

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 620.9:339.9

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/27>**Тесленко О.І.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

Куц Г.О.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

СТРУКТУРНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРЯМИ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПІДПРИЄМСТВАМИ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ

В статті наведені результати розрахунково – аналітичного дослідження основних джерел та обсягів викидів парникових газів (ПГ) технологічними виробництвами металургійної промисловості України. Чорна металургія відноситься до енергоємних галузей промисловості з найбільшими викидами ПГ: до 7% загальносвітових викидів ПГ продукується при виробництві чавуну та сталі (2019 р.). В Україні (2020 р.) чорна металургія спричинила майже 14% щорічних викидів ПГ в економіці країни (або майже 57% щорічних викидів ПГ в промисловості країни) та є визначальною галуззю промисловості щодо зменшення викидів ПГ: на неї припадає 88% від запланованого загального зменшення викидів ПГ в промисловості країни до 2030 р. Утворення двоокису вуглецю (CO_2), основного виду ПГ в чорній металургії, виникає по всьому технологічному ланцюгу металургійних процесів, як результат згорання органічних видів вуглецевмісного палива, а також окислення вуглецю та хімічного розпаду технологічної вуглецевмісної сировини та енергоносіїв, які надаються для здійснення виробничих процесів. Обраховані показники викидів CO_2 для металургійних виробництв (коксухімічне, доменне, киснево-конвертерне, електроплавильне та феросплавне) показали, що найбільші викиди CO_2 спричиняє доменне виробництво. Визначені структурні та технологічні напрями зменшення викидів ПГ підприємствами чорної металургії на найближче десятиліття. За базовою (традиційною) технологією виплавки чавуну без застосування заміщувачів коксу обсяги утворення та виходу CO_2 у доменному газі складають 995,2 кг CO_2 /т чавуну. Застосування таких інноваційних технологій заміщення коксу в доменному виробництві, як вдування тилويدного палива або гарячого доменного газу зменшує обсяг викидів CO_2 до рівня 878,2 кг CO_2 /т чавуну (зменшення 1,13 рази) та 534,8 кг CO_2 /т чавуну (зменшення 1,86 разів), відповідно. Основним напрямком зменшення викидів CO_2 у сталеплавильних виробництвах є структурні зміни схем технологічних процесів. До найбільш ефективних у зниженні викидів CO_2 відноситься наступна технологічна схема: виплавка сталі в електродуговій печі з розкисленням і легуванням у піч-ковші та наступним розливанням сталі на машинах безперервного лиття заготовок з подальшим вогневим зачищенням і з безпосереднім надходженням заготовок на прокатні стани для одержання кінцевої продукції галузі (вилучення охолодження, складування та попереднього нагрівання заготовок у нагрівальних печах прокатного виробництва).

Ключові слова: чавун, сталь, чорна металургія, парникові гази, викиди, декарбонізація, технології, структурні зміни.

Постановка проблеми. Зменшення антропогенного впливу на довкілля є однією з головних проблем сталого розвитку людської цивілізації на сьогодні, так і на досяжну перспективу. Одним з напрямів запобігання змінам клімату внаслідок життєдіяльності людства є зменшення викидів парникових газів (ПГ) для обмеження парникового ефекту та поступового глобального

зростання температури атмосферного повітря. Порівняльний огляд основних джерел за обсягами викидів ПГ енергоємними галузями промисловості в Україні та в світі показав, що чорна металургія відноситься до найбільших з них: до 7% загальносвітових викидів ПГ продукується при виробництві чавуну та сталі (2019 р.) [1]. В Україні (2020 р.) чорна металургія спричиняє майже

