

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-199-221>

УДК 669.184.244.66:669.184.235.001.5

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

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

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

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ НА ПРИКЛАДІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ АКТИВАЦІЇ СТРУМЕНЯ КИСНЮ У КОНВЕРТОРАХ ВЕРХНЬОГО ДУТТЯ

Анотація. Динамічна сучасність та стрімкий розвиток науки й техніки потребує від сталеплавильної галузі постійного вдосконалення та інтенсифікації всіх етапів виробництва без значних матеріальних витрат для збереження конкурентоспроможності на ринку конструкційних матеріалів. Це стосується й найбільш ефективного на даний час способу отримання рідкого металевого напівпродукту – киснево-конвертерного способу виробництва. За час свого існування, перебуваючи у постійному вдосконаленні, для киснево-конвертерного способу вже досконалим досліджено та встановлено раціональні показники технологічних факторів, які можуть інтенсифікувати процес, знайдено оптимальні межі їх використання, що обмежує подальше їх вдосконалення. Тому на перший план виходять нові способи фізичного впливу, серед яких актуальним є розробка способу активізації електричним розрядом кисневого газового струменя. В роботі досліджено запропонований авторами спосіб створення високовольтного розряду на виході з продувального пристрою. Це спричиняє утворення вільних заряджених часток кисню у газі (йонів), які є більш активними ніж молекулярний кисень щодо розчинення та взаємодії з іншими хімічними сполуками. Основним напрямком дослідження, що відображено в роботі, був термодинамічний аналіз впливу активізації високовольтним розрядом кисневого струменя на перебіг реакцій за участю газоподібної фази. Розрахунки проведено стосовно вільної енергії Гіббса. Цей параметр є показником ймовірності вільного перебігу реакцій з утворенням, в даному випадку, оксидних продуктів й опосередковано відповідає за інтенсивність перебігу всього процесу конвертування. Розрахунки проведено для реакцій окислення компонентів розплаву в реакційній зоні з урахуванням впливу кількості активованих часток на електродні потенціали, перш за все, газоподібного кисню. Відповідно до результатів проведеного аналізу зроблено висновок, що найбільше за рахунок дії газоподібних йонів кисню активується процес окислення вуглецю та процес розчинення кисню у залізо-вуглецевому розплаві. Це, відповідно, повинно як інтенсифікувати сам

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

перебіг конвертування з активним наведенням шлаку та протіканням всіх окислювальних процесів, так і скоротити тривалість його перебігу.

Ключові слова: киснево-конвертерний процес, верхня продувка киснем, високовольтний електричний розряд, йони, реакції окислення, вільна енергія Гіббса.

Посилання для цитування: Голуб Т. С., Молчанов Л. С. Комплексний аналіз методів підвищення ефективності виробництва сталі на прикладі застосування електричної активації струменя кисню у конверторах верхнього дуття. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 199-221. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-199-221>.

Вступ. Сучасний рівень розвитку науки й техніки потребує удосконалення всіх напрямків технічної діяльності у відповідності з рівнем автоматизації та можливостями керування. Не залишається осторонь й металургійна галузь, яка є важливою складовою економіки країн. У зв'язку з цим постійно проводять розробки та вдосконалення елементів металургійного переробу для розширення можливостей управління. Так, зокрема, це стосується основного способу масового виробництва рідкої сталі – виплавки в кисневих конвертерах. Це досить складний процес, у якому необхідно одночасно забезпечити такі вимоги до дуттьових режимів, які дозволять проведення швидкого запалювання плавки, інтенсивного перемішування ванни, підвищення ступеня засвоєння кисню та ін., що зумовлене «жорсткою» продувкою, та прискореного й сталого шлакоутворення, збільшення ступеня окислення вуглецю до CO_2 та ін., що відповідає «м'якому» типу продувки ванни. У нестабільних шихтових умовах, які є звичайною умовою роботи більшості вітчизняних конвертерних цехів, при продувці ванни з прийнятною витратою кисню через звичайну багатосоплову фурму [1-2] дотриматися вказаних вимог є досить складною задачею.

Аналіз публікацій. Основними шляхами впливу на рідку металеву ванну й обмінні процеси при кисневому конвертуванні є:

- традиційні технологічні засади:
 - інтенсивність продувки та тиск кисню;
 - положення фурми;
 - тип продувального пристрою;
 - вміст кисню у дутті;
- інші фізичні впливи, у тому числі електрофізичний вплив електричним розрядом.

Важливою складовою, що визначає дуттьовий режим кисневого конвертера, є інтенсивність подачі кисню. Кисень вводять у конвертер

через фурму, оснащену соплами, що перетворюють енергію тиску газу в кінетичну і забезпечують швидкість струменів на виході із сопла на рівні 500 - 550 м/с при статичному тиску близькому до атмосферного [3-6]. Така швидкість необхідна для проникнення струменів у ванну та забезпечення найбільш повного засвоєння кисню. Кисневі струмені, що витікають із сопел фурми, занурюються у ванну і викликають у її нижній частині спрямовану циркуляцію, а верхні шари металу і шлаку спінуються бульбашками CO, що виділяються при окисленні вуглецю. Питома витрата кисню, визначається кількістю складових чавуну і сталевого брухту, які окислюються за час продування. Виходячи з практики виробництва сталі у кисневих конвертерах вона змінюється у межах 47 – 60 м³/т сталі, зростаючи зі збільшенням вмісту домішок в шихті, і знижується зі збільшенням частки сталевого брухту в шихті, оскільки брухт містить меншу кількість домішок, у порівнянні з чавуном.

Інтенсивність продувки зазвичай є постійною для умов того чи іншого конвертерного цеху і залежить від ємності сталеплавильного агрегату [7]. Для умов виробництва сталі у кисневих конвертерах вона знаходиться в межах 2,5 до 5 – 6 м³/(т·хв) й визначає тривалість операції продувки. Для зменшення тривалості плавки інтенсивність продувки прагнуть збільшити. Проте, досвід виробництва сталі у кисневих конвертерах показав, що після перевищення певного допустимого рівня інтенсивності продувки починаються викиди металу та шлаку з конвертера через надмірне спінення шлако-металевої ванни.

Іншим важливим параметром дуттьового режиму, який має значний вплив на процес продувки є тиск кисню [7-8]. Для забезпечення, обумовлених технологією виплавки сталі у кисневих конвертерах, газодинамічних характеристик струменя кисню необхідно мати тиск у фурмі перед соплами понад 1 МПа (у магістралі – не менше 1,5- 2,0 МПа). Конвертери малої ємності, що мають відносно меншу глибину ванни, можуть нормально працювати при тиску кисню у магістралі не менше 1- 1,2 МПа [8]. Відхилення тиску кисню перед соплом від розрахункової величини призводить до порушення режиму роботи сопла, збільшення тривалості продувки та зниження ступеня засвоєння кисню ванною, пульсації струменя, що передається ванні, або захоплення крапель металу і шлаку, що обумовлює руйнування сопла.

Наступним параметром дуттьового режиму є вміст кисню у дутті, який регламентується вимогами до якості сталі та можливостями підприємства, де проводиться виробництво.

