

КОНЦЕПЦІЯ РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДОДАТКОВИХ ПРОДУВНИХ БЛОКІВ БАГАТОЯРУСНОЇ ФУРМИ

Встановлено, що у сучасних умовах роботи з урахуванням нестабільності у забезпеченні сировинної бази для киснево-конвертерних цехів Національних металургійних підприємств України з точки зору підвищення ефективності є актуальним впровадження багатоярусних конструкцій верхніх фурм. Аналіз літературних джерел показав, що незважаючи на промисловий та експериментальний досвід використання багатоярусних фурм у киснево-конвертерному виробництві, на сьогодні відсутні методики розрахунку для отримання їх конструктивних параметрів, що може призвести до виявлення ряду суттєвих недоліків пов'язаних з цим у разі експлуатації в умовах роботи Національних металургійних підприємств України фурм такого типу, розроблених за різними емпіричними підходами. Відповідно до цього постала необхідність у розробці концепції методики для розрахунку основних конструктивних параметрів додаткових продувних блоків багатоярусної фурми. За рахунок проведення аналітичних та розрахунково-статистичних досліджень з застосуванням існуючих методик для розрахунку конструктивних параметрів верхніх фурм та за подальшої обробки отриманих даних уперше запропоновано вітчизняну концепцію методики з 18 рівнянь для визначення основних конструктивних параметрів додаткових продувних блоків багатоярусної фурми. Розроблена методика дозволяє визначити: кількість додаткових продувних блоків у багатоярусній фурмі $N_{нб}$; мінімальну $H_{нб}^{\min}$ та максимальну $H_{нб}^{\max}$ висоту їх розташування відносно торця головки багатоярусної фурми; вільну довжину стовбура фурми $H_{сд}^{\phi}$ відносно висоти розташування останнього додаткового продувного блоку з урахуванням поширення факелів допалювання, до торця наконечника багатоярусної фурми, за базової кількості додаткових продувних блоків. Встановити основні параметри циліндричних сопел у n -му додатковому продувному блоці багатоярусної фурми: кут нахилу до вертикальної осі фурми $\alpha_{ц}^{n, нб}$; кількість $n_{ц}^n$; довжину $l_{ц}^n$; кут між осями сусідніх сопел $\phi_{ц}^n$. Для знаходження вищезазначених основних конструктивних параметрів розроблені необхідні допоміжні рівняння, що дозволяють визначити характеристики звукових струменів, що витікають з циліндричних сопел додаткових продувних блоків: довжину вертикального та горизонтального розповсюдження факела допалювання $l_{сф}^{n, нб}$, $l_{гф}^{n, нб}$; діаметр завіси факелів допалювання $D_{зз}^{n, нб}$. Запропоновано рівняння для встановлення максимально допустимого сумарного використання дуття на n -ну кількість додаткових продувних блоків та мінімально доцільної витрати дуття на один додатковий блок для проведення основних допоміжних технологічних операцій з застосуванням багатоярусної фурми.

Ключові слова: конвертер, багатоярусна фурма, триярусна фурма, двоярусна фурма, додаткові продувні блоки, методика розрахунку.

Юшкевич П.О. Концепция расчета основных конструктивных параметров дополнительных продувочных блоков многоярусной фурмы. Установлено, что в современных условиях работы с учетом нестабильности в обеспечении сырьевой базы для кислородно-конвертерных цехов Национальных металлургических пред-

* канд. техн. наук, науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, isi.dps.r@gmail.com

приятий України с точки зрения повышения эффективности является актуальным внедрение многоярусных конструкций верхних фурм. Анализ литературных источников показал, что, несмотря на промышленный и экспериментальный опыт использования многоярусных фурм в кислородно-конвертерном производстве, на сегодняшний день отсутствуют методики расчета для получения их конструктивных параметров, что может привести к выявлению ряда существенных недостатков, связанных с этим в случае эксплуатации в условиях работы Национальных металлургических предприятий Украины фурм такого типа, разработанных по разным эмпирическим подходам. В соответствии с этим возникла необходимость в разработке концепции методики для расчета основных конструктивных параметров дополнительных продувочных блоков многоярусной фурмы. За счет проведения аналитических и расчетно-статистических исследований с применением существующих методик для расчета конструктивных параметров верхних фурм и дальнейшей обработки полученных данных впервые предложена отечественная концепция методики из 18 уравнений для определения основных конструктивных параметров дополнительных продувочных блоков многоярусной фурмы. Разработанная методика позволяет определить: количество дополнительных продувочных блоков в многоярусной фурме $N_{нб}$; минимальную $H_{нб}^{\min}$ и максимальную $H_{нб}^{\max}$ высоту их расположения относительно торца головки многоярусной фурмы; свободную длину ствола фурмы $H_{св}^{\phi}$ относительно высоты расположения последнего дополнительного продувочного блока с учетом распространения факелов дожигания, к торцу наконечника многоярусной фурмы, при базовом количестве дополнительных продувочных блоков. Установить основные параметры цилиндрических сопел в n -м дополнительном продувочном блоке многоярусной фурмы: угол наклона к вертикальной оси фурмы $\alpha_{ц}^{ннб}$; количество $n_{ц}^n$; длину $l_{ц}^n$; угол между осями соседних сопел $\phi_{ц}^n$. Для нахождения вышеуказанных основных конструктивных параметров разработаны необходимые вспомогательные уравнения, которые позволяют определить характеристики звуковых струй, вытекающих из цилиндрических сопел дополнительных продувочных блоков: длину вертикального $l_{св\phi}^{ннб}$ и горизонтального $l_{г\phi}^{ннб}$ распространения факелов дожигания; диаметр завесы факелов дожигания $D_{зз}^{ннб}$. Предложены уравнения для определения максимально допустимого суммарного использования дутья на n -ное количество дополнительных продувочных блоков и минимально целесообразного расхода дутья на один дополнительный блок для проведения основных вспомогательных технологических операций с применением многоярусной фурмы.

Ключевые слова: конвертер, многоярусная фурма, трехъярусная фурма, двухъярусная фурма, дополнительные продувочные блоки, методика расчета.

