

УДК 66.096.5:661.13:661.666

М. В. Губинський, д.т.н., проф., ORCID 0000-0003-3770-4397**А. В. Сибір**, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-9974-0636**С. С. Федоров**, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-5409-882X**О. Є. Меркулов**, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7867-0659*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України***С. М. Губинський**, н.с., ORCID 0000-0002-4598-5136**С. В. Коваль**, аспірант, ORCID 0000-0002-4115-9865**О. М. Форись**, аспірант, ORCID 0000-0002-9524-2381*Український державний університет науки і технологій*

ОЦІНКА ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПРИ ОТРИМАННІ ШТУЧНОГО ГРАФІТУ В ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОМУ КИПЛЯЧОМУ ШАРІ

Анотація. Однією з основних світових тенденцій розвитку світової економіки є її декарбонізація з виконанням зобов'язань щодо зменшення викидів парникових газів. Значні витрати енергоносіїв і відповідно викиди парникових газів мають процеси отримання високочистих графітованих матеріалів та чорної металургії. Тому розробка та впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій на основі електротермічного киплячого шару дозволить вирішити емісію парникових газів при виробництві електродної продукції. Метою роботи є визначення екологічної ефективності впровадження інноваційної технології на основі електротермічного киплячого шару у порівнянні з існуючими. В основу методики досліджень покладено розрахунки емісії парникових газів з використанням питомих показників викидів при виробництві електричної енергії та спаленні природного газу. В роботі запропонована методика, що враховує структуру виробництва електроенергії та палива в Україні, їх види та якість. Враховано технологічні витрати електроенергії під час її транспортування від станцій до споживача, питомі витрати палива на виробництво електроенергії. Розрахунки проведені для чотирьох варіантів технологічного процесу, які реалізовані на ПрАТ «Укрграфіт» та включають стадію кальцинації антрациту у обертових печах чи електрокальцинаторах, стадію графітації у печах Аченсона та Кастнера. В роботі проаналізовано два варіанти технологій з електротермічним киплячим шаром. Результати розрахунків свідчать, що запропонована технологія отримання дрібнодисперсного штучного графіту на основі антрациту Донецького родовища значно зменшує викиди парникових газів у порівнянні з діючими технологіями ПрАТ «Укрграфіт» у 2-3,5 рази. Питомі викиди парникових газів зменшуються з 2500-2600 кг CO₂/ т до 390 – 780 кг CO₂/ т.

Ключові слова: парникові гази, графітовані матеріали, електротермічний киплячий шар, питомі викиди.

Посилання для цитування: Оцінка зменшення викидів парникових газів при отриманні штучного графіту в електротермічному киплячому шарі /

М. В. Губинський, А. В. Сибір, С. С. Федоров, О. Є. Меркулов, С. М. Губинський, С. В. Коваль, О. М. Форись // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 455-465. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-455-465.

Стан проблеми. Переважними напрямками використання вуглецевих та графітованих матеріалів є виготовлення електродної продукції для отримання алюмінію та електросталі, виготовлення електротехнічної продукції, електричних акумуляторів, відновників (карбюризаторів), ядерної енергетики тощо [1]. Основними тенденціями розвитку виробництва вуглецевих матеріалів є підвищення їх якості, в першу чергу, за рахунок підвищення чистоти самих матеріалів, а також зміни їх структури та властивостей (електропровідності, щільності, міцності) [2, 3].

Сировиною для виробництва вуглеграфітових виробів є нафтовий кокс, антрацит і природний графіт. Суть технології зводиться до як мінімум двоступеневого процесу [4]:

- перший – кальцинація сировини (нафтовий кокс, антрацит) з нагрівом до температури 1100-1300°C, в якому спостерігається видалення сірки, летючих продуктів зниження електричного опору;

- другий – графітація з нагріванням вихідного матеріалу до температури 2000-3000°C з наступною витримкою, що призводить до перебудови кристалічної структури притаманної графіту та видалення золуних елементів шляхом їх возгону до газової фази. При використанні природного графіту основним процесом є збагачення графіту до 99,95% вуглецю.