Значно більше можливостей впливу на перебіг процесу конвертування сталі має положення фурми над рівнем спокійної ванни

[9-11]. Продувка при неправильному положенні фурми призводить до зниження продуктивності конвертера; погіршення якості сталі, що виплавляється; зменшення виходу придатного; збільшення викидів металу; додатково сприяє заметалюванню горловини конвертера та кесона газовідвідного тракту; спричиняє прогари і низьку стійкість фурм. Висота розташування фурми зумовлюється рядом технологічних факторів: з одного боку вимогами шлакоутворення - високе розташування фурми над ванною, а з іншого для забезпечення процесу зневуглецювання бажано розташувати фурму якомога ближче до поверхні ванни. До того ж, під час продування плавки рівень ванни сильно змінюється, оскільки змінюється швидкість окислення вуглецю та інтенсивність виділення димових газів. У конвертерах різної ємності фурму встановлюють на висоті, що відповідає відстані до рівня ванни в спокійному стані від 0,8 до 4,8 м. У зазначених межах висота зазвичай зростає зі збільшенням ємності конвертера. Проте, дійсна відстань від фурми до ванни змінюється як по ходу продування, так і від плавки до плавки внаслідок спінування металу і шлаку, зносу вогнетривкої футеровки, добавки сипких неметалевих матеріалів і т.д [12-13]. Тому корисними є методи, які дозволяють реально оцінювати положення фурми під час продувки. Адже підйом фурми на велику висоту (900 – 1000 мм) супроводжується великим падінням швидкісного напору струменя при його контакті з поверхнею металу, збільшенням діаметра зони зустрічі струменя і металу і розсіюванням частини газу, що вдується по поверхні ванни. Все це призводить до збільшення частки поверхневих процесів, що відбуваються в умовах слабо розвиненої поверхні контакту окислювача та металу і, отже, до переважного окислення заліза [17]. Зменшення ступеня проникнення струменів наближає зону прямого окислення до шлаку і в шлак переходить більше оксидів заліза, що утворюються в цій зоні. Збагачення шлаку оксидами заліза, як відомо, значно прискорює розчинення вапна, тобто шлакоутворення, і, отже, полегшує видалення фосфору з розплаву, коалесценцію самих шлакових включень у металі та подальшу їх асиміляцію (при цьому дещо зменшується надходження кисню до металу і, отже, швидкість окислення вуглецю).

Іншим впливовим фактором на ефективність виробництва сталей у кисневому конверторі є тип фурми та кількість й тип сопел на її наконечниках. При цьому найдієвішим пристроєм впливу є верхня киснева фурма [1, 2, 7, 14-15]. Розробка наконечника верхньої фурми зазвичай зводиться до визначення раціональних геометричних параметрів конструкції: тип, діаметр, число сопел, кут їх нахилу до осі фурми, мінімальний перетин, число Маха [2, 7]. Кількість сопел, як

правило, обирається в залежності від ємності конвертера, питомої інтенсивності продувки, відстані від рівня спокійної металеві ванни до горловини конвертера та необхідності вирішення спеціальних задач. Зазвичай вважають, що [2, 16-17] збільшення кількості сопел більше 6-7 сприяє збільшенню ступеня засвоєння кисню, поліпшення гідродинаміки ванни й прискоренню шлакоутворення, але разом з тим може призводити до переокислення ванни, утворення викидів, зниження виходу рідкої сталі, особливо при виробництві низьковуглецевого напівпродукту ($[C] \leq 0,05\%$). Також важливим є достатня циркуляція охолоджувача в міжсопловому просторі фурменого пристрою. За умов використання невеликої кількості сопел (до 3-4) збільшується «жорсткість» дуття й погіршуються умови шлакоутворення [18-19]. Це зумовлює інтенсивний винос крапель шлаку і металу з реакційної зони, збільшенню заметалювання технологічного обладнання та зниженню виходу рідкого металу.

При необхідності більшого «пом'якшення» газових струменів на виході з дуттьового пристрою (наприклад, при продувці низькомарганцевих чавунів, при малошлакових технологіях і т.п.) сопла в наконечнику розташовують під кутом нахилу до вісі фурми, який у два рази більше ніж у традиційній конструкції, або виконують з різними прохідними перетинами, чи компонують у вигляді окремих соплових блоків і т. д. У зв'язку з низкою об'єктивних причин, таких як необхідність регулювання потоку кисню за ходом продувки плавки, коливання тиску кисню в цеховій магістралі, зміна протитиску в порожнині агрегату і т.п., сопла фурм працюють в нестабільних умовах, в т.ч. в режимі «перерозширення» газового потоку. Це, як правило, приводить до явища відриву течії від стінок дифузора сопла типу Лавалля, супроводжується підсмоктуванням в сопло високотемпературних газів з краплями металу і шлаку, які знаходяться в робочому просторі сталеплавильного агрегату, що призводить до швидкого розгоряння кромки сопла, зміни епюри швидкостей в перетині струменя та прогару головки фурми [2, 7, 20]. Для запобігання вказаних явищ пропонують: зменшувати довжину або кут розкриття дифузора сопел типу Лавалля, вибрати вихідний діаметр сопла відповідно до мінімальної витрати чи тиску кисню [21, 22] і т.п., що в кінцевому підсумку пропорційно зниженню величини числа Маха. При цьому потенційна енергія струменя кисню на виході з дуттьового пристрою використовується неефективно, а струмені - менш організовані у порівнянні з розрахунковим режимом витікання.

Інше вирішення питання підвищення стабільності струменя разом з підвищенням далекобійності пропонується авторами [23] за рахунок скорочення довжини сопел Лавалля та їх дооснащення циліндричними

насадками з умовою забезпечення загальної довжини сопла в закритичній частині. Дана конструкція забезпечує роботу сопел фурми без можливого ерозійного зносу закритичної частини в діапазоні витрати кисню 1200 - 700 м³/хв.

Також важливим фактором здійснення впливу на рідку металеву ванну є можливість використання додаткового центрального сопла [24]. При взаємодії додаткового центрального струменя з металевою ванною має місце прискорення шлакоутворення і зниження інтенсивності заметаллювання наконечника і стовбура фурми. Крім того, центральний струмінь може забезпечувати газодинамічний захист торцевої частини наконечника від потрапляння на неї перегрітих і переокислених крапель металу з реакційної зони.

Для інтенсифікації процесів конвертування за рахунок використання різних варіантів продувних пристроїв також використовується модифікована киснева фурма, наприклад, з кількома соплами, розташованими з кутом у горизонтальній площині (4°, 8° та 12°), який дозволяє створювати значну тангенціальну складову швидкості та посилює ефекти перемішування [25-26], або двопараметрична киснева фурма, що має у одному ряді сопла двох типів: великі та меншого діаметру [27, 28]. Спеціальна киснева фурма має декілька ярусів сопел та може мати додатково окремі підводи продувних газів на кожен ярус [29-31]. Спеціальні дуттьові пристрої вирішують не тільки задачу окислення вуглецю та домішок, але й виконують допалювання оксиду вуглецю завдяки другому ярусу сопел, крізь які вдувається кисень. У варіанті окремої подачі продувних газів на кожен ярус створюються додаткові можливості управління плавкою за рахунок регулювання параметрів вторинного, більш «м'якого» дуття, в залежності від динаміки процесу окислення вуглецю, стану шлако-газо-металевої емульсії і інших чинників [30].

Існують варіанти продувних пристроїв, що оснащено тільки одним соплом, наприклад, циклонним [32], дослідження роботи якого показало зменшення розбризування та збільшення глибини проникнення та площі реакційної зони у порівнянні з класичною фурмою. Іншим варіантом одно соплової фурми є використання сопла ежекторного або когерентного типу. Завдяки полум'яній оболонці взаємодія струменя із навколишнім газовим середовищем зменшується, що призводить до більшої потенційної довжини ядра (довжини, до якої осьова швидкість струменя дорівнює швидкості на виході з сопла) надзвукового струменя. Також стверджується, що такий струмінь газу створює менше бризок, ніж той, що створюється звичайним понадзвуковим струменем [33-38]. Когерентні газові струмені можуть створюватися й у багатосоплових наконечниках.