P.O. Yushkevich. Method of calculation the main constructive parameters of additional pugre unit for the multi-tier tuyere. It has been established that under modern working conditions, because of the instability in the provision of raw materials for oxygen-converter production at national metallurgical enterprises of Ukraine it is important, in terms of efficiency, to introduce multi-tier tuyeres. The analysis of literature sources showed that despite the industrial and experimental experience of using multi-tier tuyere in oxygen-converter production, nowadays there are no calculation methods to achieve their design parameters; it may result in lots of drawbacks. Accordingly, there appeared a need to develop a methodology for calculating the design parameters of additional purge units of multi-tier tuyeres. Due to analytical and calculation-statistical studies using the existing methods for calculating the design parameters of the tuyere with upper lances and further processing of the data, a calculation method including eighteen equations for determining the basic design parameters of additional purge

units of the multi-tier tuyere has been created. This methodology makes it possible to determine: the quantity of additional purge units in the multi-tier tuyere $N_{n\phi}$; the minimum $H_{n\phi}^{\min}$ and maximum $H_{n\phi}^{\max}$ height of their location with respect to the end of the head of the multi-tier tuyere; the free length of the lance barrel from the afterburner to the end of the tip $H_{\phi o}$. It is also possible to establish the main parameters of the cylindrical nozzles in the n^{th} additional purge unit of the multi-tier tuyere: the angle of inclination to the vertical axis of the tuyere $\alpha_{\phi}^{n\phi}$; quantities n_{ϕ}^n ; length l_{ϕ}^n ; the angle between the axes of adjacent nozzles ϕ_{ϕ}^n ; as well as a number of other auxiliary characteristics for determining the parameters of sound jets flowing from the cylindrical nozzles of additional purge units: the vertical $l_{\phi}^{n\phi}$ and horizontal $l_{\phi}^{n\phi}$ length spread of afterburners; the diameter of the curtain of the afterburner $D_{33}^{n\phi}$. Equations have been proposed to determine the maximum allowable total blowings per a certain number of additional purge units and the minimum expedient consumption of the blowings per one additional unit for basic auxiliary technological operations with the multi-tier tuyere.

Keywords: converter, multi-tier tuyere, three-tier tuyere, two-tier tuyere, additional purge unit, calculation method.

Постановка проблеми. Для підвищення ефективності роботи киснево-конвертерних цехів металургійних підприємств у існуючих нестабільних умовах сировинної бази останнім часом в Україні та світовій практиці знову набуває актуальності використання технологічних рішень [1-11], що дозволяють покращити тепловий баланс з застосуванням багатоярусних фурм, до яких можливо віднести двоярусні та тріярусні конструкції [2-7].

Незважаючи на промисловий та експериментальний досвід використання багатоярусних фурм у киснево-конвертерному виробництві, на сьогодні відсутні методики розрахунку для отримання їх конструкцій, що може призвести до виявлення ряду суттєвих недоліків пов'язаних з цим у разі експлуатації в умовах роботи Національних металургійних підприємств України фурм такого типу, розроблених за різними емпіричними підходами [2, 4, 6-9]. Відповідно до цього постала необхідність у розробці концепції методики для розрахунку основних конструктивних параметрів додаткових продувних блоків багатоярусної фурми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню розрахунку верхніх фурм присвячено декілька десятків робіт та методик, більша частина з яких дозволяє розрахувати конструктивні параметри одноярусних (класичних) фурм. Також є ряд робіт, що присвячені розрахунку двоконтурних та дворядних фурм. Однак встановлено, що стосовно розрахунку багатоярусних фурм опублікованих робіт майже немає. Так, для розрахунку певних конструктивних параметрів двоярусних фурм запропоновано лише ряд рівнянь у [8, 9].

У результаті проведених розрахунково-аналітичних досліджень до умов використання двоярусних фурм на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» встановлено, що формули, запропоновані у роботах [8, 9], для розрахунку параметрів додаткового продувного блоку (діаметра циліндричного сопла – d_{ϕ}^{II} ; кількості циліндричних сопел – n_{ϕ}^{II} ; висоти розташування відносно торця головки фурми – $H_{n\phi}^{\text{II}}$) не є доцільними для використання під час проектування промислових конструкцій багатоярусних фурм. Так, було встановлено, що за формулою (1) для розрахунку кількості сопел (n_{ϕ}^{II}) [8, 9] у будь якому випадку буде встановлюватись приблизно одна й та сама кількість.

$$n_{\phi}^{\text{II}} = \frac{360}{2 \cdot \delta}, \quad (1)$$

де n_{ϕ}^{II} – кількість циліндричних сопел у 2-му додатковому продувному блоці (верхньому ярусі фурми), шт.; δ – кут розкриття додаткового кисневого струменю верхнього соплового блоку, від 20 до 25°.

Це пов'язано з тим, що за цією формулою єдиним параметром, що впливає на кількість

сопел, є δ ; його значення може коливатися від 20 до 25°, що суттєво не впливає на зміну кількості сопел.

За формулою (2) визначення діаметру циліндричного сопла додаткового продувного блоку [8] було отримано, що розміри циліндричних сопел верхнього соплового блоку повинні бути у 2 рази більше сопел Лавалю у наконечнику штатних конструкції верхніх фурм ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» [9], а це не є припустимим.

$$d_{ц}^{II} = \sqrt{\frac{q_{доод}^{O_2, \max}}{0,785 \cdot w_{вих} \cdot n_{ц}^{II}}}, \quad (2)$$

де $d_{ц}^{II}$ – діаметр циліндричного сопла у 2-му продувному блоці, м; $q_{доод}^{O_2, \max}$ – максимальна інтенсивність продувки через верхній сопловий блок, м³/хв; $w_{вих}$ – швидкість струменю на виході з сопла верхнього продувного блоку з діаметром $d_{ц}$, м/с.

