

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

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

В.В. Вакульчук, к.т.н., н.с; ORCID 0000-0001-7887-2843

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

ДОСЛІДЖЕННЯ НА ФІЗИЧНІЙ МОДЕЛІ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОВЕДІНКИ ДВОФАЗНОЇ ВАННИ ПРИ ВЕРХНЬОМУ ПРОДУВАННІ ЧЕРЕЗ НАКОНЕЧНИК ЗІ СКЛАДЕНИМИ СОПЛАМИ

Анотація. На попередньому етапі досліджень з використанням фізичної моделі кисневого конвертера отримано результати вивчення особливостей продувки однофазної рідини через одне складене сопло. Метою даної роботи було проведення дослідження поведінки двофазної ванни при використанні багатовулфової фурми зі складеними соплами. На даному етапі дослідження для імітації шлакової фази двофазної ванни було використано силіконову олію. Вивчали особливості впливу дослідних сопель на процеси перемішування та спінування двох фаз. Досліджено три варіанти конструкції дослідного сопла: поєднання звичайного і щільного сопел зі співвідношенням їх площ 1:1, 1:2 і 2:1. Встановлено, що застосування наконечника з чотирма соплами під час продувки зверху сприяє активному формуванню двохшарової спіненої емульсії на поверхні ванни. Порівняння роботи наконечника зі складеними соплами з наконечником з циліндричними вказує на більш активне перемішування двох рідин і на формування більш стійкого та значно вищого шару спіненої емульсії. При цьому найбільш сприятливі умови для організації повноцінного перемішування двох фаз у конвертерній ванні формуються при застосуванні складених сопель з величиною щільності порядку 35% та співвідношенням площ щільної та соплі 1:2. Для інтенсифікації процесів перемішування у верхній зоні агрегату найбільш доцільно використовувати складені сопла з більшою долею щільної (до 65 %) та співвідношенням площ складових частин сопла 2:1. Використання сопель з рівновеликими площами складових у досліджених умовах не чинить позитивного впливу на обмінні процеси у конвертерній ванні.

Ключові слова: кисневе конвертування, фізичне моделювання, верхня продувка, складене сопло, спінення та перемішування двофазних фаз

Посилання для цитування: Семикін С.І., Голуб Т.С., Вакульчук В.В. Дослідження на фізичній моделі особливостей поведінки двофазної ванни при верхньому продуванні через наконечник зі складеними соплами. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Вип.34. – С.129-138. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-129-138

Стан проблеми. Основною рушійною силою продувки в кисневих конвертерах є високошвидкісний струмінь кисню, що витікає з верхньої продувочної фурми. Його характеристики визначають гідродинаміку і

тепло-масообмін конвертерної ванни [1-4]. Принципи організації дугтвого режиму в даний час є однаковими для конвертерів різної ємності [5-6], тому в великовантажних кисневих конвертерах, що обладнано тільки верхньою продувною фурмою, через концентрацію дугтя неминуче виникають складнощі при організації циркуляції металу по всьому об'єму сталеплавильної ванни. Проведені дослідження на фізичній моделі особливостей взаємодії газового струменя, що витікає зі складеного сопла, із рідкою однофазною ванною вказали на перспективну можливість покращення обмінних процесів при їх використанні за рахунок більш глибокого занурення струменя та подрібнення рідини струменем. Запропонована конструкція складеного сопла: центральне сопло для подачі основного газового потоку, що оточене щільним кільцевим соплом. При цьому газовий потік зі щільної частини сопла може бути як захисним середовищем для основного струменя газу, так і виконувати функцію основного струменя- глибоко занурюватись у ванну та чинити активне перемішування, що залежить від конструктивних особливостей сопла.

Метою дослідження є визначення особливостей взаємодії струменів, що витікають з оснащеної складеними соплами фурми, з двофазною системою ванни конвертера.

Методика проведення експериментів. Вихідною умовою підбору матеріалів, необхідних для проведення досліджень було дотримання суттєвої різниці в фізичних параметрах рідкого металевого і шлакового розплавів. У таблиці 1 наведено важливі характеристики металевого і шлакового розплавів.

