

Нізяєв К.Г., Мамешин В.С., Журавльова С.В.

Аналіз факторів, що впливають на дисипацію потужності кисневого струменя при верхній продувці в кисневому конверторі

Nizyaev K., Mameshyn V., Zhuravlyova S.

Analysis of factors affecting the power dissipation of the oxygen jet at upper blowing in oxygen converters

Історія промислового використання киснево-конвертерного процесу довела його високу ефективність і конкурентоспроможність. Домінуюча позиція киснево-конвертерного процесу у першу чергу пов'язана з його технологічною сутністю, яка полягає в окисному рафінуванні рідкого чавуну за рахунок подачі газоподібного кисню у ванну кисневого конвертера. Незалежно від прийнятого способу організації технологічного процесу характер впровадження й поширення кисневих струменів у рідкій ванні впливає на структуру гідродинамічних потоків у конвертерній ванні, що, у свою чергу, регулює тепло- і масоперенесення у ній і в остаточному підсумку визначає загальні техніко-економічні показники киснево-конвертерного процесу. Для способу подачі рафінуючого дуття зверху, у силу його організації й конструкційного оформлення, характер впровадження й режим взаємодії кисневих струменів з металеву ванною визначається енергією з якої вони впливають на поверхню рідкого металу. При цьому питанню оцінки втрат енергії струменя на ділянці між зрізом фурми й поверхню рідкої ванни у науковій літературі не приділене достатньої уваги. Проведений аналіз показав, що основними факторами, що впливають на дисипацію потужності кисневого струменя, що поширюється в порожнині кисневого конвертера, є висота розташування фурми й інтенсивність дуття. Частка дисипації потужності струменя на ділянці від зріза фурми до поверхні спокійної ванни може сягати 90%.

Ключові слова: КИСНЕВИЙ КОНВЕРТЕР, ПРОДУВКА, ДИСИПАЦІЯ ПОТУЖНОСТІ, ФУРМА, ПОНАДЗУКОВИЙ СТРУМЕНЬ

The history of industrial use of the oxygen-converter process has proved its high efficiency and competitiveness. The dominant position of the oxygen-converter process is primarily due to its technological essence, which consists in oxidative refining of liquid iron by supplying oxygen gas to the oxygen converter bath. The nature of the introduction and propagation of oxygen jets in a liquid bath affects the structure of hydrodynamic flows in the converter bath, which, in turn, regulates heat and mass transfer in it and ultimately determines the overall technical and economic performance of the oxygen converter process. For the method of supplying the refining blast from above, due to its organization and design, the nature of implementation and mode of interaction of oxygen jets with the metal bath is determined by the energy from which they affect the surface of the liquid metal. The issue of estimating the energy loss of the jet in the area between the lance cut and the surface of the liquid bath in the scientific literature is not given enough attention. The analysis showed that the main factors influencing the dissipation of the power of the oxygen jet propagating in the cavity lances and blast intensity. The share of jet power dissipation in the area from the lance cut to the surface of the quiet bath can reach 90%.

Keywords: OXYGEN CONVERTER, PRODUKA, POWER DISSIPATION, FURMA, SUPPLEMENTARY JET

ВСТУП

Майже 70-річна історія промислового використання киснево-конвертерного процесу довела його високу ефективність і конкурентоспроможність. За цей час він зайняв домінуючу позицію у світовому виробництві сталі, так частка сталі, виплавленої в кисневих-конверторах в 2019 г складала 71,9 %, що відповідає 1 млрд. 342 млн. 732 тис. тонн [1]. Аналогічна тенденція спостерігається й у металургійній галузі України, де, не дивлячись на значне скорочення загальних обсягів виробництва сталі, зберігається висока частка киснево-конвертерного процесу (в 2019 складала 71,2%) [1].

