ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 29, 2021, № 4 (327), xx-xx

https://doi.org/10.15407/scin15.04.005

УДК 669.184

**Л.С. Молчанов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, зав. відділу, e-mail: metall729321@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6139-5956

**Т.С. Голуб**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: isinasu.golubts@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9269-2953

**С.В. Синегін<sup>2</sup>,** канд. техн. наук, доц., доцент, e-mail: sinegin.ev@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9983-3971

**C.I. Семикін<sup>1</sup>,** канд. техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр., e-mail: isisemykin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7365-2259

<sup>1</sup>Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна) <sup>2</sup>Національна металургійна академія України (Дніпро, Україна)

## Фізичне моделювання впливу фракційного складу зважених часток на теплопередачу від палаючого факела в сталеплавильних агрегатах

В умовах верхньої киснево-конвертерної продувки реалізується можливість допалювання відпрацьованих газів, що відходять з агрегату, киснем дуття. В результаті над горловиною конвертера утворюється факел. Теплове випромінювання від зазначеного факела є додатковим джерелом теплоти для конвертерної ванни, а параметри факела можуть характеризувати процеси, що протікають в обсязі конвертера. Проте продувка залізовуглецевого розплаву киснем супроводжується інтенсивним димо- та пилоутворенням, що повинно чинити значний вплив на оптично-теплові показники факела допалювання димових газів. В роботі представлено результати дослідження впливу твердих часток достатньо великої фракції (більше 200 мкм) на тепловіддачу палаючого факела випромінюванням, як основного способу теплопередачі від полум'я. Моделювання проведено з використанням фізичної моделі, що дозволяла імітувати одиничний обсяг палаючого факела допалювання димових газів в конверторі із можливістю виміру кількості теплоти, що передається від нього навколишньому середовищу. В результаті досліджень було встановлено, що потрапляння твердих часток в палаючий факел призводить до зміни його якісних оптичних параметрів: поява жовто-помаранчевого забарвлення, яке опосередковано вказує на зниження температури факела. Розрахунковими методами встановлено, що незалежно від ступеня чорноти факела тільки частинки фракцією менше 10 мкм при попаданні в нього можуть нагріватися до температур, що наближаються до температури можливого початку світіння. Тому тверді частки фракції, що досліджувалися, не можуть брати участь у загальному випромінюванні факела. Також відзначено, що вплив розміру фракції твердих часток більше 200 мкм на питому надлишкову щільність теплового потоку носить ступеневий характер зі зменшенням величини надлишкової щільності теплового потоку від факела при збільшенні розміру і кількості суспендованих твердих часток в ньому.

**Ключові слова:** фізичне моделювання, газовий факел, допалювання димових газів, теплопередача випромінюванням, дрібнодисперсні частки, запилення.

ступ. Продувка залізовуглецевого розплаву киснем супроводжується інтенсивним димо- та пилоутворенням. Питомий вихід димових газів при цьому складає 60-65 м<sup>3</sup>/т, а середній вміст в них пилу визначається в межах від 0,01–0,3 кг/м<sup>3</sup> газу, а в період подачі сипких матеріалів та особливо на початку процесу продувки, через відсутність шлаку, концентрація пилу може досягати 3-4 кг/м<sup>3</sup> димових газів [1-5]. В умовах киснево-конвертерної продувки з використанням верхньої фурми реалізується можливість допалювання газів, що відходять з агрегату, киснем дуття з утворенням факела над горловиною конвертера. Теплове випромінювання від зазначеного факела є додатковим джерелом теплоти для конвертерної ванни, а параметри факела можуть характеризувати процеси, що протікають в обсязі конвертера [6].

За даними роботи [7] до складу пилу, що виноситься з конвертера, входять частки розміром 0,03-250 мкм і більше. Часточки великої фракції здебільшого формуються від сплесків металу, шлаку та при подачі сипких матеріалів у агрегат. Дрібної фракції – у своїй більшості є результатом випаровування продуктів ванни у високотемпературній реакційній зоні. У зв'язку зі значною гетерогенністю системи, що оцінювалася, дослідження теплообміну в газовій фазі кисневого конвертера є досить складною задачею. Теплообмін в зазначених умовах визначається як випромінюванням діоксиду та монооксиду вуглецю, так і випромінюванням твердої дисперсної фази – пилу. На відміну від теплових радіаційних характеристик газів, випромінювальні характеристики твердої дисперсної фази конвертерного газу поки що залишаються практично не дослідженими. Радіаційні властивості теплового випромінювання