Таблиця 1 – Фізичні характеристики металевого і шлакового розплаву сталеплавильного виробництва

Параметр	Металевий розплав	Шлаковий розплав
Щільність, кг/ м ³	7100- 7600	3200-4000
Кінематична в'язкість, мм ² /с (1600°С)	0,9*10 ⁻³	2-3*10 ⁻³
Динамічна в'язкість, Па*с (при 1600°С)	0,003-0,006	0,02-0,03

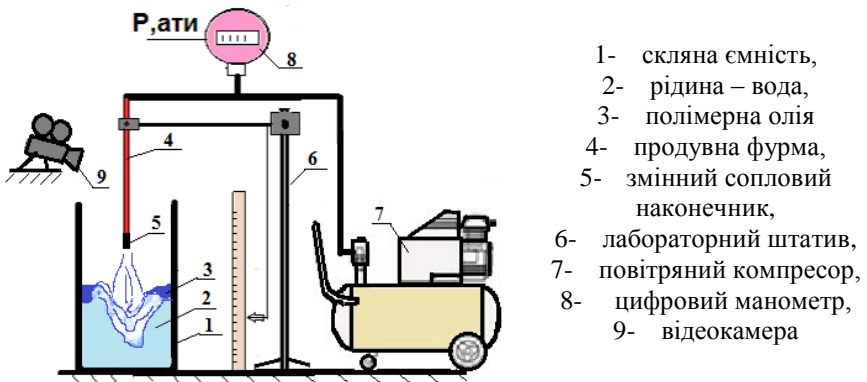
З урахуванням наведених фізичних характеристик для імітації шлакової фази, з огляду на те, що в якості рідини, що імітує металевий розплав, обрана вода, було вибрано поліметил силіконова синтетична олія - ПМС - 200, основні властивості якої наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Технічні характеристики поліметил силіконової синтетичної олії ПМС 200

Кінематична в'язкість	Динамічна в'язкість	Температура застигання	Щільність	Поверхневий натяг	Температура спалаху
$\nu, \text{мм}^2/\text{с}$	$\eta, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$T_{\text{заст.}}, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\sigma, \text{Н}/\text{М}$	$T_{\text{сп.}}, ^\circ\text{C}$
200	193	- 60	968	21.0	315

Відмінною рисою даних олій є практична відсутність залежності значень в'язкості від температури середовища в широкому її діапазоні.

Установка з проведення двофазного моделювання була аналогічною застосовуваній при однофазному моделюванні. Функціональна схема установки наведена на рис. 1.



- 1- скляна ємність,
- 2- рідина – вода,
- 3- полімерна олія
- 4- продувна фурма,
- 5- змінний сопловий наконечник,
- 6- лабораторний штатив,
- 7- повітряний компресор,
- 8- цифровий манометр,
- 9- відеокамера

Рисунок 1 - Функціональна схема станду холодного моделювання

У скляну посудину (1), яка формує конвертерну ванну, заливали воду (2) в кількості 6 кг і зверху додавали 0,6 кг полімерного масла (3), що імітувало конвертерну продувку при 10% -ній кількості шлакової фази. Далі встановлювали продувну фурму (4), обладнану змінним сопловим наконечником (5). На продувку повітря подавалося за допомогою компресора (7). Продувка фіксувалася за допомогою швидкісної відеокамери CASIO EXILIM EX F1. Для візуалізації другої фази і оцінки інтенсивності перемішування ванни під час продувки в модель вводили 2 краплі універсального барвника Colorex №50. Для візуальної оцінки характеру спінення другої фази на поверхні скляної ванни було нанесено розмітку з інтервалом $10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Досліди були проведені із застосуванням чотирьох соплових наконечників з кутом нахилу сопел до вісі фурми 14 градусів при інтенсивності подачі газу $16,6 \text{ м}^3/\text{т хв}$ і положенні фурми 20 калібрів над рівнем спокійної рідини. Було проведено зіставлення роботи дослідних

