vol. 91. No. 1. P. 2537. DOI: <https://doi.org/10.1149/09101.2537ecst>
49. Ariyama T., Takahashi K., Kawashiri Y., Nouchi T. Diversification of the Ironmaking Process Toward the Long-Term Global Goal for Carbon Dioxide Mitigation. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2019. Vol. 5. Iss. 3. P. 276–294. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00219-9>
50. Курунов И.Ф. Перспективы развития экстрактивной металлургии железа глазами европейских металлургов. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 2017. № 1. С. 80–85.

Надійшла 30.06.2022



REFERENCES

1. Paris Agreement under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Paryzh. 2015. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf [in Russian].
2. 25th Conference of the Parties on Climate Change. Madryd. 2019. URL: <https://unfccc.int/event/cop-25> [in Russian].
3. 25th Conference of the Parties on Climate Change. Hlazgo. 2021. URL: <https://unfccc.int/ru/peregovornyy-process-i-vstrechi/parizhskoe-soglasenie/klimaticheskij-pakt-glazgo/itogi-ks-26-voprosy-otchyotnosti#eq-9> [in Russian].
4. The concept of "green" energy transition. Ministerstvo enerhetyky ta zakhystu dovykillia. 2021. URL: [https://mepr.gov.ua/files/images/news_2020/14022020/pdf_%D0%B7%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B0%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%BF%D1%86%D1%96%D1%8F%20\(2\).pdf](https://mepr.gov.ua/files/images/news_2020/14022020/pdf_%D0%B7%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B0%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%BF%D1%86%D1%96%D1%8F%20(2).pdf) [in Ukrainian].
5. Economic statistics. The surrounding natural environment. Derzhstat Ukrainy. 2021. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/ns.htm [in Ukrainian].
6. Ukraine ranks fourth in the world in reducing greenhouse gas emissions. *GMK Center*. 09-08-2021. URL: <https://gmk.center/infographic/ukraina-chetvertaya-v-mire-po-sokrashheniju-vybrossov-parnikovyh-gazov> [in Russian].
7. Buerger, T., Kofler, I. (2017). Direct Reduction Technology as a Flexible Tool to Reduce CO₂ Intensity of Iron and Steelmaking. *Berg Huettenmaenn Monatsh*, vol. 162, pp. 14–19, doi: <https://doi.org/10.1007/s00501-016-0567-2>
8. Ahraval, A.K., Kinzel, K.P., Rosner, B., Kappes, Kh., Bermes, P., Mikheletti, L., Kastalonia, K. (2019). Blast furnace, taking into account the application of past, current and future technologies to reduce CO₂ emissions. *METEC & 4th ESTAD (European Steel Technology and Application Days)*. 24–28 June 2019 – Congress Centre Düsseldorf, Germany. 2019 [in Russian].
9. Chaika, A.L., Lebid, V.V., Kornilov, B.V., Moskalyna, A.A., Karikov, S.A. (2021). Thermal power analysis of technologies for reducing carbon dioxide emissions and increasing the energy efficiency of blast-furnace production. *Stal'*, no. 1, pp. 81–84 [in Russian].
10. Borodulin, A.V., Horbunov, A.D., Orel, H.I., Romanenko, V.I. (2004). Blast furnace in the energy dimension. *Kryvyi Rih: Vydavnytstvo SP "Myru"*, 436 p. [in Russian].