Треба зазначити, що у формулі (2) [8] для визначення швидкості на виході з циліндричного сопла верхнього продувного блоку $w_{вих}$ використано рівняння (3) швидкості витікання струменю з сопла Лавалю [8], у результаті чого за розрахунком (3) швидкість на виході з циліндричного сопла має становити понад дві звукові швидкості (2 Маха), а це є неможливим для умов витікання струменю з циліндричного сопла, що доводиться та підтверджується у роботі [1]. Тому доцільність інших параметрів, використаних у формулах (1-3), також викликає сумніви.

$$w_{вих} = \phi_{км} \cdot \sqrt{\frac{2k}{(k-1)} \cdot RT_{ex} \cdot \left[1 - \frac{P_{оточ}}{P_{ex}}\right]^{\frac{(k-1)}{k}}}, \quad (3)$$

де $\phi_{км}$ – коефіцієнт швидкості, змінюється від 0,95 до 0,98; $w_{вих}$ – швидкість струменю на виході з сопла верхнього продувного блоку з діаметром $d_{ц}$, м/с; k – стала адиабати, що дорівнює для кисню 1,4; R – газова стала, для кисню – $R = 260$, нм/кг·°К.

Визначення відстані розташування верхнього продувного блоку відносно головки фурми за (4) [8] також надає сумнівні результати розрахунку.

$$H_{нб}^{II} = l_{сmp} \cdot \cos \alpha_{ц}^{II}, \quad (4)$$

де $H_{нб}^{II}$ – висота розташування верхнього продувного блоку відносно торця головки багатоярусної фурми, м; $l_{сmp}$ – довжина струменю, що витікає з верхнього продувного блоку, м; $\alpha_{ц}^{II}$ – кут нахилу циліндричних сопел у верхньому додатковому продувному блоці до вертикальної осі фурми, °.

На двоярусних фурмах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», що успішно пройшли дослідно-промислові компанії, висота розташування верхнього (останнього) продувного блоку складала 2500 мм або 2,5 м [2], а за формулою (4) [8] повинна складати 590 мм або 0,59 м, що є занадто малим значенням для промислових конверторів, так як відповідно до робіт [1-7] висота розташування верхнього (останнього) ярусу фурми зазвичай коливається від 1 до 3 м, а у середньому складає 2 м відносно торця головки фурми. Таке мале значення $H_{нб}^{II}$ за роботою [8] може бути пов'язано з тим, що запропонований вираз адаптований тільки для досягнення конкретного ефекту від застосування верхнього продувного блоку за такої висоти розташування.

З урахуванням вище наведеного можна відзначити, що на сьогодні відсутня методика розрахунку, що дозволяє визначити основні конструктивні параметри для проектування промислових багатоярусних фурм та їх додаткових продувних блоків, що забезпечують проведення усіх необхідних допоміжних технологічних операцій.

Мета статті – пропозиція концепції методики для розрахунку основних конструктивних параметрів додаткових продувних блоків багатоярусної фурми.

Виклад основних матеріалів. У багатоярусній фурмі додаткові продувні блоки, не залежно від їх кількості та розташування відносно торця наконечнику (головного продувного блоку), перш за все відповідають за створення допоміжних дій, що дозволяють стабілізувати пере-

біг продувки, скоротити її тривалість, покращувати та керувати у певній мірі термодинамічними, гідрогазодинамічними та тепломасообмінними процесами під час конвертування розплаву. Проте вони не відповідають за розвиток основоположних процесів, що визначають хід продувки. Це було підтверджено як під час проведення промислово-дослідних компаній з випробуванням двоярусних фурм, з одним конструктивно передбаченим додатковим продувним блоком у киснево-конвертерних цехах Національних металургійних підприємств України ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» [2] та ПАТ «Єнакієвський металургійний завод» [7], так і виконанням експериментальних та теоретично-прикладних досліджень з застосуванням триярусних фурм [3, 5], що мали два додаткових продувних блока чи дві додаткові групи допоміжних сопел, з рознесенням однієї групи відносно іншої на певній відстані від торця головки триярусної фурми. Відповідно до цього слідує, що доцільність використання будь-якої багатоярусної фурми обумовлена необхідністю збільшення допоміжних керуючих впливів на перебіг продувки розплаву у конвертерній ванні та проведенням відповідних технологічних операцій.

З виконаного аналізу літературних джерел, досліджень та досвіду використання багатоярусних фурм, до яких можна віднести двоярусні та триярусні конструкції [1-9], встановлено, що для проведення основних допоміжних операцій, переважно на додаткові продувні блоки, передбачається сумарна витрата дуття від 10 до 30% відносно до загальної витрати на продувку конвертерної ванни.

Беручи до уваги, що доцільним для розрахунку багатоярусних фурм є максимальне розкриття їх потенціалу, з переважним уникненням недоліків, що спостерігалися у використанні прототипів, а також за рахунок проведених аналітичних досліджень [1-5, 7], введемо показник для розрахунку максимально допустимого сумарного використання дуття на n -ну кількість додаткових продувних блоків $N_{n\delta}$ у багатоярусній фурмі, що розраховується за формулою

$$\sum q_{n\delta\delta\delta}^{\max} = \sigma_{\delta\delta\delta}^{O_2} \cdot q_{зас}^{O_2}, \quad (5)$$

де $\sum q_{n\delta\delta\delta}^{\max}$ – максимально допустиме сумарне використання дуття, на n -ну кількість додаткових продувних блоків, м³/хв; $q_{зас}^{O_2}$ – загальна інтенсивність продувки, м³/хв; $\sigma_{\delta\delta\delta}^{O_2}$ – коефіцієнт максимально допустимої витрати дуття на n -ну кількість додаткових продувних блоків у багатоярусній фурмі, рекомендується від 0,10 до 0,30.