наконечників зі складеними соплами з порівняльним наконечником з соплами діаметром $2,5 \cdot 10^{-3}$ м. Дослідні сопла були виготовлені з урахуванням еквівалентності порівняльним і представляли собою поєднання звичайного циліндричного і щілинного, кільцевого, навколишнього сопел зі співвідношенням площ складових 1:1, 1:2 і 2:1. Параметри сопел приведені в таблиці 3. Кут нахилу сопел до вісі фурми для всіх досліджених варіантів конструкцій сопел був однаковим.

Результати дослідів та їх обговорення. Візуальні спостереження продувки двофазної рідини показали, що під час продувки зверху на її поверхні формується спінена двошарова емульсія: з досить великими газо-масляними бульбашками в нижній частині, що контактує з водою, і дрібнішими у верхній частині. Сама емульсія складається з дрібних крапельок води і газових бульбашок різного розміру в шарі олії, а в підфурменій зоні формується занурена частина газо-рідинного струменя, що захоплює за собою краплі полімерної олії та висхідні потоки газових бульбашок. Після припинення продувки водно-олійна емульсія розподіляється по всій поверхні рівномірно і поступово розшаровується на дві рідини.

Таблиця 3- Основні параметри дослідних складених сопел

№ п.п.	Діаметр внутрішнього сопла, $\cdot 10^{-3}$ м	Зовнішній і внутрішній діаметри щілини, $\cdot 10^{-3}$ м	Співвідношення площ щілини та центрального сопла	Доля щілинного сопла відносно загальної площі складеного сопла, %	Діаметр еквівалентного сопла, $\cdot 10^{-3}$ м
1	1,77	4,19x3,80	1:1	50	2,5
2	2,08	4,19x3,90	1:2	35	2,5
3	1,47	4,19x3,67	2:1	65	2,5

Спочатку була проведена та проаналізована продувка через порівняльні сопла. Візуально було відмічено формування двошарової піни з досить великими газо-масляними бульбашками в нижній частині і дрібнішими у верхній частині, з середньою висотою піни під час продувки порядку $30-45 \cdot 10^{-3}$ м і в спокійному стані (без продувки) близько $20 \cdot 10^{-3}$ м. На рисунку 2 наведено характерні фрагменти продувки рідин, які для наочності було забарвлено у синій колір (після розчинення барвника). На фото спінена олійна емульсія виглядає білою, а забарвлена у синій колір

водна фаза – темно та світло сірою. На першому фото («А») у нижній частині олійної емульсії видно скупчення досить крупних круглих водно-олійно-газових бульбашок. Відмічено, що під дією струменя спінена частина разом із всією ванною робила поступово обертальні та коливальні рухи, а висота піни пульсуючи то зменшувалася, то збільшувалася як за рахунок взаємодії пульсуючого впливу струменя на рідку ванну зверху і відбиття потоків від днища, так і відтиснення газовим струменем спіненого шару з підфурменної зони до стінок агрегату. На початку продувки величина піни становила близько 50% від висоти ванни (приблизно $80 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) і співвідношення верхнього та нижнього шарів було приблизно 2:6. Під шаром другої фази можна було розрізнити рух прозорої (не насиченої) дрібної газо-водної складової у водній фазі. При виході на робочий тиск висота піни зменшувалася до $30\text{-}45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ і співвідношення шарів ставало 1,5:3. Після зупинки продувки така піна зменшувалася за величиною – «осідала» за 4 хвилини приблизно на 50%. Введення барвника при порівняльній продувці показало, що розчинення в даних умовах починалося з середини та дна ванни у водній фазі, тобто спінена фаза на поверхні не була щільною і суцільною, що дозволяло краплі барвника проникнути на дно і у висхідних відбитих від дна потоках почати розчинятися. І умови перемішування в цьому варіанті були мало активні, тому що після закінчення 1 хвилини продувки на дні ванни залишалася частина не перемішаного барвника.

