

**Т. С. Голуб**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9269-2953

**Л. С. Молчанов**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-6139-5956

**Є. С. Какушкін**, к.т.н., пров.інженер

**П. Г. Прокопенко**, головний метролог

*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕБІГУ ДОПАЛЮВАННЯ В ПОРОЖНИНІ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ КИСНЕВОГО КОНВЕРТЕРА ЗА РАХУНОК ОЦІНКИ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДИМОВИХ ГАЗІВ ТА ПОЛУМ'Я**

**Анотація.** Робота присвячена розробці та оцінюванню ефективності доступного методу контролю стану конвертерної ванни за показником фізичними показниками полум'я, що утворюється при допалюванні вихідних газів. В процесі продувки у кисневому конвертері створюються умови для протікання реакції окислення CO до CO<sub>2</sub> в порожнині агрегату. Контроль вказаного фактора може дозволити проводити коректуючі дії для забезпечення на високому рівні технологічних та екологічних показників та бути показником повноти протікання хімічних перетворень в порожнині кисневого конвертера В роботі були досліджені та проаналізовані методи вимірювання фізичних показників стану газового факелу за: теплопередачею від газового факелу; за світлістю газового факелу за різним спектром; за електропровідністю газового факелу. Враховано умови різного стану високотемпературного навколишнього середовища: запиленість; фракції пилу, що виділяється з конвертера, та їхній хімічний склад, повноти згоряння при подачі різної долі окислювача. Виконано моделювання стану середовища у верхній частині кисневого конвертера. Встановлено, що найбільш впливовим негативним фактором при оцінюванні допалювання є пил, який чинить вплив на всі фізичні показники полум'я та при високих температурах процесу сам стає об'єктом випромінювання як теплоти, так і світла. За результатами дослідження зроблено висновок, що найбільш доцільно проводити вимірювання електропровідності полум'я між факелом та продувною фурмою, щоб мати більш повну інформацію про процеси допалювання. При оцінюванні роботи продувного пристрою встановлено, що залежність електропровідності полум'я від вмісту CO може слугувати характеристикою показників допалювання та має типовий квадратичний характер.

**Ключові слова:** кисневий конвертер, верхня продувка, вихідні гази, допалювання, яскравість полум'я допалювання, електропровідність

**Посилання для цитування:** Голуб Т. С., Молчанов Л. С., Какушкін Є. С., Прокопенко П. Г. Дослідження перебігу допалювання в порожнині робочого простору кисневого конвертера за рахунок оцінки фізичних параметрів димових газів та полум'я. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. Вип. 36. 2022. С. 194-207. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-194-207.

При продуванні металеві ванни киснем у конвертері відбувається окислення вуглецю та інших домішок з утворенням на поверхні металу шару шлаку, що складається з оксидів кремнію, кальцію, заліза, марганцю та інших компонентів. При цьому газоподібні продукти окислення вуглецю формують конвертерний газ (вміст оксиду вуглецю 86-90% та діоксиду вуглецю 8-14%), а також невелику кількість кисню, азоту та деяких інших речовин. Оксиди вуглецю чинять значний негативний вплив на навколишнє середовище. Тому скорочення їх викидів за рахунок залучення задля покращення теплового балансу шляхом допалення СО до СО<sub>2</sub> плавки дозволяє скоротити використання рідкого чавуну й, як наслідок, зменшити кількість викидів оксидів вуглецю.

На початку і в кінці продувки створюються сприятливі умови для протікання реакції окислення СО до СО<sub>2</sub> в порожнині агрегату - допалювання газів, що відходять, які пов'язано з незначним впливом спіненого шлаку в зазначені періоди [1-4]. У середині продувки, в період максимальної швидкості окислення вуглецю, умови для допалювання СО несприятливі: кількість СО, що найбільше утворюється навколо фурми, формує «свищевий» вихід газів [2], при цьому не встигає в достатній мірі прореагувати з окислами заліза в шлаку, і як наслідок ступінь допалювання зменшується. Контроль вказаного фактора дозволить проводити коректуючі дії для забезпечення на високому рівні технологічних та екологічних показників. Крім того, відомо, що серед непрямих факторів, які дають уявлення про повноту протікання хімічних перетворень в порожнині кисневого конвертера, у якості найбільш доступних та інформативних можуть слугувати фізико-хімічні параметри димових газів і полум'я, що утворюється за рахунок їх допалення. Виходячи з наведеного вище робота присвячена актуальному напрямку розробки та оцінювання ефективності доступного методу контролю стану конвертерної ванни за змінами електрофізичних характеристики газів що відходять з горловини конвертера, та полум'я, що утворюється при їх допаленні.