Підсумовуючи традиційні способи інтенсифікуючого впливу на конвертерний процес, можна зробити висновок, що існує безліч рекомендацій для ефективного ведення дуттьового режиму, найбільш дієвими з яких є варіації конструкції продувних пристроїв, бо інші напрямки вже використали свої потенційні можливості. Однак також існують інші методи фізичного зовнішнього впливу на конвертеру ванну. Серед них окреме місце займають способи електрофізичного впливу на фази сталеплавильного процесу. Зазначені методи базуються на особливості будови фаз сталеплавильного переробу: реагуючі між собою речовини, з яких складаються фази, мають вільні заряджені часточки (електрони та йони в металі, йони у шлаковій фазі та розігрітому у реакційній зоні до великих температур газовому потоці) та характеризуються достатньою електропровідністю [39-44]. Було встановлено, що проходження струму всередині металу здійснюється за рахунок електронної провідності та роль переносу за рахунок іонів мала [45-46]. Навпаки, у шлаковій фазі провідність має іонний характер, і за допомогою постійного електричного поля може бути досягнута різка нерівномірність розподілу компонентів у шлако-металевій фазі. Також відомо, що при протіканні електричного струму через плазму, утворену електричною дугою, метал, що переплавляється (наприклад, у процесі ПДП) у міжфазній зоні характеризується переходом від електронної провідності до газової, при якій переносниками зарядів крім вільних електронів є позитивні йони [47-49]. Проте, особливості перебігу хімічних реакцій у низькотемпературній плазмі стосовно умов окисного рафінування практично не вивчені. Незважаючи на безумовну перспективність газо-фазних плазмових процесів, найбільшого успіху в практичній реалізації досягнуто, в основному для агрегатів, заснованих на дії термічної плазми, пов'язаному з перенесенням теплової енергії, одержаної від проходження електричного струму замкнутими ланцюгами. Спектр досліджених способів і методів впливу електричної енергії відноситься до пристроїв з питомою потужністю від 100 до 800 кВт/т металу, що обробляється. Інформація про способи та пристрої, що займають діапазон застосування електричної енергії потужністю від 0,1 до 10 кВт/т, відсутня або стосується одиничних лабораторних дослідів.

Новим етапом використання електроенергії при виплавці сталі став метод використання малопотужних електричних впливів, зокрема низьковольтного потенціалу [50, 51]. Метод заснований на проходженні електричного струму невеликої потужності (100 Вт/т) у штучно створеному ланцюгу «продувна фурма – шлаковий й металевий розплав». Це менш витратний метод, зважаючи на досить невелику потужність електричних впливів на металеву ванну і простоту

додаткового обладнання. В результаті його застосування досягається покращення технологічних та техніко-економічних показників конвертування.

Іншим методом електрофізичного впливу є використання методу попередньої електричної активізації газового струменя для збільшення кількості електрично заряджених часток газу, що активує їх потенціал хімічної взаємодії з розплавленою ванною та створює додатково дуже активні молекули озону [52].

В даній роботі представлено результати дослідження впливу електрофізичної активізації газового струменя кисню на фізико-хімічні процеси в кисневому конвертері.

Методика дослідження. Активізація кисневого струменя відповідно до розробок авторів [52] повинна відбуватися за рахунок високовольтного електричного розряду, який створюється безпосередньо на виході з продувної фурми. Це дозволить формувати у кисеньвмісному потоці окрім молекул активні часточки: атоми та йони різного заряду, а також деяку частку озону, який також в подальшому через невелику стійкість, особливо за високих температур, може розкладатися з утворенням хімічно активних часток.

Спираючись на теоретичні джерела та результати проведених раніше досліджень [53], можна сформулювати загальну спрощену схему зарядового стану конвертерної ванни (рис. 1). Представлене зображення є досить умовним, бо фази, що взаємодіють, знаходяться у постійному обміні зарядженими часточками й між різними окремими йонами утворюються складніші комплекси, що також несуть заряд. Саме тому виміряна емпірично природна різниця потенціалів між фазами в конвертері змінюється як за величиною, так і за полярністю [54].

Відповідно до робіт [55] в основний період продувки, етапом, що лімітує швидкість хімічної 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:



У випадку двоатомної молекули кисню подвійний зв'язок між двома атомами кисню має енергію зв'язку приблизно 498 кДж/моль. Це відносно багато, що означає, що для розриву цього подвійного зв'язку й підготовки молекули до хімічної взаємодії з іншим елементом потрібна значна енергія. Тобто молекули кисню не легко розпадаються на частини, вступаючи в реакцію з іншими речовинами. Навпаки,

вільний атом кисню, не має жодних зв'язків і, отже, не має жодної енергії зв'язку. Цей недолік енергії зв'язку є критичним фактором, який сприяє його високій реакційній здатності, оскільки він прагне утворити стабільні зв'язки для досягнення нижчого енергетичного стану. Тобто переведення молекулярного стану в атомарний значно активує молекули кисню. Це відбувається під час нагрівання газового потоку у реакційній зоні. Проте частка атомарного кисню при 2000 °С в реакційній зоні при продувці зверху складає 0,03%. Тобто «задачу створення атомарного кисню» при поглинанні розплавом покладено на йони в металевій та шлаковій фазах, взаємодія між якими має обмежену швидкість.

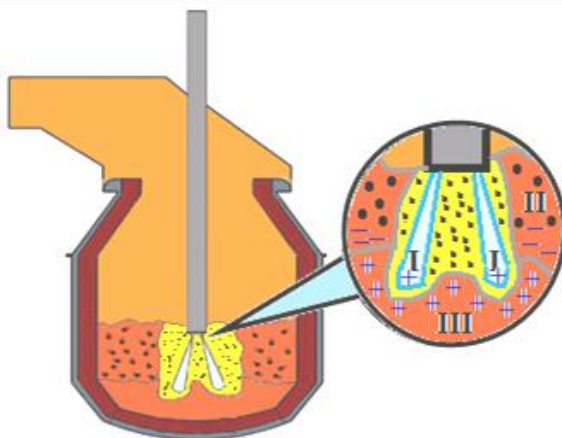
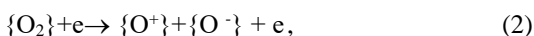
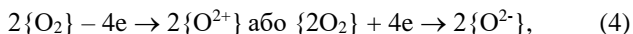
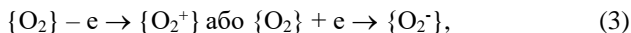


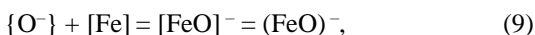
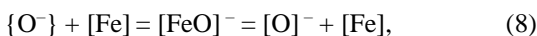
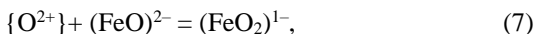
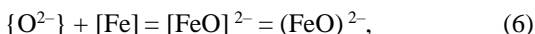
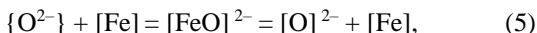
Рисунок 1 – Схематичне подання реакційного об'єму конвертерної ванни: I – газовий струмінь, що через високі температури 2500-2800°С має різний йонний склад O_2 , O^{2-} , O^{2+} ; II – шлакова фаза Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , O^{2-} , SiO_4^{4-} , PO_4^{3-} , S^{2-} ; III- металева фаза C^{4+} , Si^{4+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , H^+ , N^+ , O^{2-} , P^+ , S^{2-}

Утворення йону кисню ще більше підвищує активність останнього: при порівнянні енергії зв'язку йона кисню з молекулою та атомом встановлено значне зниження показників у 2,3 рази та 1,14 рази відповідно [56]. Таким чином, електрична активізація молекул кисню дозволить значно підвищити їх активність та повинна пришвидшити перебіг основних процесів в кисневому конвертуванні. Утворення йонів при високовольтовому електричному розряді можливо за різними схемами:

