

С. І. Семикін¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7365-2259

Т. С. Голуб¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9269-2953

Л. С. Молчанов¹, к.т.н., зав. відділом, ORCID 0000-0001-6139-5956

П. Г. Прокопенко¹, головний метролог

¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ВПЛИВУ АКТИВІЗОВАНИХ СТРУМЕНІВ КИСНЮ НА ПРОЦЕСИ ВИДІЛЕННЯ ПИЛУ В КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Анотація. У світовій практиці чорної металургії у зв'язку із загостренням питання екологічності процесу виробництва та необхідністю пошуку нових методів загального поліпшення технологічності все частіше звертаються до нетрадиційних способів інтенсифікації, які розширюють можливості існуючих металургійних процесів і не вимагають значних капіталовкладень і кардинальних змін виробництва. У зв'язку з цим, актуальним є проведення досліджень з вивчення способів впливу активізованими кисневими струменями шляхом створення активного озонівмісного газового потоку через верхню продувну фурму. Ресурсо- і енергозберігаючий ефект в цьому випадку може бути отриманий за рахунок: підвищення ступеня засвоєння кисню розплавом з відповідною інтенсифікацією тепло й масообмінних процесів у конвертерній ванні, що призводить до підвищення продуктивності кисневих конвертерів; економії шихтових матеріалів за рахунок поліпшення шлакоутворення й виключення високовартісних розріджувачів лаку; зниження інтенсивності димоутворення й виносу пилу з агрегату в результаті взаємодії активізованого окислювального струменя з часточками пилу. Дослідження проведено за отриманими лабораторними результатами вивчення активізації кисневого газового струменя кистьовим електричним розрядом при продувці як холодної моделі (що імітувала продувну фурму) так і в моделі кисневого конвертера. процес високовольної активізації кисню і кисеньвмісних газів призводить до додаткової термічної дисоціації молекул кисню з формуванням іонів і заряджених комплексів (радикалів) позитивного і негативного заряду. Проведене аналітичне дослідження встановило переважне формування позитивних частинок в газовому потоці по всій довжині струменя, що сприяє утворенню молекул озону з більш високою окисною здатністю ніж кисень, та надання позитивного заряду газовому потоку з можливістю притягування й укрупнення часточок пилу з подальшим осіданням їх у ванні.

Ключові слова: киснево-конверторний процес, верхня продувка, електричний розряд, озон, йони, активізація, пилоутворення.

Посилання для цитування: Аналіз механізмів впливу активізованих струменів кисню на процеси виділення пилу в киснево-конвертерному виробництві / С. І. Семикін, Т. С. Голуб, Л. С. Молчанов, П. Г. Прокопенко //

Стан питання. Існуючі в даний час класичні методи продувки конвертерної ванни киснем через верхні фурми потребують вдосконалення та модернізації з метою забезпечення як ресурсо-енергозбереження, так і дотримання екологічних норм, які стають все жорсткішими. Металургійна галузь посідає одне з перших місць серед всіх інших галузей промисловості за атмосферними викидами. У конвертерному цеху основними джерелами забруднення навколишнього природного середовища є пило-газовиділення, що відходять з конвертера внаслідок високих швидкостей взаємодії струменя продувального газу з металевою ванною і розвитку високих температур [1-4].

Новим напрямом у модернізації існуючих конвертерних процесів може стати застосування у конвертерному виробництві електрично активізованих газових струменів, що містять, насамперед, кисень [5-8]. Ресурсо- та енергозберігаючий ефект у зазначеному випадку може бути отриманий за рахунок:

- підвищення ступеня засвоєння розплавом хімічно більш активного газового потоку, ніж кисневий (насиченого озоном газу), з відповідною інтенсифікацією тепло-масообмінних процесів, що призводить до підвищення продуктивності кисневих конвертерів;

- так і зниження інтенсивності димоутворення та пиловиділення з агрегату в результаті електростатичної взаємодії активізованого окислювального струменя з часточками пилу.

Мета роботи. Експерименти, що були проведені на фізичній моделі кисневої фурми для активізації кисневого струменя кистьовим електричним розрядом показали наявність активізації кисеньвмісного потоку з формуванням іонів (кисеньвмісних радикалів) і молекул озону [9]. У зв'язку з цим були проведені розрахунково-аналітичні дослідження, спрямовані на визначення властивостей формованих частинок від іонного стану до молекули озону.

