

DOI: 10.31319/2519-2884.39.2021.3

УДК 669.184

А.А. Похвалітій, к.т.н., доцент, artemmslp@gmail.com

Є.М. Сігарьов, д.т.н., професор, en_sigarev@ua.fm

К.І. Чубін, к.т.н., доцент, ch.konstanta@ukr.net

Ю.С. Лобанов, аспірант

П.А. Якунін, зав. лаб.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ В НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ З ПОПЕРЕДНІМ ПІДГРІВОМ МЕТАЛОБРУХТУ

В роботі вирішена актуальна наукова задача, яка полягає в науковому обґрунтуванні напрямків удосконалення конструкції наконечника кисневої фурми зі встановленням зв'язку між конструктивними та технологічними параметрами останнього та показниками конвертерної плавки. Метою роботи є обґрунтування конструктивних параметрів продувних пристроїв 250-т кисневих конвертерів для умов ПАТ «ДКХЗ» (колишній ПАТ «ДМК») в умовах попереднього підігрівання металобрухту в конвертері. Отримано залежність коефіцієнту нерозрахунковості для штатних і дослідних наконечників кисневих фурм. Показано, що запропоновані наконечники є більш ефективними для умов попереднього підігрівання брухту.

Ключові слова: конвертер, фурма, наконечник, брухт, підігрів, сталь, кисень, коефіцієнт нерозрахунковості.

The actual scientific problem is solved in the work, which consists in scientific substantiation of directions of improvement of a design of a tip of an oxygen lance with establishment of communication between constructive and technological parameters of the last and indicators of converter melting. The aim of the work is to substantiate the design parameters of purge devices of 250 tons of oxygen converters for the conditions of PJSC "DKHZ" (former PJSC "DMK") in the conditions of preheating of scrap metal in the converter. The dependence of factor off-design for regular and experimental tips of oxygen lances is obtained. It is shown that the proposed tips are more effective for the conditions of preheating of scrap.

Keywords: converter, lance, tip, scrap, heating, steel, oxygen, off-design factor.

Постановка проблеми

З метою підвищення ефективності дуття, більш повного використання потенційної енергії кисневих струменів для інтенсифікації гідрогазодинамічних процесів конвертерної ванни при розробці конструкцій кисневих фурм необхідно прагнути до мінімізації втрати тиску кисню в магістралі і в дуттьовому пристрої.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У зв'язку з необхідністю регулювання витрати тиску в процесі продувки конвертерної ванни і коливаннями тиску кисню в магістралі сопла наконечників фурм працюють в нестационарних (нерозрахункових) умовах. При цьому продувка може відбуватися при «перерозширенні» дуттьового потоку (коефіцієнт нерозрахунковості $n < 1$), що призводить до відриву течії від стінок дифузора та «розгару» його вихідної ділянки, зниження стійкості наконечників фурм та порушення режиму дуття [1—3]. Для запобігання зазначеним явищам пропонують: зменшувати довжину [4] або кут розкриття дифузора ($\beta = 8—12^\circ$) [5], вибирати вихідний діаметр сопла відповідно до мінімальної витрати (тиску) кисню [6]. При цьому потенційна енергія дуття використовується неефективно, а струмені менш організовані (порівняно з розрахунковим режимом) [7]. Оптимальна область значень $n = 1,0—1,3$ [1].

В роботі [8] представлені результати застосування модернізованих наконечників зі зменшеним кутом нахилу сопла до вісі фурми до 15° . Параметри штатних і дослідних наконечників представлені в табл. 1. Авторами зазначено, що при поліпшенні умов для попереднього пі-

дігріву металобрухту при використанні запропонованих наконечників знижена інтенсивності зносу футерівки, заметалення стовбура фурми з дослідним наконечником було незначним у порівнянні зі штатним.

Таблиця 1. Параметри наконечників фурми [9]

Параметри	Наконечник			
	Штатний		Дослідний	
Кількість сопел, шт.	5	6	5	6
Діаметр зовнішньої труби, мм	426	426	426	426
Вхідний діаметр сопла Лавалю, мм	46	37	49	43
Вихідний діаметр сопла Лавалю, мм	60	43	52	47
Критичний діаметр сопла Лавалю, мм	41	37	41	37
Довжина конфузора, мм	14	6,5	20	19
Довжина дифузора, мм	71,5	45	79	48
Кут розкриття сопла Лавалю, град.	15	8	8	12
Кут нахилу сопла Лавалю до вертикальної осі фурми, град.	17	17	15	15
Витрата кисню на продування ванни (робочий), нм ³ /хв	650—800	650—800	700—1000	700—1100
Діаметр розташування осей вихідних перерізів сопел Лавалю на торці наконечника, мм	252	252	250	250

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є обґрунтування конструктивних параметрів продувних пристроїв 250-т кисневих конвертерів для умов ПАТ «ДКХЗ» (колишній ПАТ «ДМК») в умовах попереднього підігрівання металобрухту в конвертері.