14% щорічних викидів ПГ в економіці країни (або майже 57% щорічних викидів ПГ в промисловості країни) та є визначальною галуззю промисловості щодо зменшення викидів ПГ: на неї припадає 88% від запланованого загального зменшення викидів ПГ в промисловості країни до 2030 р. у відповідності до Другого Національно-визначеного внеску України до Паризької угоди [2]. Наведені обставини та завдання обумовлюють актуальність наукових досліджень щодо визначення напрямів та технологічних заходів зменшення викидів ПГ у чорній металургії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню проблеми зменшення викидів ПГ технологічними виробництвами металургійної промисловості за останнє десятиліття присвячено значна кількість наукових праць провідних фахівців з чорної металургії: Сталинский Д. В., Демидик В. Н., Лісієнко В.Г., Тубольцев Л.Г., Шатоха В.І. та інші [3–9]. Міжнародною групою експертів із змін клімату розроблені керівні принципи із визначення викидів ПГ в металургійній промисловості [10]. Наведені дослідження оцінюють рівень викидів ПГ за існуючими технологіями металургійного виробництва та прогнозують зменшення викидів ПГ внаслідок впровадження новітніх технологій виробництва заліза, чавуну та сталі на перспективу до 2050 р. Однак в наведених роботах не досліджуються структурні та технологічні зміни при переході традиційної технологічної схеми металургійного виробництва до інноваційних низьковуглецевих технологій отримання сталі на найближче десятиліття, протягом якого аглодомена технологія виробництва чавуну буде залишатись переважаючою.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналітичний огляд основних джерел та обсягів викидів ПГ технологічними виробництвами металургійної промисловості України та визначення структурних та технологічних напрямів зменшення викидів ПГ підприємствами чорної металургії на найближче десятиліття. В роботі застосовувався розрахунково-аналітичний метод проведення досліджень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Чорна металургія залишається провідною галуззю в економіці України, яка у 2020 р. за світовим рейтингом держав у виробництві сталі займала 11 місце, а за виробництвом чавуну посідала дев'яте місце [11]. У 2020 р. підприємствами галузі вироблено, тис. т: агломерату – 31913; коксу – 9668; чавуну – 20423; сталі – 20616 і прокату – 18440, відповідно, а також спожито палив-

них ресурсів 16723 тис. т у.п. та електроенергії 23128,0 млн кВт·год [12–14].

Утворення двоокису вуглецю (CO_2) виникає по всьому технологічному ланцюгу металургійних процесів, як результат згорання органічних видів вуглецевмісного палива, а також окислення вуглецю та хімічного розпаду технологічної вуглецевмісної сировини та енергоносіїв, які надаються для здійснення виробничих процесів. До металургійних виробництв стосовно утворення CO_2 в значних обсягах відноситься доменний процес внаслідок використання значної частки органічного вуглецевмісного палива до загальної повної технологічної енергоємності чавуну та декарбонізації сировини в цьому процесі: коксівного вугілля, агломерату, окатишів залізної руди, вапняку та інших технологічних домішок. У технологічних процесах виробництва сталі (киснево-конвертерні, мартенівські та електросталеплавильні процеси) додатково до основних джерел викидів CO_2 відносяться процеси вигорання вуглецю чавуну (відновлення заліза), який у складі сировини визначає зміни процесів декарбонізації в цих технологічних переділах виробництва сталі.

В технологічних процесах чорної металургії утворюються парникові гази у вигляді двоокису вуглецю (CO_2) і метану (CH_4). Останній є частиною горючих вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) і згорає при їх використанні. В табл. 1 наведені показники споживання вуглецевмісних енергоресурсів та сировинних матеріалів за окремими технологічними виробництвами чорної металургії. З табл. 1 видно, що такі виробництва як аглодоменне, коксохімічне та мартенівське споживають більшою мірою вуглецевмісні види палива, згорання яких обумовлює викиди CO_2 , а для киснево-конвертерного та електроплавильного переважно споживається вуглецевмісна сировина: рідинний та переробний чавун, сталевий скрап тощо.

Прийняті значення споживання енергоресурсів та сировини відповідають даним робіт [12, 18] щодо визначення повної технологічної енергоємності продукції чорної металургії в Україні за 2018 р. Для таких металургійних виробництв, як коксохімічне і аглодоменне до основних джерел утворення CO_2 відносяться первинні види палива: кокс, кам'яне коксове вугілля та природний газ, котрі в процесі термохімічної трансформації утворюють побічні продукти (горючі ВЕР), а для коксохімічного виробництва первинний горючий продукт є коксовий газ. Зазначені побічні продукти використовуються в основних чи допоміжних виробництвах галузі. В табл. 2 надано хіміч-

Таблиця 1

Показники споживання енергоресурсів та сировини в окремих виробництвах чорної металургії [12]

	Одиниці виміру	Виробництво					
		коксхімічне	агломераційне	доменне	мартенівське	киснево-конвертерне	електро-плавильне
1. Енергоресурси:							
– кокс	кг у.п.	–	–	598,1	–	–	–
– коксик	кг у.п.	–	21,0	–	–	–	–
– природний газ	куб. м	–	9,5	110,0	–	–	7,8
– паливо (суміш коксового і природного газу)	кг у.п.	140,9	29,0	20,8	126,9	–	–
2. Сировина:							
– чавун доменний рідкий	кг	–	–	–	625,0	850,0	–
– чавун переробний	кг	–	–	–	–	–	230,0
– скрап сталевий	кг	–	–	–	468,0	270,0	850,0
– вугілля коксове	кг	1480,0	–	–	–	–	–
– агломерат	кг	–	–	1000,0	–	–	–
– окатиші	кг	–	–	461,0	–	–	–
– вапняк + вапно	кг	–	192,0+54,0	42,0+0	50,0+0	0+60,0	0+30,0
– електроди	кг	–	–	–	–	–	2,0

