

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 504.064.4:66.097

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/24>

Іваненко О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гомеля М.Д.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Панов Є.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЗІ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ МОНООКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПЕЧЕЙ ВИПАЛЮВАННЯ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОДІВ

На основі статистичних даних за 2018 рік показано, що в Україні 45,81% викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел та автомобільного транспорту представлені викидами токсичного монооксиду вуглецю та становлять серйозну проблему, котра повинна вирішуватися на рівні промислових виробництв. Визначено, що скупчення в місті Запоріжжі промислових підприємств з переважанням важкої промисловості, до переліку яких входить ПрАТ «Український графіт», призвело до утворення території значного техногенного впливу, навантаження якого на довкілля України за рахунок монооксиду вуглецю становить близько 7%. Під час моделювання розсіювання викидів монооксиду вуглецю димових газів печей випалювання у виробництві електродів на ПрАТ «Український графіт» визначено перевищення приземних концентрацій монооксиду вуглецю з урахуванням фону на рівні 1,1–1,2ГДК, що обґрунтовує необхідність розробки технічних рішень щодо зменшення викидів монооксиду вуглецю в атмосферу для підвищення екологічної безпеки виробництва. У результаті проведення досліджень термообробки пересипки заготовок електродів було встановлено, що монооксид вуглецю утворюється за температур, вищих за 400°C, що дає можливість доокислювати СО в присутності каталізаторів до СО₂ та суттєво знижувати викиди монооксиду вуглецю. Було визначено, що найнижча кількість монооксиду вуглецю у газових сумішах відзначена за концентрації кисню 14%. Показано, що у разі нанесення на пересипку електродів діоксиду марганцю з 5 % розчину перманганату калію значно зростає швидкість процесу окислення монооксиду вуглецю до діоксиду вуглецю. У разі виконання розрахунку рівня приземних концентрацій монооксиду вуглецю в атмосферному повітрі після впровадження у виробництво розробленого технічного рішення щодо застосування пересипки, модифікованої 5 % розчином перманганату калію, встановлено дотримання санітарно-гігієнічних норм та нормативів на викиди. Обґрунтовано, що перевагою використання модифікованої MnO₂ пересипки є невисокі матеріальні затрати на обробку пересипки порівняно зі значними капіталовкладеннями на будівництво каталітичних реакторів із знешкодження СО.

Ключові слова: монооксид вуглецю, печі випалювання, димові гази, пересипка, діоксид марганцю, атмосфера повітря, зниження викидів.

Постановка проблеми. Серед українських промислових підприємств ПрАТ «Український графіт» (м. Запоріжжя) посідає одне з чільних місць, будучи провідним виробником в Україні графітованих електродів для електросталеплавильних та руднотерміч-

них печей, вуглецевих мас для алюмінієвих електролізерів Содерберга, анодів магнієвих електролізерів, матеріалів для футеровки доменних та феросплавних печей на основі вуглецю для підприємств металургійної, машинобудівної, хімічної та інших

галузей. Ефективна робота цього підприємства пов'язана з упровадженням новітніх технологій, сучасного технологічного обладнання, з розробкою нових видів вуглецевих матеріалів та розширенням асортименту високоякісних виробів. Проте процеси термообробки вуглецевих матеріалів, на основі яких виробляється продукція підприємства, супроводжуються утворенням високих концентрацій монооксиду вуглецю і є екологічно небезпечними [1, с. 9].

Як відомо, монооксид вуглецю (чадний газ) – безколірний отруйний газ без запаху. Відповідно до прийнятої класифікації впливу на людський організм монооксид вуглецю належить до токсичних речовин загальної дії. Це речовини, які викликають отруєння всього організму загалом або впливають на окремі органи і системи (наприклад, кровотворення, центральну нервову систему) [2, с. 24].

За даними Державної служби статистики України за 2018 рік [3, с. 30], підвищене техногенне навантаження на повітря в Україні формується за рахунок викидів монооксиду вуглецю, які становлять 744,3 тис. тонн у рік від стаціонарних джерел забруднення та 1016,8 тис. тонн у рік від автомобільного транспорту, загалом 1761,1 тис. тонн у рік.

Як видно з рис. 1, 2, 3, 29,9% викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел та 74,9% викидів від автомобільного транспорту і загалом 45,81% представлені викидами токсичного монооксиду вуглецю та становлять серйозну проблему, котра повинна вирішуватися на первинному рівні джерела забруднення, зокрема, на рівні промислових виробництв.

Що стосується Запоріжжя [3, с. 43], то скупчення в місті промислових підприємств із переважанням важкої промисловості призвело до утворення території значного техногенного впливу, навантаження якого на довкілля України за рахунок монооксиду вуглецю становить близько 7%, тобто 52,7 тис. т у рік з 744, 3 тис. т за рахунок стаціонарних джерел забруднення.