Основний матеріал досліджень. Розрахунково-аналітичні дослідження передбачали визначення енергії активації, тобто переходу у збуджений стан атому кисню та визначення загальної енергії іону кисню O^{2-} .

Розрахунок енергії активації / переходу у збуджений стан атома кисню. Визначення енергетичних втрат при переході атому кисню в іонізований стан були використані методики, запропоновані в роботах [10, 11]. Таким чином, для атома кисню відповідно до його електронної будови на орбіталях 1s, 2s, 2p знаходяться три типи електронів (рис. 1 та 2).

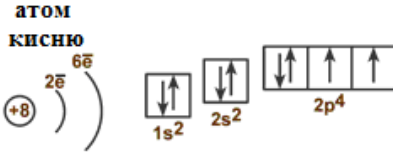


Рисунок 1 – Діаграма будови атома кисню.

Молекула кисню в своєму звичайному стані відрізняється від інших газоподібних елементів тим, що має два неспарених електрона, тобто є бірадикалом. В цілому, загальні механізми відновлення кисню в біохімічних реакціях відбуваються за участю тільки одного електрона, а кисень є досить стабільною молекулою, яка має властивість сильного окислювача.



Рисунок 2 – Будова молекули кисню (крапками вказані електрони на зовнішній орбіталі).

Молекула кисню легко вступає в реакції, пов'язані з приєднанням "недоотриманих" електронів, оскільки вона має два неспарених електрона на зовнішній орбіталі. При протіканні реакцій молекула кисню зазнає трансформації з утворенням іонів різного знаку, в залежності від кількості електронів на зовнішній орбіталі (рис. 3).

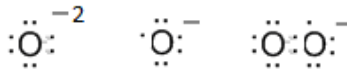


Рисунок 3 – Будова іонів кисню.

Будову молекули озону можна умовно зобразити різними способами. Наприклад, комбінацією двох крайніх (резонансних) структур. Кожна з таких структур не існує в реальності, а справжня молекула являє собою щось середнє між двома резонансними структурами (рис. 4).

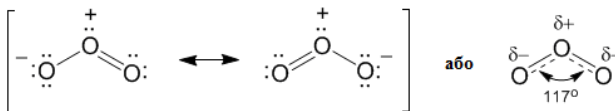


Рисунок 4 – Будова молекули озону (крапками вказані електрони на зовнішній орбіталі).

Розрахунок інтегральних енергетичних характеристик молекул і іонів ґрунтується на парціальних константах електростатики для трьох типів електронів, що визначаються з кількості пар електронів, що взаємодіють з даним електроном [12-14]:

$$\begin{aligned} k^{(1)} &= N_{1s} - 1 + \frac{N_{2s}}{4} + \frac{N_{2p}}{4-1/3}; \\ k^{(2)} &= \frac{N_{1s}}{4} + \frac{N_{2s}-1}{4} + \frac{N_{2p}}{4}; \\ k^{(3)} &= \frac{N_{1s}}{4-1/3} + \frac{N_{2s}}{4} + \frac{N_{2p}-1}{4-2/3}. \end{aligned} \quad (1)$$

де N_{1s} , N_{2s} , N_{2p} - кількість електронів на орбіталях 1s, 2s, 2p.

Повна константа електростатичної взаємодії має вигляд:

$$\begin{aligned} k_N &= N_{1s}k^{(1)} + N_{2s}k^{(2)} + N_{2p}k^{(3)}, \\ N &= N_{1s} + N_{2s} + N_{2p}. \end{aligned} \quad (2)$$

Константа електростатики з урахуванням константи парної взаємодії:

$$\begin{aligned} K_N &= k_N K_2 - 0,2F_2 (N_{2p} - 1 + \delta); \\ \delta &= 0; \\ \delta &= 1, N_{2p} = 1, 3, 6, \end{aligned} \quad (3)$$

де константа взаємодії другого порядку по водородоподібній моделі: $F_2 = 45 / 512$.

Інтегральні параметри атомів розраховуються по наступним формулам:

$$\begin{aligned} \xi_N &= \frac{N_{1s}}{2} + \frac{N_{2s} + N_{2p}}{8}; \\ E_N &= -\xi_N \left(Z - \frac{K_N}{2\xi_N} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

У всіх наведених вище формулах розрахунок енергії багатоелектронного атома проводиться аналітично. При цьому в формули підставляються тільки числа електронів на оболонках і квантові числа, що їм відповідають. Невідомим залишається параметр парної взаємодії.