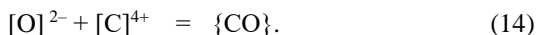
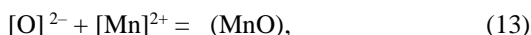
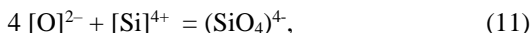




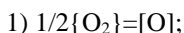
Вплив електричного розряду з формуванням йонів різного заряду сприяє реакціям потрапляння кисню в розплав через утворення різних комплексів, в першу чергу, із залізом:



Утворені кисень-залізні комплекси в подальшому стають складовими більших комплексів, наприклад з йонними кисень вмісними комплексами кальцію чи кремнію, та утворюють шлакову фазу, або окислюють основні домішки в металевій фазі:



Реакції між йонами мають назву окислювально-відновних й відбуваються між елементами які мають різний електродний потенціал [57-60]. Чим більше різниця електродних потенціалів між окисником й відновником, тим краще відбувається реакція окислення. У випадку киснево-конвертерного процесу основним окисником є продувний газ – кисень. Відповідно, його активізація й підвищення кількості йонів кисню відбувається на ймовірності перебігу тих чи інших реакцій за участю, перш за все, газоподібного кисню, яку можливо оцінити за допомогою параметру вільної енергії Гіббса [60]. В роботі були проаналізовані зміни параметру вільного перебігу хімічні реакції, що відбуваються у первинній реакційній зоні під час продувки металеві ванни киснем зверху (тобто реакцій за участю газоподібного кисню, який активізується):



- 2) $1/2\{O_2\} + [Fe] = (FeO)$;
- 3) $1/2\{O_2\} + [Mn] = (MnO)$;
- 4) $\{O_2\} + [Si] = (SiO_2)$;
- 5) $1/2\{O_2\} + [C] = \{CO\}$;
- 6) $\{O_2\} + [C] = \{CO_2\}$;
- 7) $1/2\{O_2\} + \{CO\} = \{CO_2\}$;
- 8) $1/2\{O_2\} + 2(FeO) = (Fe_2O_3)$;

(для реакцій 1 – 8 використана окрема не наскрізна нумерація для легкості подальшого аналізу й співставлення).

Для цих реакцій були розраховані енергії Гіббса для класичних умов продувки за рівнянням:

$$\Delta G = -RT \ln K_p + RT \cdot \sum k \cdot \ln P, \quad (15)$$

де R – універсальна газова стала (8,314 Дж/моль К); T – температура ванни, К; K_p – константа рівноваги, що має встановлену табличну залежність від температури в залежності від типу реакції [60]; k – кількість молей газоподібних величин, P – надмірний тиск, що діє на систему, атм.

А також для умов продувки активізованим киснем було розраховано вільну енергію Гіббса з урахуванням електродних потенціалів окислювано-відновних процесів:

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot (E_O - E_B) < 0, \quad (16)$$

де n – число електронів, які беруть участь в процесі; F – постійна Фарадея ($9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль); E_O та E_B – електродні потенціали окисника та відновника (eВ).

Електродний потенціал кисню у випадку продувки активізованим потоком, залежить від кількості сформованих йонів за одиницю часу. Ці данні були отримані з попередніх дослідження щодо встановлення йонного струму при проведенні активізації кисень вмісних газових потоків електричним розрядом [52].

Результати досліджень. Результати проведеного розрахунку для температури 1600 °С наведені на рис. 2. та у порівняльній таблиці 1. За даними, представленими, на діаграмі можна зробити висновок, що за участі активізованого електричним розрядом кисневого потоку величини вільної енергії Гіббса набувають більш від'ємних значень у

порівнянні з розрахованими даними для класичного варіанту перебігу реакцій. Тобто ймовірність протікання всіх хімічних реакцій за участю активованого газоподібного кисню у напрямку утворення оксидів зростає.

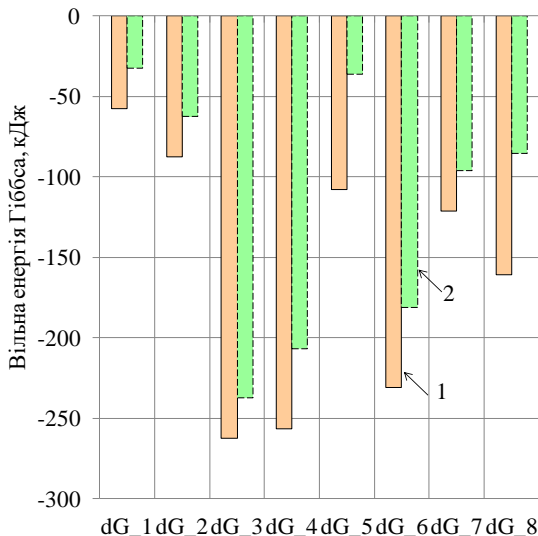


Рисунок 2 – Порівняння величин вільної енергії Гіббса для окислювальних процесів 1 – 8 за участі газової фази в порожнині кисневого конвертера: 1 – розрахунок для умов продувки активізованим кисневим потоком; 2 – розрахунок за стандартних умов продувки

Таблиця 1 - Зміна можливості перебігу реакцій 1 – 8 за участі продувки активізованим кисневим потоком

Номер реакції	1	2	3	4	5	6	7	8
Приріст вільної енергії Гіббса у порівнянні з класичним варіантом (рази)	1,77	1,40	1,11	1,24	3,00	1,28	1,26	1,88

Також слід відзначити, що найбільший приріст значень відмічено для реакції окислення вуглецю до CO (реакція 5 - у три рази у порівнянні з класичним варіантом) та для реакцій переходу кисню у розчинений в металевій фазі стан й утворення оксидів заліза з найвищим ступенем окислення (реакції 1 та 8 відповідно у 1,77 та 1,8 рази). Відповідно, отримані результати свідчать про потенційну можливість значної активізації основного процесу кисневого конвертування – окислення

вуглецю, як за рахунок взаємодії з активною кисеньвмісною газовою фазою, так і за рахунок взаємодії з розчиненим киснем, кількість якого повинна збільшитися відповідно до отриманих результатів розрахунків. Зазначений факт, відповідно, мусить позитивно вплинути на скорочення тривалості перебігу самого процесу конвертування, що є важливим показником інтенсифікації операції виплавки сталі. Крім того, підвищення ступеня розчинення кисню сприятиме перебігу й інших окислювальних реакцій та активнішому засвоєнню шлакоутворюючих матеріалів з активним наведенням шлаку, що також сприятиме підвищенню якісних показників конвертування.

Висновки

Узагальнюючи викладені матеріали, можна відзначити, що за результатами проведеного аналізу методів підвищення ефективності киснево-конвертерного процесу, заснованих на традиційних технологічних засадах, слід відзначити як найбільш впливові ті, що стосуються розробки й використання дутьових пристроїв різної конструкції. Інші традиційні напрямки вже у своїй більшості вичерпали можливості ефективного впливу на інтенсивність перебігу фізико-хімічних процесів. Серед інших методів фізичного впливу на продуктивність кисневого конвертування було відзначено напрям електричної активізації, а саме застосування впливу електричного розряду на кисневий струмінь. Це спричиняє як утворення вільних заряджених часток кисню у газі (йонів), так і подальше утворення озону. Термодинамічний аналіз впливу електричної активізації газового потоку із застосуванням показника вірогідності перебігу реакцій – енергії Гіббса, показав, що найбільше активується процес окислення вуглецю за рахунок взаємодії з йонами кисню у газовій фазі, що, в результаті, повинно скоротити тривалість перебігу всього процесу. Крім того підвищується вірогідність перебігу реакції розчинення кисню у розплаві, що також має позитивний вплив на конвертування.