Таблиця 2

Склад та технічні параметри побічних горючих газів (доменний і киснево-конвертерний) та первинного горючого коксхімічного газу [17, 18]

Склад та технічні параметри	Одиниці виміру	Доменний газ при дугті, збагачений природним газом та киснем, осушений	Киснево-конвертерний газ	Коксхімічний газ, очищений (поворотний)
1. Хімічний склад:				
	об'ємний %			
CO ₂	–"	13,9	11,5	2,0÷2,3 включно. H ₂ S
CO	–"	31,8	74,0	6,0÷6,8
H ₂	–"	17,4	0,3	57,0÷60,0
CH ₄	–"	0,4	–	24,0÷26,0
N ₂	–"	36,5	13,1	3,0÷4,0
C ₂ H ₄		–	–	2,2÷0,5
Пил	г/м ³	0,02÷1,0	64,0	до 15,0
2. Теплота згорання				
	ккал/м ³	1435,0	2250,0	4000÷4200
3. Вихід газу				
	м ³ /т основного продукту	сухий (1880÷1900) м ³ на 1 т чавуну	(70÷100) м ³ на 1 т сталі	(380÷400) м ³ на 1 т коксу

ний склад побічних енергоресурсів, які ще до згорання мають вміст CO₂ за об'ємним виміром: доменний газ – 13,9%, киснево-конвертерний газ – 11,5% і для яких CO₂ додатково зростає при їх згоранні у технологічних процесах. Внаслідок цього сумарний їх вміст визначається показником максимального сумарного вмісту CO₂ та сірчаного ангідриду (SO₂) у сухих продуктах згорання

(RO₂^{макс} в %) і розраховується за методичними алгоритмами, наведеними у [17].

Результати розрахунку складу продуктів повного згорання при стехіометричному обсязі повітря для деяких видів палива надано в табл. 3.

Високе значення в показниках триатомних газоподібних продуктів згорання палива RO₂ для доменного газу (RO₂ = 24 %) пов'язано

Склад продуктів згорання деяких видів палива в об'ємному вимірі [17]

Види палива	Хімічний склад, %			
	RO ₂	у т.ч. SO ₂	H ₂ O	N ₂
1. Кокс донецький	19,0	0,2	8,0	73,0
2. Кам'яне вугілля : тип				
– пісний донецький	18,0	0,2	7,0	75,0
– жирний донецький	17,0	0,2	9,0	74,0
– довгоплавильний донецький	17,0	0,5	11,0	72,0
3. Газ природний	10,0	0	20,0	70,0
4. Газ доменний	24,0	0,2	3,0	73,0
5. Газ коксовий	8,0	–	23,0	69,0
6. Газ скраплений	12,0	0	15,0	73,0
7. Газ киснево–конвертерний	8,6	–	2,0	89,4
8. Газ феросплавний		–	–	–
9. Газ електроплавильних печей	6,3	–	–	–

з окисленням окису вуглецю (CO) при відновленні заліза ($\text{CO} + \text{FeO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$) та декарбонізації вапняку ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), які входять до складу аглодоменної шихти.

Доменний газ використовується на підприємствах галузі для нагрівання повітря дуття для доменних печей (до 45%), на електросилових станціях (до 40%) і може надходити для обігріву коксових печей або нагрівальних печей прокатного виробництва (до 15 %) [15,17].

Киснево-конвертерне виробництво має періодичний режим роботи і тому технічні характеристики конвертерного газу змінюються у процесі продування розплавленого металу киснем в періоди, коли його використовують (відбирають) при умовах вмісту не менше 60 % CO. На вітчизняних металургійних підприємствах традиційно застосовується тільки фізичне тепло та хімічна енергія (при допалюванні) конверторного газу в котлах – утилізаторах виключно для виробництва теплової енергії (окрім Алчевського металургійного комбінату, на якому цей газ очищується та збирається в спеціальний газгольдер об'ємом 100 000 куб. м та спрямовується до парогазової електростанції або до газового господарства підприємства для заміщення природного газу).

