



УДК 669.1.015.7.074

**В.Д. МАНТУЛА**, заступник генерального директора, **С.В. СПІРИНА**, канд. хім. наук, завідувач відділу,  
**М.М. БУГАЄНКО**, науковий співробітник, **В.С. КУЛИК**, науковий співробітник

Державне підприємство «Український науково-технічний центр

металургійної промисловості «Енергосталь» (ДП «УкрНТЦ «Енергосталь»), м. Харків

## ВПЛИВ СПОСОБІВ ВІДВЕДЕННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ КОНВЕРТЕРНИХ ГАЗІВ НА ВИКИДИ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ВІД КИСНЕВИХ КОНВЕРТЕРІВ ПІДПРИЄМСТВ УКРАЇНИ

Розглянуто способи відведення газів з кисневих конвертерів. Наведено дані інструментальних вимірювань масових концентрацій оксиду вуглецю у відхідних газах кисневих конвертерів, які працюють з повним та частковим допалюванням конвертерних газів. Показано, що масова концентрація оксиду вуглецю в таких газах значно перевищує норматив гранично допустимого викиду  $250 \text{ мг/м}^3$ . Доведено необхідність розробки технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від устаткування для виробництва сталі у кисневих конвертерах.

**Ключові слова:** кисневий конвертер, сталь, відхідні гази, повне допалювання, часткове допалювання, питомий викид, розрахунковий метод.

Виробництво сталі здійснюється у 92 країнах світу, серед яких Україна у 2012 р. займала десяте місце [1]. Загальносвітовий обсяг виплавленої за 2012 р. сталі становив 1 545 млн т (у т.ч. конвертерної – 1 075,8 млн т, або 69,6 %). Основними виробниками сталі є Китай (46,38 %), Японія (6,94 %), США (5,74 %), Індія (5,02 %), Росія (4,56 %), Південна Корея (4,47 %), Німеччина (2,76 %), Туреччина (2,32 %), Бразилія (2,23 %), Україна (2,13 %).

На цей час для отримання сталі використовують в основному киснево-конвертерний процес (у зв'язку з його високою продуктивністю і економічністю). Частка конвертерної сталі від її загального виробництва становить: в Китаї – 89,8 %, Японії – 76,8 %, Бразилії – 75,2 %, Україні – 69,4 %, Німеччині – 67,7 %, Росії – 63,4 %, Південній Кореї – 62,4 %, США – 40,9 %, Індії – 31,6 %, Туреччині – 26,0 %.

В Україні за 2012 р. в конвертерах виплавлено 23 520 тис. т сталі (загальний обсяг досяг 32 975 тис. т сталі), а за 2013 р. – 24 270 тис. т.

Виробництво конвертерної сталі здійснюється на семи підприємствах України: ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (ПАТ «АМКР»), ПАТ «ДМК ім. Дзержинського» (ПАТ «ДМКД»), ПАТ «Єнакіївський металургійний завод» (ПАТ «ЄМЗ»), ПАТ «Євраз – ДМЗ ім. Петровського», ПАТ «МК «Азовсталь», ПАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча» (ПАТ «ММК ім. Ілліча»), ПАТ «Алчевський металургійний комбінат» (ПАТ «АМК»).

Більшість конвертерів має грушовидну форму з концентричною горловиною. Це забезпечує кращі умови для

введення кисневої фурми у порожнину конвертеру, відведення газів, заливання чавуну, завалення лому та введення шлакоутворюючих матеріалів.

Відхідні конвертерні гази, що містять значну кількість пилу, надходять на охолодження та очищення у газовідвідний тракт, основними елементами якого є охолоджувач конвертерних газів (ОКГ), система очистки газів, димосос і димова труба або свіча з допалювальним пристроєм.

Спосіб відведення газів від кисневого конвертера суттєво впливає на вміст, кількість, температуру, запиленість та інші параметри відхідних газів, що потрапляють у систему газоочищення.

Відведення газів з конвертера можна здійснювати такими принципово різними способами:

- з повним допалюванням конвертерних газів (коефіцієнт витрати повітря  $\alpha > 1$ );
- з частковим допалюванням конвертерних газів ( $\alpha = 0,3-0,5$  під час максимального газовиділення);
- без допалювання конвертерних газів ( $\alpha \leq 0,1$ ).

У системах відведення газів з повним допалюванням горючі складові конвертерних газів спалюють шляхом розбавлення їх повітрям, що всмоктується через проміжок між конвертером і охолоджувачем.

Обсяг продуктів згоряння, які необхідно охолоджувати і очищати від пилу в системах з допалюванням, збільшується порівняно з первинними конвертерними газами пропорційно кількості повітря, що всмоктується.