Перелік посилань

1. Зражевский А. Д., Чернятевич А. Г., Сущенко А. В., Гриценко А. С. Состояние и дальнейшее совершенствование конструкций кислородных фурм в конвертерных цехах Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 6. С. 20-30.
2. Сущенко А. В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2009. Вип. 19. С. 36-41
3. Wang Z., Liu H., Wei S., Liu Q., Lu X. Effect of blowing parameters on bath mixing efficiency during basic oxygen furnace steelmaking process. *Engineering Reports*. 2021. Vol. 3. P. 1-10
4. Asahara N., Naito K., Kitagawa I., Matsuo M., Kumakura M., Iwasaki M.

Fundamental study on interaction between top blown jet and liquid Bath. *Steel Research International*. 2011. Vol. 82. P. 587-594. <https://doi.org/10.1002/srin.201100041>

5. Cao L. L., Liu Q., Wang Z., Li N. Interaction behavior between top blown jet and molten steel during BOF steelmaking process. *Ironmaking and Steelmaking*. 2018. Vol. 45. P. 39-248. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1255373>

6. Chou J. M., Chuang M. C., Yeh M. H. Effects of process conditions on mixing between molten iron and slag in smelting reduction vessel via water model study. *Ironmaking and Steelmaking*. 2003. Vol. 30. P. 195-202. <https://doi.org/10.1179/030192303225009605>

7. Odenthal H.-J., Grygorov P., Reifferscheid M., Schlüter J. Advanced blowing and stirring conditions in the BOF process. AISTech 2013 – The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, 6-9 May 2013, Pittsburgh, PA, USA. P. 897-909

8. Wang M.-l., Lu Y.-H., Yang W.-Y., Li Sh.-G., Xu X.-W. Selection of Oxygen Pressure in BOF Steelmaking. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2011. Vol. 18. Iss. 11. P. 12-16. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60110-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60110-6)

9. Lima W., Maia B. T. BOF Lance and Functions. Conference proceedings of AISTech 2022, Pittsburgh. P. 480-493

10. Li Z.-Z., Zhu R., Liu R.-Z., Lü M. Effect of oxygen lance position on the flow velocity of molten steel in BOF. *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2014. Vol. 36. P. 15-20. <https://doi.org/10.13374/j.issn1001-053x.2014.s1.004>

11. Богушевский В. С., Грабовский Г. Г., Церковницкий Н. С, Ушаков В. А. Система управления конвертерной плавкой. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. №4. С. 232 – 235.

12. Dering D., Swartz C. L. E., Dogan N. A dynamic optimization framework for basic oxygen furnace operation. *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 241. 116653 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116653>

13. Dering D., Swartz C.L.E. , Dogan N. A. Dynamic modeling and simulation of basic oxygen furnace (BOF) operation. *Processes*, 2020. vol. 8(4). P.483-506. <https://doi.org/10.3390/pr8040483>

14. Баптизманский В. И., Охотский В. Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. Киев-Донецк : Вища школа, 1981. 182 с.

15. Старов Р. В. Развитие теории и разработка оптимальной технологии конвертерного процесса на базе исследования изменения окисленности шлака по ходу продувки: автореф. дис. д-р техн. наук: 05.16.02, ДМетИ. Днепропетровск, 1995. 50 с.

16. Охотский В. Б. Оптимизация режима продувки сверху в конвертере. *Металл и литьё Украины*. 1997. № 11-12. С. 34 – 37.

17. Li M. M., Li Q., Li L., He Y. B., Zou Z. S. Effect of operation parameters on supersonic jet behavior of BOF six-nozzle oxygen lance. *Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications*. 2014. Vol. 41. Iss. 9. P. 699-709. <https://doi.org/10.1179/1743281213Y.0000000154>

18. Li M., Li Q., Kuang S. B., Zou Z. Coalescence characteristics of supersonic

jets from multi-nozzle oxygen lance in steelmaking BOF. *Steel research Int.* 2015. Vol. 86. Iss.12. P. 1517-1529 <https://doi.org/10.1002/srin.201400506>

19. Smith G. C. Multiple jet oxygen lances. Theoretical analysis and correlation with practice. *JOM.* 1966. Vol. 18. No. 7. P. 846-851. <https://doi.org/10.1007/BF03378475>

20. Amano S., Sato S., Takahashi Y., Kikuchi N. Effect of top and bottom blowing conditions on spitting in converter. *Engineering Reports.* 2021. Vol. 3. Iss. 123, e12406. <https://doi.org/10.1002/eng2.12406>

21. Schmandt B., Herwig H. Diffuser and nozzle design optimization by entropy generation minimization. *Entropy.* 2011. Vol. 13. No. 7. P. 1380-1402. <https://doi.org/10.3390/e13071380>

22. Silveira D. C., Hamadeh H., Pastel K., Huber J. C., Brosse G. Effect of supersonic nozzle design on jet behavior in BOF steelmaking. ABM Proceedings, October 1st -3 rd, 2019, São Paulo, SP, Brazi. 2019. P. 1-12 <https://doi.org/10.5151/2594-5300-33520>

23. Bhattacharya T., Zhan L., Chukwulebe B. Design considerations of supersonic oxygen lances for a Basic Oxygen Furnace (BOF). SCANMET V. 2016. Sweden. P. 1-11.

24. Сущенко А.В. Развитие конструкций кислородно-конвертерных фурм с центральным сопловым модулем. *Вісник приазовського державного технічного університету. Технічні науки.* 2011. Вип. 22. С. 60 - 67

25. Liu F., Sun D., Zhu R., Zhao F., Ke J. Effect of nozzle twisted oxygen lance on flow field and dephosphorisation rate in converter steelmaking process. *Ironmaking & Steelmaking.* 2017. Vol. 44. No. 9. P.1-9. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1226562>

26. Higuchi, Y., Tago, Y. Effect of nozzle twisted lance on jet behavior and spitting rate in top blown process. *ISIJ Int.* 2003. Vol. 43. P. 1410 – 1414. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1410>.

27. Liu G., Liu K., Han P. Metallurgical performance of innovative double-parameter oxygen lance in BOF steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking.* 2021. Vol. 48. Iss. 4. P. 1-10. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1806677>

28. Liu G., Liu K., Han P., Chen Y. Numerical investigation on behaviors of interlaced jets and their interaction with bath in BOF steelmaking. *AIP Advances.* 2019. Vol. 9, 075202. <https://doi.org/10.1063/1.5100170>

29. Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Юшкевич П. О. Питання теорії і практики підвищення ефективності комбінованої продувки конвертерної ванни. *Теорія і практика металургії.* 2018. № 1-2. С. 83-95

30. Молчанов Л. С., Чернятевич А. Г., Вакульчук В. В., Юшкевич П. О., Чубін К. І. Оценка влияния конструкций многоярусных кислородных фурм на эффективность продувки конвертерной ванны с дожиганием отходящих газов. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* 2018. Вип. 32. С. 208-219. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/160023>

31. Вергун А. С., Чернятевич А. Г., Нестеров А. С., Чайка А. Л. Современный технологический маршрут конвертерного производства качественного железобудородистого полупродукта в сырьевых и энергетических условиях Украины. *Метал та лиття України.* 2020. Вип. 28. №1 (320). С. 30 - 37.