Домінуюче положення киснево-конвертерного

процесу обумовлене його наступними перевагами [2-4]:

- широкий інтервал хімічного складу чавунів, що переробляються;
- можливість переробки до 25-30% металобрухту без використання додаткових джерел енергії, таких як електроенергія, природний газ, вугілля;
- можливість виробництва широкого сортаменту високоякісних сталей у тому числі й легованих;
- висока продуктивність, простота керування й гнучкість технологічного процесу.

Дані переваги, у першу чергу, пов'язані з технологічною сутністю киснево-конвертерного про-

цесу, яка полягає в окисному рафінуванні рідкого чавуну, яке протікає за рахунок подачі газоподібного кисню у ванну кисневого конвертера.

Аналіз літературних даних

Залежно від прийнятої на конкретному металургійному підприємстві технології виплавки сталі, для подачі кисню в рідку металеву ванну використовують один з наступних способів: [2-5]

- верхня продувка через водоохолоджуєму фурму;
- нижня продувка через концентричні фурми, встановлені в днище конвертера
- комбінована продувка, що поєднує верхню й нижню продувку.

Згідно статистичним даним [6] по вибірці з 54 конвертерних цехів ряду країн (США, Канада, Мексика, Індія, Бразилія, Австралія, Туреччина, Великобританія й ін.) переважна більшість конверторів (121 з 126) працюють із верхньою продувкою киснем і лише в роботі 3-х конвертерів використовується нижня продувка й ще 2 працюють із комбінованою продувкою киснем зверху й знизу.

Загальноприйнятим поглядом є, що незалежно від способу підведення окисного дуття, саме характер процесу впровадження й поширення кисневих струменів у рідкій ванні впливає на структуру гідродинамічних потоків у конвертерній ванні, що, у свою чергу, регулює тепло- і масоперенесення у ній і в остаточному підсумку визначає загальні техніко-економічні показники киснево-конверторного процесу [3,5,7].

Для способу подачі рафінуючого дуття зверху, через водоохолоджуєму фурму; у силу його організації й конструкційного оформлення, характер впровадження й режим взаємодії кисневих струменів з металеву ванною визначається енергією з якої вони впливають на поверхню рід-

кого металу і якщо питання енергетичного балансу турбулентного кисневого струменя на ділянці її проникнення в рідкий метал досить докладно розібрані, наприклад у роботі [8], то питанням оцінки втрат енергії струменя на ділянці між зрізом фурми й поверхнею рідкої ванни у науковій літературі не приділене достатньої уваги.

Процес втрати енергії струменя звичайно зв'язують із турбулентним характером плинун надзвукових струменів [7-9] і, у загальному виді, він може бути описаний у такий спосіб. Газовий струмінь, завдяки поперечним переміщенням турбулентних макрочасток починає захоплювати частки навколишнього середовища й утягувати їх у рух. Кількість газів, що протікають через поперечний переріз струменя за одиницю часу, у міру видалення від сопла збільшується, тому середньовитратна швидкість руху поступово зменшується [10]

Оцінити дисипацію енергії газового струменя на ділянці між фурмою й поверхнею рідкої ванни можливо опираючись на закон збереження енергії представивши його у вигляді балансового рівняння:

$$e_1 = e_2 + e_3 \quad (1)$$

де e_1 – енергія струменя на зрізі сопла Лавалля, Дж; e_2 – енергія струменя на рівні спокійної металеві ванни, Дж; e_3 – дисипація енергії струменя, Дж.