Виклад основного матеріалу

У сучасних сировинних умовах і технології ведення плавки, що склалися, до основних напрямів удосконалення наконечників кисневих фурм для 250-т конвертерів слід віднести:

– розробку 5-ти та 6-ти соплових наконечників фурм з конфігурацією та розташуванням сопел Лавалю, відповідним вимогам попереднього підігріву брухту та оптимізації шлакоутворення по ходу продування за умови зниження окислення ванни;

– відпрацювання раціональних дутьових режимів попереднього підігріву брухту та продування ванни із задіянням розроблених конструкцій наконечників із забезпеченням зниження питомої витрати металошихти та добавок, зниження теплового навантаження на футерівку конвертера.

При розробці конструкції 5-ти і 6-ти соплових наконечників ПАТ «ДКХЗ» за методикою [10] враховувалась необхідність попереднього підігріву брухту. При такому режимі витрата кисню складає 650—750 м³/хв. В основний період окиснювального рафінування витрата кисню становить 950—1000 (1100) м³/хв. Слід зазначити, що без використання парку фурм, призначених для різного роду процедур (нагрівання брухту, рафінування чавуну тощо) дослідникам доводиться йти на компромісні рішення, оскільки робота фурми в розрахунковому режимі (коефіцієнт нерозрахунковості $n = 1$) при значних коливаннях витрати кисню неможлива.

На рис. 1 представлені дані про зміну коефіцієнту нерозрахунковості в залежності від витрати кисню для 5-ти соплової фурми. Показано, що штатна фурма працює в розрахунковому режимі при витраті кисню вище 1100 м³/хв. З одного боку така конструкція дозволяє більш повно використовувати потенційну енергію кисневого струменю при окислювальному рафінуванні, а з іншого боку, при необхідності попереднього підігріву брухту, продувка відбувається з перерозширенням кисневого струменю ($n = 0,60—0,65$), що може призводити до розгару сопла. Питання перерозширення і нині залишається дискусійним, оскільки існує думка, що робота сопла з коефіцієнтом нерозрахунковості менше 1 є припустимою [11].

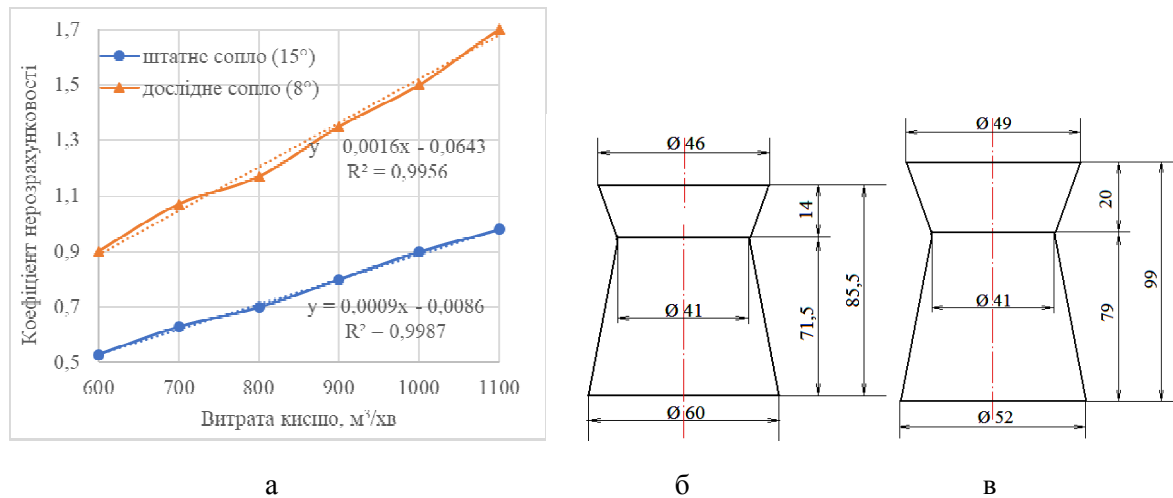


Рис. 1. Значення коефіцієнту нерозрахунковості (а) в робочому діапазоні витрат кисню для 5-ти соплового наконечника зі штатними (б) і дослідними (в) соплами