<https://doi.org/10.15407/steelcast2020.01.030>

32. Li J., Ma Zh., Chen Ch., Zhang J., Wang B. Behavior of top-blown jet under a new cyclone oxygen lance during BOF steelmaking process. *MDPI. Processes*. 2022. Vol. 10. P. 507-523. <https://doi.org/10.3390/pr10030507>

33. Sarma B., Mathur P. C., Selines R. J., Anderson J. E. Fundamental aspects of coherent gas jets. Electric furnace conf. proc. 1998. Vol. 56. P. 657 – 72.

34. Mahoney W. J. Experimental remarks on supersonic jet behavior in high temperature, reactive ambient in connection to steelmaking. AISTech-Iron and Steel Technology Conf. Proc., Pittsburgh, PA, 2010. P. 1071–1079

35. Meidani A. R. N., Isac M., Richardson A., Cameron A., Guthrie R. I. L. Modelling shrouded supersonic jets in metallurgical reactor vessels. *ISIJ Int*. 2004. Vol. 44. P. 1639–1645.

36. Zhao F., Sun D., Zhu R. Effect of shrouding gas parameters on characteristics of supersonic coherent jet. *Metall. Mater. Trans. B*. 2017. Vol. 48. P. 1807–1816. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-0931-y>

37. Golub T., Molchanov L., Semykin S., Vakulchuk V. Evaluating the efficiency of using coherent-type nozzles for the conditions of additional postcombustion of CO to CO₂ in the working space of the oxygen converter. *Science and Innovation*. 2024. Vol. 20. No. 2. P. 50–59. <https://doi.org/10.15407/scine20.02.050>

38. Golub T., Molchanov L., Semykin S. Studying the possibility of using coherent type nozzles for BOF blowing at the dynamic simulation stand. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. No. 4. P. 79–92. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.079>

39. Biswas J., Hazaveh P. K., Coley K. S. Slagelectrical conductivity and its effect on mass transport and interfacial reaction kinetics. *Steel Research International*. 2024. Vol. 11. <https://doi.org/10.1002/srin.202300701>

40. Belashchenko D. The Relationship between electrical conductivity and electromigration in liquid metals. *Dynamics*. 2023. Vol. 3. No. 3. P. 405 – 424. <https://doi.org/10.3390/dynamics3030022>

41. Охотский В. Б. Шлакообразование в конвертерных системах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 7. С. 130 - 132.

42. Masson C. R., Smith I. B., Witeway S. G. Activities and ionic distribution in liquid silicates: application of polymer theory of to silicate melts. *Can. J. Chem*. 1971. Vol. 48. P. 1456-1464

43. Bockris J. O'M., Sen R. K., Mittal K. L. On quantum electrochemical. *J. Res. Ind. Catalysis*. Hokkaido Univ., 1972. Vol. 20. No. 3. P. 153 – 184.

44. Bockris J. O'M. Modern electrochemistry 2B. Electroics in chemistry, engineering, biology and environmental science. Thecond ed. – New York: Kluwer academic plenum, 1998. 2062 p.

45. Wang H.-C., Xia W.-Z., Bao G.-D, Liao Z.-Y., Wu T., Lei J. Influence mechanism of direct current electric field on the sulfur removal of fluorine-containing spent refining slag. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023. Vol. 11. Iss. 6, 111271 <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111271>

46. Xia W.-Z., Wu T., Lei J., Zhang C., Bao G.-D., Wang H.-C. Directional sulfur removal from ladle furnace slag by electric field strengthening treatment. *Steel research Int*. 2023. Vol. 94. Iss. 12, 2300182. <https://doi.org/10.1002/>

srin.202300182

47. McTaggart F. K. Plasma chemistry in electrical discharges. Elsevier, Amsterdam, 1967. 253p.

48. Nasser E. Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics. Wiley Interscience, New York, 1971. 456 p.

49. Huang Z., Liu L., Zhao T., Hu M., Qi J., Yan H. Investigation on heat transfer and fluid flow of a plasma arc in a plasma melting furnace: Model validation and parameter effects. Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 257. Part A, 124301. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124301>

50. Семькин С. И., Поляков В. Ф., Семькина Е. В. Особенности влияния электрической энергии малой мощности на рафинирующую способность конвертерного шлака. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1998. № 1. С. 26 – 30.

51. Семькин С. И., Поляков В. Ф., Семькина Е. В. Ресурсо- и энергосберегающая технология конвертерной плавки с электрическими воздействиями. *Металл и литье Украины*. 2004. № 11. С. 46 – 48.

52. Семькин С. И., Голуб Т. С., Прокопенко П. Г. Стендовое исследование особенностей электрофизической активизации газового кислородсодержащего потока. *Сучасні проблеми металургії*. 2019. №22. С. 94–103. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2019.01.10>

53. Семькин С. И., Кияшко Т. С., Семькина Е. В. Исследование особенностей влияния низковольтного потенциала на процессы рафинирования металла в кислородном конвертере. *Металл и литье Украины*. 2011. № 7. С. 29 – 33. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MLU_2011_7_7

54. Golub T. S., Semykin S. I. Investigation of electric potential difference during the top oxygen blowing in converter. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2018. Vol. 88. No. 1. P. 35–40. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.5869>

55. Bandyopadhyay D., Singh S. D., Sanyal D., Singh K. K., Singh K. N. A study on dissolution kinetics of carbon in liquid iron bath. *Chemical Engineering Journal*. 2003. Vol. 94. Iss. 2. P. 79–92. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00030-X)

56. Семькин С. И., Голуб Т. С., Молчанов Л. С., Прокопенко П. Г. Аналіз механізмів впливу активізованих струменів кисню на процеси виділення пилу в киснево-конвертерному виробництві. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 246 - 259

57. Novikov V. K., Spiridonov M. A., Sangalova I. S. Chemical thermodynamics and elements of structure in oxide melts. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. Vol. 98. No. 1, 012020. P. 1 - 5