Якщо енергію газового струменя вважати, як суму внутрішньої енергії й статичного, динамічного, геометричного тиску на зрізі сопла Лавалля й на рівні спокійної металеві ванни [10, 11] то рівняння 1 здобуває вигляд:

$$\left(P_1 + \frac{\rho_1 \cdot \bar{\omega}_1^2}{2} + g \cdot \rho_1 \cdot Z_1 + u_1 \right) = \left(P_2 + \frac{\rho_2 \cdot \bar{\omega}_2^2}{2} + g \cdot \rho_2 \cdot Z_2 + u_2 \right) + e_3 \quad (2)$$

де P_1, P_2 – статичний тиск для відповідних перетинів, Па; $\frac{\rho_1 \cdot \bar{\omega}_1^2}{2}, \frac{\rho_2 \cdot \bar{\omega}_2^2}{2}$ – динамічний тиск, Па; $g \cdot \rho_1 \cdot Z_1, g \cdot \rho_2 \cdot Z_2$ – геометричний тиск, Па; u_1, u_2 – внутрішня енергія, Дж/м³.

Аналіз доданків, що входять до рів. 2 дозволяє його трохи спростити виходячи з наступних міркувань і допущень.

Конвертер є відкритою для атмосфери системою й оскільки витікання кисню із сопла Лавалля проходить у розрахунковому режимі тиск на зрізі сопла дорівнює тиску в порожнині конвертера, у такий спосіб значення статичних тисків на зрізі сопла й у поверхні рідкої ванни будуть рівні між собою й можуть бути виключені з розрахунку.

Величина Z_1 , відповідає висоті розташування зрізу фурми над рівнем рідкої ванни, а величина Z_2 відповідає рівню спокійної ванни й, відповідно, ($Z_2 = 0$).

Як показують результати досліджень, представлені в роботах [7,8,12] кисневий струмінь, що витікає з фурми досить швидко нагрівається в результаті теплового впливу навколишнього середовища й вже на відстані 15-20 калібрів вона досягає температури навколишнього середовища (1300-1600°C). Тому приймемо, що нагрівання струменя відбувається відразу за зрізом сопла й значення внутрішньої енергії $u_1 = u_2$.

У такий спосіб рівняння 2 приймає вид:

$$\left(\frac{\rho_1 \cdot \bar{\omega}_1^2}{2} + g \cdot \rho_1 \cdot Z_1 \right) = \left(\frac{\rho_2 \cdot \bar{\omega}_2^2}{2} \right) + e_3 \quad (3)$$

Якщо помножити праву й ліву частину рівняння 3 на витрату газу одержимо баланс потужності:

$$\frac{m_1}{\rho_1} \cdot \left(\frac{\bar{\omega}_1^2}{2} + g \cdot \rho_1 \cdot Z_1 \right) = \frac{m_2}{\rho_2} \cdot \left(\frac{\bar{\omega}_2^2}{2} \right) + \frac{m_3}{\bar{\rho}} \cdot e_3 \quad (4)$$

або в згорнутому виді:

$$W_1 = W_2 + W_3 \quad (5)$$

де m_1, m_2, m_3 – масова витрата газу, кг/з; $\rho_1, \rho_2, \bar{\rho}$ – щільність газу, кг/м³; $\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2$ – середня швидкість газу, м/с; g – прискорення вільного падіння, м/с²; Z_1 – висота розташування фурми над рівнем спокійної ванни, м, W_1, W_2, W_3 – відповідно

но потужність струменя на зрізі сопла, у поверхні рідкої ванни й дисипації енергії, Вт;

Виходячи з рівнянь 4 і 5 потужність дисипації енергії струменя може бути виражена по рівнянню (6)

$$W_3 = W_1 - W_2 = m_1 \cdot \left(\frac{\bar{\omega}_1^2}{2} + g \cdot Z_1 \right) - m_2 \cdot \left(\frac{\bar{\omega}_2^2}{2} \right) \quad (6)$$

Для розрахунків параметрів розрахункового струменя на виході із сопла Лавалля, можна скористатися наступними рівняннями [10]:

- швидкість газу на виході із сопла Лавалля:

$$\bar{\omega}_1 = \omega_1 = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_{\text{окр.ср}}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (7)$$

- масова витрата газу на виході із сопла Лавалля:

$$m_1 = f_{\text{вих}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot P_0 \cdot \rho_0 \cdot \left(\left(\frac{P_{\text{окр.ср}}}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{\text{окр.ср}}}{P_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} \quad (8)$$