Отже, при високотемпературній обробці вуглецевої сировини відбуваються одночасно два процеси: рафінування матеріалу (очищення його та відведення золи) та перебудова кристалічної решітки та її наближення до графіту. Обидві процеси пов'язані один з одним та відбуваються одночасно. Для реалізації першої стадії, кальцинації, відомі пічні агрегати для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів з використанням зовнішнього нагріву та прямого електричного нагріву, які забезпечують термічну обробку сировини при температурах 900-1400°C. До цих агрегатів слід віднести наступні типи печей: обертові з газовим нагрівом, електрокальцинатори.

Відома технологія графітації проводиться при температурі 2400–3000°C у печах Кастнера чи Аченсона [5]. Це печі періодичної дії, де нагрів відбувається за рахунок проходження електричного струму через робочий простір печі та виділення джоулевої теплоти. Робочім опором служать або самі вуглецеві заготовки (піч Кастнера), чи пересипка з гранульованого коксу (піч Аченсона). Тривалість технологічного циклу у печах Аченсона складає 36-120 годин в залежності від продуктивності печі, а печі Кастнера відповідно 10-30 годин. Питомі витрати електроенергії досягають 3000-3500 кВт·год/т для печі Кастнера та 4500-6500 кВт·год/т для печі Аченсона

[5]. Отже, розігрів печей та витримка при температурі графітації складає від декілька часів до десятків часів.

Альтернативою процесу високотемпературної обробки в щільному шарі є використання печей з електротермічним киплячим шаром (ЕКШ) [6,7]. Розробка наукових основ створення цих печей та технологічних процесів з ЕКШ приходится на 70-ті роки минулого сторіччя, але практичне їх використання було не дуже поширеним, оскільки конкурентні технології на основі щільного шару та викопного палива мали на той час свої переваги. Однак перехід на сталий розвиток виробництва з використанням відновлювальних та нетрадиційних джерел енергії привернули увагу інженерів до електротермічних процесів, які можуть бути основою створення «зелених» високотемпературних технологій. Тому процеси термічної обробки дисперсних матеріалів без їх розплавлення мають перспективи використання печей ЕКШ. Електротермічний киплячий шар забезпечує роботу печей при температурах 1000-3000 °С, при цьому тривалість обробки не обмежена і дозволяє організувати безперервний виробничий процес. Основні принципи його організації полягають у наявності як мінімум двох електродів, електропровідного матеріалу та джерела струму.

Високотемпературні печі з ЕКШ для графітації матеріалів мають конструкцію аналогічну до [8] з центральним електродом і електропровідною робочою камерою, футеровка якої відіграє роль другого електроду. Робоча камера виконується з графітових матеріалів, а у якості зріджуючого агенту використовуються інертні гази: аргон або азот. Такі печі зазвичай працюють в потоковому режимі з постійним завантаженням сировини та вивантаженням обробленого матеріалу. Типова конструкція високотемпературної печі представлена на рисунку 1.

На відміну від традиційного процесу графітації в печах Аченсона і Кастнера, термічна обробка в печах з киплячим електротермічним шаром забезпечує швидке нагрівання вуглецевих матеріалів та не потребує стадії кальцинації [9]. Процес термічної обробки в печах з киплячому електротермічному шарі складає 30-60 хв, а середня температура шару становить 2900-3000°С. Зазначений режим забезпечує відповідну якість графітованого матеріалу з антрациту Донецького родовища. Зменшення часу обробки до 30 хв пов'язано з використанням адіабатичної витримки у камері 13 (рис. 1).

Метою дослідження є визначення екологічної ефективності інноваційної технології отримання графітованого матеріалу у електротермічному киплячому шарі у порівнянні з відомими технологічними процесами обробки у печах Аченсона та Кастнера.

Основний матеріал дослідження. Одною з основних переваг запропонованої технології є зменшення викидів парникових газів при отриманні штучного графіту батареїної якості з антрациту.