Константу парної взаємодії можна визначити аналітично з умови мінімуму енергії атома в залежності від числа електронів. Отже розрахунок константи K_2 можна провести за формулою:

$$K_2 = \frac{Z}{k' \xi' - k_N / 2\xi_N}. \quad (5)$$

Оптимальне значення константи парної взаємодії для кисню, p -

елементу другого періоду, складає 0,56382.

Для розрахунку енергії молекули кисню O_2 використаємо формулу, яка враховує взаємодію двох атомів кисню:

$$E = E_1 + E_2 - \frac{x^2}{r} 27,2, \quad (6)$$

де E_1, E_2 – енергія атомів, x – кількість електронів, що утворили загальну електронну пару, r – ефективний радіус. Розрахунок аналогічних параметрів для молекули озону проведемо по формулі:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 - \frac{x^2}{r} 27,2. \quad (7)$$

Узагальнені відомості стосовно енергетичних параметрів з'єднань кисню у атомарній та іонній формах представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розраховані значення інтегральних параметрів стану кисню в залежності від його конфігурації.

Конфігурація	O_3	O_2	O	O^-	O^{2-}
Ξ	2,250	2,250	1,750	1,875	2,000
$-E, eV$	4285,9	2837,6	1388,6	1220,0	1053,6

Відповідно до даних представлених в таблиці 1 можна зробити висновок, що енергія електростатичної взаємодії в молекулі вище, ніж в атомарному або іонному стані, що пов'язано з великою кількістю електронів в електронній конфігурації молекули. Також таблиця відображає загальну закономірність – збільшення електростатичної взаємодії зі збільшенням кількості електронів в електронній конфігурації атома. Відповідно до цього зменшуються за абсолютною величиною енергія взаємодії з ядром і кінетична енергія. Фізично це відбувається внаслідок того, що в результаті відштовхування електронів один від одного збільшуються радіуси атомних орбіт і зменшується енергія взаємодії з ядром. У молекулі ж, навпаки, енергія взаємодії з ядром досить велика.

Фактично утворення озону під дією високовольтного розряду, згідно з результатами досліджень ряду авторів [15-18], проходить як фотометричним шляхом, тобто через порушення молекули кисню, так і в результаті рекомбінації іонів. Магі і Бартон [15] припускають, що процеси іонізації призводять до утворення двох молекул озону на пару іонів, а процеси первинного збудження - близько 5 молекул на пару іонів з протіканням, поряд з іншими, наступної реакції:



Разом на пару іонів мусить виходити близько 7 молекул озону, що

відповідає приблизно 20 молекулам / 100 еВ.

Згідно відомостей представлених у работах [15-18] утворення озону відбувається за рахунок реакцій між збудженими радикалами при розпаді молекул кисню в результаті електричного розряду, тобто аналогічно фотохімічному шляху:



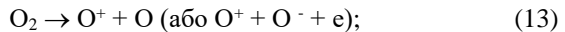
де М – сума вкладів різних газів в реакцію утворення озону.

При підвищенні потенціалу іонізації вихід озону збільшується (за даними Анрі [17-18] з 6 В до 21 В) практично в три рази. В цьому випадку активними частинками вже є атоми або атомарні іони кисню, тому що за вимірюваннями Тета і Хагструм [18] вже при 18,9 еВ можливий процес утворення атомарного іона кисню за схемою:



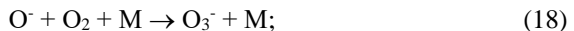
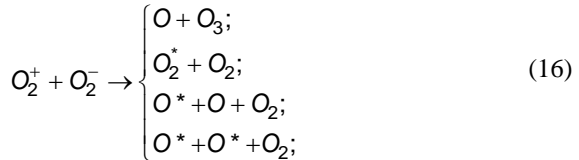
Таким чином, в утворенні озону, мабуть, є активними як атоми, так і збуджені молекули і іони. З огляду на це, схема утворення озону при електронному ударі може бути представлена наступним чином:

1) процес утворення активних часток:



де O_2^* - молекула кисню в критично збудженому стані.