ВИРОБНИЦТВО ЧАВУНУ ТА СТАЛІ



Рш. 1. Схематичне зображення установки моделювання впливу присутності зважених твердих часток різної фракції на теплопередачу від факела та характерні фото дослідів: «А» при подачі частинок пилу у потоці повітря та «Б» – при безпосередній подачі часток до газового пальника: 1 – газовий балон; 2 – пальник; 3 – манометр; 4 – ротаметр; 5 – бункер з порошком; 6 – сопло для подачі порошку; 7 – компресор; 8 – бункер неперервної подачі порошку без повітря носія; 9 – кварцова труба; 10 – мідна пластина; 11 – мультиметри; 12 – фотокамера

дисперсної системи визначаються тепло-оптичними властивостями окремих часток, їх концентрацією в об'ємі потоку та розподілом за розмірами. За даними робіт [8-9] відповідно до результатів математичного моделювання й теоретичних розрахунків залежність поглинаючої здатності диспергованих часток від їх розміру має експоненціальний характер зі значним підвищенням величин в області малих розмірів часток (менше 20 мкм) й відповідним малозначним впливом більш великих часток (більше 200 мкм). Враховуючи, що відповідно до дрібнодисперсного пилу відомо, що він при достатньо високих концентраціях у газі створює непроникну для потоку теплового випромінювання перешкоду, а вплив більш крупної фракції пилових часток потребує більш детального дослідження. В даній роботі представлено результати досліджень з визначення впливу твердих частинок достатньо великої фракції (більше 200 мкм), на тепловіддачу палаючого факела випромінюванням, як основного способу теплопередачі від полум'я.

*Методика досліджень.* Дослідження були проведені з залученням фізичної моделі, яка імітувала одиничний обсяг палаючого факела при наявності запиленості частинками різної фракції. У роботі було досліджено два варіанти подачі твердих частинок у факел: у потоці повітря та прямим струменем у газовий пальник. Схему моделі наведено на рис. 1. Модель складалася з балона з пропан-бутановою сумішшю (з теоретичною калорійністю горіння 2,6 МДж/м<sup>3</sup> [10]), оснащеного газовим пальником (у роботі використано пальник Бунзена з вихідним діаметром сопла 11 мм), який формував палаючий факел. Порошокоподібний матеріал безперервно подавали у потоці повітря у першому випадку, та у потоці пропан-бутанової суміші у другому. У вищезазначених варіантах порошок подавали у полум'я пальника. Для виключення впливу конвективного теплообміну пальник був розміщений у кварцовій трубі, що є оптично прозорою для інфрачервоного випромінювання [11]. Реєстрація теплового потоку проводилася за допомогою оцінки зміни температури мідної пластини (57 x 57) × 10-3 м і товщиною 1 × 10-3 м, розміщеної під кварцовою трубою на однаковій для всіх дослідів відстані. При цьому зміна температури пластини, труби

і навколишнього середовища реєструвалася за допомогою електронних пристроїв ТМ-920С. Для проведення досліджень використовувався порошок діоксиду кремнію різної фракції (500, 400, 300 і 200 мкм), що відповідало умовам введення пилоподібної негорючої речовини (що не окислюється) досить крупної фракції у димові гази сталеплавильного агрегату.

**Результати досліджень.** В ході виконання досліджень встановлено, що введення в палаючий факел твердих часток фракцією 500–300 мкм призводило до збільшення довжини видимої частини факела у середньому з 75×10<sup>-3</sup> м для умов без вдування порошків до 100×10<sup>-3</sup> м, а при вдуванні порошку фракцією 200 мкм – до 115×10<sup>-3</sup> м. При цьому факел набував солом'яно-помаранчевого відтінку. Проте, слід відзначити, що варіант досліджень з подачею порошку у струмені повітря відзначався меншою довжиною видимої частини факела, ніж варіант прямої подачі порошку, що обумовлено надходженням більшої частки холодного газу, яка потребувала більших витрат теплоти.