У разі використання додаткових продувних блоків для технологічних операцій, що спрямовані на поліпшення умов продувки та стабілізацію її перебігу, значення $\sigma_{\delta\delta\delta}^{O_2}$ рекомендується обирати від 0,10 до 0,20, відповідно до аналізу джерел [1-9] та ряду інших, що стосуються цього питання, у випадку необхідності їх використання для покращення теплового балансу, прискорення шлакоутворення – від 0,20 до 0,30. Також з аналізу робіт [1-9] можна відзначити, що в залежності від необхідності проведення допоміжних технологічних операцій в ході продувки розплаву у робочому просторі конвертеру з застосуванням додаткових продувних блоків багатоярусної фурми, можна рекомендувати наступні значення для мінімально доцільної витрати дуття $q_{1\delta\delta\delta}^{\min}$ на один додатковий продувний блок:

– покращення теплового балансу конвертерної плавки (за рахунок підвищення частки допалювання СО у відхідних конвертерних газах до СО₂), шлакоутворення, створення спіненої шлакометалевої емульсії

$$q_{1\delta\delta\delta}^{O_2 \min} = 0,12 \div 0,15 \cdot q_{зас}^{O_2}, \quad (6)$$

де $q_{1\delta\delta\delta}^{O_2 \min}$ – мінімально доцільна витрата кисню на один додатковий продувний блок, м³/хв;

– зменшення рівня спіненої шлакометалевої емульсії, пригнічення переливів та викидів розплаву передбачає заміну додаткового кисню (О₂) на азот (N₂) з його витратою, що визначається за формулою

$$q_{1\delta\delta\delta}^{N_2 \min} = 0,1 \div 0,12 \cdot q_{зас}^{O_2}, \quad (7)$$

де $q_{1\delta\delta\delta}^{N_2 \min}$ – мінімально доцільна витрата азоту на один додатковий продувний блок, м³/хв.

– зменшення інтенсивності заметалювання фурми та киснево-конвертерного обладнання у ході продувки, настилів на стовбурі фурми

$$q_{1\text{доо}}^{O_2 \text{ min}} = 0,07 \div 0,1 \cdot q_{\text{заг}}^{O_2}, \quad (8)$$

– запобігання заметалюванню додаткових сопел для проведення операцій, спрямованих на зниження окисненості металу [O] і шлаку (FeO) на остаточному етапі продувки, збільшення виходу придатного залізுவуглецевого напівпродукту передбачає заміну додаткового кисню (O₂) на азот (N₂) з його витратою, що визначається за формулою

$$q_{1\text{доо}}^{N_2 \text{ min}} = 0,05 \div 0,07 \cdot q_{\text{заг}}^{O_2}, \quad (9)$$

Зазвичай потрібно запланувати під конструкцію, що розраховується, максимально допустиме з усіх мінімально доцільних значень витрати дуття на додаткові продувні блоки, щоб за необхідності задовольнити усім умовам для проведення більшості допоміжних технологічних операцій, тобто відповідно до виразу (6). У разі використання додаткових продувних блоків для проведення конкретної допоміжної операції з перелічених вище, для визначення $q_{1\text{доо}}^{i \text{ min}}$ обирається відповідне рівняння з виразів (6)-(9). Відповідно до вище встановленого для розрахунку кількості додаткових продувних блоків у конструкції багатоярусної фурми, можна запропонувати наступне рівняння

$$N_{n\text{б}} = \frac{\sum q_{n\text{доо}}^{\text{max}}}{q_{1\text{доо}}^{i \text{ min}}}, \quad (10)$$

де $N_{n\text{б}}$ – кількість додаткових продувних блоків у багатоярусній фурмі, шт.; $q_{1\text{доо}}^{i \text{ min}}$ – мінімально доцільне значення витрати дуття на один додатковий продувний блок, м³/хв.

Запропоноване рівняння (10) також може бути використане і до випадку конструкції двоюрисної фурми; для цього у чисельнику та знаменнику повинно виступати значення $q_{1\text{доо}}^{i \text{ min}}$.

Треба відзначити, що у випадку використання багатоярусної фурми з одним потоком для подання дуття розподілення його витрати між $N_{n\text{б}}$ буде відбуватися в залежності від пропускної здатності кожного продувного блоку та за необхідності може досягатися як рівнозначне розподілення, так і зміна співвідношення між кожним з блоків.

Висота розташування кожного додаткового продувного блоку $H_{n\text{б}}$, як було встановлено під час аналізу [2-5, 7], повинна обиратися у відповідності до геометричних параметрів звукових та надзвукових продувних струменів, розмірів реакційної зони взаємодії та геометричних параметрів конвертеру, стовбура фурми. Також можна виділити мінімальну $H_{n\text{б}}^{\text{min}}$ та максимальну $H_{n\text{б}}^{\text{max}}$ висоту розташування додаткових продувних блоків відносно торця головки багатоярусної фурми. Виходячи з цього, визначимо, що $H_{n\text{б}}^{\text{min}}$ становить висоту розташування нижнього (першого) додаткового продувного блоку багатоярусної фурми, а $H_{n\text{б}}^{\text{max}}$, відповідно, верхнього (останнього) продувного блоку; разом вони визначають базову кількість додаткових продувних блоків на стовбурі багатоярусної фурми. У разі, якщо кількість додаткових продувних блоків перевищує базову, їх розташовують у межах розміщення від $H_{n\text{б}}^{\text{min}}$ до $H_{n\text{б}}^{\text{max}}$ на стовбурі багатоярусної фурми.

Для того, щоб забезпечити максимальну залученість звукових кисневих струменів, що витікають з циліндричних сопел нижнього додаткового продувного блоку багатоярусної фурми у розвиток термодинамічних, гідрогазодинамічних та тепломасообмінних процесів під час продувки та тим самим інтенсифікувати покращення теплового балансу, шлакоутворення з досягненням стабільності перебігу конвертування розплаву, висоту його розташування $H_{n\text{б}}^{\text{min}}$ слід визначати на стовбурі фурми з урахуванням довжини початкового ядра надзвукових кисневих струменів [5], довжини розповсюдження факелів додаткових звукових струменів у просторі конвертеру відповідно до [10] та діаметру загальної реакційної зони взаємодії надзвукових кисневих струменів з поверхнею розплаву [11]. За вище наведеного для розрахунку мінімальної висоти розташування $H_{n\text{б}}^{\text{min}}$ відносно торця головки багатоярусної фурми рекомендується дотримуватись виконання співвідношення (11), за якого визначається доцільна довжина розповсюдження факелів допалювання звукових струменів.

$$l_{\text{ст}}^{\text{поч}} \geq l_{\text{з ф}}^{n\text{б}} \geq 0,69 \cdot l_{\text{ст}}^{\text{поч}}, \quad (11)$$

де l_{cm}^{noch} – початкова довжина ділянки струменя, для якого швидкість на осі залишається рівною вихідній на перерізі сопла Лавалю, м; $l_{\phi}^{n\ n\phi}$ – довжина розповсюдження факелу допалювання звукових струменів, м.