2) первинні процеси утворення озону:



3) вторинні процеси утворення озону:



В ході проведення в даній роботі вимірів розподілу заряджених

частинок по довжині струменя було встановлено, що в разі продувки киснем і кисеньвмісними газами іонний струм був вище, коли на зонді був негативний заряд (приблизно на 15-30%). Причому різниця була меншою при наближенні до зрізу сопла (таблиці 2-4). Це, ймовірно, свідчить про те, що при активізації кисню формується велика частка позитивних іонів кисню на всьому протязі струменя, які повинні брати участь в рекомбінації з частинками пилу, що несуть негативний заряд, і сприяти їх коагуляції. Крім того частинки пилу з негативним зарядом можуть осідати на стовбурі фурми, видаючи свій заряд, що також сприяє зниженню кількості пилу, що виноситься з агрегату під час продувки рідкої ванни.

Таблиця 2 – Середній рівень зареєстрованого іонного току на зонді при різних положеннях електрода відносно зрізу сопла при продувці киснем (тиск газу 0,05-0,2 МПа).

№ з/п	Положення електрода відносно зрізу сопла, мм	Величина іонного струму, нА при замірі					
		Негативних іонів на відстані, мм			Позитивних іонів на відстані, мм		
		10	30	100	10	30	100
1	0	640-1010	190-210	63-104	800-1223	210-277	60-120
2	-5*)	520-624	124-178	70-96	700-802	136-200	77-98
3	-10	1200-2300	76-150	27-75	2180-3250	82-169	42-93
4	-15	88-64	37-32	22-19	125-120	51-47	25-21
5	-20	20-5	8-7	5-2	23-7	12-7	9-7

*) мінус значить заглиблення електрода до фурми.

Таблиця 3 – Середній рівень зареєстрованого іонного току на зонді при різних положеннях електрода відносно зрізу сопла при продувці повітрям (тиск газу 0,05-0,2 МПа).

№ з/п	Положення електрода відносно зрізу сопла, мм	Величина іонного струму, нА при замірі					
		Негативних іонів на відстані, мм			Позитивних іонів на відстані, мм		
		10	30	100	10	30	100
1	0	160-240	94-110	58-98	160-240	96-130	60-120
2	-5*)	130-160	60-90	60-90	140-160	65-93	62-94
3	-10	250-650	38-74	22-72	400-1000	40-80	40-90
4	-15	27-22	18-17	18-17	34-25	28-25	20-21
5	-20	3-1	2-1	1-0	16-5	14-5	7-5

*) мінус значить заглиблення електрода до фурми

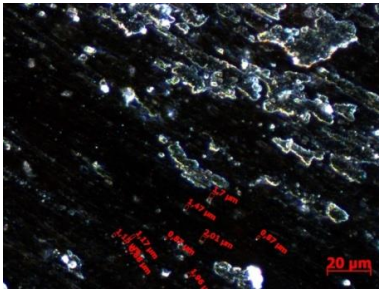
Підтвердженням висловленого припущення про коагуляцію частинок пилу можуть служити результати проведеного додатково дослідження проб відібраної з димовідводу пилу. Для аналізу була зібрана і підготовлена порція пилу на плавці, що була проведена з високовольтною активізацією і без неї. Дослідження було проведено за

допомогою мікроскопа Аксіоверт 200М МАТ в відбитому світлі при 800^x збільшенні. Результати представлені у вигляді фото на рис. 5-6.

Таблиця 4 – Середній рівень зареєстрованого іонного току на зонді при різних положеннях електрода відносно зрізу сопла при продувці вуглекислим газом (тиск газу 0,05-0,2 МПа).

№ з/п	Положення електрода відносно зрізу сопла, мм	Величина іонного струму, нА при замірі					
		Негативних іонів на відстані, мм			Позитивних іонів на відстані, мм		
		10	30	100	10	30	100
1	0	410-867	72-110	50-90	412-850	70-110	55-90
2	-5*)	250-420	65-100	50-88	255-420	70-100	55-88
3	-10	100-230	55-87	27-53	99-235	57-90	30-55
4	-15	34-61	9-14	6-12	35-60	10-16	8-12
5	-20	5-10	5-7	2-4	5-10	5-8	2-3

*) мінус значить заглиблення електрода до фурми.