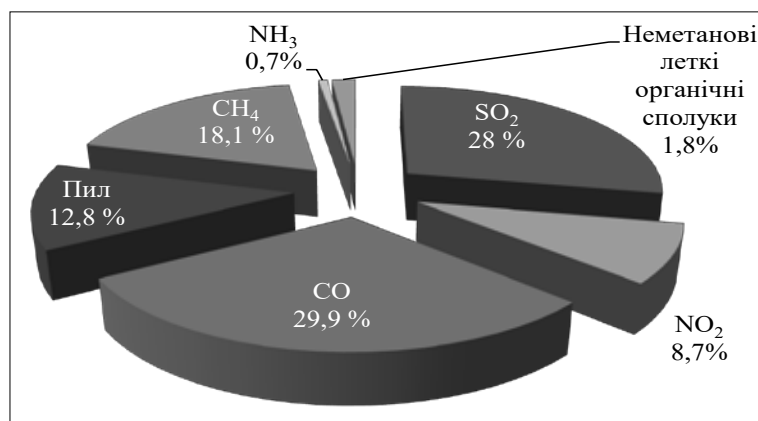


Рис. 1. Діаграма викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел забруднення у атмосферне повітря України за 2018 рік (2486,8 тис. т)

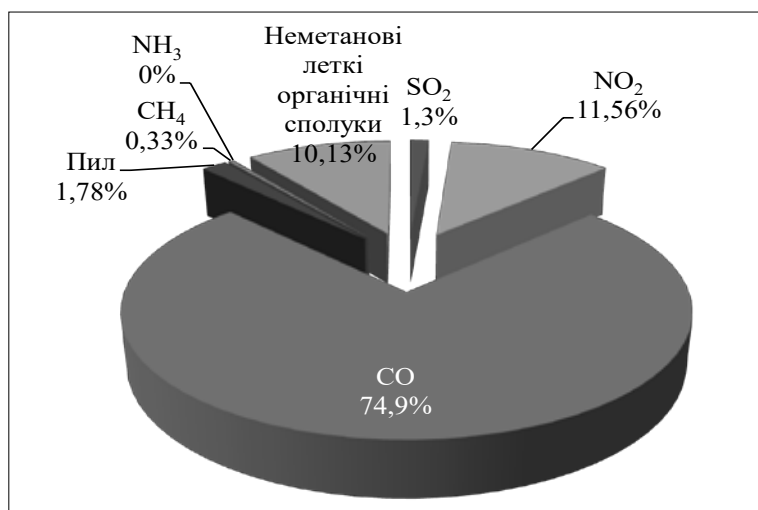


Рис. 2. Діаграма викидів забруднюючих речовин від автомобільного транспорту у атмосферне повітря України за 2018 рік (1357,507 тис. т)

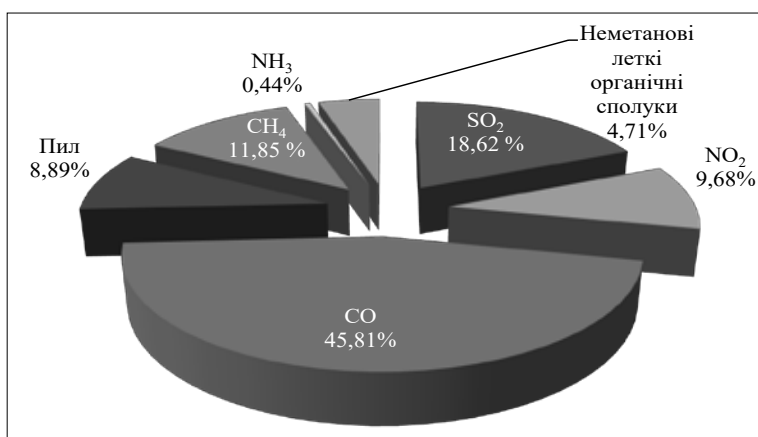


Рис. 3. Сумарна діаграма викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел забруднення та автомобільного транспорту у атмосферне повітря України за 2018 рік (3844,307 тис. т)

Якщо врахувати, що у викидах ПрАТ «Український графіт» присутній монооксид вуглецю в кількості 41,97% [1, с. 12], в цілях підвищення екологічної безпеки підприємства та України загалом необхідно розробляти заходи щодо зниження викидів монооксиду вуглецю димових газів, що утворюються головним чином у печах випалювання під час виробництва електродів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Випалювання спресованих електродних заготовок являє собою процес термічної обробки до температур, близьких 1000°C, за визначеним графіком і швидкістю для забезпечення необхідної якості електродної продукції, в результаті чого відбувається спікання частинок вуглецевого наповнювача і сполучного кам'яновугільного пеку. У разі використання для випалювання електродних заготовок багатокамерних печей типу Рідгамера їх особливістю є пересипка вуглецевим зернистим матеріалом встановлених у печі заготовок. Як показали попередні дослідження [4, с. 15], утворення монооксиду вуглецю в димових газах печей відбувається як за рахунок часткового окислення матеріалів заготовок, так і, що вірогідніше, пересипки. Як показали багаторазові дослідження, зменшення маси пересипки за весь цикл термообробки становить близько 6% [5, с. 75].

Натепер за нормативу граничнодопустимого викиду CO 250 мг/м³ [6, с. 3] у ПрАТ «Український графіт» спостерігається перевищення цього нормативу у печах № 9 (джерело викиду 326), де фактичний викид сягає 998,3 мг/м³, та у печах № 10 (джерело викиду 347) з фактичним викидом 1750 мг/м³. Таким чином, необхідність перетворення цього процесу в екологічно чистий складник електродного виробництва вимагає пошуку дієвих рішень зі зниження утворення CO в процесі випалювання електродів.

Серед запропонованих кроків зі зниження інтенсивності газовиділення під час випалювання заготовок визначальними є модернізація регламенту обпалу [7, с. 44], застосування теплообмінника-утилізатора для локального допалу CO [8, с. 40], заміна багатокамерних кільцевих печей типу Рідгамера на тунельні печі обпалу [9, с. 18], використання каталітичних методів знешкодження CO [2, с. 33; 10, с. 92] тощо. Впровадження таких технічних рішень на підприємстві обмежене або взагалі неможливе внаслідок значних капітальних витрат на реконструкцію чи модернізацію виробництва. Тому досі на виробництві залишається актуальним розв'язання питання шкідливого впливу викидів монооксиду

вуглецю в атмосферне повітря та розробки заходів щодо зниження його негативного впливу на навколишнє середовище і прилеглу житлову та громадську забудову економічно доцільним шляхом без суттєвого переоснащення виробництва.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є розробка науково-технічних рішень зі зниження викидів монооксиду вуглецю димових газів печей випалювання під час виробництва електродів і дотримання екологічних нормативів, встановлених в Україні.