Запропонована конструкція наконечника фурми ефективно працює в режимі підігріву брукху при 650—750 м³/хв. і має $n = 1—1.1$. При витраті кисню 900—1000 м³/хв. коефіцієнт нерозрахунковості знаходиться в межах 1,3—1,5, що є цілком припустимою величиною [1]. Форма сопла штатного і дослідного 5-ти соплового наконечника представлена на рис. 1б, в. Сопло дослідного наконечника має менший кут розкриття дифузору і дещо подовжено в порівнянні зі штатною конструкцією. На рис. 2 представлено розрахункові параметри закритичної частини сопла 5-ти соплового наконечника для досліджуваного діапазону витрати кисню при куті розкриття 15° і 8°.

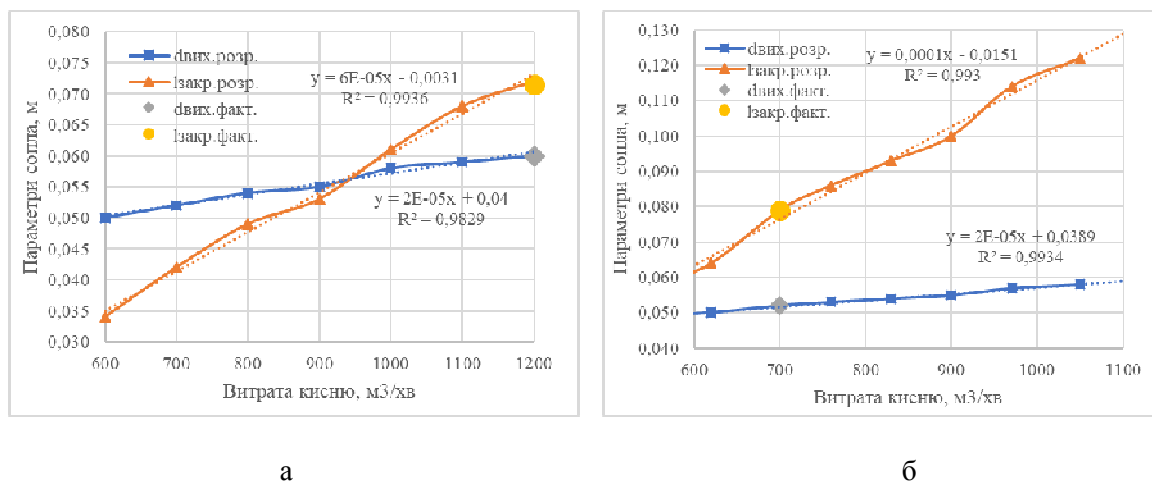


Рис. 2. Розрахункові значення закритичної частини сопла з кутом розкриття 15° (а) і 8° (б)

На рис. 2 показано, що зменшення витрати кисню потребує скорочення довжини закритичної частини сопла, що цілком корелюється з літературними даними [4, 5]. Для штатного наконечника (рис. 2а) через надмірний кут розкриття сопла для режиму підігріву брукху $l_{\text{закр}}$ має становити 40—45 мм, що може ускладнити існуючу технологія виготовлення 5-ти соплового наконечника. Менш радикальним було рішення зменшити кут розкриття сопла (рис. 1б), що дозволило дещо збільшити довжину сопла і підвищити жорсткість дуття.

Для штатної фурми з 6-ти сопловим наконечником картина дещо інша. На рис. 3 показано, що для цієї фурми при витраті кисню 600—1100 м³/хв коефіцієнт нерозрахунковості ко-

ливається в широкому діапазоні від 1,3 до 2,3. Тобто, наконечник фурми розрахований на низьку витрату кисню і при значеннях вище $1000 \text{ м}^3/\text{хв}$ коефіцієнт нерозрахунковості вдвічі перевищує рекомендовані ($n = 2,1—2,3$). Сопла працюють зі значним недорозширенням і ефективність використання потенційної енергії знижується.