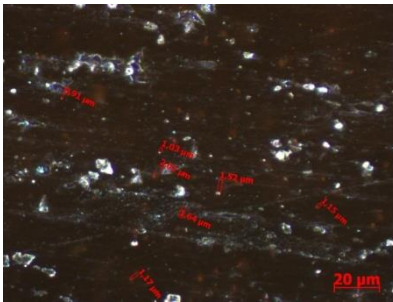


а



б

Рисунок 5 – Фотографії зразка пилу при збільшенні у 800^x, відібраного з порівняльної плавки: а - без світлового фільтру; б - з світловим фільтром.



а



б

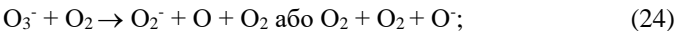
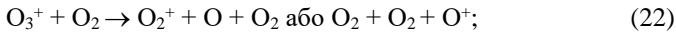
Рисунок 6 – Фото зразка пилу при збільшенні у 800^x, відібраного з дослідної плавки: а - без світлового фільтру; б - з світловим фільтром.

Аналіз зразків пилу показав, що на плавках, проведених з високовольтною активізацією кисневого потоку, середній розмір частинок пилу в зразку становив $0,2 \cdot 10^{-6}$ м, а на порівняльній плавці – $0,17 \cdot 10^{-6}$ м, при цьому кількість частинок з розміром більше $0,2 \cdot 10^{-6}$ м в полі зору мікроскопа в зразку на дослідній продувці було на 40% більше, ніж в зразку на порівняльній продувці, що підтверджує припущення про більш активну коагуляцію частинок на дослідній плавці.

Також слід зазначити відмінність в кольорі матеріалів пилу: на дослідному зразку вони мали характерний рудо-коричневий відтінок, а на порівняльному – сіро-зелений. Це свідчить про розвиток під дією електричних розрядів вторинних процесів в високотемпературній зоні газової фази між продуктами основних реакцій з відповідною зміною хімічного складу частинок пилу, і, перш за все, в зміні співвідношення оксидів заліза ($\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$) в бік збільшення частки вищих оксидів в дослідному варіанті.

Сформовані молекули озону не стабільні, отже, процес їх утворення протікає паралельно процесу розпаду також з формуванням іонів та збуджених атомів і молекул. Тут можливі наступні процеси:

1) первинні процеси розпаду озону:



2) вторинні процеси розпаду озону:



Відповідно, далі при контакті з рідким металом активізовані молекули і вже сформовані в результаті дисоціації озону іони готові вступати в реакцію з основними компонентами розплаву.

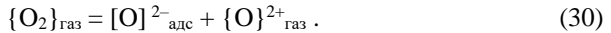
При визначенні механізму взаємодії газоподібного кисню з металевим розплавом необхідно враховувати, що молекули кисню в присутності атомів заліза повинні долати енергетичний бар'єр, проходячи стадію термічної іонізації [19]. Отже, в разі проведення високовольтної активізації іони, що вміщують кисень, надходять вже підготовленими в зону взаємодії, і створюються сприятливі умови для протікання реакцій.

Відповідно до роботам С.І.Попеля [19], етапом, що лімітує швидкість реакції взаємодії вуглецю з киснем, тобто регулюючим швидкість надходження окислювача, є хімічна адсорбція молекул

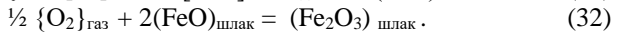
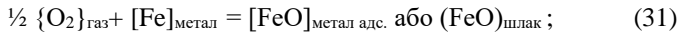
кисню з газової фази в зону металевого розплаву, в яку вони надходять шляхом конвективної дифузії. Це представляється наступним рівнянням [19-20]:



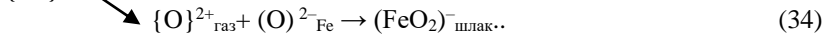
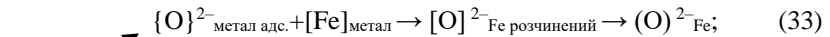
У той же час, при розгляді окремих сторін механізму надходження кисню в металевий розплав, виходячи з умов мінімізації енергетичних витрат, слід припустити, що молекули кисню, адсорбовані на поверхні металевого розплаву, розташовуються не випадковим чином, а відчуваючи електричне вплив з боку металеві матриці і узагальненої електронної хмари провідності, властиві металевим системам, розташовуються строго орієнтовано, утворюючи на поверхні подвійний поляризаційний шар. В цьому випадку, процес дисоціації (ділення) молекули кисню завершується утворенням двох протилежно заряджених іонів кисню. Такому поділу, ймовірно, передує момент максимального зсуву електронної хмари в молекулі кисню до одного з двох атомів, в результаті чого, один атом (у вигляді іона) поглинається (розчиняється) в металевому розплаві, а інший атом (також у вигляді іона), відчуваючи відштовхуючий електричний вплив, переходить в газу або шлакову фази за схемою:



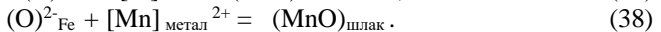
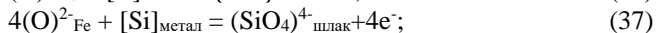
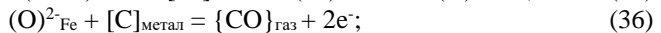
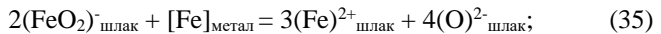
Як наслідок, кисень вступає в реакції з атомами заліза по реакціям в молекулярному вигляді:



Або за іонною схемою:



Далі сформовані кисеньвмісні комплекси вступають в реакції з компонентами розплаву:



Формування другої групи комплексів викликано енергетичними труднощами в подоланні атомом кисню подвійного електричного шару, сформованого на кордоні взаємодіючих фаз. Фактичне їх співвідношення визначається ступенем розвитку компенсаційних

процесів і безпосередньо пов'язане з кінетичними умовами подачі кисню на поверхню розплаву: чим вище інтенсивність продувки, тим менше кисню йде на утворення (FeO). В результаті нормальний перебіг реакції супроводжується насиченням поверхневого шару металевого розплаву киснем у вигляді комплексів $[O]^{2-}_{Fe}$ розчинені, які є донорами по перенесенню кисню з газової фази в металевий розплав з подальшою взаємодією розчиненого кисню з домішками по реакціях 36 - 38.

Гальмування процесу переходу негативного іона кисню в метал призводить до активного формування шлаку на поверхні, і навпаки, надходження негативних іонів кисню сприяє більш активному протіканню реакцій окислення домішок розплаву, в першу чергу вуглецю.

Формування негативних кисневих іонів при дисоціації озону активізують процеси окислення основних домішок розплаву, легше засвоюючись металевою ванною (для них вже подолано необхідний енергетичний бар'єр формування іонів кисню).

Висновки

Процес високовольтної активізації кисню і кисеньвмісних газів призводить до додаткової термічної дисоціації молекул кисню з формуванням іонів і заряджених комплексів (радикалів) позитивного і негативного заряду. При цьому встановлене переважне формування позитивних частинок в газовому потоці по всій довжині сприяє за відомою схемою, по-перше, утворення молекул озону, що володіють більш високою окисною здатністю ніж кисень, по-друге, позитивно заряджений газовий потік бере участь в об'єднанні і укрупненні частинок пилу, які, як відомо, несуть негативний заряд, а значить сприяє їх коагуляції і осіданню в поле дії гравітаційних сил, повертаючись в сталеплавильну ванну, або осідаючи на стовбурі фурми.

Молекули озону виступають в ролі постачальника високоактивних позитивно і негативно заряджених іонів кисню, прискорюючи основні металургійні реакції з рафінування металу від домішок і, перш за все, інтенсифікують протікання реакції окислення вуглецю, що і було відзначено в даній роботі.

Перелік посилань

1. Recent advancements in source reduction and recycling technologies for converter dust/ Yun Zhou, Rong Zhu, Guangsheng Wei // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. 2022. P. 7274-7285.
2. Branca T. A., Fornai B., Colla V. Industrial symbiosis and energy efficiency in European process industries: A review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 16. P. 9159.
3. Chen Z. B. The current state and development of recovery and utilization technology of domestic converter gas. *Metall. Power*. 2003. Vol. 1. P. 9-12.
4. Delhaes C., Hauck A., Neuschütz D. Mechanisms of dust generation in a stainless steelmaking converter. *Steel Res*. 1993. Vol. 64, No. 1. P. 22-27.
5. Патент SU135471. Спосіб выплавки сталі / Ю. И. Жаворонков, Ю. Н.

Давыдов, Б. Н. Николаев [и др.] / Опубл. 15.01.92. Бюл. № 2.