Для досягнення поставлених цілей у роботі необхідно провести моделювання розсіювання забруднюючих речовин у атмосферному повітрі, що містяться у викидах підприємства ПрАТ «Український графіт», та обґрунтувати необхідність розробки технічних рішень щодо зменшення викидів монооксиду вуглецю в атмосферу для підвищення екологічної безпеки виробництва.

Виклад основного матеріалу. Промисловий майданчик ПрАТ «Український графіт» входить у склад промислового вузла, розташованого в північно-східному напрямку основного житлового масиву м. Запоріжжя, в його східній частині на лівому березі р. Дніпро. Для оцінки екологічної безпеки наявного стану підприємства в житловій та громадській забудові виконаний розрахунок приземних концентрацій монооксиду вуглецю в атмосферному повітрі з урахуванням розмірів санітарно-захисної зони, що становить 1000 м.

Розрахунок виконаний з використанням програмного комплексу «ЕОЛ Плюс (версія 5.3.8)», розробленої ТОВ «Топаз» (м. Київ) і погодженої Міністерством охорони навколишнього природного середовища України (3141/10/2-10 від 27.03.2007).

Розрахунки виконувались у разі середньозважених небезпечних швидкостей вітру $1U_{неб}$, $0,5U_{неб}$, $1,5U_{неб}$, 0,5 м/с, 1 м/с, 1,5 м/с, 2,0 м/с, 2,5 м/с. Розташування джерела викиду забруднюючих речовин в атмосферу визначено в координатній сітці «Х-У», яка орієнтована по сторонах світу: вісь «0У» – напрямом «Південь–Північ», вісь «0Х» – «Захід–Схід». Поля максимальних концентрацій розраховувались для території, представленій у вигляді розрахункового квадрата зі стороною 6,0 км із кроком розрахункової сітки 250 м. Крок перебору небезпечних напрямків вітру становив 10 градусів. Розрахунок розсіювання виконувався з урахуванням фонових концентрацій, а також середньорічна роза вітрів приймалася згідно з даними Запорізького обласного центру з гідрометеорології.

Аналіз результатів розрахунку забруднення атмосферного повітря показав, що в п'яти точках розрахункового майданчика спостерігається перевищення максимально допустимої концентрації монооксиду вуглецю, що становить 5 мг/м³, з урахуванням фону в 1,1–1,2 раза (табл. 1, рис. 4).

Отже, негативним фактором функціонування ПрАТ «Український графіт», який безпосередньо впливає на довкілля та здоров'я людини, є викиди монооксиду вуглецю в атмосферне повітря, що, своєю чергою, вимагає впровадження технічних рішень з мінімізації викидів монооксиду вуглецю та дотримання санітарно-гігієнічних норм

Таблиця 1

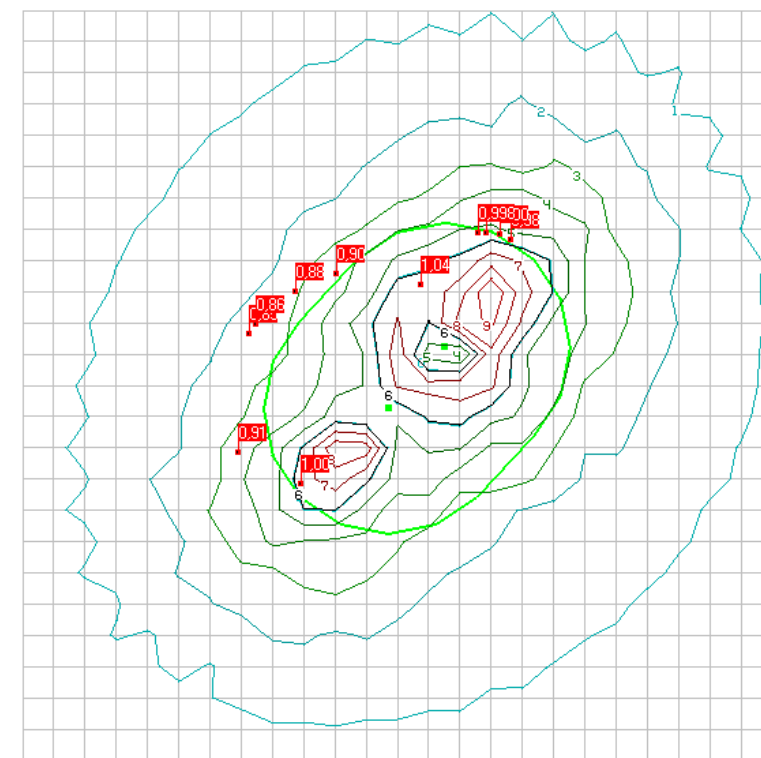
Перелік найбільших приземних концентрацій монооксиду вуглецю у разі заданих напрямків та величин швидкості вітру за наявного стану функціонування ПрАТ «Український графіт»