11. Bolshakov, V.I. (2007). High-Efficiency Energy-Saving Blast Smelting Technology. Kyiv: Naukova dumka, 412 p. [in Russian].
12. Romanenko, V.I., Shvets, A.G., Lystopadov, V.S., Chaika, A.L., Shvachka, A.I., Borodulin, A.V. (2006). Control of the blast regime in a blast furnace with automatic stabilization of the blast parameters. *OAO "Chermetinformatsiya". Biuleten "Chernaya metallurgiya"*, no. 2, pp. 28–33 [in Russian].
13. Vegman, Ye.F., Zherebin, B.N., Pokhvisnev, A.N. et al. (1989). Iron metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 512 p. [in Russian].
14. Luengen, H.B., Schmoele, P. (2018). Comparison of blast furnace operation modes in the world. *8th International Congress on Science and Technology of Ironmaking – ICSTI 2018* [in Russian].
15. Kalko, A.A., Volkov, Ye.A., Kalko, O.A., Khreieva, S.N. (2021). The main directions of development of the technology of the first processing stage of PJSC Severstal, taking into account the prospects for carbon regulation. *Metallurg*, no. 12, pp. 4–10 [in Russian].
16. Pashynskiy, V.F., Tovarovskyi, I.G., Kovalenko, P.Ye., Boikov, N.G. (1991). Blast furnace with coke oven gas injection. Kyiv: Tekhnika, 104 p. [in Russian].
17. Shapovalov, M.A. (1958). On injection of reducing gases into the hearth of a blast furnace. *Stal'*, no. 5, pp. 385–389 [in Russian].
18. Ramm, A.N. (1980). Modern blast process. Moscow: Metallurgiya, pp. 229–235 [in Russian].
19. Tovarovskyi, I.G. (2015). Knowledge of processes and development of blast furnace technology. Dnipropetrovsk: Zhurfond, 912 p. [in Russian].
20. Zherebin, B.N., Dembovetskyi, V.P., Minkin, V.M. et al. (1987). The use of coke gas in blast furnaces. *Koks i khimiya*, no. 10, pp. 40–41 [in Russian].
21. Agrawal, A.K., Kinzel, K.P., Bermes, P., Castagnola, S. (2018). Step wise modifications to BF plants for progressive CO₂ emissions reduction from integrated steel plants. *8th International Congress on Science and Technology of Ironmaking – ICSTI 2018* [in Russian].
22. Shishido, T., Okayama, T., Hamaguchi, M. et al. (2009). Development of high-performance coking additive in high strength coke making. *Zairyo to Prosesu. CAMP ISIJ*, vol. 22, no. 2, p. 777.
23. Zhang, W., Wang, Z.Y., Wang, X.L., Zhang, L.G. (2009). Experimental study of pulverized coal added dust injection into blast furnace. *The 9th CSM Steel Congress Proceeding*. Beijing.
24. Tovarovskyi, I.G., Bolshakov, V.I., Ben, T.G., Merkulov, A.Ye., Lialiuk, O.V. (2007). Possibility of replacing coke with coals and gases in blast furnaces of Ukraine. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metalurgii: Zb. nauch. tr.* Dnipropetrovsk: IChM NAN Ukrainy, iss. 15, pp. 28–33 [in Russian].
25. Van der Stel, J. et al. (2011). Developments of the ULCOS low CO₂ blast furnace process at the LKAB Experimental BF in Luleå. *1st Intern. Conf. on Energy Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry (EECR)*. Dusseldorf, Germany. 27 June – 1 July 2011.
26. Pukhov, A.P., Stepin, G.M., Tseitlin, M.A., Shvedov, V.S., Mkrtchan, L.S., Gokhman, Yu.I. (1991). Mastering the technology of blast-furnace smelting with the injection of hot reducing gases. *Stal'*, no. 8, pp. 7–13 [in Russian].
27. Titov, V.V., Murat, S.G., Kyselov, N.I. (2006). Experience in the use of by-products of sintering production of JSC "Tulachermet". *Ekologiya i promyshlennost'*, no. 4 (9), pp. 11–15 [in Russian].
28. Khirsh, A., Ya. van der Stel, Sert, D. (2012). ULCOS blast furnace with top gas recycling. *Chernye metally*, no. 9, pp. 33–39 [in Russian].
29. Birat, J.P. (2011). CO₂-lean steelmaking: ULCOS, other international programs and emerging concepts. *1st Intern. Conf. on Energy Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry (EECR)*. 27 June – 1 July 2011. Dusseldorf, Germany.
30. Korthas, B., Peters, M., Schmoel, P. (2005). Back to the future – ideas for new blast furnace concepts. *5th European Coke and Ironmaking Congress (ECIC)*, 12–15 June 2005. Stockholm, Sweden.
31. Technological review. Capture, use and storage of carbon (CCUS). UNECE. 2021. URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_RU_final_0.pdf [in Russian].
32. Holdshtein, N.L. (1971). Hydrogen in the blast furnace process. Moscow: Metallurgiya, 208 p. [in Russian].
33. Jue, Tang, Mansheng, Chu, Feng, Li, Cong, Feng, Zhenggen, Liu, Yu-sheng, Zhou (2020). Development and progress on hydrogen metallurgy. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 27, no. 6, pp. 713–723, doi: <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2021-4>
34. Tonomura, S. (2013). Outline of course 50. *Energy Procedia*, vol. 37, pp. 7160–7167, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.653>
35. Watakabe, S., Miyagawa, K., Matsuzaki, S., Inada, T., Tomita, Y., Saito, K., Osame, M., Sikström, P., Ökvist, L.S., Wikström, J.-O. (2013). Operation trial of hydrogenous gas injection of COURSE50 project at an experimental blast furnace. *ISIJ Int.*, vol. 53, iss. 12, pp. 2065–2071, doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.2065>
36. Abdul Quader, M., Ahmed, S., Dawal, S.Z., Nukman, Y. (2016). Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO₂) Steelmaking (ULCOS) program. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 537–549, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.101>
37. Wang, Q., Li, G.Q., Zhang, W., Yang, Y.X. (2019). An Investigation of Carburization Behavior of Molten Iron for the Flash Ironmaking Process. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 50, iss. 4, pp. 2006–2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01594-0>
38. HYBRIT Brochure. 22 May 2020. URL: <http://www.hybritdevelopment.com/>
39. Vogl, V., Åhman, M., Nilsson, L.J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, vol. 203, pp. 736–745, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>