Відомо, що колір полум'я визначається випромінюванням електронних переходів різних як заряджених, так і незаряджених частинок, що утворюються в результаті хімічної реакції між молекулами пального і киснем повітря, а також в результаті термічної дисоціації [9, 12]. Зокрема, при горінні палива, що містить вуглець, яким є пропан-бутанова суміш (і основна частина вихідних газів з конвертера, що моделюється) в повітрі, синя ділянка кольору полум'я обумовлена випромінюванням частинок CN ±n, червоно-помаранчева – випромінюванням частинок С2 ±п і мікрочасток сажі. Випромінювання інших компонентів, що утворюються в процесі горіння (CH, ±n, H<sub>2</sub>O ±n, HO ±n, CO<sub>2</sub> ±n, CO ±n) і основних газів (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) лежить у невидимій для людського ока ультрафіолетовій та інфрачервоній ділянках спектра.

Паливна суміш в пальнику Бунзена [13] при стехіометричному горінні (подачі необхідної за стехіометрією кількості кисню для повного окислення пального) горить слабко синім, здебільшого невидимим полум'ям. У разі горіння без попереднього змішування з киснем (подача кисню перекрита) паливна суміш горить жовто-помаранчевим розсіяним полум'ям з найбільшою довжиною видимої частини. У разі, коли подача повітря частково перекрита, формується помаранчево-червоне полум'я з довжиною видимої частини більшою, ніж в разі стехіометричного горіння, проте меншою за випадок повного перекриття подачі кисню. Таким чином, зареєстрований прояв впливу подачі твердих часток у полум'я може бути свідченням неповного згоряння суміші газів, що надходять з балону, за рахунок впливу матеріалів, що подаються, з формуванням часток  $C_2^{\pm n}$  або сажі. Крім того, зазначені особливості могли бути пов'язані з нагріванням від факела часток діоксиду кремнію різної фракції і відповідним їх світінням вздовж потоку. Для оцінки можливості нагрівання частинок фракції, що використовувалася у дослідах, до температури можливого початку світіння (близько 527 °С) [9] був проведений розрахунок нагрівання частинок за час перебування їх в зоні впливу палаючого факела. Спочатку, було визначено орієнтовний час прольоту частинки в трубі. Враховуючи, що на виході з сопла частинки порошку мають ту ж швидкість, що і газ, та рухаючись в супутньому потоці газу зберігають її на всій довжині труби, можна розрахувати середньовитратну швидкість газу на виході з сопла [14]:

$$\overline{w} = \frac{4q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 100}{60 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \cdot 0,008^2} = 33$$
, m/c, (1)

де *q* = 100 л/хв – об'ємна витрата газу; *d* = 0,008 м – діаметр сопла.

З огляду на те, що довжина факела, на якій його випромінювання могло досягти мідної пластини, становила близько 0,5 м, час випромінювання складе:

$$\tau = 0,5/\overline{w} = 0,5/33 = 0,015$$
, c afo 15 mc. (2)

Оскільки температура факела пальника в умовах експерименту складала близько 1020 °С з незначною зміною по довжині факела, а відносна швидкість потоку газу є незначно малою величиною, то впливом конвекції можна знехтувати і прийняти, що нагрів частинок порошку відбувається переважно випромінюванням. У цьому випадку, розрахунок кінцевої температури частинок можна проводити для умов тіл з ідеальною теплопровідністю, для яких  $\lambda = \infty$  при постійній температурі джерела випромінювання теплоти ( $T_{exp}$  = const) з формули [15]:

$$T = \frac{R_{\rho}c \cdot 10^{8}}{4K_{1}\varepsilon_{e\varphi-r}C_{o}T_{e\varphi}^{3}} \left[ 2 \arctan \frac{\theta_{\kappa} - \theta_{n}}{1 + \theta_{\kappa}\theta_{n}} + \ln \frac{\left(1 + \theta_{\kappa}\right)\left(1 - \theta_{n}\right)}{\left(1 + \theta_{n}\right)\left(1 - \theta_{\kappa}\right)} \right], c, (3)$$

де R – радіус частинки, м;  $\rho$  – щільність матеріалу частинки (для SiO<sub>2</sub> – 2650 кг/м<sup>3</sup>); c – середня питома теплоємність частинки (для SiO<sub>2</sub> в інтервалі температур 20–1000 °С складає 800 Дж/(кг·°С);  $K_1$  – коефіцієнт масового навантаження, який залежить від форми тіла (для кулі дорівнює 3);  $\varepsilon_{\rm ep-\tau} = 1/(1/\varepsilon_{\rm ep} + 1/\varepsilon_{\rm r} - 1)$  – загальний ступінь чорноти системи теплообміну «джерело теплоти з  $T_{\rm ep}$  – тіло, що нагрівається»;  $C_0$  = 5,67 Вт/(м<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;  $\theta_{\rm n} = T_{\rm n}/T_{\rm ep}$  та  $\theta_{\rm k} = T_{\rm k}/T_{\rm ep}$  – відносні температури на початку та в кінці нагрівання.