де φ – коефіцієнт, що враховує вплив тертя й відхилення від адіабатичного процесу (звичайно близький до 1); k – показник адіабати, рівний для двохатомних газів 1,4; P_0 – тиск газу перед входом у сопло Лавалля, Па; ρ_0 – щільність газу перед входом у сопло Лавалля, кг/м³; $P_{\text{окр.ср}}$ – тиск навколишнього середовища, Па; $f_{\text{вих}}^2$ – площа вихідного перетину сопла Лавалля, м².

$$m_2 = m_{\text{пр.м}} + m_1 \quad (10)$$

Зміна осьової швидкості газового струменя, у поверхні рідкої ванни (на відстані Z_1 від зрізу сопла), можна знайти, згідно з вираженнями, отриманими С. Іто і Й. Мучі [14]:

$$\omega^{\text{ось}} = \bar{\omega}_1 \left(1 - \exp \left(- \frac{1}{a \cdot \bar{x} \cdot \bar{\rho}^{0.5-b}} \right) \right) \quad (11)$$

Значення коефіцієнтів a і b в рів. 11 визначається комплексом величиною $\bar{x} \cdot \bar{\rho}^{0.5}$, ($\bar{x} \cdot \bar{\rho}^{0.5} \geq 6,82$ – $a = 0,218, b = 1,482$); ($\bar{x} \cdot \bar{\rho}^{0.5} > 7,95$ – $a = 0,191, b = 1,517$); ($\bar{x} \cdot \bar{\rho}^{0.5} \geq 9,46$ – $a = 0,148, b = 0,7$).

При розрахунках масової витрати струменя на рівні ванни необхідно враховувати, що в процесі свого витікання надзвуковий газовий струмінь ежекує (приєднує) навколишню атмосферу, що впливає на її загальну масу [7,8]. Оцінити величину приєднаної маси можливо по рівнянню (9) [13]:

$$\frac{m_{\text{пр.м}}}{m_1} = 0,0782 \cdot \bar{x} \cdot \bar{\rho}^{0.5} \quad (9)$$

У рівняння 9 входять наступні величини: $\bar{x} = \frac{Z_1}{d_{\text{вих}}}$ – відстань від зрізу сопла, калібри; $\bar{\rho} = \frac{\rho_{\text{навк.ср}}}{\rho_1}$ – параметр неізотермічності струменя.

Масова витрата струменя на рівні ванни буде становити

Оцінити швидкість у перетині струменя на поверхні рідкої ванни можливо виходячи з формули Шлихтинга [8,9,11,14] яка описує розподіл швидкості в поперечному перерізі струменя й для перетинів у перехідному й основному ділянках струменя:

$$\frac{\omega^x}{\omega^{\text{ось}}} = \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^{1.5} \right]^2 \quad (12)$$

де ω^x – швидкість газу на відстані x від осі струменя, м/с; ω^{ocb} – швидкість на осі струменя, м/с; R – радіус струменя в даному перетині струменя, м.

$$\bar{\omega}_2 = \frac{1}{\pi \cdot R^2} \int_0^R \omega^{ocb} \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^{1.5} \right]^2 2 \pi x dx = \frac{2 \omega^{ocb}}{R^2} \int_0^R \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^{1.5} \right]^2 x dx \quad (13)$$

де $\pi \cdot R^2$ – площа перетину струменя в поверхні рідини, м²; $2 \pi x dx$ – елементарний майданчик у формі кільця для даного перетину.

Результати досліджень та їх обговорення

Виходячи з наведеного аналізу до основних факторам, що впливають на дисипацію потужності струменя (див. рівн. 6) слід віднести висоту розташування фурми над рівнем ванни й витрату дуття (швидкість витікання є функцією від витрати й визначається конструкцією сопла).