40. Duarte, P. (2019). Trends in H₂-based steelmaking. *Steel Times International*, vol. 43, no. 1, pp. 27–32.
41. Kushnir, D., Hansen, T., Vogl, V., Åhmanc, M. (2019). Adopting hydrogen direct reduction for the Swedish steel industry: A technological innovation system (TIS) study. *Journal of Cleaner Production*, vol. 242, pp. 118–185.
42. Midrex. 2018 World Direct Reduction Statistics. 22 May 2020. URL: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex_STATSbookprint_2018Final-1.pdf
43. Ying, Z.W., Chu, M.S., Tang, J., Liu, Z.G., Zhou, Y.S. (2019). Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process. *Heibei Metals*, vol. 282, no. 6, p. 1.
44. Cavaliere, P. (2019). Clean Ironmaking and Steelmaking Processes. *Springer Nature Switzerland AG*. Switzerland, p. 596, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4>
45. ArcelorMittal Commissions Midrex to Design Demonstration Plant for Hydrogen Steel Production in Hamburg. 22 May 2020. URL: <https://www.midrex.com/press-release/arcelormittal-commissions-midrex-to-design-demonstration-plant-for-hydrogen-steel-production-in-hamburg/>
46. Buerger, T., Prammer, J. (2019). Hydrogen steelmaking: Technology options and R&D projects. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 164, no. 11, p. 447, doi: <https://doi.org/10.1007/s00501-019-00908-8>
47. Mandova, H., Patrizio, P., Leduc, S., Kjærstad, J., Wang, C., Wetterlund, E., Kraxner, F., Gale, W. (2019). Achieving carbon-neutral iron and steelmaking in Europe through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage. *Journal of Cleaner Production*, vol. 218, pp. 118–129, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.247>
48. Posdziech, O., Geißler, T., Schwarze, K., Blumentritt, R. (2019). System Development and Demonstration of Large-Scale High-Temperature Electrolysis. *ECS Transactions*, vol. 91, no. 1, p. 2537, doi: <https://doi.org/10.1149/09101.2537ecst>
49. Ariyama, T., Takahashi, K., Kawashiri, Y., Nouchi, T. (2019). Diversification of the Ironmaking Process Toward the Long-Term Global Goal for Carbon Dioxide Mitigation. *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 5, iss. 3, pp. 276–294, doi: <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00219-9>
50. Kurunov, I.F. (2017). Prospects for the development of extractive iron metallurgy through the eyes of European metallurgists. *Ivestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, no. 1, pp. 80–85 [in Russian].

Received 30.06.2022

Summary

O.L. Chaika, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Head of the Laboratory, e-mail: chaykadp@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0003-1678-2580>

B.V. Kornilov, PhD (Engin.), Senior Researcher,

e-mail: balesan2209@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5544-3023>

O.Ye. Merkulov, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Senior

Researcher, e-mail: merkulov1@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7867-0659>

A.O. Moskalyna, PhD (Engin.), Researcher, e-mail: moskalina.aa@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0001-9552-2853>

V.V. Lebid, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: vitalii.lebid@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0003-3938-3785>

M.M. Iziumskyi, Junior Researcher, e-mail: izumnick@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-5164-4450>

*Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (ISI NASU)
(Dnipro, Ukraine)*

Analysis of trends in the development of ideas and technologies aimed at reducing carbon dioxide emissions in blast furnace production

Developing direction to improve blast furnace smelting technology to increase energy efficiency and improve environmental performance by reducing carbon dioxide emissions is an urgent task today in global metallurgy. According to the International Energy Agency (IEA), by 2050 blast furnace production will remain the dominant link in steel production, as it is the most cost-effective with a thermal efficiency of up to 90 % or more. Blast furnace production consumes 40–75 % of the energy resources of the metallurgical plant, so the blast furnace has the greatest potential to reduce carbon dioxide emissions.

The paper presents the results of the analysis of directions of reduction of carbon dioxide emissions and reduction of carbon consumption in blast furnace production due to improvement of existing technologies and introduction of innovative technologies of CO₂ emission reduction based on injection of blast furnace fuel additives into the blast furnace; coke oven gas; washed flue gas. Paul Wurth, ThyssenKrupp and Primetals are world leaders in the development of technical and technological so-

lutions to reduce CO₂ emissions in blast furnace production. But the solutions offered by foreign companies are not always applicable to blast furnace production in Ukraine, they require scientific study and adaptation to the conditions of Ukraine, including the energy balance of enterprises, raw material conditions, blast furnace equipment, technology and competitiveness of iron-carbon intermediate, the presence of energy.

Ukraine needs to develop its own concept of reducing CO₂ emissions, taking into account the competitiveness of iron-carbon intermediate, which depends on the energy intensity of blast furnace production. Therefore, it is very important to assess and analyze the directions of reduction of CO₂ emissions in metallurgy abroad for further development of blast furnace smelting regimes that reduce carbon dioxide emissions in relation to the existing and future conditions of metallurgical enterprises of Ukraine.

Keywords

Blast furnace, technologies, CO₂ emissions, ecology.