Коксохімічний газ є продуктом піролізного процесу коксування вугілля. Його фізико-хімічні характеристики залежать від складу вугілля і режиму проходження технологічного процесу коксування (наявність частки легких речовин, вологості та зольності вугілля, температури та швидкості процесу коксування). Використовується коксовий газ на власні потреби коксохімічних підприємств і профіцитні залишки (до 10 % загального обсягу) надходять для синтезу аміаку з наступним поверненням його до постачальника.

В процесі виплавки сталі в електродугових печах (ЕДП) утворюється відхідний газ в результаті вигорання вуглецю металеві шихти, вуглецевмісних флюсів та палива у вигляді коксу, який в незначних обсягах подається для потужних електропечей. Теплота згорання відхідних газів Q_H^p дорівнює 2000 ккал/м³, вміст CO знаходиться в межах 60–65 % (по об'єму), обсяг виходу газу складає 50–60 м³/т сталі, але з урахуванням всмоктування зовнішнього повітря, обсяг збільшується в 10–15 разів (500–700 м³/т) [20, 21].

Феросплави у вітчизняній чорній металургії виплавляються в основному в електродугових печах. При виплавці доменних феросплавів утворення вторинних горючих газів не відрізняється від процесу виробництва чавуну, а в електропечах відбувається окис вуглецю коксую, який застосовується в технологічному процесі як складова металеві шихти. Вміст CO у феросплавних газах коливається в межах 65–90 % (об'ємних) при теплоті згорання 2000–2700 ккал/м³. Обсяг виходу феросплавного газу у закритих електропечах складає 940–960 м³/т феросплаву, використовується як паливо у власних котельних установках феросплавних підприємств [21].

Зазначені горючі гази відносяться до основних джерел CO₂ і використовуються на усіх переділах технологічних процесів кінцевих видів продукції для окремих видів металургійного виробництва. Крім того, вторинні горючі гази також використовуються в додаткових виробництвах, таких як виробництво електричної та теплової енергії, стисненого повітря, кисню, інертних газів, підготовці сировини і матеріалів та інше. Тому у визначенні обсягів утворення CO₂ з метою виключення подвійного рахунку значення обсягів викидів CO₂ віднесено до одиниці продукції того виробництва,

в якому вони утворились, а саме до тонни чавуну, коксу, сталі та феросплаву (табл. 4).

При порівняльному аналізі даних табл. 4 можна зробити висновок, що серед розглянутих виробництв до найбільших по утворенню та викидів CO_2 відноситься доменне виробництво, обсяг викидів CO_2 для якого складає 887,67 кг CO_2 /т чавуну, наступним є феросплавне виробництво з викидів 151,83 кг CO_2 /т феросплавів. Щодо сталеплавильних виробництв слід відмітити значно менші питомі обсяги утворення та викидів CO_2 , які складають для киснево-конвертерного виробництва 14,45 кг CO_2 /т сталі, електросталеплавильного виробництва 6,23 кг CO_2 /т сталі.

Проведене визначення основних джерел викидів CO_2 по всьому ланцюгу проходження технологічного процесу кінцевої продукції галузі та обсягів утворення і питомого виходу CO_2 на одиницю продукції окремих виробництв показало, що металургійна галузь відноситься до однієї з самих крупних джерел викидів CO_2 , особливо це стосується аглодоменного виробництва. В цілому чорна металургія потребує новітніх технологій екологічного захисту від викидів ПГ та структурних змін схем технологічних процесів по використанню крупних електродугових печей, запічних методів рафінування, застосування машин безперебійного лиття заготовок та вогневого зачищення, що дозволяє збільшити виробництво сталі та прокату і сприятиме зниженню викидів ПГ.

Слід відмітити можливість широкого впровадження новітніх апробованих технологій в доменному виробництві чавуну, до яких відносяться:

– вдування пиловугільного палива (ПВП) у доменні печі в обсязі до 185 кг/т чавуну та до

270 кг/т чавуну з інжекцією концентрату енергетичного вугілля;

– вдування відновлюваного (доменного) газу.

За даними роботи [22] застосування як заміщувача скіпового коксу доменним газом дозволяє знизити його витрати на 30 % і підняти продуктивність доменної печі на 20–25 % порівняно з використанням в якості заміщувача природного газу. Але зазначена технологія потребує додаткових витрат теплової енергії та хімічних сорбентів (моностаноламіна або металона) для проведення очищення доменного газу від CO_2 до 1,0–1,5 % за обсягом його вмісту.