Координата X, м	Координата Y, м	Концентрація в точці, мг/м ³	Концентрація в точці, долей ГДК	Напрямок вітру, град.	Швидкість вітру, м/с	Код джерела	Внесок, %	Код джерела	Внесок, %
13783	16527	5,992465	1,198493	120,00	2,46	347	82,09	326	17,91
14033	16777	5,808430	1,161686	130,00	2,50	347	69,54	326	30,46
14033	16527	5,652540	1,130508	150,00	2,46	347	80,84	326	19,16
13033	15527	5,598890	1,119778	300,00	2,50	326	68,31	347	31,69
12783	15527	5,549255	1,109851	320,00	2,50	326	57,62	347	42,38

Речовина 06000 / 337 Оксид вуглецю

19026.5

13026.5



9	1.122	ГДК
8	1.082	ГДК
7	1.042	ГДК
6	1.002	ГДК
5	0.962	ГДК
4	0.922	ГДК
3	0.882	ГДК
2	0.842	ГДК
1	0.802	ГДК
0	1.000	ГДК

Ізолінії концентрацій монооксиду вуглецю: 0 – 1ГДК; 1 – 0,802ГДК; 2 – 0,842ГДК; 3 – 0,882ГДК; 4 – 0,922ГДК; 5 – 0,962ГДК; 6 – 1,002ГДК; 7 – 1,042ГДК; 8 – 1,082ГДК; 9 – 1,122ГДК

Рис. 4. Карта-схема розсіювання викидів монооксиду вуглецю за наявного стану функціонування ПрАТ «Український графіт»

і нормативів на викиди згідно з Наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309.

Як показали дослідження газовиділення печей випалювання під час виробництва електродів [11, с. 89], максимальна концентрація монооксиду вуглецю, що вимірювалась безпосередньо в камерах печей випалювання, сягала 3500–3700 мг/дм³. Необхідно також відзначити, що за результатами попередніх досліджень різке підвищення концентрації СО в димових газах відбувається за температури заготовок 320–390°C. Досягнута концентрація СО в газовій суміші практично не змінюється до викидів в атмосферу. З урахуванням того, що в склад димових газів входить

кисень з концентрацією 14% та пари води з концентрацією 8%, високий вміст СО можна теоретично обґрунтувати присутністю лімітуючої стадії конверсії монооксиду вуглецю в діоксид вуглецю. Загалом, виходячи з незначного збільшення констант швидкостей реакцій окислення СО від температури, було зроблено припущення про необхідність використання каталізаторів для прискорення процесів його окислення. При цьому застосування каталізатора повинно обумовлювати невисокі матеріальні затрати на обробку вуглецевого матеріалу порівняно зі значними капіталовкладеннями на будівництво каталітичних реакторів із знешкодження СО. Таким чином, є необхідність дослідження залежності кількості

утвореного монооксиду вуглецю під час використання немодифікованої та модифікованої каталізатором пересипки за різних концентрацій кисню в газовій суміші.

Обов'язковою умовою проведення процесу лабораторного моделювання утворення монооксиду вуглецю в печі випалювання у разі використання пересипки є дотримання теплового регламенту печі та вмісту кисню в суміші газів. Як матеріал для дослідження використовували термоантрацитну пересипку крупністю 2,8–6 мм.

Процеси утворення монооксиду вуглецю в термокамері установки описані в роботі [12, с. 140]. У такому разі через камеру, в якій розміщено наважку пересипки, продували повітря або суміш повітря та діоксиду вуглецю під час нагрівання камери електронагрівачем від кімнатної температури до температури ~850 °С. При цьому газоаналізатором на виході вимірювали концентрації СО, СО₂, О₂ у газовому потоці.

У разі визначення впливу температури концентрації кисню в газовій фазі на вміст монооксиду вуглецю в газових викидах у термокамеру установки завантажували близько 445 г пересипки та пропускали через неї газову суміш з витратою 131,4 дм³/год за концентрації кисню 13–15%, 98,4 дм³/год за концентрації 15–16 % та 60 дм³/годину за концентрації 17–18%.

З огляду на те, що подача газів у термокамеру регулювалась з метою досягнення заданої концентрації кисню і за

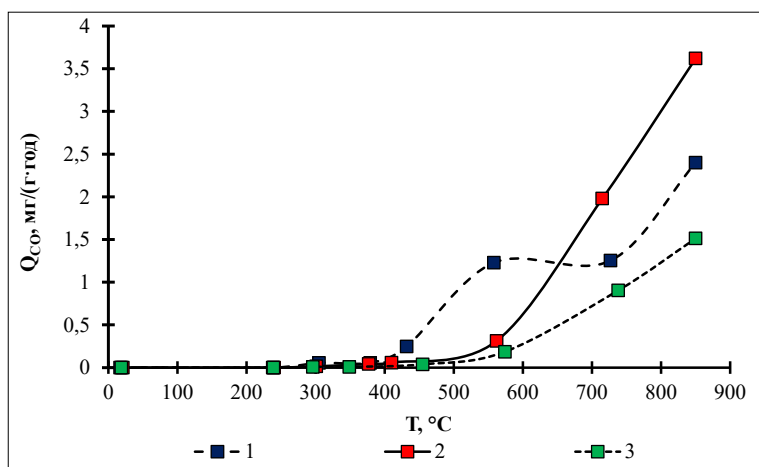


Рис. 5. Зміна кількості монооксиду вуглецю, що утворюється з 1 г пересипки, залежно від температури у разі витрати газової суміші, пропущеної через термокамеру, дм³/год: 131,4 (1) (C_{O₂} = 13–15%); 98,4 (2) (C_{O₂} = 15–16%); 60,0 (3) (C_{O₂} = 17–18%)