Якщо співвідношення (11) не виконується, необхідно скоригувати витрату додаткового дуття на продувку. Треба відзначити, що $l_{\phi}^{n\ n\phi}$, використаний у співвідношенні (11), характеризує тільки довжину факела допалювання звукового струменя у робочому просторі конвертеру, а для подальших розрахунків, окрім неї, необхідно встановити довжину його вертикального розповсюдження за напрямком осі фурми до наконечнику (головного продувального блоку). Для цього запропоновано параметр довжини вертикального розповсюдження факела допалювання $l_{\phi}^{n\ n\phi}$, що визначається на підставі адаптованого рівняння з роботи [10] з урахуванням кута нахилу циліндричних сопел до вертикальної осі фурми, за виразом

$$l_{\phi}^{n\ n\phi} = 373 \cdot 10^{-3} \cdot \cos \alpha_{\phi}^n \cdot \sqrt{q_{доо}^{i\ min} / n_{\phi}^n}, \quad (12)$$

де n_{ϕ}^n – кількість циліндричних сопел у n -му додатковому продувальному блоці, шт.; $l_{\phi}^{n\ n\phi}$ – довжина вертикального розповсюдження факела допалювання звукових струменів над поверхнею ванни, м; α_{ϕ}^n – кут нахилу циліндричних сопел у n -му додатковому продувальному блоці до вертикальної осі фурми, °.

Для повного уявлення стосовно розмірів факелу допалювання звукових струменів у просторі конвертеру нам також необхідно встановити довжину горизонтального розповсюдження над поверхнею ванни, як було визначено з аналітичних досліджень та графічних побудов; значення $l_{\phi}^{n\ n\phi}$ можна знайти з наступного рівняння

$$l_{\phi}^{n\ n\phi} = \sqrt{(l_{\phi}^{n\ n\phi})^2 - (l_{\phi}^{n\ n\phi})^2}, \quad (13)$$

де $l_{\phi}^{n\ n\phi}$ – довжина горизонтального розповсюдження факела допалювання звукових струменів над поверхнею ванни, м.

З дотриманням співвідношення (11) для досягнення кращого ефекту від перекриття реакційної зони завісою факелів допалювання, що формуються звуковими струменями додаткового нижнього продувального блоку, необхідно, щоб діаметр завіси був максимально наближений до діаметра загальної реакційної зони взаємодії надзвукових кисневих струменів з поверхнею ванни [11] та визначався за наведеним рівнянням

$$D_{\phi}^{n\ n\phi} = 2 \cdot l_{\phi}^{n\ n\phi} + D_{\phi}^{3\ mp}, \quad (14)$$

де $D_{\phi}^{n\ n\phi}$ – діаметр завіси факелів допалювання звукових струменів додаткового продувального блоку, м; $D_{\phi}^{3\ mp}$ – діаметр зовнішньої труби фурми, м.

Відповідно до вище наведеного за рівняннями (11)-(14) та аналітично-розрахунковими дослідженнями можна охарактеризувати, що раціональну мінімальну висоту розміщення нижнього додаткового продувального блоку відносно торця головки багатоярусної фурми, яка буде дозволити звуковим кисневим струмінням, що витікають з циліндричних сопел цього блоку, ефективно виконувати усі необхідні допоміжні технологічні операції у ході продувки, можливо знайти за виразом

$$H_{n\phi}^{\min} = 11,6 \cdot 10^{-2} \cdot l_{\phi}^{n\ n\phi}, \quad (15)$$

де $H_{n\phi}^{\min}$ – мінімальна висота розташування додаткового продувального блоку на стовбурі фурми відносно торця наконечнику (головного продувального блоку) багатоярусної фурми, м.

У свою чергу для верхнього (останнього) додаткового продувального блоку багатоярусної фурми з урахуванням наведеного у рівняннях (11)-(14), а також того, що за максимально допустимої витрати дуття за рівняннями (5)-(9), геометричні розміри вертикальної довжини факелів допалювання $l_{\phi}^{n\ n\phi}$ виключають взаємодію з поверхневими шарами металевого розплаву у робочому просторі конвертерної ванни та безпосереднє витікання звукових струменів верхнього продувального блоку у межах реакційної зони взаємодії надзвукових струменів з поверхнею ванни.

За вище наведених умов висота розташовування верхнього продувального блоку $H_{n\delta}^{\max}$ повинна бути такою, щоб забезпечувати дії керуючого впливу на рівень шлакометалевої емульсії у разі її надмірного спінення, а також сприяти розвитку процесу допалювання вихідних макрооб'ємів CO до CO₂, що переважно виділяються з меж вторинної реакційної зони взаємодії надзвукових кисневих струменів з поверхнею ванни та у залежності від рівня спіненої шлакометалевої емульсії можуть виходити за рахунок «свищового» потоку чи ланцюжком макропузирів CO, що утворюються з певною періодичністю.

Також треба відзначити, що одним з факторів, що лімітує максимально допустиму кількість додаткових продувних блоків $N_{n\delta}^{\max}$ у багатоярусній фурмі, є відстань між $H_{n\delta}^{\min}$ та $H_{n\delta}^{\max}$, так як для виключення перекриття струменів, що витікають з сусідніх блоків один одного, та злиття завіс звукових струменів у вертикальній площині, мінімальна відстань між ними визначається з урахуванням довжини вертикального розповсюдження факелів допалювання звукових струменів, що витікають з циліндричних сопел, над поверхнею ванни $l_{\phi}^{n\delta}$ – знаходиться за рівнянням (12).

З урахуванням представленого можливо відзначити, що $H_{n\delta}^{\max}$ повинна забезпечувати мінімальну відстань від звукових струменів верхнього (останнього) додаткового продувального блоку до верхніх шарів розплаву, що досягається за рахунок раціонального розміщення відносно торця наконечнику багатоярусної фурми. Ця умова є важливою для процесу передання тепла від факелів допалювання CO до CO₂, які утворюються звуковими кисневими струменями під час взаємодії з макрооб'ємами відхідних газів з меж реакційної зони взаємодії. Окрім цього, $H_{n\delta}^{\max}$ повинна бути такою, щоб забезпечувати вплив на максимально допустиму висоту спіненої шлакометалевої емульсії та за необхідності створювати керуючу дію на її рівень у основний та заключний період продувки розплаву.