Для визначення ефективності цієї технології запропоновано порівняльний аналіз викидів з діючою технологією у печах Аченсона та Кастнера, яка реалізована у ПрАТ «Укрграфіт» м. Запříжжя. Порівняльний аналіз проведено на основі співставлення показників питомих викидів парникових газів, що визначаються на основі залежності:

$$E_{gp} = E_{ee} \cdot b_{gp}^{ee} + E_{пг} \cdot b_{gp}^{пг}, \quad (1)$$

де E_{gp} – питомі викиди парникових газів при виробництві графітованих матеріалів, $гCO_2/т$; $E_{ee}, E_{пг}$ – питомі викиди парникових газів при виробництві електричної енергії та спаленні природнього газу відповідно, $гCO_2/кВт\cdot год$, $гCO_2/1000м^3$; $b_{gp}^{ee}, b_{gp}^{пг}$ – питомі витрати електричної енергії та природнього газу при виробництві графітованих матеріалів, $кВт\cdot год/т$, $1000м^3/т$.

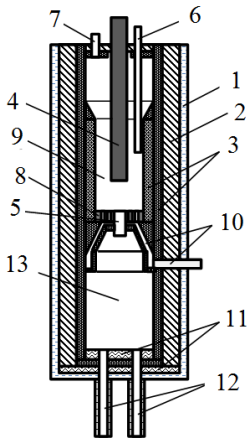


Рисунок 1 – Схема печі з електротермічним киплячим шаром: 1 - корпус, 2 - теплова ізоляція, 3 - графітова футеровка, 4 - центральний електрод, 5 - випускна труба обробленого матеріалу, 6 - труба для завантаження сировини, 7 - газохід для видалення відхідних газів, 8 - розподільча решітка псевдозріджуючого газу, 9 - робоча камера, 10 - канал для подачі інертного газу, 11 - холодильник готового продукту, 12 - теплова ізоляція, 13 - камера витримки.

При визначенні питомих викидів парникових газів у виробництві електричної енергії необхідно враховувати наступні фактори: структуру виробництва електроенергії в Україні щодо долі теплових, ядерних та гідро електростанцій, види палива та його якість, що використовуються на теплових електростанціях, технологічні витрати електроенергії під час її транспортування від станцій до споживача, питомі витрати палива на виробництво електроенергії:

$$E_{ee} = k_{тр} k_{теc} \left[d_{vy} (e_{CO_2}^{vy} + GPW_{CH_4} e_{CH_4}^{vy} + GPW_{N_2O} e_{N_2O}^{vy}) + d_{пг} (e_{CO_2}^{пг} + GPW_{NO_2} e_{CH_4}^{пг} + GPW_{N_2O} e_{N_2O}^{пг}) \right] b_{ee}, \quad (2)$$

де $k_{тр}$ – коефіцієнт, що враховує технологічні витрати електроенергії під час її транспортування; $k_{теc}$ – коефіцієнт, що враховує частку виробництва електроенергії на теплових станціях в Україні; $e_{CH_4}^{vy}, e_{CH_4}^{пг}$ – питома емісія метану при спаленні вугілля і природнього газу відповідно, $гCH_4/кг$ у.п.;

$e_{N_2O}^{By}$, $e_{N_2O}^{Pg}$ - питома емісія NO_2 при спаленні вугілля і природного газу відповідно, г NO_2 /кг у.п.; $e_{CO_2}^{By}$, $e_{CO_2}^{Pg}$ - питома емісія CO_2 при спаленні вугілля і природного газу відповідно, г CO_2 /кг у.п.; d_{By} , d_{Pg} – доля вугілля і природного газу при виробництві електричної енергії на ТЕС; b_{ee} – питомі витрати палива при виробництві електроенергії на теплових електростанціях в Україні, г у.п./кВт·год; GPW_{CH_4} , GPW_{NO_2} – коефіцієнти приведення викидів NO_2 і CH_4 до CO_2 еквіваленту (Global Warming Potential), дорівнює 310 та 21 відповідно.