Зазначені технології частково замінили технологію по вдуванню природного газу і впроваджуються на вітчизняних меткомбінатах (Донецький металургійний завод, Алчевський металургійний комбінат, «Запоріжсталь» та інших).

Із використанням вихідних даних з робіт [23–25] виконані розрахунки щодо визначення обсягів викидів CO_2 для різних технологій заміщення вуглецевмісного коксу іншими менш вуглецевмісними видами палива в доменному виробництві (табл. 5).

Показником порівняння технологій щодо ефективності зменшення викидів ПГ доменними печами прийнято питомий обсяг викидів CO_2 на 1 т чавуну, який розраховується за алгоритмом:

$$G_{\text{CO}_2} = V_{\text{d.z.}} \cdot (\text{RO}_2 - \text{SO}_2) \cdot \gamma_{\text{CO}_2}, \text{ кг/т} \quad (1)$$

де $V_{\text{d.z.}}$ – обсяг виходу доменного газу, м³/т чавуну; RO_2 – сумарний вміст триатомних газів (CO_2 та сірчаного ангідриду (SO_2)) при згоранні сухого доменного газу (в об'ємних одиницях, приймається за табл. 3);

SO_2 – вміст SO_2 при згоранні доменного газу (в об'ємних одиницях, приймається за табл. 3);

Таблиця 4

Обсяги викидів CO_2 технологічними виробництвами чорної металургії, які обумовлені утворенням та використанням горючих газів

Найменування технологічного виробництва	Усереднений обсяг утворення горючого газу, м ³ /т продукції	Сумарний вміст CO_2 , ($\text{RO}_2^{\text{max}} - \text{SO}_2$), об'ємні %	Повний обсяг викидів CO_2	
			у м ³ /т продукції	у кг/т продукції
1. Коксохімічне	390,0	8,0	31,2	61,68
2. Доменне	1890,0	23,8	449,0	887,67
3. Виробництво сталі:				
– киснево-конвертерна	85,0	8,6	7,3	14,45
– електроплавильне, на сталевому скрапі	50,0	6,3	3,15	6,23
4. Феросплавне	960,0	8,0	76,8	151,83

γ_{CO_2} – питома вага CO_2 в $кг/м^3$ (прийнято $\gamma_{CO_2}=1,977$ $кг/м^3$ доменного газу).

Обсяг виходу доменного газу в $м^3/т$ чавуну розраховується [21]:

$$V_{d.z.} = \frac{\kappa \cdot (C_k \times G_k + C_g \times G_g) + C_m \times G_m + 100 \cdot C_z \times V_z - 1000 \cdot C_v}{0,536 \cdot (CO_2 + CO + CH_4)}, \text{ м}^3/\text{т} \quad (2)$$

де κ – коефіцієнт, який враховує втрати вуглецю у доменному процесі (у розрахунках κ прийнято рівним 0,985 [21]);

C_k, C_g, C_r, C_z, C_v – вміст вуглецю відповідно у коксі, вапняку, твердому паливі (на суху масу), газу і чавуну, у вагових %;

CO_2, CO, CH_4 – вміст CO_2, CO, CH_4 у доменному газі, у об’ємних %;

G_k, G_B – питомі витрати сухого скіпового коксу і вапняку (прийнято 234 $кг/т$ чавуну з урахуванням вмісту вапняку в агломераті), $кг/т$;

G_m – питомі витрати твердого чи рідинного палива, які вдуваються в доменну піч, $кг/т$;

V_z – питомі витрати газоподібного палива (природного, доменного чи іншого, які вдуваються у доменну піч), $м^3/т$.

Вміст вуглецю в газоподібному паливі визначається за алгоритмом [17, 19]:

$$C_z = \frac{0,536}{100} \cdot (CO + CO_2 + \sum m \cdot C_m \times H_m), \text{ кг/м}^3; \quad (3)$$

де CO, CO_2 та $C_m H_m$ – вміст CO, CO_2 та вуглеводнів у газоподібному паливі, у об’ємних %.

Порівняльний аналіз розрахованих даних показників оцінки ефективності технологій, які застосовуються у доменному виробництві для заміщення коксу, свідчить, що до найбільш прийнятних до реалізації відноситься технологія вдування гарячого доменного газу. При даній

технології практично вдвічі зменшуються питомі витрати коксу на тонну чавуну і, відповідно, обсяг викидів зменшується до 534,8 $кг CO_2/т$ чавуну порівняно 995,2 $кг CO_2/т$ чавуну при здійсненні виробництва чавуну за застарілим технологічним процесом (табл. 5). За результатами розрахункового аналізу можна зробити висновок, що до основного джерела утворення CO_2 в доменному процесі відноситься скіповий кокс, обсяг якого залежить не тільки від впровадження технологій його заміщення, але й від таких показників, як вміст заліза у металевій шихті (до 60–62 %), вдування кисню (до 35%), підвищення температури повітря доменного дуття (до 1200–1250°C).