У системах відведення газів з частковим допалюванням оксиду вуглецю відсмоктування конвертерних газів здійснюється за обраної постійної продуктивності димососа. За такого режиму коефіцієнт витрати повітря  $\alpha$  і ступінь допалювання газів змінюються залежно від коливань газовиділення з конвертера.

Відведення газів без доступу повітря і допалювання забезпечується регулюванням відсмоктування повітря, при якому коефіцієнт надлишку повітря не перевищує 0,1. Цей спосіб відомий як регульоване відведення газів без допалювання.

Через мінімальне відсмоктування повітря об'єм газів у системах без допалювання оксиду вуглецю різко зменшується порівняно з установками з повним допалюванням, що надає змогу зменшити габарити обладнання для охолодження та очищення газів, а також знизити капітальні та експлуатаційні витрати. Розглянута система дає можливість використовувати відхідні гази як паливо або хімічну сировину.

Основним способом очищення конвертерних газів на цей час є мокре очищення у трубах Вентурі різної модифікації. Найефективнішу очистку забезпечують системи мокрих газоочисток з прямокутними регульованими трубами Вентурі. Система складається з двох ступенів. Першим ступенем є скруббер або низьконапірні труби Вентурі, а другим – високонапірна труба Вентурі з регульованим перерізом горловини.

Основними чинниками, що визначають речовинний склад і фізико-хімічні властивості конвертерного пилу у відхідних газах, є газовий і температурний режими в газовідвідних трактах конвертерів. Склад газового середовища та температура газового потоку у тракті залежать насамперед від режиму газовиділення з конвертера та коефіцієнта надлишку повітря в ОКГ.

Газовиділення з конвертера визначається швидкістю окислення вуглецю, яка в процесі плавки змінюється в широких межах. Процес окислення вуглецю до газовиділення з кисневого конвертера при продуванні ванни киснем зверху поділяється на три основних періоди.

Перший період продувки (до 25 % часу продувки) включає наведення шлаку з оксидів заліза, кремнію, марганцю, кальцію і утворення шлакометалевої емульсії. У період, коли температура ванни порівняно низька (1300–1400 °С), вигорять в основному кремній та марганець, що мають більшу спорідненість до кисню, ніж вуглець. Швидкість окислення вуглецю в цей період є мінімальною і лінійно наростає у часі.

Другий (основний) період продувки характеризується найбільш інтенсивним окисленням вуглецю і максимальним газовиділенням з конвертера. У цей період (25–85 % часу продувки) зі зниженням вмісту кремнію в металі

і підвищенням температури ванни кисень, що надходить у ванну, витрачається в основному на окислення вуглецю, і швидкість зневуглецювання досягає максимальної величини. На цій стадії продування при постійній витраті дуттєвого кисню швидкість окислення вуглецю залишається постійною.

Як тільки вміст вуглецю в металі досягає критичного значення, починається третій період (85–100 % часу продувки), протягом якого швидкість окислення вуглецю зменшується за законом прямої лінії. Зменшення швидкості окислення у кінці продувки зумовлює різкий спад газовиділення з конвертера.

Другим чинником, що визначає газовий режим у газовідвідному тракті конвертера, є коефіцієнт витрати повітря в ОКГ. Відведення газів від кисневих конвертерів, працюючих за системою з повним допалюванням, здійснюється зі змінним коефіцієнтом витрати повітря за постійної продуктивності димососа. В ОКГ протягом продувки відбувається практично повне допалювання оксиду вуглецю. У період максимального газовиділення повне допалювання СО здійснюється з мінімальним коефіцієнтом надлишку повітря, який на виході з топкової частини ОКГ становить 1,03–1,1. У момент максимально можливих (пікових) газовиділень з конвертера вміст недопаленого оксиду вуглецю у продуктах згоряння досягає 1,0–3,0 % [2].

При частковому допалюванні конвертерних газів відведення відбувається з перемінним коефіцієнтом витрати повітря  $\alpha$ , який змінюється протягом продувки залежно від газовиділення з конвертера. В свою чергу, кількість конвертерних газів визначається швидкістю зневуглецювання. Отже, кількість відхідних газів, що надходять в ОКГ при частковому допалюванні, є практично функцією двох величин – коефіцієнта витрати повітря і швидкості зневуглецювання.