Факел (полум'я) – розпечене газоподібне середовище, що утворюється при горінні та складається в значній мірі з частково іонізованих фрагментів, в якій відбуваються фізико-хімічні перетворення складових частинок середовища (в т.ч. пального, окислювача, домішкових частинок, продуктів їх взаємодії) і супроводжується інтенсивним випромінюванням та виділенням теплоти [5-6]. Факел складається з фізичних областей різної структури, розташованих тільки в певній послідовності й існуючих спільно: фронт полум'я, «холодний конус» і зона стабілізації або зона зворотних струмів. Стаціонарне гомогенне полум'я являє собою систему, що має в цілому нейтральний заряд. Однак в самому ламінарному полум'ї

заряджені частинки розподіляються нерівномірно: зона реакції і зовнішній конус характеризуються переважно позитивним зарядом, а внутрішній конус - переважно негативним. Такий поділ різнойменних зарядів викликано різною рухливістю позитивних іонів і негативних частинок - електронів і побічно підтверджує, що джерелом заряджених частинок є хімічна реакція, яка розвивається у фронті полум'я. Позитивні іони, що утворилися внаслідок хімічної реакції через малу їх рухливість створюють переважно позитивний заряд в місці свого виникнення, натомість більш рухливі електрони, отримані в результаті тієї ж реакції, швидко залишають фронт полум'я й утворюють переважно негативний заряд у внутрішньому конусі. Це обумовлює наявність електропровідності полум'я [6-11]. Можна зробити висновок, що вимірювання показників полум'я, які змінюються під дією різних чинників, які супроводжує процес горіння, можуть надавати інформацію про ці чинники. Відомо, що під час протікання процесів кисневого конвертування над горловиною конвертера утворюється газо-полум'яний факел, який має нести інформацію, в першу чергу, про процеси допалювання вихідних газів. Дане дослідження присвячене пошуку та аналізу простого методу якісного оцінювання процесу допалювання димових газів під час кисневого конвертування.

Киснево-конверторний процес є досить багатофакторним та йому притаманні значні температури, які не дають змоги проводити пряме дослідження, у зв'язку із чим було проведено дослідження на фізичній моделі, яка відтворювала на малому об'ємі палаючий факел, що формується при горінні газоподібного палива в окислювальному середовищі. В роботі були досліджені та проаналізовані наступні методи вимірювання фізичних показників стану газового факелу: по теплопередачі від газового факелу; по світимості (яскравості) газового факелу; по електричним характеристикам газового факелу (електропровідності).

Проведено оцінку впливу умов запиленості та повноти згорання вихідних газів, що формуються при горінні полива, на фізичні характеристики полум'я.

**Методика проведення досліджень.** Дослідження мало комплексний характер та базувалось на комплексному вивченні впливу пилу, повноти окислення палива у полум'ї на оптичні, фізичні, теплотехнічні та електричні показники факелу від згорання газоподібного палива. Для проведення досліджень була виготовлена фізична модель, що дозволяє імітувати процес горіння газів, які відходять з кисневого конвертера при різних ступенях запиленості та контрольованою подачею кисню на процес горіння (рис. 1). Лабораторна установка складалася з металевого

захисного кожуха 1, нерухомо встановленого на металевих опорах. Його функцією було захист полум'я від зовнішнього впливу, в середині якого був встановлений газовий пальник 2, що створював палаючий факел газовой пропан-бутанової суміші 3. Газова суміш подавалася з балону 4 при здійсненні контролю витрати та тиску за допомогою поплавкового ротаметру 5 та стрілкового манометру 6 відповідно. Порошок для створення газо-порошкової суміші надходив з бункера 7, який було обладнано шнековою подачею порошку. Шнек обертався завдяки прямому електроприводу 8. Для реєстрації показників яскравості факелу (інфрачервоного, денного та ультра фіолетового спектру випромінювання, а також температури) в одну зі стінок моделі було вмонтовано пластину з фотодіодами 9 (фотодіод ІС 940-для реєстрації інфрачервоного спектру, ТЕМТ6000 - аналоговий датчик освітленості, ML8511 - датчик ультрафіолетового випромінювання) та термістором (опір 20 кОм), показники яких реєструвалися АЦП 10.

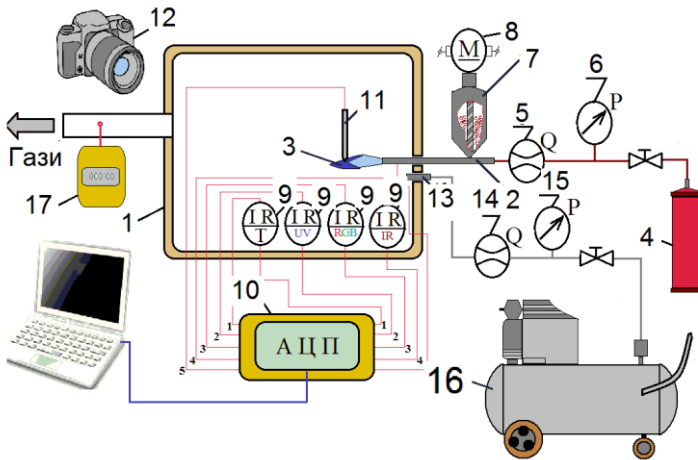


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки: 1 – металевий кожух моделі, оснащений оглядовим віконцем з термостійкого скла; 2 – газовий пальник із соплом; 3 – полум'я факелу; 4 – газовий балон; 5 – ротаметр (РМА 0063Г), для контролю витрати газу; 6 – манометр ДМ 05160 М; 7 – живильник з порошком, шнекового типу; 8 – електропривід; 9 – датчик реєстрації показників яскравості та температури; 10 – АЦП; 11 – датчик заміру електричного опору факелу; 12 – відеокамера; 13 – сопло для подавання стисненого повітря на процес горіння; 14 – ротаметр (РМ016Г) для контролю витрати повітря; 15 – манометр ДМ 05160 М; 16 – компресор; 17 - датчик виміру CO Air quality detector E18609