Важливим напрямом у зменшенні викидів CO_2 для металургійної галузі слід віднести структурні зміни у виробництві сталі, технологічні процеси яких мають безпосередню залежність від кількості чавуну, спожитого як сировина. За даними робіт [18, 21, 23] для виплавки сталі киснево-конвертерним процесом потрібно в середньому 600 $кг$ розплавленого чавуну на тонну сталі, для електроплавильного – до 130 $кг$ передільного чавуну. Повний обсяг викидів CO_2 у електродуговій печі у 2 рази нижчий, ніж у кисневих конвертерів (табл. 4). Така різниця в викидів CO_2 обумовлена тим, що виплавка сталі киснево-конвертерним способом має значно більше споживання чавуну, як сировини, порівняно з електроплавильним способом, що обумовлює більший обсяг утворення CO_2 при відновленні заліза чавуну.

Основним напрямком зменшення викидів CO_2 у сталеплавильних виробництвах є структурні зміни схем технологічних процесів з підвищен-

Таблиця 5

Порівнянні показники ефективності зменшення викидів CO_2 при застосуванні технологій заміщення коксу при аглодоменному виробництві чавуну

Перелік технологій заміщення коксу	Прямі витрати		Вихід доменного газу у $м^3/т$ чавуну	Обсяг викидів CO_2		Частка до п. 1, %
	коксу, $кг/т$ чавуну	заміщувачів коксу		у $м^3/т$ чавуну	у $кг/т$ чавуну	
1. Технологія без використання природного газу	507,0	–	2115,4	503,40	995,2	100,0
2. Базова технологія з вдуванням природного газу	409,0	природний газ 97–113 $м^3$	1937,1	461,0	911,4	91,5
3. Технологія з вдуванням вугільного пилу	294,0	Вугільний пил 185–135 $кг$	1866,7	444,3	878,3	88,2
4. З інжекцією концентрату та енергетичного вугілля	227,0	Вугільний пил 270–197 $кг$	1831,8	435,9	861,8	86,6
5. Вдування гарячого доменного газу	245,0	163 $м^3$	1136,6	270,5	534,8	54,1

ням енергоефективності та зменшенням споживання вуглецевмісних енергоресурсів [12, 18]. До найбільш ефективних у зниженні викидів CO₂ відноситься наступна схема: виплавка сталі в електродуговій печі з розкисленням і легуванням у піч-ковші та наступним розливанням сталі на машинах безперервного лиття заготовок з подальшим вогневим зачищенням та з безпосереднім надходженням заготовок на прокатні стани для одержання кінцевої продукції галузі (вилучення охолодження, складування та попереднього нагрівання заготовок у нагрівальних печах прокатного виробництва).

Висновки. Чорна металургія залишається провідною галуззю в економіці України, яка у 2020 р. за світовим рейтингом держав у виробництві сталі (20616 тис. т) займала 11 місце, а за виробництвом чавуну (20423 тис. т) посіла дев'яте місце.

При виробництві чавуну та сталі продукується до 7% загальносвітових викидів ПГ. В Україні чорна металургія спричиняє майже 14% щорічних викидів ПГ в економіці країни (або майже 57% щорічних викидів ПГ в промисловості країни) та є визначальною галуззю промисловості щодо зменшення викидів ПГ: на неї припадає 88% від запланованого загального зменшення ПГ в промисловості країни до 2030 р.

Обраховані показники викидів CO₂, як єдиного суттєвого виду парникових газів у чорній металур-

гії, для таких виробництв: коксохімічне доменне, киснево-конвертерне, електроплавильне, феросплавне, показали, що найбільше викидів CO₂ спричиняє доменне виробництво.

За базовою (традиційною) технологією виплавки чавуну без застосування заміщувачів коксу обсяги утворення та виходу CO₂ у доменному газі складає 995,2 кг CO₂ на тонну чавуну. Застосування таких інноваційних технологій заміщення коксу в доменному виробництві, як вдування пиловидного палива або гарячого доменного газу зменшує обсяг викидів CO₂ до рівня 878,2 кг CO₂/т чавуну (зменшення 1,13 рази) та 534,8 кг CO₂/т чавуну (зменшення 1,86 разів), відповідно.