У початковий і кінцевий періоди продування, коли кількість конвертерних газів порівняно невелика, відбувається їх повне допалювання у відсмоктуваному повітрі з  $\alpha > 1,0$ . У міру збільшення газовиділення з конвертера коефіцієнт витрати повітря знижується до значень, менших 1,0 ( $\alpha$  в період максимального зневуглецювання досягає 0,3–0,5). У тракті утворюється недопалений оксид вуглецю (до 35–40 %), який проходить через ОКГ, систему газоочистки і спалюється на свічі [2]. У момент плавних переходів між режимами повного ( $\alpha > 1$ ) і часткового ( $\alpha < 1$ ) допалювання з коефіцієнтом витрати повітря, близьким до 1,0, в ОКГ утворюється суміш газів  $\text{CO}_2$  і  $\text{N}_2$  («тампон»), яка промиває тракт, що забезпечує вибухобезпечність системи. Коливання  $\text{CO}/\text{CO}_2$  протягом продувки залежать від режиму газовиділення з конвертера.



При відведенні конвертерних газів без регульовано-го підсмоктування повітря (повне і часткове допалюван-ня CO) вміст недопаленого оксиду вуглецю та CO/CO<sub>2</sub> є функцією коефіцієнта витрати повітря.

За даними [2], при відведенні газів з частковим до-палюванням і зміні  $\alpha$  від 1,1 до 0,4 відношення CO/CO<sub>2</sub> змінюється в межах 0–1,5. При регульованому відведенні газів без допалювання CO/CO<sub>2</sub> у відхідних газах колива-ється протягом продувки (за винятком початкового і кін-цевого періодів) в межах 3–3,5.

На чотирьох заводах України знаходяться в ек-сплуатації три 60-т конвертери (ПАТ «Євраз – ДМЗ ім. Петровського») та десять 160-т конвертерів (ПАТ «ЄМЗ», ПАТ «АМКР», ПАТ «ММК ім. Ілліча»), які працюють з відведенням газів з повним допалюван-ням. Середня витрата димових газів 60-т конверте-рів, що її приведено до нормальних умов, становить 177,3 тис. м<sup>3</sup>/год (~ 2450 м<sup>3</sup>/т сталі), а 160-т конвертерів – від 170 до 220 тис. м<sup>3</sup>/год (до ~ 1000 м<sup>3</sup>/т сталі).

Також на чотирьох заводах України знаходять-ся в експлуатації два 160-т конвертери (ПАТ «ЄМЗ»), два 250-т конвертери (ПАТ «ДМКД»), два 300-т конвертери (ПАТ «АМК») і два 350-т конвертери (ПАТ «МК «Азовсталь»), які працюють з відведенням га-зів з частковим допалюванням оксиду вуглецю (коефіці-єнт надлишку повітря  $\alpha = 0,2-0,3$  або  $\alpha > 0,3$ ). Середня витрата димових газів (приведена до нормальних умов) 160-т конвертерів становить до 100 тис. м<sup>3</sup>/год (або до 570 м<sup>3</sup>/т сталі), 250-т конвертерів – до 200 тис. м<sup>3</sup>/год (670 м<sup>3</sup>/т сталі), 300-т конвертерів – до 210 тис. м<sup>3</sup>/год (470 м<sup>3</sup>/т сталі), 350-т конвертерів – до 230 тис. м<sup>3</sup>/год (490 м<sup>3</sup>/т сталі).

У роботі проведено вимірювання масових концентра-цій оксиду вуглецю поза газоочисним обладнанням кис-невих конвертерів, що працюють з повним допалюван-ням конвертерних газів (результати наведено в табл. 1).

На підприємствах ГМК України, на яких експлуату-ють кисневі конвертери, що працюють з частковим допа-люванням конвертерних газів, проведено аналіз графіків безперервного вимірювання вмісту оксиду вуглецю, діоксиду вуглецю, водню та кисню у відхідних газах (при-клад зміни вмісту газоподібних речовин у відхідних газах таких конвертерів наведено на рис. 1).

Конвертерний газ із вмістом оксиду вуглецю менше 20 % (нормальні умови) не згоряє, а викидається (протя-гом 3–6 хв) в атмосферне повітря. За результатами про-ведених розрахунків (табл. 2) викиди оксиду вуглецю за цей період становлять 2–5 м<sup>3</sup> на тону сталі (близько 5 % від загальної кількості утвореного оксиду вуглецю).

Конвертерний газ із вмістом оксиду вуглецю понад 20 % (нормальні умови) згоряє на свічі у допалювальню-му пристрої. Під час згоряння природного газу у пальни-ках на допалювальному пристрої утворюється незначна кількість оксиду вуглецю, частка якого складає близько 0,02 % від загального викиду в атмосферне повітря.

Отримані розрахунковим методом величини пито-мих викидів оксиду вуглецю (м<sup>3</sup>/т сталі) від кисневих конвертерів, що працюють з частковим допалюванням за цим способом відведення, відповідають літературним даним [4], за якими ці викиди становлять 3–5 м<sup>3</sup>/т сталі.