З протилежного боку моделі було закріплено вольфрамовий електрод – датчик 11 для заміру електричного опору факелу на ділянці «газовий пальник – палаючий факел». Процес горіння факелу записували на відеокамеру 12 через оглядове віконце в корпусі 1. Введення повітря для підтримування процесів горіння здійснювали через спеціальне сопло 13, встановлене у металевому кожуху установки 1, за допомогою компресора 16. При цьому контроль витрати та тиску повітря, що подається на процес горіння, здійснювався за допомогою поплавкового ротаметру 14 та стрілкового манометра 15, відповідно. Паралельно з фіксацією оптичних, теплотехнічних, електричних показників та лінійних розмірів факелу проводили паралельний моніторинг вмісту CO у газах, що відходять за допомогою датчик виміру CO Air quality detector E18609, що має 4 розряди та провидить вимірювання CO у ppm.

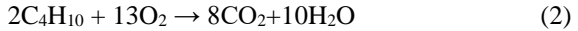
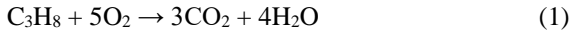
Оскільки в ході кожного досліду електросхема з датчиками неминуче нагрівалася і, таким чином, показники датчиків набували похибки, перед кожним дослідом модель охолоджували до кімнатної температури. У якості порошоків для імітації запиленості факела використовували різні речовини фракції 100-200 мкм: графіт, сажу, порошок заліза, а також оксиди заліза (II) та (III), кальцію, кремнію, магнію. Вимірювання електричних характеристик проводили за двома схемами: 1) між полум'ям та пальником (один електрод приєднували до пальника, який попередньо був ізольований від кронштейну, інший вводили до полум'я); 2) безпосередньо у полум'ї (обидва електроди, що були розташовані на відстані 5 мм один від одного, вводили до полум'я на одному рівні).

Враховуючи, що дослідження носило комплексний характер, то з метою отримання більш точних результатів визначення впливу окремих факторів на показники факелу проводилося окрема не допускаючи комплексного впливу факторів.

При визначенні впливу запиленості факелу дослід починали з відкриття крану газового балону та подачі газової суміші з витратою 0,016 м<sup>3</sup>/год та при тиску 12,5 кПа (більший тиск не забезпечував у розробленій моделі сталого та рівномірного горіння факелу), запалювали пальник для утворення полум'я та включали електропривід пристрою для подавання порошокоподібних матеріалів і здійснювали його рівномірну подачу у факел. При цьому проводили реєстрацію показників яскравості за інфрачервоним, денним та ультрафіолетовим спектрами випромінювання, оцінювали тепловий потік та електричні показники факелу. Повітря на процес горіння надходило з коефіцієнтом витрати на рівні 1,1 – 1,2, що дозволяло тдосягти повного згорання пропан-бутанової суміші. Масу порошку до та після досліду визначали за рахунок зважування на електронних вагах (ТВЕ-6-01).

Наступним етапом досліджень було визначення впливу ступеня недопалення газо-паливної суміші на показники факелу. Його проводили відповідно до наступної послідовності: спочатку відкривали кран газового балону та подавали газову суміш з встановленою витратою (було досліджено три рівні витрати газу 0,013, 0,019, 0,025 м<sup>3</sup>/год, що складало 20, 30 та 40 % від шкали ротаметра. Максимальний рівень обумовлений наявними можливостями газового балону малого об'єму), підпалювали пальник для утворення полум'я та проводили вимірювання електричних характеристик факелу за висотою на відстані від пальника від 20 до 180 мм з кроком 10 мм при різних величинах повітря, що подається на окиснення (0,016 - 0,536 м<sup>3</sup>/год., що складало до 90 % від шкали ротаметру).

Реакція окислення (горіння) пропан – кисень і бутан – кисень [13]:



Молярні маси пропану –  $M_{\text{C}_3\text{H}_8} = 44$  г/моль; бутану –  $M_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 58$  г/моль. Необхідна маса кисню (O<sub>2</sub>) для спалювання 1 кг пропану (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) і бутану (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), а також кількість повітря при врахуванні того, що продування проводили не чистим киснем, наведені в таблиці 1 в масовій та об'ємній величинах.