З урахуванням цього розроблено дослідний 6-ти сопловий наконечник зі збільшеним кутом розкриття сопла ($\beta=12^\circ$). Розрахунки показують (рис. 3), що при витраті кисню для нагрівання металобрухту ($650—750 \text{ м}^3/\text{хв}$) фурма працює в розрахунковому режимі ($n = 1,00—1,07$). При максимальній витраті кисню ($1000—1100 \text{ м}^3/\text{хв}$) $n = 1,5—1,7$, що вказує на більш ефективне використання потенційної енергії кисневого струменю.

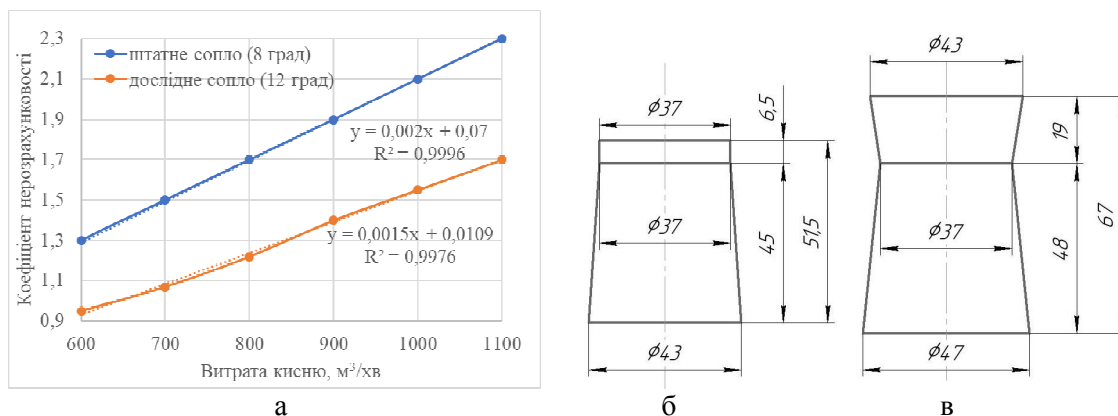


Рис. 3. Значення коефіцієнту нерозрахунковості (а) в робочому діапазоні витрат кисню для 6-ти соплового наконечника зі штатними (б) і дослідними (в) соплами

За результатами аналізу даних дослідно-промислових кампаній встановлено, що дослідні плавки з 5-ти сопловим наконечником характеризуються: підвищенням на 0,105 % середнім вмістом кремнію в чавуні при нижчій концентрації марганцю ($-0,05\%$) та фосфору ($-0,005\%$) порівняно зі штатними плавками; підвищеною питомою витратою брухту в металошихті ($+3,85\%$) за відповідної економії переробного чавуну ($-0,9\%$ чавуну); очікуваним незначним перевитратою кисню на попередній підігрів брухту ($+2,7\%$) та зменшенням витрати кисню на продування ($-1,7\%$); показник дефосфорації розплаву збільшився на 2,35 %. За результатами цієї дослідної кампанії отримано зниження окисленості кінцевого шлаку на 1,7 % та питомої витрати металошихти на сталеву заготовку на 0,29 кг / т. Дослідні плавки другої кампанії, проведені з використанням для продування ванни 5-ти соплового наконечника характеризуються такими показниками: при приблизно рівному зі штатними середнім вмістом $[\text{Si}]_{\text{чуг}}$ витрати вапна на плавку підвищено на 1,32 кг / т, що обумовлено підвищеною витратою передельного чавуну ($+1,7\%$) у порівнянні зі штатними плавками; ступінь дефосфорації залізовуглецевого розплаву після закінчення продування в дослідних плавках склала 76,52 % порівняно з 76,61 % на штатних плавках ($-0,009\%$) при одночасному зниженні окисленості шлаку на 1,96 %; питома витрата металошихти на сталеву заготовку знижено на 0,38 кг / т.

На дослідних плавках з використанням 6-ти соплового наконечника при приблизно рівному вмісті кремнію і фосфору в чавуні у зв'язку зі зниженням частки останнього в металошихті (в середньому $-0,83 \text{ т/пл.}$) досягнуто скорочення питомої витрати вапна ($-1,81 \text{ кг / т}$) та кисню на продування ванни ($-264 \text{ м}^3/\text{плавку}$). При рівній температурі ванни після закінчення продування вміст вуглецю в розплаві був вищим на 0,012 % у порівнянні зі штатними плавками, а окисленість шлаку — менше на 1,22 % відповідно. Зниження основності ($-0,24 \text{ од.}$) та окиснення шлаку призвело до зменшення ступеня дефосфорації розплаву на 1,14 %. Скорочення питомої витрати металошихти на сталеву заготовку під час використання 6-ти соплового наконечника під час дослідно-промислової кампанії становило 0,26 кг/т.