На підставі проведених досліджень (табл. 1) показа-но, що при виробництві сталі у кисневих конвертерах, які працюють з повним допалюванням, масова концентрація оксиду вуглецю у відхідних газах знаходиться в діапазоні від 4000 до 27000 мг/м<sup>3</sup> залежно від технологічного ре-жиму проведення плавки, садки конвертера, марки сталі тощо. Для кисневих конвертерів, що працюють з част-ковим допалюванням, розрахована потужність вики-ду оксиду вуглецю становить від 200 до 485 г/с, або від 4000 до 7400 мг/м<sup>3</sup> (табл. 2).

Отже, масова концентрація оксиду вуглецю у від-хідних газах кисневих конвертерів значно перевищує

**Таблиця 1 – Результати вимірювання масових концентрацій оксиду вуглецю поза газоочисним обладнанням кисневих конвертерів, що працюють з повним допалюванням конвертерних газів**

Устаткування	Масова концентрація CO за результатами вимірювань на підприємствах України, мг/м <sup>3</sup>	Питомий викид CO на підприємствах України, кг/т сталі	Питомий викид CO на підприємствах ЄС [3], кг/т сталі
60-т конвертери (три одиниць)	4187,5–6187,5	4,8–5,9	0,393–7,2
160-т конвертери (десять одиниць)	8281,3–26687,5	6,7–11,5	0,393–7,2

**Таблиця 2 – Результати розрахунків викидів оксиду вуглецю від кисневих конвертерів, що працюють з частковим допалюванням**

Устаткування	Потужність викиду CO на підприємствах України, г/с	Питомий викид CO на підприємствах України		Питомий викид CO на підприємствах ЄС [3]
		м <sup>3</sup> /т сталі	кг/т сталі	кг/т сталі
160–350-т конвертери (вісім одиниць)	200–485	2,0–4,9	2,5–6,1	7,0–16,0