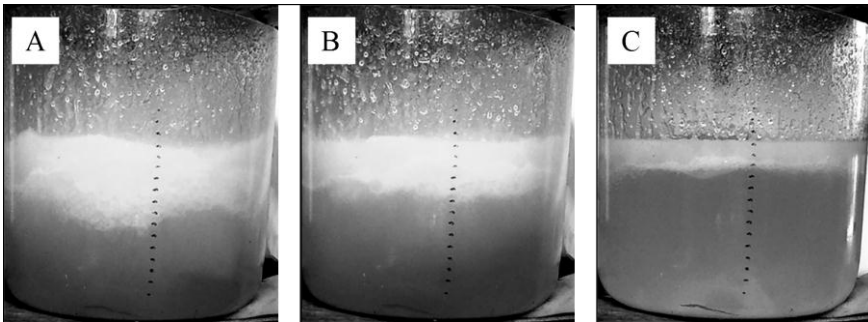


Рисунок 2 – Фото двофазної моделі продувки через порівняльний чотирьох сопловий наконечник А – на початку продувки, В – після виходу на робочий режим продувки, С- у спокійному стані.

Продувка з дослідним наконечником №1 зі співвідношенням площ складових частин 1:1 дещо відрізнялась від продувки через порівняльний наконечник і характеризувалася формуванням більш однорідної піни за висотою. Величина спінення другої фази була подібною до вище

наведеного порівняльного варіанту продувки: $35-40 \cdot 10^{-3}$ м під час продувки у робочому режимі та близько $30 \cdot 10^{-3}$ м в спокійному стані (рис. 3). Виразність шарів емульсії у цьому варіанті не була чіткою. Також не дуже виразною була дрібна фаза, що знаходиться під спіненою емульсією. Було відмічено, що спінена емульсія була сталого розміру як на початку продувки, так і під час робочого режиму продувки. Сформована пінна емульсія була досить стійкою у порівнянні з варіантом продувки через звичайний чотирьох сопловий наконечник: за 4 хвилини без продувки зменшувалася в об'ємі приблизно на 15-20%. При введенні барвника, як і на порівняльній продувці, було відзначено недостатнє його розчинення за 1 хвилину і напрямок розчинення був подібним: з дна та середини моделі.

Продувка із застосуванням дослідного наконечника №2, що відрізнялася співвідношенням площ складових частин сопла 1:2 характеризувалася візуально найактивнішим у порівнянні з іншими варіантами перемішуванням ванни (в умовах підтримання близьких показників продувки), та дуже активним формуванням емульсії з висотою в спокійному стані близько $20-25 \cdot 10^{-3}$ м.

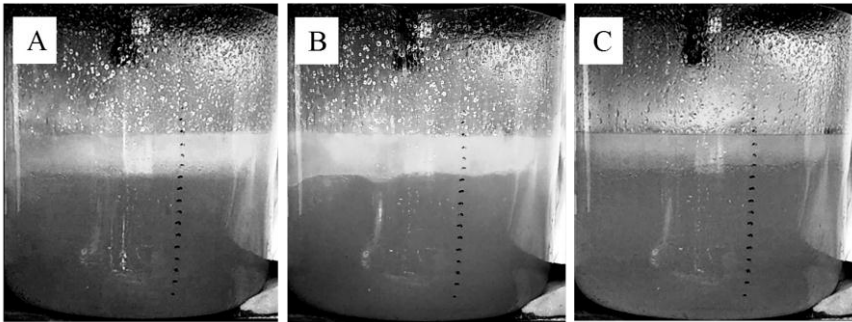


Рисунок 3 – Фото двофазної моделі продувки через дослідний наконечник №1 А – на початку продувки, В – після виходу на робочий режим продувки, С- у спокійному стані.