Структура виробництва електроенергії в Україні (табл.1) свідчить, що частка теплових електростанцій у сумарному виробленні енергії становила за останні роки 29-36%. Саме використання викопного палива на ТЕС пов'язано з викидами парникових газів при виробництві електроенергії в Україні. Викиди парникових газів на атомних і гідроелектростанціях, сонячних та вітрових станціях на два порядки менші за теплові станції. За даними [10] питомий викид парникових газів на атомних станціях становить 2-6 г CO_2 /кВт·год, а на гідроелектростанціях 4-7 г CO_2 /кВт·год. Тому в подальшому викидами парникових газів від атомних і гідроелектростанцій та станцій ВДЕ нехтували. Таким чином, можна вважати, що тільки близько третини спожитої електроенергії в умовах України призводить до емісії парникових газів. Це враховується при обчисленні питомої емісії парникових газів шляхом введення коефіцієнта $k_{гес} = 0,29-36$.

Технологічні витрати електроенергії під час її транспортування від станцій до споживача за останні роки склали 11-12% [11]. Отже, коефіцієнт, що враховує технологічні витрати, складає $k_{тр} = 1,11-1,12$.

Таблиця 1 – Структура вироблення електроенергії в Україні у 2020-2021 рр.

Тип електростанцій	АЕС	ТЕС та ТЕЦ	ГЕС та ГАЕС	ВДЕ
Доля у загальному виробництві електроенергії, %	52,1-55,1	29,3-35,2	5,1-6,7	8,2-8,5

Структура споживання палива на ТЕЦ і ТЕС в Україні [12] свідчить, що 93-94% палива становить вугілля, інша частина – природний газ. Отже, в розрахунках прийнято: $d_{By} = 0,94$, а $d_{Pg} = 0,06$. Питомі витрати палива на виробництво електроенергії на ТЕС (табл. 2) перевищують розрахункові (322-340 г у.п./кВт·год). Це пов'язано з експлуатацією енергоагрегатів зі зниженим навантаженням, а також фізичним зносом обладнання. В розрахунках прийнято $b_{ee} = 404$ г.у.п./кВт·год.

Таблиця 2 – Питома витрата палива на виробництво електроенергії [11,12]

Роки	2008	2016	2017	2018
Питомі витрати палива на виробництво електроенергії, г у.п./кВт·год	401,9	403,7	402,6	404,7

Питома емісія CO₂ при спаленні вугілля і природного газу визначалася розрахунковим шляхом з використанням стандартних методик розрахунку спалення палива [13]. При розрахунках було враховано недопал палива у відповідності до рекомендацій [14]. Результати розрахунків питомих показників емісії парникових газів в Україні при виробництві електроенергії в таблиці 3.

Таблиця 3 – Питомі показники емісії CO₂, N₂O и CH₄ при спаленні палива на теплових станціях України.

Вид палива	Емісія CO ₂ г/кг у.п.	Емісія CH ₄ г/кг у.п.	Емісія N ₂ O г/кг у.п.
Вугілля	2527-3018	0,029	0,041
Природний газ	1524-1673	0,029	0,003

На основі отриманих даних проведені розрахунки питомих викидів парникових газів при виробництві електричної енергії в Україні по залежності (2), які показали, що питомі викиди складають $E_{ee} = 339$ г CO₂/кВт·год. У наступних розрахунках питомі викиди парникових газів від спалення природного газу дорівнюють $E_{пг} = 1639$ г CO₂/1000 м³. Отримані показники питомих викидів парникових газів були використані при співставленні технологій виробництва штучного графіту на основі залежності (1).

У табл. 4 наведені питомі показники енергоспоживання для кожної технології що порівнюються. Данні для розрахунків для технологій ПрАТ «Укрграфіт» отримані з [67].

При аналізі використані данні енергоспоживання наявних технологій ПрАТ «Укрграфіт». До них належать наступні:

- кальцинація у обертовій печі + графітація у печі Аченсона;
- кальцинація у електрокальцинаторі + графітація у печі Аченсона;
- кальцинація у електрокальцинаторі + графітація у печі Кастнера;
- кальцинація у електрокальцинаторі + графітація у печі Кастнера.