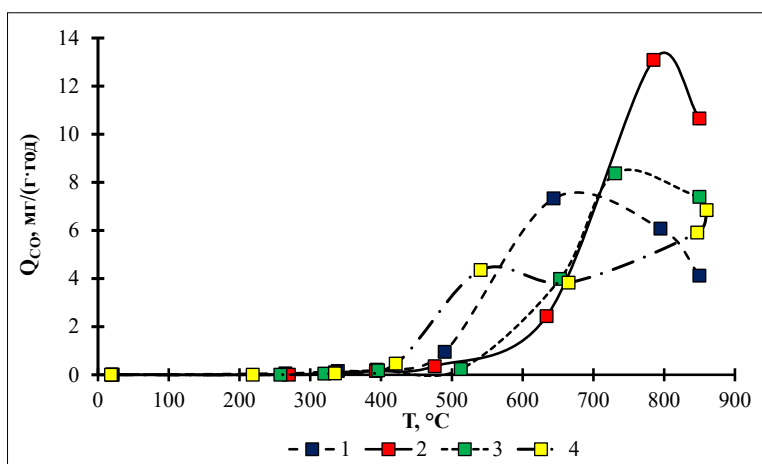


Рис. 6. Зміна кількості монооксиду вуглецю, що утворюється з 1 г пересипки, залежно від температури у разі витрати газової суміші, пропущеної через термокамеру, дм³/год: 376 (1) (C_{O₂} = 14,06%); 350 (2) (C_{O₂} = 15,50%); 323 (3) (C_{O₂} = 17,50%); 350 (4) (C_{O₂} = 20,95%)

різних його концентрацій витрата газів була різною, практичний інтерес викликає розрахунок значення кількості утвореного монооксиду вуглецю за певний час, приведений до одиниці маси вуглецевого матеріалу. У такому разі кількість утвореного СО визначається не лише його концентрацією в газовій суміші, а розраховується як витрата газу на концентрацію за час дегазації за формулою:

$$Q_{CO} = C \cdot V / M \text{ (мг/г*год)}, \quad (1)$$

де C – концентрація СО, мг/м³; V – витрата газової суміші, м³/год; M – маса завантаженої термоантрацитної пересипки, г.

Про зміну кількості утвореного монооксиду вуглецю в газовій суміші, яка проходила через термокамеру, можна судити по графіках, приведених на рисунку 5.

У такому разі слід відзначити, що в діапазоні температур 100–400 °С кількість утвореного СО у газовій суміші була незначною і лише за температури 400 °С становила 0,0553 мг/г*год для газової суміші, що містить 13–15% кисню, 0,0417 мг/г*год за концентрації кисню 15–16% і всього 0,0087 мг/г*год за вмісту кисню 17–18%. В усіх випадках показник зростає із температурою і за 650–800 °С він збільшується до 1,2539 мг/г*год, 1,9796 мг/г*год та 0,9040 мг/г*год у разі зростання вмісту кисню в газовій суміші від 13–15% до 17–18%, а за температури 850 °С цей показник становить відповідно 2,400 мг/г*год, 3,6207 мг/г*год та 1,5126 мг/г*год.

Щодо концентрації монооксиду вуглецю, то за температур 250–400 °С вона становила 125–250 мг/м³ незалежно від концентрації кисню в газовій суміші. Надалі концентрація СО до температури 653 °С зростала швидше за концентрації кисню 13–15%, а за вищих температур – за концентрації кисню 15–16%. Максимальна концентрація СО сягала 13025–18625 мг/м³ за концентрації кисню 15–16%.

Втрата маси пересипки сягала 3,311, 2,295 та 1,947% відповідно за вмісту кисню у газовій суміші 13–15%, 15–16% та 17–18%. Як видно з результатів досліджень, з підвищенням концентрації кисню у газовій суміші втрата маси пересипки мінімальна.

Зниження маси пересипки з підвищенням концентрації кисню можна пов'язати із зменшенням витрати газоповітряної суміші, що у цілому призвело до зменшення кількості пропущеного кисню. Так, за концентрації кисню 13–15% витрата газу становила 131,4 дм³/годину, або за 7 годин – 919,8 дм³. З них 14% – це кисень,

або 128,772 дм³. За концентрації кисню 15–16% витрата газової суміші була 98,4 дм³/годину, або в цілому 688,8 дм³, в тому числі кисню 106,76 дм³. У разі витрати газової суміші 60 дм³/годину кількість пропущеного кисню складе всього 73,5 дм³. Саме цим можна пояснити і зменшення кількості утвореного монооксиду вуглецю у разі зниження витрати газової суміші.

Очевидно, що з підвищенням концентрації кисню до 15–16% кількість утвореного СО зростає із підвищенням температури. Загалом, за весь час нагрівання середній показник кількості утвореного СО найвищий для концентрації кисню 15–16% і сягає $Q_{CO}^{ср} = 0,8610$ мг/г*год. Слід відзначити, що розрахована в цілому для печі випалювання на виробництві питома кількість монооксиду вуглецю, що утворюється на 1 г пересипки, за весь цикл обробки заготовок становить 0,12297 мг/г*год. Можливо, це пов'язане з тим, що димові гази містять до 8% парів води, яка пришвидшує реакцію доокислення СО за реакціями, приведеними в літературі [13, с. 50], що в цілому забезпечує зниження його концентрації в газовій суміші.