Враховуючи, що ступінь чорноти факела пропанбутанової суміші залежить від повноти згоряння компонентів суміші й, відповідно, сформованих продуктів реакції (насамперед сажі з тих часток), і може змінюватися по ходу протікання процесу горіння, в розрахунку він варіювався в межах від 0,25 до 1. Фракція порошку в розрахунку варіювалася від 10 до 500 мкм. Результати розрахунку наведено на рис. 2.

Аналіз отриманих залежностей вказує на те, що не залежно від ступеня чорноти факела в діапазоні температур, що досліджувалися, яка наближується до температури можливого початку радіації (світіння), за час руху вздовж труби з кварцового скла, можуть нагріватися тільки частинки фракцією менше 10 мкм.



Рш. 2. Залежність температури частинок від їх розміру при ступені чорноти факела: 1 – 1; 2 – 0,75; 3 – 0,5 і 4 – 0,25 одиниць

Отже, в дослідах, що проводилися, частки порошку діоксиду кремнію могли тільки поглинати теплоту, нагріваючись у незначному ступені.

Ефективність теплопередачі випромінюванням, як основним шляхом передачі теплоти від факела, при вдуванні в нього порошків крупної фракції (більше 200 мкм) було розраховано, виходячи з зареєстрованих даних, по величині середнього теплового потоку, що надходив до мідної пластини за формулою [15]:

$$q = \frac{c_{Cu}m_{Cu}\left(t_{KiH}^{Cu} - t_{\Pi O 4}^{Cu}\right)}{f_{Cu}\tau} \pm 3,26 \cdot \left|\bar{t}_{Cu} - \bar{t}_{OTO4}\right|^{5/4}, \text{ BT/M}^{2}, (4)$$

де  $C_{\rm Cu}$  – питома теплоємність мідної пластини, Дж/(кг·°С);  $m_{\rm Cu}$  – маса мідної пластини, кг;  $t_{\rm nov}^{\rm Cu}$  й  $t_{\rm кін}^{\rm Cu}$  – відповідно початкова й кінцева температура мідної пластини, °С;  $f_{\rm Cu}$  – площа поверхні пластини, м²;  $\tau$  – час одного досліду, с;  $\bar{t}_{\rm cu}$  та  $\bar{t}_{\rm оточ}$  – відповідно, середня температура мідної пластини та навколишнього середовища протягом досліду.

Розраховані результати були приведені до питомих величин задля врахування впливу маси порошку, що подавався. Результати розрахунків наведено на рис. З для двох варіантів досліджень. Перш за все слід відзначити значний вплив кількості повітря, що витрачається для інжекції порошку, на величину щільності теплового потоку. Результати досліджень у варіанті з подачею порошку у потоці повітря мали значення майже на один – півтора порядки нижче, ніж у варіанті безпосередньої подачі порошку до полум'я у потоці пропан-бутанової суміші: для частинок 500–400 мкм у середньому у 45 разів, а для частинок 300–200 мкм – у 15 разів. Зазначений вплив насамперед зумовлений значним поглинанням теплоти палаючого факела прохолодним відносно полум'я потоком повітря.

Аналіз отриманих результатів вказує на те, що вплив розміру крупної фракції твердих часток (більше



Рш. 3. Вплив твердих частинок великої фракції на величину питомої надлишкової щільності теплового потоку випромінюванням: 1 – при подачі частинок пилу у потоці повітря та 2 – при безпосередній подачі часток до газового пальника

200 мкм) на питому надлишкову щільність теплового потоку носить квадратичний характер зі значним зменшенням питомої надлишкової щільності потоку при збільшенні розміру часток. Вочевидь, що за відсутності зважених частинок величина надлишкової щільності теплового потоку повинна бути максимальною. Менша фракція порошку має більшу сумарну площу поверхні частинок, що вступає у контакт з полум'ям, а значить зростає величина теплопередачі від прямого контакту часток. В даному випадку зменшення середнього діаметра частинок з 500 до 200 мкм призводить до збільшення сумарної питомої площі поверхні частинок в 2,5 рази відповідно й відповідно викликає збільшення надлишкової щільності теплового потоку у 6,6 разів у випадку введення їх у потоці супутнього повітря та у 2,1 рази у варіанті безпосередньої подачі порошку у полум'я в потоці пропан-бутанової суміші.