Порівняння емісії парникових газів було проведено для двох варіантів інноваційної технології на основі електротермічного киплячого шару:

- графітація у печі з електротермічним киплячим шаром без адіабатичної витримки з перебуванням матеріалу у робочому просторі 60 хв;

- графітація у печі з електротермічним киплячим шаром з адіабатичною витримкою і перебуванням матеріалу у робочому просторі 30 хв.

Результати розрахунків свідчать що запропонована технологія отримання дрібнодисперсного штучного графіту у печах ЕКШ значно зменшує викиди парникових газів у порівнянні з діючими технологіями ПрАТ «Укрграфіт» у 2- 6 разів. Це є значним економічним чинником разом зі зниженням енергоспоживання, що дозволяє успішно конкурувати на ринку вуглецевих матеріалів.

Таблиця 4 – Питомі показники енергоспоживання та викидів парникових газів.

№	Технологія	Питоме споживання природнього газу, м ³ /т	Питомі викиди парникових газів від природнього газу, кгСО ₂ /т	Питоме споживання електроенергії, МВт·год/т	Питомі викиди парникових газів від електроенергії, кгСО ₂ /т	Питомі викиди парникових газів по технології в цілому, кгСО ₂ /т
1	Кальцінація у обертовій печі	178	341,8	-	-	2519,9
		-	-	6,425	2178,1	
2	Кальцінація у електрокальцінаторі	-	-	1,397	473,6	2651,6
		-	-	6,425	2178,1	
3	Кальцінація у обертовій печі	178	341,8	-	-	1553,7
		-	-	3,575	1211,9	
4	Кальцінація у електрокальцінаторі	-	-	1,397	473,6	1658,5
		-	-	3,575	1211,9	
5	Графітація у печі з ЕКШ без адіабатичної витримки	-	-	2,3	779,7	779,7
		-	-	1,15	389,85	
6	Графітація у печі з ЕКШ з адіабатичною витримкою	-	-	-	-	389,85

Висновки

На основі порівняльного аналізу викидів парникових газів при виробництві штучного графіту з антрациту Донецького родовища встановлено наступне:

- традиційні технології засновані на двостадійному процесі, який включає кальцинацію в обертових печах чи електрокальцинаторах та графітацію у печах Аченсона чи Кастнера. Питомі викиди парникових газів для цих технологій в умовах України складають 2500 -2650 кгCO₂/т для печей Аченсона та 1550-1660 кгCO₂/т для печей Кастнера;
- використання інноваційних технологій отримання дрібнодисперсного штучного графіту на основі електротермічного киплячого шару дозволить знизити питомі викиди парникових газів до 390-780 кгCO₂/т;
- інноваційна технологія отримання дрібнодисперсного штучного графіту у печах ЕКШ значно зменшує викиди парникових газів у порівнянні з діючими технологіями ПрАТ «Укрграфіт» у 2-6 разів. Це є значним економічним чинником разом із зниженням енергоспоживання, що дозволяє успішно конкурувати на ринку вуглецевих матеріалів.

Перелік посилань

1. Фиалков А. Углеродистые материалы. Москва : Энергия, 1979. 320 с.
2. Петров Б. Энеросбережение при производстве электродного термоантрацита. Київ : Екотехнологія, 2006. 144 с.
3. Губинский М., Федоров С., Ливитан Н. Печи для производства высококачественных углеродных материалов. *Теория и практика тепловых процессов в металлургии* : Материалы Международной научно-практической конференции, м. Екатеринбург, 8 верес. 2012 р. Екатеринбург, 2012. С. 79–83.
4. Schobert H. Chemistry of fossil fuels and biofuels. Cambridge University Press, 2013. 480 p.
5. Теплоэлектрическое состояние печей графитирования Аченсона / С. Лелека та ін. Киев : Rntd,-НТУУ «КПИ», 2013. 238 с.
6. Печі з електротермічним киплячим шаром / А. Сибір та ін. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2020. № 2. С. 42–61.
7. Gupta C., Sathiyamoorthy S. Fluid bed technology in materials processing. Boca Raton, Fla. : CRC Press, 1999. 528 p.
8. Method and apparatus for heat treatment of particulates in an electrothermal fluidized bed furnace and resultant products : пат. WO 2005/028978 A1 : F27B 15/10. № PST/US2004/029814 ; заявл. 10.09.2004 ; опубл. 31.03.2005.
9. Effect of anthracite heat treatment parameters during shock heating on the properties of carbon materials / A. Sybir et al. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2022. № 5. С. 94–101.
10. Gas Inven to ries Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. 2006. Vol. 2: Energy. IPCC. 47 p. URL: https://www.ipccnggip.iges.or.jp/pub/lic/2006gl/pdf/2_Volume
11. Вольчин І., Гапонич Л. Викиди парникових газів на українських теплових електростанціях. *Енерготехнології та ресурсосбереження*. 2019. № 4. С. 3–12.
12. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. : Стратегія Каб. Міністрів