Висновки

Таким чином, фурми з дослідними наконечниками, при наявному в цеху тиску, надійно працюють в діапазоні витрат кисню 650—950 м³/хв і дозволяють збільшувати витрати кисню на початку продування до 1000—1100 м³/хв і більше, за необхідності.

Коефіцієнт нерозрахунковості для дослідних в робочому діапазоні витрат кисню для запропонованих 5-ти і 6-ти соплових наконечників знаходиться в межах $n = 1,0—1,7$, що сприяє зменшенню розгару сопел і заметалюванню фурми.

Для максимізації використання потенційної енергії кисневого потоку і продувки в розрахунковому режимі доцільним є використання парку фурм, призначених для різних режимів продувки.

Список використаної літератури

1. Сущенко А.В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров / А.В. Сущенко // *Вісник Приазовського державного технічного університету*, 2009, № 19, С. 36–41.
2. Баптизманский В.И. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса / В.И. Баптизманский, В.Б. Охотский. Киев-Донецк: Вища школа, 1981, 182 с.
3. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктий и др. М.: Машиностроение, 1987, 184 с.
4. К вопросу о проектировании дутьевых сопел кислородных фурм / А.С. Горбик, В.С. Бобошко, Л.М. Гревцев и др. // *Сталь*. 1971. № 12. С. 1077–1079.
5. Старов Р.В. Производство стали в конвертерах / Р.В. Старов, В.А. Нагорских. К: Техника, 1987, 165 с.
6. Готов Г.Ф. Исследование параметров осесимметричных недорасширенных струй газа, истекающих в затопленное пространство / Г.Ф. Готов, М.И. Фейман // *Ученые записки ЦАГИ*, 1971, Т. 2, № 4, С. 69–75.
7. Повышение стойкости наконечников фурм для 350-т конвертеров / А.В. Сущенко, А.А. Курдюков, И.Д. Буга и др. // *Сталь*, 1996, № 5, С. 14–17.
8. Сігарьов Є.М. Дослідження впливу конструкції наконечника фурми на показники конвертерної плавки з попереднім підігрівом металобрухту / Є.М. Сігарьов, Ю.С. Лобанов, А.А. Похвалітий // *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське: ДДТУ, 2021, вип. 1(38), С. 33–38.
9. Сигарев Е. Н. Использование наконечников фурм с уменьшенным углом наклона сопел в конвертерной плавке с повышенной долей лома [Электронный ресурс] / Е.Н. Сигарев, А.А. Похвалитый, П.А. Якунин // *Університетська наука - 2021: тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. (Маріуполь, 19–20 травня 2021 р.): в 4 т. / ДВНЗ «ПДТУ»*. Маріуполь, 2021, Т. 1, С. 32–33.
10. Горбик А.С. К вопросу о проектировании дутьевых сопел кислородных фурм / А.С. Горбик, В.С. Бобошко, Л.М. Гревцев и др. // *Сталь*, № 12, 1971, С. 1077–1079.
11. Разработка и внедрение парка кислородных фурм и дифференцированной технологии ведения конвертерной плавки в кислородно-конвертерном цехе ОАО "МУ «Азовсталь» / А.В. Сущенко И.Д. Буга, А.В. Воробьев [и др.] // *Металлургические процессы и оборудование*, 2005, №1, С. 47–50.

SPECIFIC FEATURES OF DETERMINING THE DESIGN OF OXYGEN TUBE TIPS UNDER NON—STATIONARY CONDITIONS OF CONVERTER MELT WITH PRELIMINARY HEATING OF SCRAP

Pohvalitiy A., Sigarev E., Chubin K., Lobanov Yu., Yakunin P.