Таблиця 1 – Витрата окислювача на 1 кг (1 м<sup>3</sup>) горючого газу.

Окислювач	Пропан (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	Бутан (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )
Кисень (O <sub>2</sub> ), кг (м <sup>3</sup> )	3,636 (5)	3,586 (6,5)
Повітря, кг (м <sup>3</sup> )	15,672 (23,779)	15,457 (30,914)

Пропан (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) і бутан (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) використовуються не окремо, а як суміш горючих газів, тому необхідна кількість окислювача для повного згорання пропан-бутанової суміші буде залежати від процентного співвідношення кожного з компонентів. Найбільш поширені суміші пропану й бутану відповідають співвідношенням 70/30, 60/40 та 50/50 відповідно пропану/бутану. Оскільки пропан і бутан не вступають в хімічні реакції, то стехіометричне відношення для реакцій з окислювачем для кожного з газів не буде змінюватися. Значення кількості окислювача в залежності від процентного вмісту пропану і бутану в суміші представлені в таблиці 2 при врахуванні того, що молярна маса суміші становитиме 47,435 г/моль, 48,702 г/моль та 50,039 г/моль при співвідношеннях пропану й бутану 70/30, 60/40 та 50/50 відповідно.

Отримані значення витрати окислювача (як за масою, так і за об'ємом) на одиницю горючого газу слід збільшити на 2-5%, тому що в повітрі присутні інші компоненти, які під дією високих температур горіння самі

вступають в реакцію окислення і тим самим знижують частку окислювача, що припадає на горючий газ. За реальних умов для досягнення повного окислення суміші за стехіометрією потрібно перевищення кількості повітря на 10%. Для повного окислення газової суміші за умов стехіометрії в реальних умовах з вказаною вище витратою необхідно: для витрати 0,013 м<sup>3</sup>/год витрата повітря 0,372-0,400 м<sup>3</sup>/год, для 0,019 м<sup>3</sup>/год – 0,543-0,585 м<sup>3</sup>/год та для витрати 0,025 м<sup>3</sup>/год необхідно 0,715-0,770 м<sup>3</sup>/год повітря. З метою визначення отриманих результатів з впливу параметрів факелу (ступеня допалення СО) на електрофізичні показники факелу було проведено порівняння вмісту у газах, що відходять СО та електричних показників факелу.

Таблиця 2 – Витрата окислювача на 1 кг (1 м<sup>3</sup>) горючого газу для пропан-бутанових сумішей.

Окислювач / Пропан - бутанова суміш	70/30	60/40	50/50
Кисень (О <sub>2</sub> ), кг (м <sup>3</sup> )	3,621 (5,368)	3,616 (5,503)	3,611 (5,647)
Повітря, кг (м <sup>3</sup> )	15,607 (25,529)	15,586 (26,175)	15,565 (26,857)

**Результати досліджень.** Узагальнені результати виміру фізичних показників факелу наведено на рис. 2.

В ході проведення досліджень з визначення впливу запиленості на параметри факелу, візуально встановлено, що пряма подача у палаючий факел твердих частинок, що не горять проявляється у появі жовтого або жовто-помаранчевого кольору полум'я та збільшенні його видимих габаритів через неповне допалювання газу. Такий прояв характерний для частинок оксидів кремнію, кальцію та магнію й оксиду заліза (III). Частинки, які можуть окислюватися при контакті з палаючим полум'ям, крім збільшення видимої частини, спричиняють значне підвищення візуальної яскравості полум'я та характеризуються наявністю палаючих іскор. Це характерно для частинок оксидів заліза (II), графіту, сажі і, особливо, відмічено для дрібних частинок заліза. Було встановлено наступне.

За тепловіддачею від палаючого факелу:

- подача будь-якого твердого матеріалу з температурою значно нижчою за температуру факела негативно відбивається на теплопередачі від факела випромінюванням навіть при можливому візуальному збільшенні яскравості показників;
- майже у два рази знижується тепловий потік при потраплянні часток оксидів кальцію, кремнію, магнію, заліза III валентного;
- потрапляння часток оксидів заліза II валентного та порошку заліза збільшують тепловий потік за рахунок горіння самих часток;

- потрапляння твердих частинок в палаючий факел впливає на зміну його візуальних параметрів: поява жовто-помаранчевого забарвлення, що вказує на зниження температури факела.