- України від 24.07.2013 р. : станом на 18 серп. 2017 р.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text>.
13. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Санкт-Петербург, 1998. 257 с.
 14. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
 15. Річний звіт з моніторингу проекту СВ «Скорочення викидів парникових газів внаслідок заходів з підвищення енергоефективності та утилізації вторинного тепла на ВАТ «УКРГРАФІТ» за період 1 січня 2008 року по 30 листопада 2012 року, Версія 2.0, 12 грудня 2012 року/ https://carbonunitsregistry.gov.ua/ua/proekti_spilnogo_vprowadzhennya.

References

1. Fialkov A. Uglegrafitovye materialy [Carbon graphite materials]. Moskva: Energiya, 1979.
2. Petrov B. Enerosberezhenie pri proizvodstve elektrodnogo termoantracita [Energy saving in the production of electrode thermoanthracite]. Kyiv: Ekotekhnologiya, 2006. [In Russian].
3. Gubynskiy M., Fedorov S., Livitan N. Pechi dlya proizvodstva vysokochistyh uglerodnyh materialov [Furnaces for the production of high-purity carbon materials]. *Teoriya i praktika teplovykh processov v metallurgii [Theory and practice of thermal processes in metallurgy]*. Ekaterynburh: UrFU, 2012. P. 79–83. [In Russian].
4. Schobert H. *Chemistry of fossil fuels and biofuels*. Cambridge University Press, 2013.
5. Leleka S., Panov E., Karavackij A., Pulinec I., Chirka T., Lazarev T. Teploelektricheskoe sostoyanie pechej grafitirovaniya Achensona [The thermoelectric state of Achenson graphitizing furnaces]. Kyiv: Rntd,-NTUU «KPI», 2013. [In Russian].
6. Sybir A., Hubytskyi M., Fedorov S., Hubytskyi S., Hohotsi O. Pechi z elektrotermichnym kypliyachym sharom [Pechi with electrothermal kypliyachym sharom.]. *Metallurhiina ta hirnychorudna promyslovist [Metallurgical and mining industry]*, 2020. No. 2. P. 42–61. [In Ukrainian].
7. Gupta C., Sathiyamoorthy S. *Fluid bed technology in materials processing*. CRC Press, 1999.
8. Zak M., Harrison W., Doninger J. Method and apparatus for heat treatment of partuculats in an electrothermal fluidized bed furnace and resultant products (Patent № WO 2005/028978 A1: F27B 15/10. № PST/US2004/029814 ; published 31.03.2005.).
9. Effect of anthracite heat treatment parameters during shock heating on the properties of carbon materials / A. Sybir et al. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologi*. 2022. № 5. C. 94–101.
10. Gas In ven to ries Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Pub lished: IGES, Japan. 2006. Vol. 2: Energy. IPCC. 47 p. URL: https://www.ipccnggip.iges.or.jp/pub lic/2006gl/pdf/2_Volume
11. Volchyn I., Haponych L. (2019). Vykydy parnykovykh haziv na ukrainskykh teplovykh elektrostantsiiah. [Greenhouse gas emissions at Ukrainian thermal power plants] *Enerhotekhnolohyy y resursoberezhennye [Energy technology and resource saving]*. 2019. No. 4. P. 3–12. [In Ukrainian].
12. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2030 r., Stratehiia Kabinetu Ministriv

Ukrainy [Energy Strategy of Ukraine until 2030, Strategy of the Cabinet of Ministers of Ukraine]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text> [In Ukrainian].