Величина теплопередачі від прямого контакту твердих часток була оцінена шляхом проведення додаткових досліджень без використання обмежувальної труби, виконаної з кварцового скла. Результати досліджень наведено на рис. 4 при зіставленні отриманих величин з величиною надлишкового теплового потоку випромінюванням.

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що аналогічно з показником надлишкової щільності теплового потоку випромінюванням тепловий потік при прямому контакті збільшується при зменшенні розміру твердих часток, що зумовлено збільшенням їх сумарної площі поверхні, що може нагріватися і відповідно віддавати тепло при контакті з поверхнею теплообміну. При цьому величина питомого надлишкового теплового потоку від прямого контакту у 1,7 рази більша від величини вказаного показника при теплообміні лише випромінюванням.



Рш. 4. Зіставлення величин питомої надлишкової щільності теплового потоку при прямому контакті частинок з поверхнею, що нагрівається (qПК) та при випромінюванні (qB)

Крім впливу розміру твердих часток та способу їх подачі в полум'я на ефективність передачі теплоти від нього було досліджено вплив кількості твердих частинок, що поступають, шляхом регулювання інтенсивності подачі часток фракції 300 мкм від 15 до 35 г/хв. Результати досліджень наведено на рис. 5 як для показника теплопередачі випромінюванням, так і для випадку прямого контакту нагрітих часток з поверхнею теплообміну. Встановлено, що збільшення кількості часток, що подаються у полум'я, значно знижує показник передачі теплоти від факела випромінюванням, що пов'язано як зі зниженням температури полум'я через велику кількість часток, що мають початкову температуру значно нижчу, ніж температура факела, так і зі значним зниженням притоку необхідного для горіння кисню через значне запилення середовища коло факела дрібними частками. Проте підвищення кількості часток, що подаються у полум'я, сприяє підвищенню теплопередачі від прямого контакту, що логічно зумовлено збільшенням питомої маси нагрітих часток, які віддають теплоту поверхні теплообміну.

Для оцінки впливу запиленості та розміру фракції твердих часток на теплопередачу був проведений регресійний аналіз експериментальних даних, за результатами якого отримано рівняння (5), узагальнююче встановлений вплив запиленості факела, відповідно до якого збільшення кількості та діаметра твердих суспендованих часток, що подаються до факела, відображається в значному зниженні щільності теплового потоку:

$$\Delta q_{\text{випромін}} = \frac{39,898}{d^2} - \frac{412112}{m^{0,63}} - 2,024 \text{ , BT/M}^2, R^2 = 8,13,(5)$$

де *d* – середній розмір фракції частинок, мкм; *m* – запиленість факела, г/л.



Рш. 5. Залежність надлишкової щільності теплового потоку від полум'я випромінюванням (1) та при прямому контакті (2) від витрати порошку, що подається в палаючий факел пропан-бутанової суміші

## Висновки

Виконане фізичне моделювання впливу фракції твердих суспендованих частинок на тепловіддачу палаючого факела показало:

 потрапляння твердих часток в палаючий факел відбивається в зміні його візуальних параметрів: появі жовто-помаранчевого забарвлення, що вказує на зниження температури факела, та зміні довжини, що вказує на зміну частки необхідного для горіння кисню, що потрапляє до факела;

 відповідно до розрахунку, незалежно від ступеня чорноти факела тільки частинки фракцією менше 10 мкм при попаданні в нього можуть нагріватися до температур, що наближаються до температури можливого початку світіння, тому частинки дослідженої фракції можуть безпосередньо брати участь тільки у теплопередачі прямим контактом;

 відзначений значний вплив кількості повітря, що транспортує частки, на величину щільності теплового потоку – величина надлишкової щільності теплового потоку майже на один – півтора порядки нижча, ніж у варіанті безпосередньої подачі порошку до полум'я;