Підсумовуючи результати експериментальних досліджень, можна сказати про те, що температурний діапазон, за якого в процесі випалювання з вуглецевого матеріалу утворюється СО, суттєво відрізняється від раніше опублікованих даних. Вважалось, що основна маса монооксиду вуглецю утворюється за температури 320–390 °С. І це була головна причина, що перешкоджала створювати умови для окислення СО в технологічному процесі. З отриманих даних видно, що реально монооксид вуглецю утворюється за температур, вищих за 400 °С, що дає можливість доокислювати СО в присутності каталізаторів до СО₂ та суттєво знижувати викиди монооксиду вуглецю.

Під час проведення дослідження з підтриманням постійної витрати газової суміші за різних концентрацій кисню було визначено, що найнижча кількість монооксиду вуглецю у газових сумішах відзначена за концентрації кисню 14% – 4,1191–6,0735 мг/г*год на рівні 4875–7188 мг/м³ (рис. 6). У разі підвищення концентрації кисню до 15,5% відзначений максимальний вміст СО 10,6559–13,0915 мг/г*год за температури 785–850 °С (13125–16125 мг/м³).

У разі подальшого зростання концентрації кисню в газовій суміші вміст монооксиду вуглецю в газах на виході з термокамери дещо знижується та у разі концентрації кисню 20,95% кількість утвореного монооксиду вуглецю становить 5,9118–6,8470 мг/г*год, що відповідає 6375–7375 мг/м³.

Для інтенсифікації процесів окислення монооксиду вуглецю під час термообробки пересипки її модифікували 1% та 5% розчинами перманганату калію за методикою [14, с. 60]. При цьому перманганат у разі взаємодії з вугіллям відновлюється до MnO_2 і залишається на його поверхні у вигляді мікрокристалів. У такому разі навіть під час продування через пересипку, модифіковану 5% розчином перманганату калію, чистого повітря кількість утвореного монооксиду вуглецю в газовій суміші становила $0,125 \text{ мг/г}\cdot\text{год}$, що відповідає 70 мг/м^3 за температури $520 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7). Порівняно з пересипкою, модифікованою 1% розчином перманганату калію, та немодифікованою пересипкою, цей показник нижчий у 10 ($1,248 \text{ мг/г}\cdot\text{год}$ або 769 мг/м^3) та, відповідно, $73,5$ ($9,175 \text{ мг/г}\cdot\text{год}$ або 5875 мг/м^3) раза. Якщо врахувати, що в багатоканальних печах Рідгамера димовий газ рухається з попередньої гарячої до послідувочі більш холодної камери випалювання, та суттєвий ріст утворення CO відбувається за температури заготовок $320\text{--}390 \text{ }^\circ\text{C}$, то застосування пересипки, модифікованої 5% розчином перманганату калію, є простим і зручним методом запобігання викидам монооксиду вуглецю в атмосферу в процесах випалювання електродів. Причому отримана концентрація монооксиду вуглецю 70 мг/м^3 значно нижча нормативу граничнодопустимого викиду CO 250 мг/м^3 .

Зважаючи на те, що за концентрації кисню 14%, яка відповідає промисловим умовам проходження процесу випалювання електродів, кількість утвореного монооксиду вуглецю нижча, застосування такого технічного рішення на підприємстві

перетворить процес випалювання електродів на екологічно чистий складник електродного виробництва.

Для оцінки дотримання вимог екологічних нормативів, встановлених в Україні, в зоні дії викидів ПрАТ «Український графіт» після впровадження у виробництво розробленого технічного рішення щодо застосування пересипки, модифікованої 5% розчином перманганату калію, виконаний розрахунок рівня приземних концентрацій монооксиду вуглецю в атмосферному повітрі.

Згідно з приведеним переліком найбільших концентрацій розрахункового майданчика (табл. 2, рис. 8) після вдосконалення процесу окислення монооксиду вуглецю його приземні концентрації не перевищують максимально допустимої концентрації монооксиду вуглецю 5 мг/м^3 . При цьому будуть дотримані вимоги нормативів на викиди згідно з Наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309.

Висновки. У результаті проведення оцінки впливу підприємства з виробництва електродної продукції ПрАТ «Український графіт» на рівень забруднень довкілля з урахуванням розмірів санітарно-захисної зони було встановлено, що в п'яти точках розрахункового майданчика спостерігається перевищення максимально допустимої концентрації монооксиду вуглецю, що становить 5 мг/м^3 з урахуванням фону в 1,1–1,2 раза.

У результаті проведення досліджень термообробки пересипки заготовок електродів було встановлено, що монооксид вуглецю утворюється за температур, вищих за $400\text{ }^\circ\text{C}$, що дає можливість доокислювати CO в присутності каталізаторів до CO_2 та суттєво знижувати викиди монооксиду вуглецю. Було визначено, що найнижча кількість монооксиду вуглецю у газових сумішах відзначена у разі концентрації кисню 14%.

Показано, що під час нанесення на пересипку діоксиду марганцю з 5% розчину перманганату калію значно зростає швидкість процесу окислення монооксиду вуглецю до діоксиду вуглецю, при цьому концентрація монооксиду вуглецю в газовій суміші була нижчою 70 мг/м^3 за температури до $520 \text{ }^\circ\text{C}$.