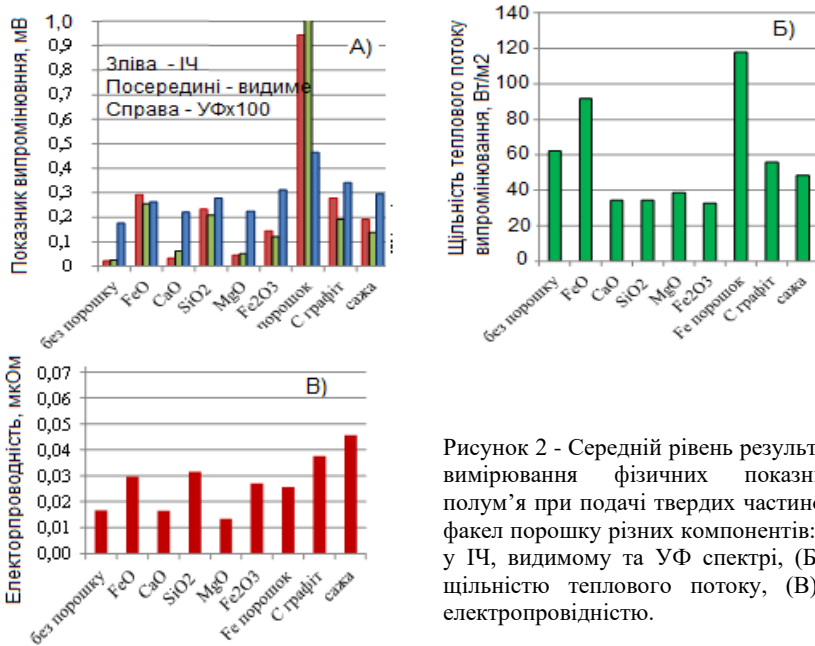


Рисунок 2 - Середній рівень результатів вимірювання фізичних показників полум'я при подачі твердих частинок у факел порошку різних компонентів: (А) у ІЧ, видимому та УФ спектрі, (Б) за щільністю теплового потоку, (В) за електропровідністю.

#### За яскравістю факелу:

- при появі у палаючому факелі твердих оксидів кремнію, кальцію, магнію, заліза, графіту чи сажі його яскравість підвищується;

- на рівень випромінювання ультрафіолетового діапазону наявність твердих часток дослідженого складу та фракції практично не чинить впливу (підвищення рівня майже у два рази встановлене при згорянні часток заліза за рахунок значного підвищення температури факелу);

- щодо рівня випромінювання видимого та інфрачервоного спектру присутність дрібних часток у середовищі факелу через неповне згорання газової суміші з формуванням сажистих часток сприяє підвищенню показників та збільшенню видимої частини факелу (здебільшого жовтогогарячого кольору);

- підвищення яскравості факелу при прямому потрапленні у нього твердих часток, що не горять, відбивається на зниженні теплових показників факелу, а при потрапленні у факел часток, що горять – значному підвищенню рівня теплоти, що відводиться від факела.

За електричними характеристиками факелу: введення порошкових



частинок у факел впливає на електропровідність у незначній мірі, окрім часток сажі та графіту (приблизно у два рази збільшується електропровідність при інтенсивності подачі часток 0,1 г/хв).

Дослідження впливу повноти окислення палива в полум'ї дозволили зробити наступні висновки (на рис. 3 наведено усереднені результати):

- вимірювання електричних характеристик полум'я між пальником та занурюваним у полум'я електродом має більш сталі й значно вищі показники при можливості проводити виміри на відстані 30 – 80 мм, ніж при вимірюванні, коли обидва електроди розміщені у полум'ї;

- додаткова подача окислювача (повітря) у зону горіння сприяє підвищенню електричних характеристик полум'я за рахунок більш активного протікання процесу горіння до певного рівня витрати окислювача (до витрати повітря 0,3-0,4 м<sup>3</sup>/год), подальше зростання частки повітря відбивається у зниженні електричних показників;

- при вимірюванні електричних характеристик необхідно отримати результати інтегрувати через наявність флуктуацій;

- знаючи необхідний рівень кисню, що стехіометрично необхідний для проведення повного окислення, можливо за рівнем електричних характеристик стверджувати про повноту окислення.

За результатами вимірів характеристик пилу за ходом промислової продукції, що відбирався зі шламопроводу після газоочистки з частотою кожні 20 % часу продукції, відстоювався, ретельно просіювався та розділявся на фракції, встановлено, що основною часткою пилу є фракції 25 та 75 мкм (рис. 4).

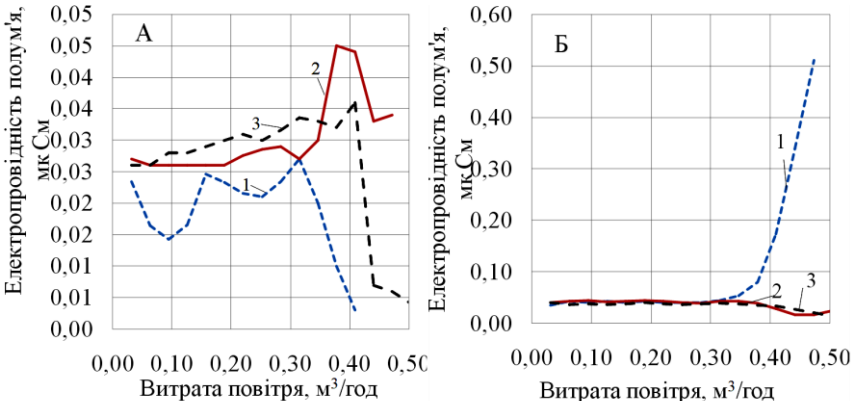


Рисунок 3 – Зміна електричних характеристик полум'я при зміні витрати повітря, що подається на окислення пального (1- 0,013, 2 – 0,019, 3 – 0,025 м<sup>3</sup>/год) при вимірюванні електродами, розміщеними у полум'ї (А) та між полум'ям та пальником (Б).