58. Carter P. T., Macfarlane T. G. Thermodynamics of slag. *J. Iron and Steel Inst.* 1957. Vol. 173. № 1. P. 62 – 66.

59. Turkdogan E. T. Fundamentals of Steelmaking. The Institute of Materials, London, 1996. 331 p.

60. Atkins P., de Paula J. and Keeler J. Physical Chemistry. 12 edition. Oxford University press, 2022. 976 p.

References

1. Zrazhevskiy, A. D., Cherniatevych, A. G., Sushenko, A. V., Gritsenko, A. S. (2014). Sostojanie I dalneishee sovershenstvovanie konstrukcii kislorodnyh furn v konvertornyh cegah Ukrainy. *Metallurgical and mining industry*, 6, 20-30
2. Sushchenko, A. V. (2009). Sovershenstvovanie I optimizaciia dutevyh rezhymov I ustrojstv kislorodnyh konverterov. *Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, 19, 36 – 41
3. Wang, Z., Liu, H., Wei, S., Liu, Q., & Lu, X. (2021). Effect of blowing parameters on bath mixing efficiency during basic oxygen furnace steelmaking process. *Engineering Reports*, 3, 1-10
4. Asahara, N., Naito, K., Kitagawa, I., Matsuo, M., Kumakura, M., & Iwasaki, M. (2011). Fundamental study on interaction between top blown jet and liquid Bath. *Steel Research International*, 82, 587-594. <https://doi.org/10.1002/srin.201100041>
5. Cao, L. L., Liu, Q., Wang, Z., & Li, N. (2018). Interaction behavior between top blown jet and molten steel during BOF steelmaking process. *Ironmaking and Steelmaking*, 45, 39-248. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1255373>
6. Chou, J. M., Chuang, M. C., & Yeh, M. H. (2003). Effects of process conditions on mixing between molten iron and slag in smelting reduction vessel via water model study. *Ironmaking and Steelmaking*, 30, 195-202. <https://doi.org/10.1179/030192303225009605>
7. Odenthal, H.-J., Grygorov, P., Reifferscheid, M., & Schlüter, J. (2013). Advanced blowing and stirring conditions in the BOF process. *AISTech 2013 – The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, 6-9 May 2013, Pittsburgh, PA., USA*, pp. 897-909
8. Wang, M.-l., Lu, Y.-H., Yang, W.-Y., Li, Sh.-G., & Xu, X.-W. (2011). Selection of Oxygen Pressure in BOF Steelmaking. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18(11), 12-16. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60110-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60110-6)
9. Lima, W., & Maia, B. T. (2022). BOF Lance and Functions. *Conference proceedings of AISTech 2022, Pittsburgh*, pp. 480-493
10. Li, Z.-Z., Zhu, R., Liu, R.-Z., & Lü, M. (2012). Effect of oxygen lance position on the flow velocity of molten steel in BOF. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 36, 15-20. <https://doi.org/10.13374/j.issn1001-053x.2014.s1.004>
11. Bogushevskij, V. S., Grabovskij, G. G., Tserkovnikov, N. S., & Ushakova, V. A. (2007). Sistema upravlenia konverternoj plavkoj. *Metallurgical and mining industry*, (4), 232 – 235
12. Dering, D., Swartz, C. L. E., & Dogan, N. (2011). A dynamic optimization framework for basic oxygen furnace operation. *Chemical Engineering Science*, 241, 116653 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116653>
13. Dering, D., Swartz, C. L. E., & Dogan, N. A. (2020). Dynamic modeling and simulation of basic oxygen furnace (BOF) operation. *Processes*, 8(4), 483-506. <https://doi.org/10.3390/pr8040483>
14. Baptizmanskiy, V. I., & Okhotskiy, V. B. (1981). *Fiziko-himicheskie osnovy kislorodno-konverternogo processa*. Vysha shkola

15. Starov, R. V. (1995). *Razvitie teorii I razrabotka optimalnoj tehnologii konverternogo processa na baze issledovania izmenenia okislennosti shlaka po hodou produvki*: abstract dis. Doctor of tech. sciences: 05.16.02, Dnepropetrovsk
16. Okhotskiy, V. B. (1997). Optimizacia rezima produvki sverhu v konvertere. *Metal and casting of Ukraine*, 11-12, 34 – 37
17. Li, M. M., Li, Q., Li L., He, Y. B. & Zou, Z. S. (2014). Effect of operation parameters on supersonic jet behavior of BOF six-nozzle oxygen lance. *Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications*, 41(9), 699-709. <https://doi.org/10.1179/1743281213Y.0000000154>
18. Li, M., Li Q., Kuang, S. B., & Zou, Z. (2015). Coalescence characteristics of supersonic jets from multi-nozzle oxygen lance in steelmaking BOF. *Steel research Int.*, 86(12), 1517-1529. <https://doi.org/10.1002/srin.201400506>
19. Smith, G. C. (1966). Multiple jet oxygen lances. Theoretical analysis and correlation with practice. *JOM*, 18(7), 846-851. <https://doi.org/10.1007/BF03378475>
20. Amano, S., Sato, S., Takahashi, Y., & Kikuchi, N. (2021) Effect of top and bottom blowing conditions on spitting in converter. *Engineering Reports*, 3(123), e12406. <https://doi.org/10.1002/eng2.12406>
21. Schmandt, B., & Herwig, H. (2011). Diffuser and nozzle design optimization by entropy generation minimization. *Entropy*, 13(7), 1380-1402. <https://doi.org/10.3390/e13071380>
22. Silveira, D. C., Hamadeh, H., Pastel, K., Huber, J. C. & Brosse, G. (2019). Effect of supersonic nozzle design on jet behavior in BOF steelmaking. *ABM Proceedings, October 1st -3 rd, 2019, São Paulo, SP, Brazi*. P. 1-12 <https://doi.org/10.5151/2594-5300-33520>
23. Bhattacharya, T., Zhan, L., & Chukwulebe, B. (2016) Design considerations of supersonic oxygen lances for a Basic Oxygen Furnace (BOF). *SCANMET V, Sweden*. P. 1-11.
24. Sushchenko, A. V. (2011). Razvitie konstrukcii kislorodno-konverternih furn s centralnym soplovyim module. *Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences.*, 22, 60 – 67
25. Liu, F., Sun, D., Zhu, R., Zhao, F., & Ke, J. (2017). Effect of nozzle twisted oxygen lance on flow field and dephosphorisation rate in converter steelmaking process. *Ironmaking & Steelmaking*, 44(9), 1-9. <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1226562>
26. Higuchi, Y., & Tago, Y. (2003). Effect of nozzle twisted lance on jet behavior and spitting rate in top blown process. *ISIJ Int.*, 43, 1410–1414. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1410>
27. Liu, G., Liu, K., & Han, P. (2021). Metallurgical performance of innovative double-parameter oxygen lance in BOF steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*, 48(4),1-10. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1806677>
28. Liu, G., Liu, K., Han, P., & Chen, Y. (2019). Numerical investigation on behaviors of interlaced jets and their interaction with bath in BOF steelmaking. *AIP Advances*, 9, 075202. <https://doi.org/10.1063/1.5100170>
29. Cherniatevych, A .G., Molchanov, L. S., & Yushkevich, P. O. (2018). Pytannia teorii I praktyky podvyshennia efektyvnosti kombinovanoi produvki

konverternoi vanny. *Theory and practice of metallurgy*, 1-2, 83–95

30. Molchanov, L. S., Cherniatevych, A. G., Vakulchuk, V. V., Yushkevich, P. O., & Chubin, K. I. (2018). Ocenka vlijanja konstrukcii mnogojarusnyh kislorodnyh furn na effektivnost produktivki konverternoj vanny s dozhiганиem othodiashih gazov. *Fundamental and applied issues of ferrous metallurgy*, 32, 208–219. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/160023>

31. Vergun, A. S., Cherniatevych, A. G., Nesterov, A. S., & Chayka, A. L. (2020). Sovremenniy tehnologicheskij marshrut konverternogo proizvodstva kachestvennogo zhelezouglerodistogo poluprodukta v syrevyh I energeticheskikh usloviyah Ukrainy. *Metal and casting of Ukraine*, 28(320), 30-37. <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.01.030>

32. Li, J., Ma, Zh., Chen, Ch., Zhang, J., & Wang, B. (2022). Behavior of top-blown jet under a new cyclone oxygen lance during BOF steelmaking process. *MDPI Processes*, 10, 507-523. <https://doi.org/10.3390/pr10030507>

33. Sarma, B., Mathur, P. C., Selines, R. J., & Anderson, J. E. (1998). Fundamental aspects of coherent gas jets. *Electric furnace conf. proc.* 56, 657–72

34. Mahoney, W. J. (2010). Experimental remarks on supersonic jet behavior in high temperature, reactive ambient in connection to steelmaking. *AISTech-Iron and Steel Technology Conf. Proc., Pittsburgh, PA*. P. 1071–1079

35. Meidani, A. R. N., Isac, M., Richardson, A., Cameron, A. and Guthrie, R. I. L. (2004). Modelling shrouded supersonic jets in metallurgical reactor vessels. *ISIJ Int.*, 44, 1639–1645

36. Zhao, F., Sun, D., & Zhu, R. (2017). Effect of shrouding gas parameters on characteristics of supersonic coherent jet. *Metall. Mater. Trans. B.*, 48, 1807–1816. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-0931-y>