На початковому етапі продувки майже вся ванна виглядала однорідно змішаною: білою, дрібною завісою, виділити шари у емульсії було складно, і за рухами білої зависи можна було розрізнити, що у дрібно емульгованому стані було майже 80-90% ванни ($11-12 \cdot 10^{-3}$ м) (рис. 4). Далі при виході на робочий режим продувки висота пни становила близько $60 \cdot 10^{-3}$ м і була більш чітко виражено двошаровою: верхній візуально більш щільний шар і нижній крупно бульбашковий. Співвідношення шарів було 3:3 – 4:2. Проте й надалі протягом всієї

продувки спостерігався рух чітко розрізняемої білої дрібної завіси під другою фазою. Тобто у цьому варіанті у перемішуванні було задіяно найбільша маса рідини у порівнянні з іншими дослідними варіантами. Після припинення продувки піна проявила найвищу стійкість серед варіантів: за 4 хвилини змінилася в обсязі не більше ніж на 5-7%.

Введення барвника характеризувалося активним розчиненням вже під час руху його краплі крізь спінену емульсію з рівномірним практично однаковим за часом фарбуванням всіх формованих фаз: як підфарбовуванням спіненої емульсії, так і насиченим фарбуванням води. Причому період фарбування був найкоротшим серед усіх досліджених варіантів продувки і становив близько 35-40 секунд і після 1 хвилини продувки весь барвник було розчинено.

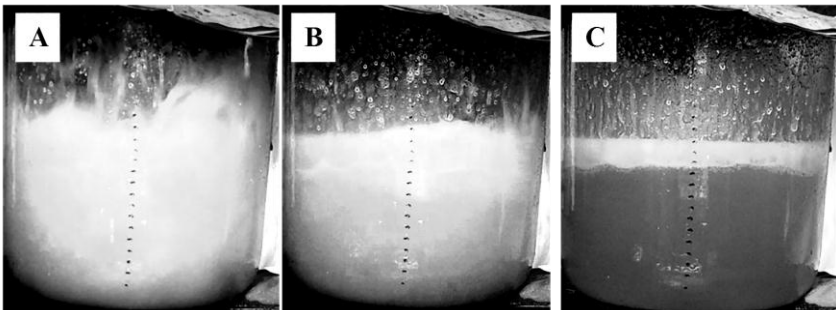


Рисунок 4 – Фото двофазної моделі продувки через дослідний наконечник №2 А – на початку продувки, В – після виходу на робочий режим продувки, С- у спокійному стані.

Продувка через дослідний наконечник № 3 зі співвідношенням площ складових частин сопел 2:1 характеризувалася також формуванням двошарової піни заввишки $30-35 \cdot 10^{-3}$ м в спокійному стані. Відрізнялась ця продувка тим, що сформована висока піна підтримувалася впродовж досить довгого часу і шари формуємої емульсії були інші: верхній шар з середньою величиною пор та зовсім дрібний нижній шар, подібний до вище описаної білої завіси (рис.5). У цьому варіанті був відсутнім шар піни з крупними бульбашками. Проте дрібна фаза займала не весь обсяг ванни у порівнянні з попереднім варіантом продувки. На початку продувки піна становила до 60% від висоти ванни (порядка $90-95 \cdot 10^{-3}$ м) і відрізнялася співвідношенням верхніх і нижніх шарів 3:6. При виході на робочий режим продувки співвідношення шарів становило 2:8-3:6 і висота піни складала приблизно $90 \cdot 10^{-3}$ м. Після зупинки продувки така піна зменшувалася за величиною за 4 хвилини приблизно на 10-15%.

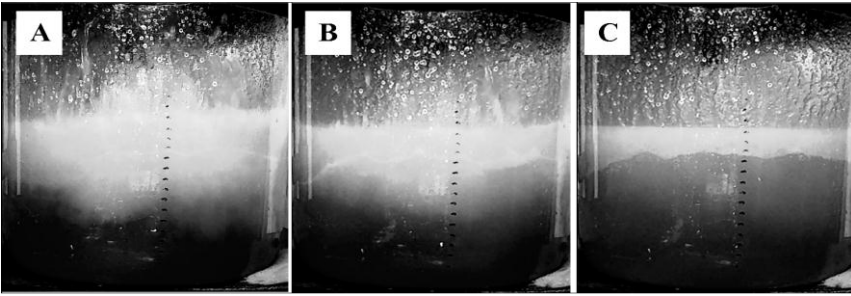


Рисунок 5 – Фото двофазної моделі продувки через дослідний наконечник №3 А – на початку продувки, В – після виходу на робочий режим продувки, С- у спокійному стані.