Оцінка можливості нагрівання частинок пилу різної фракції [14] свідчить про те, що не залежно від ступеня чорноти факелу в діапазоні температур, що розвиваються у верхній частині конвертера (1300-1600 °С), за час руху можуть нагріватися до температури світіння (порядку 1200 °С) частинки фракції 5 – 100 мкм (частка яких найбільша в загальному обсязі пилу), та й навіть 200 - 400 мкм (рис. 5). Отже частинки пилу, що входять до основної частки, можуть значно розігріватися і світитися в реальних умовах. Цей факт свідчить про те, що пил може вносити значну похибку в результати вимірювання таких показників факелу, як тепловіддача (тепловий потік) та яскравість, виконуючи функції джерела випромінювання.

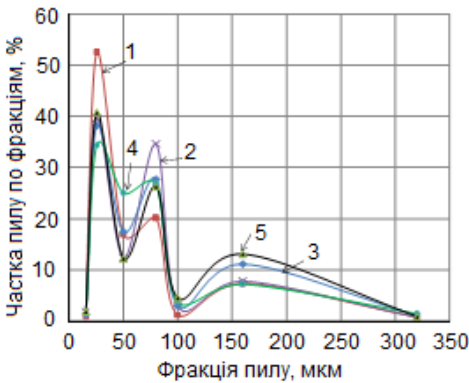


Рисунок 4 - Фактичний розподіл часток пилу, що виділяється з конвертера, за фракціями за ходом промислової продувки.  
1 – 20%; 2- 40%; 3 -60%; 4- 80%; 5 -100% часу продувки.

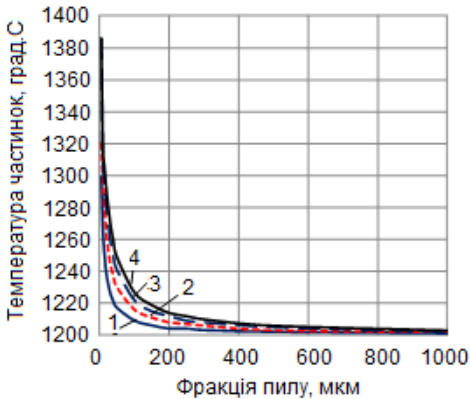


Рисунок 5 - Розрахункова залежність можливої температури розігріву частинок від їх розміру при ступені чорноти факелу.  
1 - 1; 2- 0,75; 3 - 0,5 і 4 - 0,25 одиниць чорноти.

Відповідно до отриманих результатів можна зробити висновок про те, що найбільш точним та стабільним методом отримання характеристики стану та характеру взаємодії газового факелу з ванною (для оцінки

теплових показників щодо допалювання відхідних газів та ефективності шлакоутворення) при роботі в жорстких умовах сталеплавильного агрегату може бути обрано метод вимірювання електричних характеристик газового факела - електропровідності.

Дослідження, що було проведено шляхом прямого виміру вмісту CO у відхідних газах процесу горіння твердого палива із одночасним виміром електропровідності високотемпературної зони допалювання вихідних газів показало наявність квадратичної залежності між цими величинами (рис. 6) із загальним виглядом залежності  $y = -ax^2 + bx + c$ , де  $x$  – рівень CO у вихідних газах. При цьому отриманий коефіцієнт кореляції при лінізації експериментальних даних, дозволяє стверджувати про можливість використання метода прямого виміру електричних характеристик факела допалення димових газів для моніторингу фізико-хімічних перетворень в порожнині конвертера.

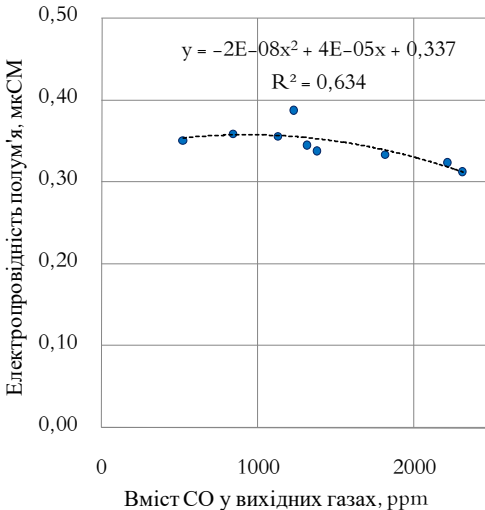


Рисунок 6 – Залежність електропровідності полум'я продувного струменя від вмісту CO у вихідних газах.