Abstract

The results of calculating the parameters of the tips of oxygen lances, taking into account the preheating of scrap metal in the converter due to the combustion of solid fuels in the modern raw materi-

al conditions of a metallurgical enterprise of Ukraine, are presented. The substantiation of the design of blowing devices is provided. The results of calculating the geometric parameters and the coefficient of off-design for standard and experimental tips of oxygen lances are presented. Using numerical methods, the value of the diameters and length of the supercritical part of the nozzle was obtained. It is shown that with a decrease in the blast flow rate, it is advisable to decrease the length of the supercritical part of the nozzle, which is fully correlated with the literature data. The change in the coefficient of off-design was determined for the studied range of oxygen consumption (600—1100 m³ / min) for standard and experimental handpieces. It is shown that the value of the coefficient of off-design is in the range of 0.52—0.98 and 1.30—2.30, respectively, for 5- and 6-nozzle standard tips. For experimental tips, this figure is 1.00—1.70. Tuyeres with experimental tips, at the pressure available in the shop, reliably operate in the range of oxygen consumption 650—950 m³ / min and allow increasing the oxygen consumption at the beginning of the blowdown to 1000—1100 m³ / min and more, if necessary. The resulting saving effect from the introduction of the modernized tips is: a decrease in the oxidation of the final slag 1.22—1.70 %; reduction in the specific consumption of lime 0.29—1.81 kg / t; reduction of specific consumption of metal charge 0.26—0.38 kg/t.

References

- [1] Sushchenko A.V. Sovershenstvovaniye i optimizatsiya dut'yevykh rezhimov i ustroystv kislorodnykh konverterov / A.V. Sushchenko // *Visnik Priazov'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu*, 2009, № 19, P. 36—41. [in Ukraine]
- [2] Baptizmanskiy V.I. Fiziko-khimicheskiye osnovy kislorodno-konverternogo protsessa / V.I. Baptizmanskiy, V.B. Okhotskiy. Kiyev-Donetsk: Vishcha shkola, 1981, 182 p. [in Ukraine]
- [3] Tekhnologiya proizvodstva stali v sovremennykh konverternykh tsekhakh / S.V. Kolpakov, R.V. Starov, V.V. Smoktiy i dr. M.: Mashinostroyeniye, 1987, 184 p. [in Russian].
- [4] K voprosu o proyektirovanii dut'yevykh sopel kislorodnykh furn / A.S. Gorbik, V.S. Boboshko, L.M. Grevtsev i dr. // *Stal'*. 1971. № 12. P. 1077—1079. [in Russian].
- [5] Starov R.V. Proizvodstvo stali v konverterakh / R.V. Starov, V.A. Nagorskikh. K: Tekhnika, 1987, 165 p. [in Ukraine].
- [6] Glotov G.F. Issledovaniye parametrov osesimmetrichnykh nedorasshirennykh struy gaza, istekayushchikh v zatoplennoye prostranstvo / G.F. Glotov, M.I. Feynman // *Uchenyye zapiski TSAGI*, 1971, T. 2, № 4, P. 69—75. [in Russian].
- [7] Povysheniye stoykosti nakonechnikov furn dlya 350-t konverterov / A.V. Sushchenko, A.A. Kurdyukov, I.D. Buga i dr. // *Stal'*, 1996, № 5, P. 14—17. [in Russian].
- [8] Sigarev E.M. Doslidzhennya vplyvu konstruktsiyi nakonechnykh furn na pokaznyky konverternoyi plavky z poperednim pidihrivom metalobrukhtu / E.M. Sigarev, Yu.S. Lobanov, A.A. Pokhvalitiy // *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky)*. Kamyanske: DDTU, 2021, vyp.1(38), P. 33—38. [in Ukraine].
- [9] Sigarev E. N. Ispol'zovaniye nakonechnikov furn s umen'shennym uglom naklona sopel v konverternoy plavke s povyshennoy doley loma [Elektronnyy resurs] / E.N. Sigarev, A.A. Pokhvalitiy, P.A. Yakunin // *Universitets'ka nauka - 2021: tezi dop. Mizhnar. naukovo-tekhn. konf. (Mariupol', 19—20 travnya 2021 r.): v 4 t. / DVNZ «PDTU»*. Mariupol', 2021, T. 1, P. 32—33. [in Ukraine].
- [10] Gorbik A.S. K voprosu o proyektirovanii dut'yevykh sopel kislorodnykh furn / A.S. Gorbik, V.S. Boboshko, L.M. Grevtsev i dr. // *Stal'*, № 12, 1971, P. 1077—1079. [in Russian].
- [11] Razrabotka i vnedreniye parka kislorodnykh furn i differentsirovannoy tekhnologii vedeniya konverternoy plavki v kislorodno-konverternom tsekh OAO "MK «Azovstal'» / A.V. Sushchenko I.D. Buga, A.V. Vorob'yev [i dr.] // *Metallurgicheskkiye protsessy i oborudovaniye*, 2005, №1, P. 47—50. [in Ukraine].