Введення барвника відзначалося активним розчиненням з яскравим фарбуванням в зоні спіненої емульсії з перших секунд подачі барвника і барвник активно поширювався від верхніх спінених шарів до нижніх і до води-першої фази. Час розчинення був також досить швидкий і становив близько 45-50 секунд.

Висновки. Підсумовуючи описані результати двофазного холодного моделювання продувки через складені сопла з різними параметрами у порівнянні із продувкою через звичайну чотирьох соплову фурму можна зробити висновок, що:

- застосування складених сопл, що складаються з центрального сопла, що оточене щільним соплом, з визначеним співвідношенням площ складових, сприяє активному формуванню стійкої спіненої емульсії на поверхні ванни та підвищенню активності перемішування двофазних рідин під час продувки зверху;
- найбільш сприятливі умови для організації повноцінного перемішування двох фаз у конвертерній ванні формуються при застосуванні складених сопл з величиною щілини порядку 35% та співвідношенням площ щілини та сопла 1:2;
- для інтенсифікації процесів перемішування у верхній зоні агрегату найбільш доцільно використовувати складені сопла з великою долею щілини (до 65 %) та співвідношенням площ складових частин сопла 2:1;
- використання сопл з рівновеликими площами складових не чинить позитивного впливу на обмінні процеси у конвертерній ванні.

Перелік посилань

1. *Охотский В. Б.* Гидродинамическая модель конвертера // Известия вузов. ЧМ. 1996. № 3. С. 10-14.

2. Чернятевич А.Г., Шишов Б. И. Некоторые вопросы распространения кислородных струй в рабочем пространстве конвертера // Известия вузов. ЧМ. 1981. № 1. С. 28-29.
3. Чернятевич А. Г., Зарвин Е. Я., Волович М. И. Наблюдение через прозрачную стенку за поведением конвертерной ванны при продувке // Изв. вузов. Черная металлургия. 1975. № 2. С. 37-42.
4. Явойский А.В, Тарановский Г.А. Исследование, разработка и применение газовых потоков в конвертерных процессах производства сталей // Проблемы теории и практики сталеплавильного производства. Москва : Металлургия, 1991. С. 126-148.
5. Состояние и дальнейшее совершенствование конструкций кислородных фурм в конвертерных цехах Украины / А.Д. Зражевский, А.Г. Чернятевич, А.В. Сушенко, А.С. Грищенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2014. № 6. С. 20-30.
6. Совершенствование конструкции кислородной фурмы, дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки в 160-т конвертерах ОАО «ММК им. Ильича» / А.В. Сушенко, А.А. Ларионов, В.В. Климанчук и др. // Металл и литье Украины. 2005. № 3-4. С. 64-66.