Під час виконання розрахунку рівня приземних концентрацій монооксиду вуглецю в атмосферному повітрі після впровадження у виробництво розробленого технічного рішення щодо застосу-

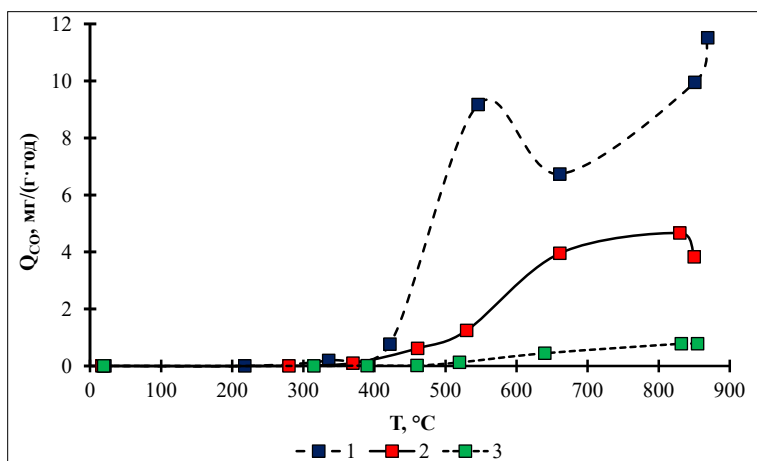
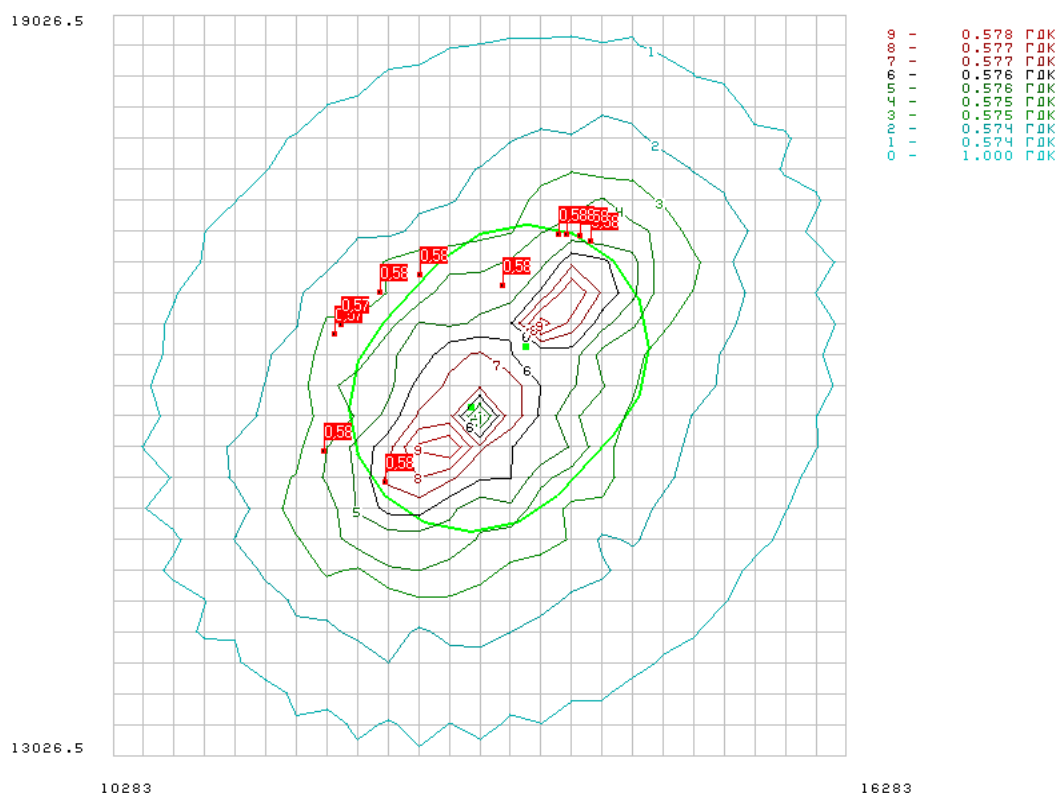


Рис. 7. Зміна кількості монооксиду вуглецю залежно від температури у разі витрати повітря $588 \text{ дм}^3/\text{год}$ ($C_{O_2} = 20,95\%$), пропущеного через: (1) пересипку; (2) пересипку, модифіковану 1% розчином перманганату калію; (3) пересипку, модифіковану 5% розчином перманганату калію

**Перелік найбільших приземних концентрацій монооксиду вуглецю
у разі заданих напрямків та величин швидкості вітру після впровадження технічного рішення
на ПрАТ «Український графіт»**

Координата X, м	Координата Y, м	Концентрація в точці, мг/м ³	Концентрація в точці, долей ГДК	Напрямок вітру, град.	Швидкість вітру, м/с	Код джерела	Внесок, %
13783	16526	3,750055	0,750011	120,00	2,27	347	100,00
13533	16526	3,741875	0,748375	60,00	2,27	347	100,00
13783	16026	3,738440	0,747688	250,00	2,27	347	100,00
13533	16026	3,733390	0,746678	290,00	2,27	347	100,00
14033	16276	3,731940	0,746388	190,00	2,27	347	100,00

Речовина 06000 / 337 Оксид вуглецю



Ізолінії концентрацій монооксиду вуглецю: 0 – 1ГДК; 1 – 0,574ГДК; 2 – 0,574ГДК; 3 – 0,575ГДК; 4 – 0,575ГДК; 5 – 0,576ГДК; 6 – 0,576ГДК; 7 – 0,577ГДК; 8 – 0,577ГДК; 9 – 0,578ГДК

Рис. 8. Карта-схема розсіювання викидів монооксиду вуглецю після впровадження технічного рішення у ПрАТ «Український графіт»

вання пересипки, модифікованої 5% розчином перманганату калію, було встановлено дотримання санітарно-гігієнічних норм та нормативів на викиди згідно з Наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309.