Відповідно до цього, під час встановлення $H_{n\delta}^{\max}$ можна використовувати формули (11)-(14), завдяки чому визначення цього параметру стає безпосередньо пов'язаним з геометричними параметрами факелів допалювання, що забезпечують теплообмін з прошарками шлакометалевої емульсії, а з урахуванням необхідності змінення рівня спіненої шлакометалевої емульсії треба також керуватися геометричним параметром простору конвертера, що лімітує максимально допустиме значення підйому шлакометалевої емульсії у напрямку до його горловини. Виходячи з цього, визначимо $H_{n\delta}^{\max}$ за рівнянням

$$H_{n\delta}^{\max} = H_n - (l_{\phi}^{n\delta} + h_{\phi}^{pob}) / \cos \alpha_u^n, \quad (16)$$

де $H_{n\delta}^{\max}$ – максимальна висота розташування додаткового продувального блоку на стовбурі фурми відносно торця головного продувального блоку багатоярусної фурми, м; H_n – висота розташування лютки у конвертері, м; h_{ϕ}^{pob} – висота робочого розташування фурми під час продувки розплаву, м.

Після того, як встановлені значення $H_{n\delta}^{\min}$ та $H_{n\delta}^{\max}$, можливо знайти для базової кількості додаткових продувних блоків вільну довжину стовбура фурми відносно $H_{n\delta}^{\max}$ з урахуванням поширення факелів допалювання верхнього та нижнього продувального блоку до торця наконечника багатоярусної фурми

$$H_{\phi\delta}^{\phi} = H_{n\delta}^{\max} - (l_{\phi}^{\max\ n\delta} + H_{n\delta}^{\min}), \quad (17)$$

де $H_{\phi\delta}^{\phi}$ – вільна довжина стовбура фурми відносно $H_{n\delta}^{\max}$ з урахуванням поширення факелів допалювання до торця наконечника багатоярусної фурми за базової кількості додаткових продувних блоків, м.

Рівняння (11)-(17) дозволяють визначитись лише з кількістю додаткових продувних блоків $N_{n\delta}$ та висотою їх розташування $H_{n\delta}^n$ для проектування раціональної конструкції багатоярусної фурми, окрім них також необхідно встановити основні конструктивні параметри, що стосуються циліндричних сопел додаткових продувних блоків.

У додатковому продувальному блоці багатоярусної фурми кількість циліндричних сопел

може бути визначена зі встановленням доцільної витрати дуття на один блок та розподіленням максимальної або мінімальної витрати дуття на кожне сопло цього блоку. За необхідності з використанням рівнянь (6)-(9) можливо визначити раціональну кількість сопел окремо для кожного додаткового продувального блоку багатоярусної фурми з умовою потреби проведення конкретних допоміжних технологічних операцій з урахуванням (6)-(9) у виразі (18)

$$n_u^n = q_{1\text{доо}}^{i\text{min}} / q_{1u}^{\text{доо}}, \quad (18)$$

де n_u^n – кількість циліндричних сопел у n -му додатковому продувальному блоці, шт.; $q_{1u}^{\text{доо}}$ – мінімальна або максимальна витрата дуття на одне циліндричне сопло додаткового продувального блоку, що розраховується для багатоярусної фурми, м³/хв.

Проведені аналітичні та розрахункові дослідження під час розробки методики дозволили встановити, що для знаходження діаметра d_u^n та кута нахилу до вертикальної осі фурми α_u^n циліндричних сопел у n -му додатковому продувальному блоці можливо задіяти рівняння (19) та (20) з робіт [11, 12], адаптувавши їх під умови конструкції багатоярусної фурми

$$d_u^{n\text{нб}} = 11299 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{f_{\text{кр}}^{n\text{нб}}}, \quad (19)$$

де $d_u^{n\text{нб}}$ – діаметр циліндричного сопла у n -му додатковому продувальному блоці, м; $f_{\text{кр}}^{n\text{нб}}$ – площа циліндричного сопла у n -му додатковому продувальному блоці, м².

$$\alpha_u^{n\text{нб}} = \arctg(0,5 \cdot D_{pз}^{\text{за}} / \cdot h_{\text{ф}}^{\text{роб}} - \text{tg}(0,5 \cdot \theta_{\text{за}})), \quad (20)$$

де $\theta_{\text{за}}$ – кут розкриття звукового кисневого струменя, °; $D_{pз}^{\text{за}}$ – діаметр загальної реакційної зони взаємодії, м; $\alpha_u^{n\text{нб}}$ – кут нахилу циліндричних сопел у n -му додатковому продувальному блоці, °.

Подальші дослідження та статистична обробка геометричних параметрів багатоярусних фурм (двоярусних), що були спроектовані під умови роботи на вітчизняних кисневих конвертерах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» [2] та ПАТ «Єнакієвський металургійний завод» [7], з точки зору раціоналізації конструкції, дозволили встановити, що довжина циліндричного сопла у n -му додатковому продувальному блоці може бути знайдена на підставі різниці між радіусом зовнішньої труби багатоярусної фурми та радіусом центру розміщення сопла у додатковому продувальному блоці відносно центральної осі багатоярусної фурми та з урахуванням кута нахилу сопла до цієї осі за рівнянням (21)

$$l_u^n = ((D_{\text{ф}}^{\text{змп}} / 2) - (d_{\text{ц}}^{n\text{нб}} / 2)) / \cos \alpha_u^{n\text{нб}}, \quad (21)$$

де l_u^n – довжина циліндричного сопла у n -му додатковому продувальному блоці, м; $d_{\text{ц}}^{n\text{нб}}$ – радіус центру розміщення сопла у додатковому продувальному блоці відносно центральної осі багатоярусної фурми, м.

Важливим параметром також є кут між осями сусідніх циліндричних сопел у n -му додатковому продувальному блоці φ_u^n , він є у певній мірі своєрідним аналогом відповідної характеристики кута у плані між осями сусідніх сопел Лавалю у наконечнику φ (головному продувальному блоці) багатоярусної фурми. Однак треба відзначити, що у випадку наконечника (головного продувального блоку) багатоярусної фурми значення φ встановлюється для того, щоб забезпечити роздільне витікання струменів та розгалуження первинних реакційних зон взаємодії надзвукових кисневих струменів у просторі з виключенням перекриття сусідніми струменями один одного на відстані не меншій початкової довжини струменя $l_{\text{см}}^{\text{ноч}}$.