Для оцінки впливу цих факторів задамося параметрами продувки близькими до параметрів,

Згідно з роботою [15] знайти середню, по даному поперечному перерізу струменя, швидкість ($\bar{\omega}_2$) можна розв'язавши рів. 12 представлене диференціальним рівнянням виду:

що застосовують в киснево-конверторному процесі [2-4]:

- інтенсивність продувки 360-550 м³/хв;
- висота розташування фурми 1,4-1,8 м;
- число сопів Лавалля (n=5);
- тиск перед входом у сопло (P₀=12 атм);
- температура газу перед входом у сопло 25 °С;
- температура газів у порожнині конвертера 1600 °С;
- склад газів у порожнині конвертера 3 – 90%, З₂ 10%.

Розрахункові значення дисипації енергії кисневого струменя представлені на рис.1.

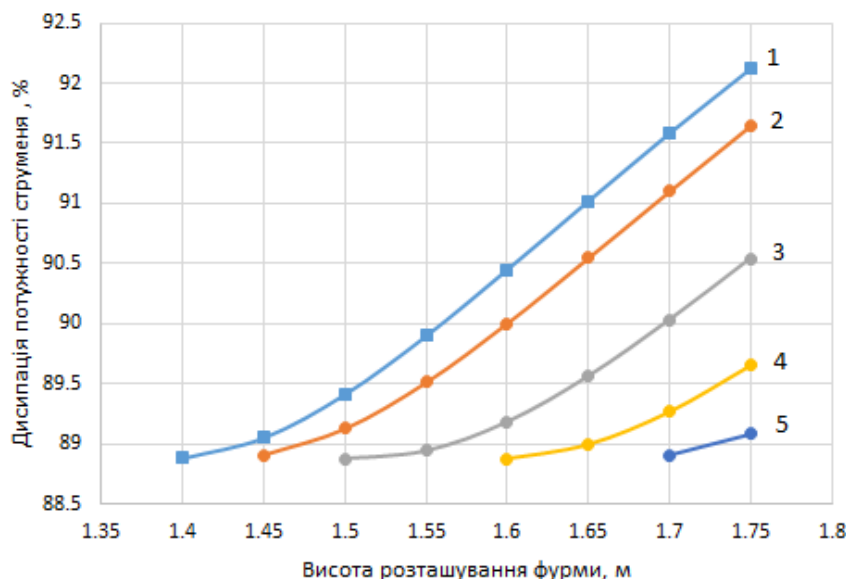


Рисунок 1 Залежність дисипації потужності струменя від висоти розташування фурми над рівнем спокійної ванни й витрати дуття.

1 – інтенсивність дуття 360 м³/хв.; 2 – інтенсивність дуття 400 м³/хв.; 3 – інтенсивність дуття 450 м³/хв.; 4 – інтенсивність дуття 500 м³/хв.; 5 – інтенсивність дуття 550 м³/хв.

Аналіз кривих наведених на рис.1 показує, що у випадку витікання кисневого струменя в розрахунковому режимі при постійній інтенсивності дуття (тобто постійній масовій витраті кисню) зростання висоти розташування фурми призводить до збільшення втрат потужності струменя, а збільшення інтенсивності продувки навпаки сприяє зниженню втрат потужності струменя.

Такий характер впливу факторів на втрати потужності струменя обумовлений її аеродинамічною будовою. Згідно із загальноприйнятими поглядами [5, 7-9] надзвуків газовий струмінь на по-

чатковій ділянці майже не розкривається й не взаємодіє з навколишнім середовищем, а інтенсивний массообмін з навколишнім середовищем спостерігається лише на основній ділянці струменя.

При незмінній інтенсивності дуття довжина ядра початкових швидкостей надзвукового газового струменя зберігається постійною, а збільшення висоти розташування фурми сприяє росту довжини основної ділянки струменя, що приводить до збільшення приєднаної маси й відповідно до більших втрат потужності струменя. У ви-

падку ж фіксованого розташування фурми над ванною й збільшення інтенсивності дуття границя початкової ділянки швидкостей зрушується ближче до поверхні ванни, що скорочує величину приєднаної маси й зменшує дисипацію потужності струменя.