Перевагою використання модифікованої MnO_2 пересипки є невисокі матеріальні затрати на обробку вуглецевого матеріалу порівняно зі значними капіталовкладеннями на будівництво каталітичних реакторів із знешкодження CO .

Список літератури:

1. Екологічний паспорт Запорізької області за 2018 р. / Офіційний портал Міністерства енергетики та захисту довкілля України 30 липня 2019. 173 с. URL: <https://menr.gov.ua/news/33529.html>.
2. Іваненко О.І., Носачова Ю.В., Оверченко Т.А., Наконечна М.В. Особливості застосування каталізаторів різних типів у процесах знешкодження монооксиду вуглецю димових газів. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. Київ, 2020. № 1(19). С. 22–42.
3. Статистичний збірник «Довкілля України за 2018 рік». / Державна служба статистики України. URL: http://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2019/zb/11/Zb_dovk_2018.pdf.
4. Панов Е.Н., Шилович І.Л., Іваненко Е.І., Буряк В.В. Тепловые и химические аспекты образования СО в процессе обжига электродов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2012. № 4/6 (58). С. 15–18.
5. Панов Е.Н., Шилович І.Л., Іваненко Е.І., Буряк В.В. Определение состава газовых выбросов обжиговых печей при производстве электродов. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. Київ, 2012. № 1(9). С. 75–77.
6. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309 «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин зі стаціонарних джерел». Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 1 серпня 2006 р. за № 912/12786. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06#Text>.
7. Карвацкий А.Я., Лелека С.В., Пулинец И.В., Лазарев Т.В. Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовой выделения обжигаемых заготовок. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2011. № 6/5 (54). С. 42–45.
8. Карвацкий А.Я., Шилович І.Л., Крутоус Л.В., Кутузов С.В. Зниження концентрації СО за рахунок установки конверсії монооксиду вуглецю. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2013. № 2/11 (62). С. 38–41.
9. Bogacki M., Oleniacz R., Mazur M., Szczygłowski P. Air pollution emissions during baking of semi-finished graphite products in a tunnel furnace. *Environment Protection Engineering*. Wroclaw, 2012. № 38(1). Pp. 15–23.
10. Belokon K.V., Belokon Y.A., Kozhemyakin G.B., Matukhno E.V. Environmental assessment of the intermetallic catalysts utilization efficiency for deactivation of the pollutants emitted by electrode production enterprises. *Науковий вісник НГУ*. Днепр, 2016. № 3. С. 87–94.
11. Gomelya N.D., Ivanenko E.I. The estimation of influence of kinetic factors on content of CO in the process of baking of electrodes. *Ecobaltica-2012 : book of abstracts the IX International Youth Science Environmental Forum (St-Petersburg, 29–30 Nov. 2012)*. Sankt-Petersburg, 2012. С. 89.
12. Panov Ye., Gomelia N., Ivanenko O., Vahin A., Leleka S. Assessment of the Effect of Oxygen and Carbon Dioxide Concentrations on Gas Evolution During Heat Treatment of Thermoanthracite Carbon Material. *Journal of Ecological Engineering*. Lublin, 2020. № 2 (2). Pp. 139–149.
13. Фокин В.П., Малахов А.А., Малахов С.А., Сошкин С.В. Усовершенствование технологии обжига электродных материалов. *Цветные металлы*. Москва, 2002. № 4. С. 48–51.
14. Хохотва А.П., Мельникова Н.В. Очистка фенолсодержащих вод окислением на суспензии MnO_2 . *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. Київ, 2008. № 5. С. 59–61.

Ivanenko O.I., Gomelya N.D., Panov Ye.M. DEVELOPMENT OF MEASURES TO REDUCE CARBON MONOXIDE EMISSIONS FROM THE FLUE GASES OF KILNS IN THE PRODUCTION OF ELECTRODES

Based on statistical data for 2018, it is shown that in Ukraine 45.81% of pollutant emissions from stationary sources and road transport are emissions of toxic carbon monoxide and are a serious problem that must be addressed at the level of industrial production. It is determined that the concentration of industrial enterprises in the city of Zaporizhzhia with a predominance of heavy industry, which includes PJSC “Ukrainian Graphite”, led to the formation of a significant man-made impact, the load on the environment of Ukraine due to carbon monoxide is about 7%. In modelling the scattering of carbon monoxide emissions from the flue gases of kilns during the production of electrodes at PJSC “Ukrainian Graphite” the excess of surface concentrations of carbon monoxide at the level of 1.1–1.2 MPC was determined, taking into account the background, which justifies the need to develop technical solutions to reduce carbon monoxide emissions into the atmosphere to improve the environmental safety of production. As a result of heat treatment studies of electrode’s packing materials, it was found that carbon monoxide

is formed at temperatures above 400°C, which allows to oxidize CO in the presence of catalysts to CO₂ and significantly reduce carbon monoxide emissions. It was determined that the lowest amount of carbon monoxide in gas mixtures was observed at an oxygen concentration of 14%. It is shown that when applying manganese dioxide electrodes from a 5% solution of potassium permanganate to the packing materials, the rate of the process of oxidation of carbon monoxide to carbon dioxide increases significantly. When calculating the level of surface concentrations of carbon monoxide in the air after the introduction into production of the developed technical solution for the application of the packing materials, modified with 5% solution of potassium permanganate, compliance with sanitary and hygienic norms and emission standards was established. It is substantiated that the advantage of using modified MnO₂ packing materials is low material costs for processing of carbon material in comparison with significant investments in construction of catalytic reactors for CO neutralization.

Key words: carbon monoxide, kilns, flue gases, packing materials, manganese dioxide, atmospheric air, emission reduction.