## Висновки

Таким чином, виходячи з наведеного вище можна зробити загальні висновки щодо проведених досліджень можливості якісного оцінювання допалювання відхідних газів, які формуються в процесі горіння, у тому числі при кисневому конвертуванні:

1) найбільш впливовим негативним фактором при оцінюванні допалювання є пил, що виділяється з конвертера, який при високих температурах процесу сам стає об'єктом випромінювання як теплоти, так і світла й чинить вплив на всі фізичні показники полум'я;

2) найбільш доцільно проводити вимірювання електропровідності полум'я між факелом та продувною фурмою, щоб досягнути більший фронт й мати більш повну інформацію про процеси допалювання;

3) залежність електропровідності полум'я, що утворюється при допалюванні вихідних газів, від вмісту у них СО має типовий квадратичний характер та може слугувати характеристикою при оцінюванні роботи продувного пристрою щодо показників допалювання, які вони можуть створювати.

### Перелік посилань

1. Меркер Э. Э., Карпенко Г. А. Повышение степени дожигания монооксида углерода в конвертере. *Современные наукоемкие технологии*. 2005. № 10, С. 83-84
2. Меркер Э. Э., Карпенко Г. А. Эффективность кислородно-конвертерных процессов производства стали с дожиганием оксида углерода в отходящих газах. *Изв. ВУЗов «Черная металлургия»*. 2000. № 4, С. 12-14.
3. Протопопов Е. В., Чернятевич А. Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами. *Изв. ВУЗов «Черная металлургия»*. 1996. № 10, С. 5-9.
4. Комбинированная продувка в конвертерах с использованием двухъярусной фурмы / А. Г. Чернятевич, Л. А. Гензер, Р. С. Айзатулов и др. // *Изв. ВУЗов «Черная металлургия»*. 1988. № 7, С. 48-51.
5. Крыжановский Ю. В., Крыжановский В. Н. Структура и расчет газового факела. К.: Освіта України, 2012. 96 с.
6. Шнайдер А., Азизов Д. Г., Кожевников А. П., Жернов Л. А. Справочник по автономному и системному газоснабжению. С.-П. : ООО «Газтехника», 2015. 362 с.
7. Kgakgamatso Mphale, Mal Heron. Measurement of Electrical Conductivity for a Biomass Fire. *Int J Mol Sci*. 2008. Vol. 9 (8), P. 1416–1423.
8. Effects of Direct-Current (DC) Electric Fields on Flame Propagation and Combustion Characteristics of Premixed CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Flames / Meng Xiangwen, Wu Xiaomin, Kang Chan, Tang Andong, Gao Zhongquan // *Energy & Fuel* 2012. Vol. 26 (11), P. 6612- 6620
9. Vishnyakov V. I. Ionization Balance in Low-Temperature Plasmas with Nanosized Dust. *Ukrainian Journal of Physics*. 2021, Vol. 66 (4), P. 303-309.
10. Шерстов Б. И., Гончаренко Г. Н. Исследование электропроводности факела кислородного конвертера. *Металлургия и коксохимия*. 1973. Вып. 36, С. 89-91.
11. Контроль металлургических процессов на основе ионизационных явлений, возникающих при горении / Б. С. Фиалков, Б. И. Беседин, Э. И. Гамалей и др. // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1986. № 4, С. 130-132.
12. Дойников А. С. Цветовая температура. Физическая энциклопедия : [в 5 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Большая российская энциклопедия, 1999. т. 5 : Стробоскопические приборы. Яркость. С. 422. - 692 с.
13. Гринка Н. Л. Общая химия. М. : ИД Юрайт, 2013. 898 с.
14. Румянцев В. Д. Теория тепло - и массообмена. Днепропетровск: Пороги. 2006, 692 с.