6. Бурнаков К. К., Рябухин А. Г., Смирнов Л. А. Абсолютные скорости реакции окисления углерода при продувке стали кислородом и озоном. *Металлы*. 1989. № 4. С. 48-52.

7. Донской А. В., Клубинкин В. С. *Электро-плазменные процессы и установки в машиностроении*. Л. : Машиностроение, 1979. 231 с.

8. Mihovsky M. Thermal plasma application in metallurgy. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. 2010. Vol. 45, No. 1. P. 3-18.

9. Стендовое исследование особенностей электрофизической активизации газового кислородсодержащего потока / С. И. Семькин, Т. С. Голуб, П. Г. Прокопенко // *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. Дніпро: НМетАУ-ІВК «Системні технології». 2019, № 22. P. 94-103.

10. Кустов Е. Ф., Кустов Д. Е. *Энергетическая структура атом, молекул, твёрдых тел*. -М.: Издательство МЭИ, 2001. 50 с.

11. Зайцев Ю. В., Кузищина Т. К., Кустов Д. Е. *Расчёт физико-химических характеристик элементов проводников*. М. : Издательство МЭИ, 2001. 8 с.

12. Филиппов Ю. В., Вобликова В. А., Пантелеев В. И. *Электросинтез озона*. М. : Изд-во Московского университета, 1987.

13. Лунин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. *Физическая химия озона*. М. : Изд-во Московского университета, 1998.

14. Самойлович В. Г., Гибалов В. И., Козлов К. В. *Физическая химия барьерного разряда*. М. : Изд-во Московского университета. 1989.

15. Magee J. L., Barton M. *J. Am. Chem. Soc.* 1951. Vol. 73. P. 523-530.

16. Wansbrough-Jones O. H. *Proc. Roy. Soc.* 1930. Vol. 127. P. 530-538.

17. Henry L. A. M. *Bull. Soc. Chim. Belg.* 1931. Vol. 40. P. 339-345.

18. Kruger F., Zickermann C. *Z. Phys.*, 1936. Vol. 99. P. 428-452.

19. Есин О. А., Гельд П. В. *Физическая химия пирометаллургических процессов*. М. : Металлургия, 1966. 598 с.

20. Попель С. И., Сотников А. И., Бороненков В. Н. *Теория металлургических процессов*. М. : Металлургия, 1986. 463 с.

References

1. Zhou, Y., Zhu, R., & Wei, G. (2022). Recent advancements in source reduction and recycling technologies for converter dust. *Energy Reports*, 8, 7274-7285

2. Branca, T. A., Fornai, B., & Colla, V. (2021). Industrial symbiosis and energy efficiency in European process industries: A review. *Sustainability*, 13(16), 9159

3. Chen, Z. B. (2003). The current state and development of recovery and utilization technology of domestic converter gas. *Metall. Power*, 1, 9-12

4. Delhaes, C., Hauck, A., & Neuschütz, D. (1993). Mechanisms of dust generation in a stainless steelmaking converter. *Steel Res*, 64(1), 22-27

5. Zhavoronkov, Yu. I., Davidov, Yu. N., Nikolaev, B. N., Klimov, L. P., & Zinchenko, S. D. (1992). Patent SU135471. Sposob viplavki stali [Method of steel production]. *Bul.* № 2. [in Russian]

6. Burnakov, K. K., Riabuhin, A. G., & Smirnov, L. A. (1989). Absolutnie skorosti reakcii okisleniia ugleroda pri produvke stali lislorodom I ozonom [Absolute reaction rates of carbon oxidation during purging of steel with oxygen and ozone]. *Metalls*, (4), 48-52. [in Russian]