Отримані аналітично розрахункові значення дисипації енергії кисневого струменя корелюються зі значенням дисипації енергії струменя, отримані при проведенні холодного моделювання продувки конвертерної ванни зверху (60-65%) [16].

Висновки

Результати аналітичного дослідження показали, що основними факторами, що впливають на

дисипацію потужності кисневого струменя, що поширюється в порожнині кисневого конвертера, є висота розташування фурми й інтенсивність дуття. Частка дисипації потужності струменя на ділянці її поширення, зріз фурми - поверхня спокійної ванни, може досягати 90%.

Результати можна використовувати при аналітичній оцінці енергетичного балансу процесу впровадження кисневого струменя в рідку металеву ванну.

При подальших дослідженнях у розглянутому напрямку доцільним є додатковий облік впливу, захвату струменем пили, крапель металу й шлаку, наявності зустрічного потоку газу, що гальмує струмінь, зміни внутрішньої енергії струменя.

Бібліографічний опис

1. World Steel in Figures 2020, World Steel Association, Brussels: 2020. - (Electronic resource). – Mode of access: (<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f7982217-cfde-4fdc-8ba0-795ed807f513/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202020i.pdf>).
2. Технология производства стали в современных конвертерных цехах /Колпаков С.В., Старов Р.В., Смоктий В.В. и др./ Под общей ред. С.В. Колпакова – М.: Машиностроение - 1991. - 469 с.
3. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотський, П.С. Харлашин. - Дніпропетровськ: Дніпро-ВАЛ, 2004. - 454 с.
4. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали: Учебник / В. А. Кудрин. — М.: «Мир», ООО «Издательство АСТ», 2003.— 528с.
5. Явойский В.И. Теория продувки сталеплавильной ванны /В.И. Явойский, Г.А. Дорофеев, И.Л. Повх. - М.: Металлургия, 1974. - 496 с.
6. 2017 AIST basic oxygen furnace roundup. (Electronic resource). Iron & Steel Technology. – 2017a Vol.17 № 4 – P. 210–210. – Mode of access: https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Publications/Monthly/17_Apr_210_SF.pdf
7. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса: Монография / В.И. Баптизманский, В.Б. Охотский - Киев – Донецк: Вища школа, 1981. – 184 с.
8. Баптизманский В. И. Теория кислородно-конвертерного процесса / В. И. Баптизманский. — М.: Металлургия, 1975.—375 с.
9. Баптизманский В.И. Механизм и кинетика процессов в конвертерной ванне / В. И. Баптизманский. М.: Металлургиздат, 1960. - 284с.
10. Румянцев В.Д. Теория тепло - и массообмена / В. Д. Румянцев. – Днепропетровск: Пороги, 2006. — 532 с.
11. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. / Л.Г. Лойцянский — М.: Дрофа, 2003. — 842 с
12. Коотц Т. Некоторые вопросы теории кислородно-конвертерного процесса / Т. Коотц, К. Беренс, Г. Маас и др. // Черные металлы. -1965. -№ 15. -С. 42-52.
13. Методичні вказівки до дисципліни "Фізико-хімічна механіка сталеплавильних процесів" для студентів спеціальності 7.090401, спеціалізації - металургія сталі / Укл. В.Б.Охотський.- Дніпропетровськ: ДМетАУ, 1997,- 20 с.
14. Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов. / В.Б. Охотский — М.: Металлургия, 1993. - 151 с.
15. О закономерностях затопленных струйных течений / Ф. И. Лухтура // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. Сер. Техн. науки. - 2015. - Вип. 30, ч. 1. - С. 202-212.
16. Sabah, S., Brooks, G. Energy Balance Around Gas Injection into Oxygen Steelmaking. Metall and Materi Trans B 47, 458–466 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0475-y>