Reference

1. Ohotskiy V. B. (1996). Gidrodinamicheskaya model konvertora [Hydrodynamic model of the converter]. *Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1996, 3, 10-14. [in Russian]
2. Cherniatevich A.G., & Shishov B. I. (1981). Nekotorie voprosy rasprostraneniya kislorodnyh stuy v rabochem prostranstve konvertora [Some questions of oxygen jets propagation in the converter working space]. *Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1981, 1, 28-29. [in Russian]
3. Cherniatevich A.G., Zarvin Ye. Ya. & Volovich M.I. (1975). Nabludeniye cherez prozrachnuyu stenuku za povedeniyem konvertornoj vanny pri produvke [Observation through a transparent wall of the behavior of a converter bath during blowing]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1975, 2, 37-42. [in Russian]
4. Yavoyskiy A.V. & Taranovskiy G.A. (1991). Issledovanie, razrabotka i primeneniye gazovyh potokov v konvertornykh protsessah proizvodstva staley [Research, development and application of gas streams in converter processes of steel production]. *Problemy teorii i praktiki staleplavilnogo proizvodstva [Problems of theory and practice of steel production]*, 1991, 126-148. [in Russian]
5. Zrazhevskij A.D., Cherniatevych A.G., Sushenko A.V. & Gritsenko A.S. (2014). Sostojanie i dalnejshee sovershenstvovanie konstrukcij kislorodnyh furn v konvertornykh tsekhah Ukrainy [Condition and further improvement of oxygen tuyere structures in converter shops of Ukraine]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost [Metallurgical and mining industry]*, 2014, 6, 20-30. [in Russian]
6. Sushenko A.V., Larionov A.A. & Klimanchuk V.V. et al. (2005). Sovershenstvovanie konstrukcii kislorodnoy furny, dutevogo i shlakovogo regimov konvertornoj plavki v 160-t konverterah JSC “Ilyich iron and steel works” [Improvement of the design of the oxygen lance, blast and slag modes of converter

smelting in 160-ton converters of JSC “Ilyich iron and steel works”]. *Metall i lite Ukrainy [Metal and casting of Ukraine]*, 2005, 3-4, 64-66. [in Russian]

S.I. Semykin, PhD, senior researcher; ORCID 0000-0002-7365-2259

T.S. Golub, PhD, senior researcher; ORCID 0000-0001-9269-2953

V.V. Vakulchuk, PhD, researcher; ORCID 0000-0001-7887-2843

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Research on the physical model of features of the behavior of a two-phase bath at top blowing through a tip with folded nozzles

Summary. At the previous stage of research using a physical model of an oxygen converter, the results of studying the features of purging a single-phase liquid through a single composite nozzle were obtained. The aim of this work was to study the behavior of a two-phase bath using a multi-nozzle lance with folded nozzles. At this stage of the study, silicone oil was used to simulate the slag phase of a two-phase bath. The peculiarities of the influence of experimental nozzles on the processes of mixing and foaming of two phases were studied. Three variants of the experimental nozzle design were investigated: a combination of a conventional and a slit nozzle with a ratio of their areas of 1: 1, 1: 2 and 2: 1. It is established that the use of a tip with four nozzles during purging from above promotes the active formation of a two-layer foamed emulsion on the surface of the bath. Comparison of the operation of the tip with folded nozzles with a tip with a cylindrical indicates more active mixing of the two liquids and the formation of a more stable and much higher layer of foamed emulsion. The most favorable conditions for the organization of full mixing of the two phases in the converter bath are formed when using folded nozzles with a slit size of about 35% and a ratio of slot and nozzle area of 1: 2. To intensify the mixing processes in the upper zone of the unit, it is most expedient to use folded nozzles with a larger fraction of the slit (up to 65%) and the ratio of the areas of the components of the nozzle 2: 1. The use of nozzles with equal areas of components in the studied conditions does not have a positive effect on metabolic processes in the converter bath.

Keywords: oxygen conversion, physical modeling, upper purge, folded nozzle, delay and mixing of two-phase phases

For citation: *Semykin S.I., Holub T.S., Vakulchuk V.V.* Doslidzhennya na fizychniy modeli osoblyvostey povedinky dvofaznoyi vanny pry verkhnomu produvanni cherez nakonechnyk zi skladenymy soplamy. [Research on the physical model of the behavior of a two-phase bath with the upper purge through the tip with folded nozzles.]. *«Fundamental'nye i prikladnye problemy chornoj metallurgii»*. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 129-138. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-129-138

*Стаття надійшла до редакції збірника 29.10.2020 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування.
(Протокол засідання редакційної колегії №3 від 22 грудня 2020 р.)*

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34
«Fundamental'nye i prikladnye problemy chornoj metallurgii». – 2020. – Випуск 34
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34*