7. Donskoy, A. V., & Klubinkin, V.S. (1979). Elektro-plazmennie processy I ustanovki v mashinostroenii [Electro-plasma processes and installations in mechanical engineering]. Mashinostroenie. [in Russian]
8. Mihovsky, M. (2010). Thermal plasma application in metallurgy. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 45(1), 1, 3-18
9. Semykin, S. I., Golub, T. S., & Prokopenko, P. G. (2019). Stendovoe issledovanie osobennostey elektrofizicheskoy aktivacii gazovogo kislorodsoderzhashego potoka [Stand study of the features of electrophysical activation of gaseous oxygen-containing flow]. *Modern problems of metallurgy*, (22), 94-103. [in Russian]
10. Kustov, Ye. F., & Kustov, D. Ye. (2001). *Energeticheskaya struktura atom, molekul, tverdyh tel* [Energy structure of atoms, molecules, solid bodies]. MAI. [in Russian]
11. Zaytsev, Yu. V., Kuzishina, T. K., & Kustov, D. Ye. (2001). *Raschet fiziko-himicheskikh karakteristik elementov provodnikov* [Calculation of physical and chemical characteristics of conductor elements]. MAI. [in Russian]
12. Filipov, Yu. V., Voblikova, V. A., & Pantelev, V. I. (1987). *Elektrosintez ozona* [Electrosynthesis of ozone]. Moscow university publication. [in Russian]
13. Lunin, V. V., Popovich, M. P., & Tkachenko, S. N. (1998). *Fizicheskaya himiya ozona* [Physical chemistry of ozone]. Moscow university publication. [in Russian]
14. Samoilovich, V. G., Gibalov, V. I., & Kozlov, K. V. (1989). *Fizicheskaya himiya barernogo rozriada* [Physical chemistry of barrier discharge]. Moscow university publication. [in Russian]
15. Magee, J. L., & Barton, M. (1951). *J. Am. Chem. Soc.*, 73, 523-530
16. Wansbrough-Jones, O. H. (1930). *Proc. Roy. Soc.*, 127, 530-538
17. Henry, L. A. M. (1931). *Bull. Soc. Chim. Belg.*, 40, 339-345
18. Kruger, F., & Zickermann, C. (1936). *Z. Phys.*, 99, 428-452
19. Yesin, O. A., & Held, P. V. (1966). *Fizicheskaya himiya pirometalurgicheskikh protsessov* [Physical chemistry of pyrometallurgical processes]. Metallurgy. [in Russian]
20. Popel, S. I., Sotnikov, A. I., & Boronenkov, V. N. (1986). *Teoriia metalurgicheskikh protsessov* [Theory of metallurgical process]. Metallurgy. [in Russian]

S. I. Semykin¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7365-2259

T. S. Golub¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9269-2953

L. S. Molchanov¹, Ph. D. (Tech.), Head of Department, ORCID 0000-0001-6139-5956

P. H. Prokopenko¹, Chief Metrologist

¹*Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

ANALYSIS OF THE INFLUENCE MECHANISMS OF ACTIVATED OXYGEN STREAMS ON DUST EMISSION PROCESSES IN OXYGEN-CONVERTER PROCESS

Abstract. In the global practice of ferrous metallurgy, in connection with the aggravation of the environmental issue of the production process and the need to

find new methods of general improvement of manufacturability, non-traditional methods of intensification are increasingly being turned to, which expand the capabilities of existing metallurgical processes and do not require significant capital investments and drastic changes in production. In this regard, it is urgent to carry out research on methods of exposure to activated oxygen jets by creating an active ozone-containing gas flow through the upper blowing nozzle. In this case, the resource- and energy-saving effect can be obtained due to: increase in the degree of absorption of oxygen by the melt with the corresponding intensification of heat and mass transfer processes in the converter bath, which leads to an increase in the productivity of oxygen converters; saving of charge materials due to improvement of slag formation and exclusion of high-cost lacquer thinners; decrease in the intensity of smoke formation and removal of dust from the unit as a result of the interaction of the activated oxidizing jet with dust particles. The research was carried out based on the obtained laboratory results of the study of the activation of the oxygen gas jet by a brush electric discharge when blowing both a cold model (which simulated a blowing nozzle) and an oxygen converter model. The process of high-voltage activation of oxygen and oxygen-containing gases leads to additional thermal dissociation of oxygen molecules with the formation of ions and charged complexes (radicals) of positive and negative charge. The conducted analytical research established the predominant formation of positive particles in the gas flow along the entire length of the jet, which contributes to the formation of ozone molecules with a higher oxidizing capacity than oxygen, and the provision of a positive charge to the gas flow with the possibility of attracting and thickening dust particles with their subsequent sedimentation in the bath.

Key words: oxygen-converter process, top blowing, electric discharge, ozone, ions, activation, dust formation.

For citation: Semykin, S. I., Golub, T. S., Molchanov, L. S., & Prokopenko, P. H. (2013). Analysis of the influence mechanisms of activated oxygen streams on dust emission processes in oxygen-converter process. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 246-259. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-246-259>

*Стаття надійшла до редакції збірника 04.11.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*