 вплив розміру фракції твердих частинок на питому надлишкову щільність теплового потоку носить квадратичний характер зі зменшенням величини надлишкової щільності теплового потоку від факела при збільшенні розміру і кількості суспендованих твердих частинок в ньому;

 величина питомого надлишкового теплового потоку від прямого контакту твердих часток у 1,7 рази більша від величини цього показника від випромінювання полум'я при подачі таких частинок у нього;

 збільшення кількості часток, що подаються у полум'я, значно знижує показник передачі теплоти від факела випромінюванням, проте підвищує теплопередачу від прямого контакту з частинками.



- 1. Бигеев А.М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. Челябинск: Металлургия, 1988. 479 с.
- 2. Баптизманский В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса. Москва: Металлургия, 1975. 376 с.
- 3. Симонян Л.М., Говорова Н.М. Особенности пылеобразования при кислородной продувке расплава и возможные пути использования уловленной пыли. *Металлург.* 2011. № 6. С. 78–85.
- 4. Кожухов А.А., Меркер Э.Э., Шевченко А.А. Моделирование газоструйной пылеочистки над зоной продувки кислородного конвертера. *Металлург.* 2010. № 9. С. 41–44.
- 5. Охотский В.Б. Характеристика пылеуноса при продувке металла окислительным газом. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 5. С. 100–102.
- 6. Величко А.Г., Иващенко В.П., Верховская А.А., Головко В.И., Селегей А.Н. АСУТП в конвертерном производстве: Учебник. Днепропетровск: НМетАУ, 2016. 245 с.
- 7. Явойский В.И., Славин В.И. Обзор гипотез пылеобразования при продувке металла в конвертере. *Сталь*. 1986. № 10. С. 15–18.
- 8. Жульковский О.А., Мастеровенко Е.Л. Об особенностях теплообмена в газовой фазе кислородного конвертера. *Промышленная теплотехника*. 1998. № 20 (1). С. 15–18.
- 9. Дойников А.С. Цветовая температура. Физическая энциклопедия: [в 5 т.]. Гл. ред. А.М. Прохоров. Москва: Большая российская энциклопедия, 1999. т. 5: Стробоскопические приборы. Яркость. С. 422. 692 с.
- 10. Белянин Б.В., Эрих В.Н. Технический анализ нефтепродуктов и газов. Санкт-Петербург: Химия, 1970. 344 с.
- 11. Зверев В.А., Кривопустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Ч. 2. С.-П.: СПб НИУ ИТМО, 2013. 248 с.
- 12. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я. Основные характеристики горения. Москва: Химия, 1977. 320 с.
- 13. William B. Jensen. The Origin of the Bunsen Burner. *Journal of Chemical Education. American Chemical Society*. 2005. Vol. 82. No. 4. P. 518.
- 14. Кирилиллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. Москва: МЭИ, 2008. 496 с.
- 15. Румянцев В.Д. Теория тепло- и массообмена. Днепропетровск: Пороги, 2006. 532 с.