## References

1. Merker E. E., Karpenko G. A. Povishenie stepeni dozhiganiia monooksida ugleroda v konvertere [Increasing the degree of postcombustion of carbon monoxide in the converter]. *Modern high technologies*. 2005. No 10. P. 83-84 [in Russian].
2. Merker E. E., Karpenko G. A. Efektivnost kislorodno-konverternih processov proizvodstva stali s doziganem oksida ugleroda v othodiaschih gazah [Efficiency of oxygen-converter steel production processes with post-combustion of carbon monoxide in exhaust gases]. *Izvestiya Universities "Ferrous Metallurgy"*. 2000. No 4. P. 12-14. [in Russian].
3. Protopopov, Ye. V., Cherniatevich, A. G. Investigation of the Interaction of Oxygen Jets with Converter Outgoing Gases. *Izvestiya Universities "Ferrous Metallurgy"*. 1996. No 10. P. 5-9. [in Russian].
4. Cherniatevych, A. G., Genzer, L. A., Ayzatulov, R. S. Kombinirovannaia prodavka v konverterah s ispolzovaniem dvuharusnoy furny [Combined blowdown in converters using a two level lance]. *Izvestiya Universities "Ferrous Metallurgy"*. 1988. No 7. P. 48-51. [in Russian].
5. Kryzhanovskiy, Yu. V., Kryzhanovskiy, V. N. Struktura I raschet gazovogo fakela [Structure and calculation of a gas torch]. Kyiv: Osvita Ukrainy, 2012. 96 p. [in Russian].
6. Shnaider, A., Azizov, D. G., Kozhevnikov, A. P., Zhernov, L. A. Spravochnik po avtonomnomu i sistemnomu gazosnabzheniu [Handbook of Autonomous and Systemic Gas Supply]. S-Pb.: Gaztehnika, 2015. 362 p. [in Russian].
7. Kgakgamatso Mphale, Mal Heron. Measurement of Electrical Conductivity for a Biomass Fire. *Int J Mol Sci*. 2008. Vol. 9(8). P. 1416–1423.
8. Meng Xiangwen, Wu Xiaomin, Kang Chan, Tang Andong, Gao Zhongquan Effects of Direct-Current (DC) Electric Fields on Flame Propagation and Combustion Characteristics of Premixed CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Flames. *Energy & Fuel*. 2012. Vol. 26 (11), P. 6612- 6620.
9. Vishnyakov V. I. Ionization Balance in Low-Temperature Plasmas with Nanosized Dust. *Ukrainian Journal of Physics*. 2021. Vol. 66 (4). P. 303-309.
10. Shestov B. I., Goncharenko G. N. Issledovanie elektroprovodnosti fakela kislorodnogo konvertera [Investigation of the electrical conductivity of the oxygen converter flame]. *Metallurgy and coke chemistry*. 1973. Collection 36. P. 89-91. [in Russian].
11. Fialkov B. S., Besedin B.I., Gamaley E. I. Kontrol metalurgicheskikh protsessov na osnove ionizatsionnyh yavleniy, voznikauschih pri gorenii [Control of metallurgical processes based on ionization phenomena that occur during combustion]. *Izvestiya Universities "Ferrous Metallurgy"*. 1986. No 4. P. 130-132. [in Russian].
12. Doynikov A. S. Tsvetovaia temperatura. [Colorful temperature]. Physical Encyclopedia. Ch. ed. A. M. Prokhorov in book: Great Russian encyclopedia, 1999, vol. 5: Stroboscopic devices. Brightness. 422. [in Russian].
13. Glinka N.L. Chemistry. Moskva: Yurayt, 2013. 898 p. [in Russian].
14. Rumiantsev V. D. Teoriia teplo- I masoperenosa [Theory of heat and mass transfer]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2006. 692 p. [in Russian].

**T. S. Golub**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9269-2953  
**L. S. Molchanov**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6139-5956  
**E. S. Kakushkin**, Ph. D. (Tech.), Leading Engineer  
**P. H. Prokopenko**, Chief Metrologist

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

**ASSESSMENT OF THE POSTCOMBUSTION PROCESS IN THE CAVITY  
 OF THE WORKING SPACE OF THE OXYGEN CONVERTER BASED  
 ON ASSESSMENT OF THE PHYSICAL PARAMETERS OF FLUE  
 GASES AND FLAME**

**Summary.** The work is devoted to the development and evaluation of the effectiveness of an available method of monitoring the state of the converter bath based on the physical parameters of the flame formed during the afterburning of the source gases. In the process of purging in the oxygen converter, conditions are created for the oxidation reaction of CO to CO<sub>2</sub> in the cavity of the unit. Control of the specified factor can allow corrective actions to be taken to ensure a high level of technological and environmental indicators and be an indicator of the completeness of the flow of chemical transformations in the cavity of the oxygen converter. according to the luminosity of the gas torch in different spectrum; by the electrical conductivity of the gas torch. The conditions of different conditions of the high-temperature environment are taken into account: dustiness; fractions of dust emitted from the converter and their chemical composition, completeness of combustion when different fractions of the oxidizer are supplied. Simulation of the state of the environment in the upper part of the oxygen converter was performed. It was established that the most influential negative factor in the assessment of afterburning is dust, which affects all physical parameters of the flame and at high temperatures of the process itself becomes an object of radiation of both heat and light. According to the results of the research, it was concluded that it is most appropriate to measure the electrical conductivity of the flame between the torch and the blowing nozzle in order to have more complete information about the afterburning processes. When evaluating the operation of the blowing device, it was established that the dependence of the electrical conductivity of the flame on the CO content can serve as a characteristic of afterburning indicators and has a typical quadratic character.

**Key words:** oxygen converter, top purge, outlet gases, afterburning, afterburning flame brightness, electrical conductivity.

**For citation:** Golub T. S., Molchanov L. S., Kakushkin E. S., Prokopenko P.H. Doslidzhennia perebihu dopaliuvannia v porozhnyni robochoho prostoru kysnevoho konvertera za rakhunok otsinky fizychnykh parametriv dymovykh haziv ta polumia. [Assessment of the postcombustion process in the cavity of the working space of the oxygen converter based on assessment of the physical parameters of flue gases and flame]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 194-207. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-194-207.

*Стаття надійшла до редакції збірника 14.10.2022 р.  
 Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2022. – Випуск 36  
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2022. – Collection 36*