Reference

1. World Steel in Figures 2020, World Steel Association, Brussels: 2020. - (Electronic resource). – Mode of access: (<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f7982217-cfde-4fdc-8ba0-795ed807f513/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202020i.pdf>).
2. Tehnologiya proizvodstva stali v sovremennyih konvertornyih tsehah /Kolpakov S.V., Starov R.V., Smoktiy V.V. i dr./ Pod obschey red. S.V. Kolpakova – M.: Mashinostroenie - 1991. - 469 s.
3. Boychenko B.M. Konverterne virobnitstvo stall: teoriya, tehnologiya, yaklst stall, konstruktSIYi agregativ, retsirkulyatslya materlallv l ekologlya: Pidruchnik / B.M. Boychenko, V.B. Ohotskiy, P.S. Harlashin. - Dnlpr?petrovsk: Dnlpro-VAL, 2004. - 454 s.
4. Kudrin V. A. Teoriya i tehnologiya proizvodstva stali: Uchebnik / V. A. Kudrin. — M.: «Mir», ООО «Izdatelstvo AST», 2003.— 528s.
5. Yavoyskiy V.I. Teoriya produvki staleplavilnoy vannyi /V.I. Yavoyskiy, G.A. Dorofeev, I.L. Povh. - M.: Metallurgiya, 1974. - 496 s.

6. 2017 AIST basic oxygen furnace roundup. (Electronic resource). Iron & Steel Technology. – 2017a Vol.17 # 4 – P. 210–210. – Mode of access: https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Publications/Monthly/17_Apr_210_SF.pdf
7. Baptizmanskiy V.I., Ohotskiy V.B. Fiziko-himicheskie osnovyi kislorodno-konvertornogo protsessa: Monografiya / V.I. Baptizmanskiy, V.B. Ohotskiy - Kiev – Donetsk: Vischa shkola, 1981. – 184 s.
8. Baptizmanskiy V. I. Teoriya kislorodno-konvertornogo protsessa / V. I. Baptizmanskiy. — M.: Metallurgiya, 1975.—375 s.
9. Baptizmanskiy V.I. Mehanizm i kinetika protsessov v konverternoй vanne / V. I. Baptizmanskiy. M.: Metal-?urgizdat, 1960. - 284s.
10. Rummyantsev V.D. Teoriya teplo - i massoobmena / V. D. Rummyantsev. – Dnepropetrovsk: Porogi, 2006. — 532 s.
11. Loytsyanskiy L. G. Mehanika zhidkosti i gaza. / L.G. Loytsyanskiy — M.: Drofa, 2003. — 842 s
12. Kootts T. Nekotoryie voprosyi teorii kislorodno-konvertornogo protsessa / T. Kootts, K. Berens, G. Maas i dr. // Chernye metallyi. -1965. -# 15. -S. 42-52.
13. Metodichni vkazivki do distsiplni "Fiziko-himichna mehanika staleplavilnih protsesiv" dlya studentiv spetsialnosti 7.090401, spetsializatsiYa - metalurgiya stal / Ukl. V.B.Ohotskiy.- Dniopetrovsk: DMetAU, 1997,- 20 s.
14. Ohotskiy V.B. Fiziko-himicheskaya mehanika staleplavilnyih protsessov. / V.B. Ohotskiy — M.: Metallurgiya, 1993. - 151 s.
15. O zakonomernostyah zatoplennyih struynyih techeniy / F. I. Luhtura // VIsn. Priazov. derzh. tehn. un-tu. Ser. Tehn. nauki. - 2015. - Vip. 30, ch. 1. - S. 202-212.
16. Sabah, S., Brooks, G. Energy Balance Around Gas Injection into Oxygen Steelmaking. Metall and Materi Trans B 47, 458–466 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0475-y>

Стаття поступила: 02.11.2019