У свою чергу, як вже було встановлено та наведено вище у роботі, будь-який додатковий продувний блок багатоярусної фурми перш за все відповідає за допоміжні операції під час продувки, для більшості з яких навпаки необхідно створення щільної зависи звукових кисневих струменів над зоною взаємодії, що формується соплами Лавалю головного продувального блоку, за якої допускається контакт зовнішніх меж сусідніх струменів, що витікають з циліндричних сопел додаткового продувального блоку. За цієї умови можна встановити значення φ_u^n з урахування рівномірного рознесення сопел за профілем додаткового продувального блоку з формули

$$\varphi_{\psi}^n = \frac{360}{n_{\psi}^n}, \quad (22)$$

де φ_{ψ}^n – кут між осями сусідніх циліндричних сопел у n -му додатковому продувному блоці, °.

Треба також зазначити, що взаємне перекриття струменів один одного в умовах їх витікання з продувного блоку є небажаним явищем, тому значення φ_{ψ}^n може відноситись до показників, що лімітують максимально допустиму кількість сопел n_{ψ}^n у одній площині додатково продувного блоку, за умови, що кут φ_{ψ}^n повинен бути більший або дорівнювати значенню кута розкриття звукового струменя $\theta_{3\psi}$.

Висновки

Запропоновано першу у світі вітчизняну концепцію методики для розрахунку основних конструктивних параметрів додаткових продувних блоків багатоярусної фурми, що передбачає алгоритм за 18 рівняннями, отриманими на підставі аналітичних та розрахунково-статистичних досліджень під час обробки даних, що встановлені з застосуванням існуючих методик для розрахунку конструктивних параметрів верхніх фурм, що були розглянуті до умов роботи Національних металургійних підприємств України. Розроблена методика дозволяє визначити: кількість додаткових продувних блоків у багатоярусній фурмі $N_{n\psi}^{\psi}$; мінімальну $H_{n\psi}^{\min}$ та максимальну $H_{n\psi}^{\max}$ висоту їх розташування відносно торця головки багатоярусної фурми; вільну довжину стовбура фурми $H_{\psi\psi}^{\psi}$ відносно висоти розташування верхнього (останнього) додаткового продувного блоку з урахуванням поширення факелів допалювання до торця наконечника багатоярусної фурми за базової кількості додаткових продувних блоків.

Встановити основні параметри циліндричних сопел у n -му додатковому продувному блоці багатоярусної фурми: кут нахилу до вертикальної осі фурми $\alpha_{\psi}^{n\psi}$; кількість n_{ψ}^n ; довжину l_{ψ}^n ; кут між осями сусідніх сопел φ_{ψ}^n . Для знаходження вищезазначених основних конструктивних параметрів розроблені необхідні допоміжні рівняння, що дозволяють визначити характеристики звукових струменів, що витікають з циліндричних сопел додаткових продувних блоків: довжину вертикального та горизонтального розповсюдження факела допалювання $l_{\psi\psi}^{n\psi}$, $l_{\psi\psi}^{n\psi}$; діаметр завіси факелів допалювання $D_{\psi\psi}^{n\psi}$.

Запропоновано рівняння для встановлення максимально допустимого сумарного використання дугтя на n -ну кількість додаткових продувних блоків та мінімально доцільної витрати дугтя на один додатковий блок для проведення основних допоміжних технологічних операцій з застосуванням багатоярусної фурми.

Перелік використаних джерел:

1. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі : теорія, технологія, якість сталі, рециркуляція матеріалів і екологія / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотский, П.С. Харлашин. – Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 456 с.
2. Разработка конструкции двухъярусной фурмы и режима продувки ванны 160-т конвертеров ПАО «АрселорМиталл Кривой Рог» с ее использованием / А.Г. Чернятевич [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2012. – № 5-6. – С. 76-85.
3. Чернятевич А.Г. Инновационная технология комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом с применением многоярусных фурм // А.Г. Чернятевич, Л.С. Молчанов, П.О. Юшкевич / Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти : наукові праці Всеукраїнської науково-технічної конференції, присвяченої 100-річчю з дня народження Г.Г. Єфіменка (4-5 квітня 2017 р.; Дніпро). – Дніпро : НМетАУ, 2017. – С. 193-198.
4. Rymarchyk N. Post combustion lance in Basic Oxygen Furnace (BOF) operations / N.

- Rymarchyk // *Steelmaking Conference Proceedings*. – 1998. – Pp. 445-449.
5. Чернятевич А.Г. Комбинированная продувка конвертерной ванны с использованием трехъярусной фурмы / А.Г. Чернятевич, П.О. Юшкевич // *Литье. Metallurgiya*. 2015 : Материалы XI Международной научно-практической конференции (26-28 мая 2015 г.; Запорожье). – Запорожье : «ЗТПП», 2015. – С. 437-438.
 6. Чернятевич И.В. Современное состояние и направления совершенствования конструкций кислородных фурм для продувки конвертерной ванны / И.В. Чернятевич // *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. – 2008. – № 12. – С. 23-27.
 7. Чернятевич А.Г. Разработка и совершенствование конструкции двухъярусной фурмы для 160-т конвертеров ПАО «ЕМЗ»/ А.Г. Чернятевич, А.Г. Коваленко, А.В. Сущенко // *Теория и практика металлургии*. – 2014. – № 3-6. – С. 20-28.
 8. Королькова Л.Н. Исследование процесса дожигания оксида углерода над зоной продувки в конвертере / Л.Н. Королькова, Э.Э. Меркер, Г.А.Карпенко // *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. – 2011. – № 9. – С. 38-41.
 9. Организация газодинамической защиты над зоной продувки в конвертере с учетом влияния шлака / Э.Э. Меркер, Г.А. Карпенко // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2001. – № 3. – С. 18-22.
 10. Дожигание монооксида углерода в конвертере. Газовая динамика // В.Б. Охотский, Ю.Н. Борисов, А.Д. Зражевский, А.В. Шибко / *Известия ВУЗов : Черная металлургия*. – № 6. – 1992. – С. 4-5.
 11. Исследование структуры и параметров реакционных зон при верхней продувке применительно к проектированию многоцелевых конвертерных фурм / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, Д.А. Лаврик, Е.Л. Мастеровенко // *Известия ВУЗов : Черная металлургия*. – 2002. – № 12. – С. 16-21.
 12. Фейлер С.В. Использование составных сопел в кислородных фурмах продувки металлического расплава в большегрузных конвертерах / С.В. Фейлер, Е.В. Протопопов, Д.Т. Неунываха // *Вестник Российской академии естественных наук*. – 2016. – Вып. 18. – С. 111-117.