Основним напрямком зменшення викидів CO₂ у сталеплавильних виробництвах є структурні зміни схем технологічних процесів. До найбільш ефективних у зниженні викидів CO₂ відноситься наступна схема: виплавка сталі в електродуговій печі з розкисленням і легуванням у піч-ковші та наступним розливанням сталі на машинах безперервного лиття заготовок з подальшим вогневим зачищенням та з безпосереднім надходженням заготовок на прокатні стани для одержання кінцевої продукції галузі (вилучення охолодження, складування та попереднього нагрівання заготовок у нагрівальних печах прокатного виробництва).

Список літератури:

1. Decarbonization Pathways for Steel and Cement Industries. URL: <https://cdn.ihsmarkit.com/www/pdf/0622/Infographic---Decarbonization-Pathways-for-Steel-and-Cement-Industries.pdf>
2. Презентація сценаріїв, політик та інвестицій до НВВ2. Засідання Робочої групи з питань розробки другого Національно-визначеного внеску України до Паризької угоди: обговорення політик та заходів. м. Київ, Україна, 26 листопада 2020 р. URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/Zmina_klimaty/26.11.2020%20презентація%20сценаріїв,%20політик%20та%20інвестицій%20до%20НВВ2.pptx
3. Сталинский Д. В., Литвиненко В. Г., Каневский А. Л., Андреева Т. А. Особенности и прогнозирование эмиссии парниковых газов на металлургических предприятиях Украины. *Металл и горнорудная промышленность*. 2010. № 2. С. 239–243.
4. Демидик В. Н. Парниковый эффект и производство стали. *Металл и литьё Украины*. 2011. № 5 (216). С. 29–33.
5. Лисиенко В.Г., Чесноков Ю.Н., Лаптева А. В. Энергоемкость и эмиссия CO₂ различных сочетаний переделов при производстве стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 6. С. 105–111.
6. Тубольцев Л.Г., Падун Н.И., Горохова В.А. Влияние энергетических затрат металлургического производства на выбросы парниковых газов. *Экология и промышленность*, 2015. Том 4. С. 11–16.
7. Шатоха В.И., Рогоза В.М. Устойчивое развитие черной металлургии в контексте предотвращения изменения климата./ Управление устойчивым развитием в условиях переходной экономики. Монография. Книга 2 // Изд-во: НГУ-БТУ. 2016. С. 148–159.
8. Material Economics (2019), Industrial Transformation 2050: Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry . University of Cambridge for Sustainability Leadership, Cambridge, United Kingdom.
9. Koolen, D. and Vidovic, D., Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners, Joint Research Centre. EUR 31112 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg,, 2022, 35 p. doi:10.2760/170198

10. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 Том 3: Промышленные процессы и использование продуктов Глава 4: Выбросы металлургической промышленности https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/3_Volume3/V3_4_Ch4_Metal_Industry.pdf
11. World Steel in Figures. World Steel Association. 2021. 32 p. URL: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/world-steel-in-figures-2021-now-available/>
12. Куц Г.О., Тесленко О.І. Прогнозна оцінка повної технологічної енергоємності продукції чорної металургії України за виробничими схемами до 2040 року. *Проблеми загальної енергетики*. 2021. вип. 2(65). С. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2021.01.060>
13. Про основні показники роботи паливно-енергетичного комплексу України у 2020 році. ГО «Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України»// К. : Вид-во НТСЕУ «Енергоінформ». 2021. № 592. 13 с.
14. Маляренко О.Є., Станиціна В.В., Куц Г.О. Прогнозування попиту на паливно-енергетичні ресурси для енергоємних видів продукції з урахуванням потенціалу енергозбереження до 2040 року. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. Вип. 2 (57). С. 13–20. URL: <https://doi.org/10.15407/pge2019.02.013>
15. Назюта Л.Ю., Харахулах В.О. Структура енергопотребления доменного производства. *Метал и литье в Украине*. 2009. № 3. С. 33–69.
16. Большаков В.И., Тубольцев Л.Г. Состояние и перспективы развития черной металлургии Украины на основе энергосберегающих технологий. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 2. С. 1–5.
17. Равич М.Б., Дворин С.С., Ленков А.Я., Певзнер С.И. Металлургическое топливо. Справочник. М.: Изд-во «Металлургия». 1965. 471 с.
18. Куц Г.О., Тесленко О.І. Методичні положення щодо розподілу повної технологічної енергоємності між окремими видами продукції багатопродуктових виробництв. *Проблеми загальної енергетики*. 2020 . вип. 4 (63). С. 58–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2020.04.058>
19. Куц Г.О., Галіновський Є.І., Мельник В.І. Калорійні еквіваленти для перерахунку різних видів палива з натуральних одиниць на умовні. *Проблеми загальної енергетики*. 2004. № 11. С. 60–64.
20. Справочно-информационный фонд к схемам теплоснабжения промышленных узлов. М.: ВНИПИЭнергопром. 1983. 287 с.
21. ДСТУ 4369:2005 Енергозбереження. Чорна металургія. Ресурси енергетичні вторинні. Методика визначення показників виходу та використання. [Чинний від 2006-01-01]. К. : Держспоживстандарт України. 2006. 24 с. (Національний стандарт України).
22. Грановский Б.М., Кульченко В.В., Мильграм Т.И., Шейнфайн Ф.И. Сокращение энергозатрат на очистку от CO₂ колошникового газа при вдувании восстановительных газов в доменную печь / Использование вторичных энергоресурсов и охлаждение агрегатов в черной металлургии // Тематический отраслевой сборник. № 7. М. : Metallurgizdat. 1978. С. 27–32.
23. Ярошевский С.Л., Афанасьев З.К., Кузин А.В. К вопросу эффективности использования пылеугольного топлива в доменных печах ОАО «Азовсталь» // Сб. трудов научно-проект. конф., Донецк. ДонНГУ. 2007. С. 280–285.
24. Шаповалова Н.Г., Давиденко П.В., Еремка О.В. Проекты промышленного использования и проекты внедрения установок вдувания пылеугольного топлива в горн доменных печей // Сб. докладов научно-проект. конф., Харьков, Энергосталь. 2007. С. 313–317.
25. Катаев А.А. Опыт и перспективы энергосбережения ресурсоемких предприятий горно-металлургического комплекса Украины. *Экономика Украины*. 2013. № 9 (614). С. 18–30.

Teslenko O.I., Kuts H.O. STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL DIRECTIONS OF REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS BY FERROUS METALLURGY ENTERPRISES

The article presents the results of a calculation-analytical study of the main sources and volumes of greenhouse gas (GHG) emissions by technological productions of the ferrous metallurgy of Ukraine. Ferrous metallurgy is one of the energy-intensive industries with the largest GHG emissions: up to 7% of global GHG emissions are produced in the production of iron and steel (2019). In Ukraine (2020), ferrous metallurgy accounted for almost 14% of annual GHG emissions in the country's economy (or almost 57% of annual GHG emissions in the country's industry) and is the determining industry for reducing GHG emissions: it accounts for 88% of the planned total reduction of GHG emissions in the country's industry by 2030. The formation of carbon dioxide (CO₂), the main type of GHG in ferrous metallurgy, occurs throughout the technological chain of metallurgical processes as a result of the combustion of organic types of carbon-containing fuel, as well as the oxidation of carbon and the chemical decomposition of technological carbon-containing raw materials and

energy carriers that are provided for the implementation of production processes. The calculated indicators of CO₂ emissions for metallurgical industries (coke chemical, blast furnace, oxygen converter, electro smelting and ferroalloy) showed that blast furnace production causes the largest CO₂ emissions. The structural and technological directions for reducing GHG emissions by ferrous metallurgy enterprises for the coming decade have been determined. According to the basic (traditional) technology of iron smelting without the use of coke substitutes, the volumes of CO₂ formation and output in the blast furnace gas amount to 995.2 kg of CO₂/t of iron. The use of such innovative technologies for replacing coke in blast furnace production as blowing pulverized fuel or hot blast furnace gas reduces CO₂ emissions to the level of 878.2 kg CO₂/t of cast iron (1.13 – fold decrease) and 534.8 kg CO₂/t of cast iron (1.86 – fold decrease), respectively.

The main direction of reducing CO₂ emissions in steelmaking industries is structural changes in technological process schemes. The following technological scheme is among the most effective in reducing CO₂ emissions: steel smelting in an electric arc furnace with deoxidation and alloying in ladle furnaces and subsequent pouring of steel on machines for continuous casting of blanks with subsequent fire cleaning and with direct delivery of blanks to rolling mills to obtain final products industry (removal of cooling, storage and preheating of blanks in heating furnaces for rolling production).

Key words: cast iron, steel, ferrous metallurgy, greenhouse gases, emissions, decarbonization, technologies, structural changes.