13. Teplovoy raschet kotelnykh agregatov (normativnyi metod) [Thermal calculation of boiler units (normative method)]. (1998). [In Russian].
14. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
15. Richnyi zvit z monitorynhu proektu SV «skorochennia vykydiv parnykovykh haziv vnaslidokh zakhodiv z pidvyshchennia enerhoefektyvnosti ta utylizatsii vtorynnoho tepla na vat «ukhrhafit» [Annual monitoring report on the project «Reduction of greenhouse gas emissions due to measures to improve energy efficiency and utilization of waste heat per watt «Ukrgraphite»] (za period 1 sichnia 2008 roku po 30 lystopada 2012 roku, Versiia 2.0,) [for the period from 1 January 2008 to 30 November 2012, Version 2.0]. 2012. [In Ukrainian].

M. V. Gubynskiy, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0003-3770-4397

A. V. Sibir, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0002-9974-0636

S. S. Fedorov, D.S c. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-5409-882X

O. Ye. Merkulov, Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7867-0659

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

S. M. Gubynskiy, Researcher, ORCID 0000-0002-4598-5136

S. V. Koval, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-4115-9865

O. M. Forys, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-9524-2381

Ukrainian State University of Science and Technologies

EVALUATION OF THE REDUCTION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS WHEN PRODUCING ARTIFICIAL GRAPHITE IN ELECTROTHERMAL FLUIDIZED BED

Summary. One of the main global trends in the development of the world economy is its decarbonization with the fulfillment of obligations to reduce greenhouse gas emissions. The processes of obtaining high-purity graphitized materials and ferrous metallurgy have significant consumption of energy carriers and, accordingly, emissions of greenhouse gases. Therefore, the development and implementation of innovative energy-saving technologies based on the electrothermal fluidized bed will allow to solve the emission of greenhouse gases during the production of electrode products. The purpose of the work is to determine the environmental efficiency of the implementation of innovative technology based on electrothermal fluidized bed in comparison with existing ones. The basis of the research methodology is the calculation of greenhouse gas emissions using specific emission rates during the production of electrical energy and burning of natural gas. The work proposes a methodology that takes into account the structure of electricity and fuel production in Ukraine, their types and quality. Technological costs of electricity during its transportation from stations to the consumer, specific fuel costs for electricity production are covered. Calculations were made for four variants of the technological process, which are implemented at PrJSC «Ukrgrafit» and

include the stage of anthracite calcination in rotary furnaces or electrocalciners, the stage of graphitization in Achenson and Kastner furnaces. Two options of technologies with an electrothermal fluidized bed are analyzed in the work. The results of the calculations show that the proposed technology for obtaining finely dispersed artificial graphite based on anthracite from the Donetsk deposit significantly reduces greenhouse gas emissions by 2-3.5 times compared to the existing technologies of PrJSC «Ukrgrafit». Specific emissions of greenhouse gases decrease from 2500-2600 kg of CO₂/t to 390-780 kg of CO₂/t.

Keywords: greenhouse gases, graphitized materials, electrothermal fluidized bed, specific emissions.

Reference for citation: Otsinka zmenshennia vykydiv parnykovykh haziv pry otrymanni shtuchnoho hrafitu v elektrotermichnomu kypliachomu shari [Evaluation of the reduction of greenhouse gas emissions when producing artificial graphite in electrothermal fluidized bed] / M. V. Gubynskiy, A. V. Sibir, S. S. Fedorov, O. Ye. Merkulov, S. M. Gubynskiy, S. V. Koval, O. M. Forys // *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 455-465. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-455-465.

*Стаття надійшла до редакції збірника 07.11.2022 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*