References:

1. Boychenko V.M., Okhotsky V.B., Kharlashyn P.S. *Konverterne vyrobnytstvo stali: teoriya, tekhnolohiya, yakist' stali, retsyrkulyatsiya materialiv i ekolohiya* [Converter steel production: theory, technology, steel quality, material recycling and ecology]. Dnipropetrovsk, RVA «Dnipro-VAL» Publ., 2006. 456 p.(Ukr).
2. Chernyatevich A.G., Sigarev Ye.N., Chernyatevich I.V. *Razrabotka konstruktсии dvukh'yarusnoy furmy i rezhima produvki vannы 160-t konverterov PAO «ArcelorMittal Krivoy Rog» s yeye ispol'zovaniyem* [Development of the design of a two - tier lance and the mode of purge of a bath of 160-t converters of PJSC «ArcelorMittal Krivoy Rog» with its use]. *Teoriia i praktika metallurgii – Theory and practice*, 2012, no. 5-6, pp. 76-85.(Rus.)
3. Chernyatevich A.G., Molchanov L.S., Yushkevich P.O. *Innovatsionnaya tekhnologiya kombinirovannoy produvki konverternoy vannы kislorodom i neytral'nyy gazom s primeneniyyem mnogoyarusnykh furm. Nauk. pratsi Vseukr. nauk.-tekhn. konf., prisviachenoi 100-richchiu z dnia narodzhennia G.G. Efimenka «Aktual'ni problemi rozvitku metalurgiinoi nauki ta osviti»* [Innovative technology of the combined purge of a converter bath with oxygen and neutral gas with use of multilevel lances. Proceedings of All-Ukr. Sci.-techn. conf. dedicated to the 100th anniversary of the birth of G.G. Efimenko «Actual problems of development of metallurgical science and education»]. Dnipro, 2017, pp. 193-198. (Rus.)
4. Rymarchyk N. Post combustion lance in Basic Oxygen Furnace (BOF) operations. *Steelmaking Conference Proceedins*, 1998, pp. 445-449.
5. Chernyatevich A.G., Yushkevich P.O. *Kombinirovannaya produvka konverternoy vannы s ispol'zovaniyem trekh'yarusnoy furmy. Materialy XI Mezhd. Nauch.-prakt. Konf. «Lit'ye. Metallurgiya. 2015»* [Combined purge of the converter bath using a three-tier lance. Proceedings of XI Int. Sci.-Pract. Conf. «Casting. Metallurgy. 2015»]. Zaporozh'ye, 2015, pp. 437-438. (Rus.)
6. Chernyatevich I.V. *Sovremennoye sostoyaniye i napravleniya sovershenstvovaniya konstruktсий*

- kislorodnykh furn dlya produvki konverternoy vannы [Current state and directions of improvement of oxygen lance constructions for converter bath purge]. *Biulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii «Chernaia metallurgii» – Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information «Ferrous metallurgy»*, 2008, no. 12, pp. 23-27.(Rus.)
7. Chernyatevich A.G., Kovalenko A.G., Sushchenko A.V. Razrabotka i sovershenstvovaniye konstrukttsii dvukh'yarusnoy furnы dlya 160-t konverterov PAO «YEMZ» [Development and improvement of the design of a two-tier lance for 160 tons of converters of PJSC «EMZ»]. *Teoriya i praktika metallurgii – Theory and practice*, 2014, no. 3-6, pp. 20-28.(Rus.)
 8. Korol'kova L.N., Merker E.E., Karpenko G.A. Issledovaniye protsessa dozhiganiya oksida ugleroda nad zonoy produvki v konvertere [Investigation of the process of afterburning of carbon monoxide over the purge zone in the converter]. *Biulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii «Chernaia metallurgii» – Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information «Ferrous metallurgy»*, 2011, no. 9, pp. 38-41.(Rus.)
 9. Merker E.E., Karpenko G.A. Organizatsiya gazodinamicheskoy zashchity nad zonoy produvki v konvertere s uchetom vliyaniya shlaka [Organization of gas-dynamic protection over the purge zone in the converter taking into account the influence of slag]. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaia Metallurgii – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2001, no. 3, pp. 18-22. (Rus.)
 10. Okhotskiy V.B., Borisov Yu.N., Zrazhevskiy A.D., Shibko A.V. Dozhiganiye monooksida ugleroda v konvertere. Gazovaya dinamika [Afterburning of carbon monoxide in the converter. Gas dynamics]. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaia Metallurgii – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 1992, no. 6, pp. 4-5.(Rus.)
 11. Protopopov Ye.V., Chernyatevich A.G., Lavrik D.A., Masterovenko Ye.L. Issledovaniye struktury i parametrov reaktsionnykh zon pri verkhney produvke primenitel'no k proektirovaniyu mnogotselevykh konverternykh furn [Investigation of the structure and parameters of the reaction zones at the top blowing as applied to the design of multipurpose converter tuyeres]. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaia Metallurgii – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2002, no. 12, pp. 16-21.(Rus.)
 12. Feyler S.V., Protopopov Ye.V., Neunyvakhina D.T. Ispol'zovaniye sostavnykh sopel v kislorodnykh furnakh produvki metallichesкого rasplava v bol'shegruznykh konverterakh [Use of composite nozzles in oxygen lances for blowing metal melt in heavy-duty converters]. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk – Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2016, no. 18, pp. 111-117.(Rus.)

Рецензент: Д.М. Тогобицька

д-р техн. наук, проф., Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Стаття надійшла 12.03.2020