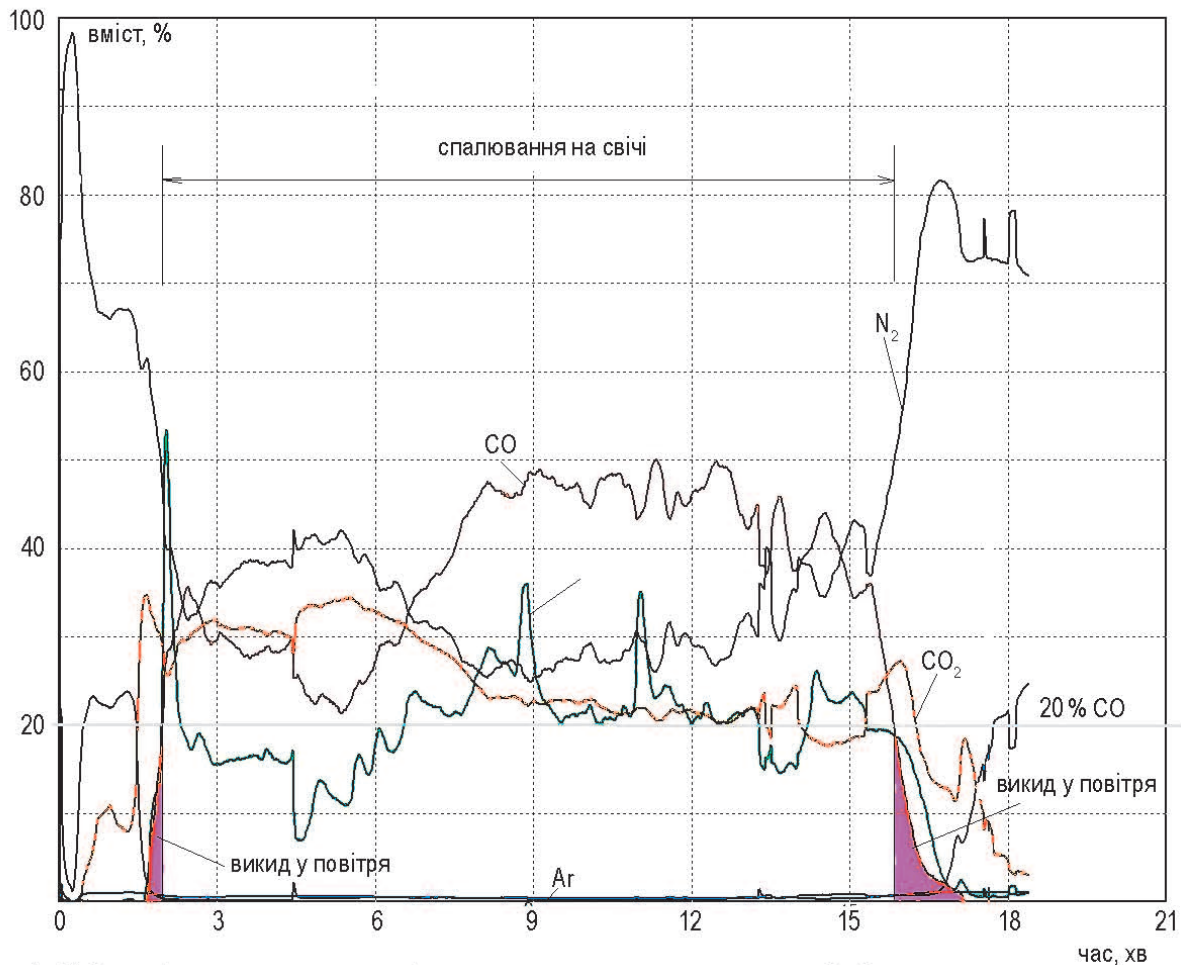


Рисунок 1 – Зміна вмісту оксиду вуглецю, діоксиду вуглецю, водню та кисню у відхідних газах кисневих конвертерів, що працюють з частковим допалюванням, у період продувки

норматив гранично допустимого викиду ( $250 \text{ мг/м}^3$ ), що його встановлено наказом [5]. Цей норматив прийнятний для котлоагрегатів, але розповсюджений зазначеним наказом на викиди від технологічного обладнання доменного, сталеплавильного виробництв, виробництва вапна та ін. Він є науково необґрунтованим і не завжди досяжним, тому законодавством України передбачена можливість розроблення технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин.

### ВИСНОВКИ

1. На базі досліджень, проведених на промислових кисневих конвертерах України при різних способах відведення та охолодження відхідних газів, встановлено, що масова концентрація оксиду вуглецю у цих газах значно перевищує норматив гранично допустимого викиду  $250 \text{ мг/м}^3$ .

2. Доведено, що норматив ГДК оксиду вуглецю, який діє згідно з наказом [5], є науково необґрунтованим і технічно недосяжним щодо викидів від кисневих конвертерів.

3. Результати цієї роботи використані під час розроблення технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від устаткування для виробництва сталі у кисневих конвертерах, включаючи безперервний розлив, продуктивність якого перевищує  $2,5 \text{ т/год}$  [6].

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Steel Statistical Yearbook 2012 – Worldsteel Committee on Economic Studies. – Brussels, 2012. – 124 p.
2. Чалый Л.Г. Исследование влияния способов отвода и охлаждения газов сталеплавильных кислородных конвертеров на состав и физико-химические свойства пыли : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Чалый Леонид Григорьевич. – М. : 1978. – 202 с.
3. Draft reference document on Best Available Techniques of the production of Iron and Steel. Integrated Pollution and Control. – European Commission, 2012. – 623 p.
4. Бережинский А.И. Охлаждение и очистка газов кислородных конвертеров / А. И. Бережинский, А. Ф. Циммерман. – М. : Metallurgiya, 1975. – 192 с.



5. Наказ Мінприроди України від 27.06.2006 р. № 309. Про затвердження нормативів гранично допустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел.
6. Наказ Мінприроди України від 16.08.2004 р. № 317. Про затвердження Переліку типів устаткування, для яких

Рассмотрены способы отвода газов из кислородных конвертеров. Приведены данные инструментальных измерений массовых концентраций оксида углерода в отходящих газах кислородных конвертеров, работающих с полным и частичным дожиганием конвертерных газов. Показано, что массовая концентрация оксида углерода в таких газах значительно превышает норматив предельно допустимого выброса  $250 \text{ мг/м}^3$ . Доказана необходимость разработки технологических нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от оборудования для производства стали в кислородных конвертерах.

розробляються нормативи гранично допустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел.

*Поступила в редакцію 14.07.2014*

One be examined methods of gas disposal from oxygen converters which affect essentially on content, quantity, temperature, dust level and other parameters of waste gases falling into gas cleaning system. One be provided data of instrumentation measurement of mass concentration of carbonic oxide in waste gases of oxygen converters which operate with full or partial afterburning of converter gases. It is shown that mass concentration of carbonic oxide in waste gases of oxygen converters exceeds significantly standard emission limits of  $250 \text{ mg/m}^3$ . One be proven necessary to develop process standards for emission limits at atmosphere from equipment for steel making in oxygen converters.