Надійшла 18.10.2021



- 1. Bigeev, A.M. (1988). Steel metallurgy. Theory and technology of steel smelting. Chelyabinsk: Metallurgiya, 479 p. [in Russian].
- 2. Baptizmanskiy, V.I. (1975). Theory of oxygen converter process. Moscow: Metallurgiya, 376 p. [in Russian].
- 3. Simonian, L.M., Hovorova, N.M. (2011). Features of dust formation during oxygen blowing of the melt and possible ways of using the captured dust. *Metallurgist*, no. 6, pp. 78–85 [in Russian].
- 4. Kozuhov, A.A., Merker, E.E., Shevchenko, A.A. (2010). Simulation of gas jet dust cleaning above the blowing zone of the oxygen converter. *Metallurgist*, no. 9, pp. 41–44 [in Russian].
- 5. Okhotskiy, V.B. (2000). Characteristics of dust emission at blowing metal with an oxidizing gas. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and mining industry*, no. 5, pp. 100–102 [in Russian].
- 6. Velichko, A.H., Ivashenko, V.P., Verhovskaia, A.A., Holovko, V.I., Selehey, A.N. (2016). APCS in converter production. Dnepropetrovsk: NMetAU, 245 p. [in Russian].
- 7. Yavoyskiy, V.I., Slavin, V.I. (1986). Review of dust formation hypotheses during metal blowing in a converter. *Stal'. Steel*, no. 10, pp. 15–18 [in Russian].
- 8. Zhul'kovskiy, O.A., Masterovenko, Ye.L. (1998). On the features of heat transfer in the gas phase of the oxygen converter. *Promyshlennaya teplotekhnika. Industrial heating technology*, no. 20 (1), pp. 15–18 [in Russian].
- 9. Doynikov, A.S. (1999). Colour temperature. *Physical encyclopedia*. A.M. Prohorov (ed.) (vols. 1–5, vol. 5). Big Russian Encyclopedia, p. 422, 692 p. [in Russian].
- 10. Belianin, B.V., Erih, V.N. (1970). Technical analysis of oil products and gases. Lvov: Khimiya, 344 p. [in Russian].
- 11. Zverev, V.A., Krivopustova, Ye.V., Tochilina, T.V. (2013). Optical material. Saint Petersburg: Sp RDI ITMO, 248 p. [in Russian].
- 12. Mal'tsev, V.M., Mal'tsev, M.I., Kashporov, L.Ya. (1977). Main specifications of burning. Moscow: Khimiya, 320 p. [in Russian].
- 13. William B. Jensen (2005). The Origin of the Bunsen Burner. *Journal of Chemical Education. American Chemical Society*, vol. 82, no. 4, p. 518.
- 14. Kirilin, V.A., Sychev, V.V., Sheindlin, A.Ye. (2008). Technical thermodynamics. Moscow: MEI production, 496 p. [in Russian].
- 15. Rumiantsev, V.D. (2006). Theory of heat and mass exchange. Dnepropetrovsk: Porogi, 532 p. [in Russian].

Received 18.10.2021

| Summary | L.S. Molchanov <sup>1</sup> , PhD (Engin.), Head of the Department,<br>e-mail: metall729321@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6139-5956<br>T.S. Golub <sup>1</sup> , PhD (Engin.), Senior Researcher,<br>e-mail: isinasu.golubts@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9269-2953<br>Ye.V. Synehin <sup>2</sup> , PhD (Engin.), Associate Professor, Assistant Professor,<br>e-mail: sinegin.ev@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9983-3971<br>S.I. Semykin <sup>1</sup> , PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher,<br>e-mail: isisemykin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7365-2259 |
|---------|---|
|         | <sup>1</sup> Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro,<br>Ukraine)<br><sup>2</sup> National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine)   |

## Physical modeling of influence of fractional composition of suspended particles on heat transfer from a burning torch in steelmaking units

In the conditions of the top oxygen-converter blowing the possibility of postcombustion of the exhaust gases leaving the unit with blowing oxygen is realized. As a result, a torch is formed above the neck of the converter. Thermal radiation from the specified torch is an additional source of heat for the converter bath, and the parameters of the torch can characterize the processes occurring in the volume of the converter. The blowing of the iron-carbon melt with oxygen is accompanied by intense smoke and dust formation, which should have a significant effect on the optical-thermal parameters of the flame of flue gases postcombustion in the oxygen converter. The paper presents the results of the study of the influence of solid particles of a sufficiently large fraction (more than 200 µm) on the heat transfer of a burning torch by radiation as the main method of heat transfer from a flame. The simulation was performed using a physical model that allowed to simulate a single volume of a burning flue gas postcombusted in a converter with the ability to measure the amount of heat transferred from it to the environment. As a result of the research, it was found that the emersion of solid particles into the burning torch leads to a change in its qualitative optical parameters: the appearance of a yellow-orange color, which indirectly indicates a decrease in the torch temperature. It was established by calculation method that, regardless of the degree of blackness of the torch, only particles with a fraction of less than 10 microns, when hitting it, can be heated to temperatures approaching the temperature of the possible onset of luminescence. Therefore, solid particles of the investigated fraction cannot participate in the total radiation of the torch. It was also noted that the effect of the size of the fraction of solid particles over 200 µm on the specific excess density of the heat flux is of a stepwise nature with a decrease in the value of the excess density of the heat flux from the torch with an increase in the size and amount of suspended solid particles in it.

Keywords

Physical modeling, gas torch, postcombustion of flue gases, heat transfer by radiation, fine particles, dusting.