37. Golub, T., Molchanov, L., Semykin, S. & Vakulchuk, V. (2024). Evaluating the efficiency of using coherent-type nozzles for the conditions of additional postcombustion of CO to CO₂ in the working space of the oxygen converter. *Science and Innovation*, 20(2), 50 – 59. <https://doi.org/10.15407/scine20.02.050>

38. Golub, T., Molchanov, L. & Semykin, S. (2023). Studying the possibility of using coherent type nozzles for BOF blowing at the dynamic simulation stand. *Science and Innovation*, 19(4). P. 79 – 92. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.079>

39. Biswas, J., Hazaveh, P. K., & Coley, K. S. (2024). Slag electrical conductivity and its effect on mass transport and interfacial reaction kinetics. *Steel Research International*, 11. <https://doi.org/10.1002/srin.202300701>

40. Belashchenko, D. (2023). The Relationship between electrical conductivity and electromigration in liquid metals. *Dynamics*, 3(3), 405–424. <https://doi.org/10.3390/dynamics3030022>

41. Okhotskiy, V. B. (2006). Shlakoobrazovanie v konverternyh sistemah. *Metallurgical and mining industry*, 7, 130-132

42. Masson, C. R., Smith, I. B., & Witeway, S. G. (1971). Activities and ionic distribution in liquid silicates: application of polymer theory of silicate melts. *Can. J. Chem.*, 48, 1456 - 1464

43. Bockris, J. O' M., Sen, R. K., Mittal, K. L. (1972). On quantum electrochemical. *J. Res. Ind. Catalysis. Hokkaido Univ*, 20(3), 153–184

44. Bockris, J. O'M. (1998). *Modern electrochemistry 2B. Electrode in chemistry, engineering, biology and environmental science*. New York: Kluwer academic plenum

45. Wang, H.-C., Xia, W.-Z., Bao, G.-D., Liao, Z.-Y., Wu, T., & Lei, J. (2023). Influence mechanism of direct current electric field on the sulfur removal of fluorine-containing spent refining slag. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111271. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111271>

46. Xia, W.-Z., Wu, T., Lei, J., Zhang, C., Bao, G.-D., & Wang, H.-C. (2023). Directional sulfur removal from ladle furnace slag by electric field strengthening treatment. *Steel research Int.*, 94(12), 2300182. <https://doi.org/10.1002/srin.202300182>

47. McTaggart, F. K. (1967). *Plasma chemistry in electrical discharges*. Elsevier, Amsterdam

48. Nasser, E. (1971). *Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics*. Wiley Interscience, New York. 456 p.

49. Huang, Z., Liu, L., Zhao, T., Hu, M., Qi, J., & Yan, H. (2024). Investigation on heat transfer and fluid flow of a plasma arc in a plasma melting furnace: Model validation and parameter effects. *Applied Thermal Engineering*, vol. 257, part A, 124301 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124301>

50. Semykin, S. I., Poliakov, V. F., & Semykina, Ye. V. (1998). Osobennosti vlijania elektricheskoy energii maloj moshnosti na rafiniruushiu sposobnost konverternogo shlaka. *Metallurgical and mining industry*, 1, 26 – 30

51. Semykin, S. I., Poliakov, V. F., & Semykina, Ye. V. (2004). Resurso- I energosberegaushaja tehnologija konverternoj plavki s elektricheskimi vozdeystvijami. *Metall and casting of Ukraine*, 11, 46–48

52. Semykin, S. I., Golub, T. S., & Prokopenko, P. G. (2019). Stendovoe issledovanie osobennostej elektrofizicheskoy aktivizacii gazovoga kislorodsoderzhashego potoka. *Modern problems of metallurgy*, 22, 94-103. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2019.01.10>

53. Semykin, S. I., Kiiashko, T. S., & Semykina, Ye. V. (2011). Issledovanie osobennostej vlijania nizkovoltnogo potenciala na process rafinirovania metalla v kislorodnom konvertere. *Metal and casting of Ukraine*, 7, 29–33. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MLU_2011_7_7

54. Golub, T. S., & Semykin, S. I. (2018). Investigation of electric potential difference during the top oxygen blowing in converter. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 88(1), 35–40. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.5869>

55. Bandyopadhyay, D., Singh, S. D., Sanyal, D., Singh, K. K., & Singh, K. N. (2003). A study on dissolution kinetics of carbon in liquid iron bath. *Chemical Engineering Journal*, 94(2), 79–92. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00030-X)

56. Semykin, S. I., Golub, T. S., Molchanov, L. S., & Prokopenko, P. G. (2023). Analiz mehanizmv vplyvu aktyvizovanyh strumenav kysnu na processy vydilannia pylu v kysnevo-konverternomu vyrobnyctvi. *Fundamental and applied issues of ferrous metallurgy*, 37, 246 – 259

57. Novikov, V. K., Spiridonov, M. A., & Sangalova, I. S. (2008). Chemical

thermodynamics and elements of structure in oxide melts. *Journal of Physics: Conference Series*, 98(1), 012020

58. Carter, P. T., & Macfarlane, T. G. (1957). Thermodynamics of slag. *J. Iron and Steel Inst.*, 173(1), 62 – 66

59. Turkdogan, E. T. (1996). *Fundamentals of Steelmaking*. The Institute of Materials, London

60. Atkins P., de Paula J., & Keeler J. (2022). *Physical Chemistry*. 12 edition. Oxford University press

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

L. S. Molchanov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6139-5956

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

COMPLEX ANALYSIS OF METHODS OF INCREASE IN STEEL PRODUCTION EFFICIENCY ON THE EXAMPLE OF THE APPLICATION OF ELECTRICAL ACTIVATION OF THE OXYGEN FLOW IN TOP BLOW CONVERTERS

Abstract. Dynamic modernity and the rapid development of science and technology require the steel industry to constantly improve and intensify all stages of production without significant material costs in order to maintain competitiveness on the construction materials market. This also applies to the currently most effective method of obtaining a liquid metal semi-product - the oxygen-converter method of production. During its existence, being in constant improvement, for the oxygen-converter method, rational indicators of technological factors that can intensify the process have already been thoroughly researched and established, optimal limits of their use have been found, that limits their further improvement. Therefore, new methods of physical influence come to the fore, among which the development of a method of activation of an oxygen gas jet with an electric discharge is relevant. The method proposed by the authors for creating a high-voltage discharge at the outlet of the blowing device was investigated in the paper. This causes the formation of free charged oxygen particles in the gas (ions), that are more active than molecular oxygen in dissolving and interacting with other chemical compounds. The main direction of research reflected in the paper was the thermodynamic analysis of the influence of activation by a high-voltage discharge of an oxygen jet on the course of reactions involving the gaseous phase. The calculations were performed with respect to the Gibbs free energy. This parameter is an indicator of the probability of the free flow of reactions with the formation, in this case, of oxide products. It is indirectly responsible for the intensity of the entire oxygen converter process. Calculations were made for oxidation reactions of melt components in the reaction zone, taking into account the effect of the number of activated particles on the electrode potentials, first of all, of gaseous oxygen. According to the results of the analysis, it was concluded that the process of carbon oxidation and the process of oxygen dissolution in the iron-carbon melt are mainly activated due to the action of gaseous oxygen ions. Accordingly, this should both intensify the course of oxygen converter

process itself with active slag formation and the active flow of all oxidation processes, and shorten its duration.

Key words: oxygen-converter process, top blowing with oxygen, high-voltage electric discharge, ions, oxidation reactions, Gibbs free energy.

For citation: Golub, T. S., & Molchanov, L. S. (2024). Complex analysis of methods of increase in steel production efficiency on the example of the application of electrical activation of the oxygen flow in top blow converters. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 199-221. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-199-221>

Стаття надійшла до редакції збірника 01.11.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)