

DOI: 10.31319/2519-2884.tm.2024.12

УДК 669.184.124

Самохвалов С.Є.¹, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-7362-213X3, serg_samokhval@ukr.net

Чернятевич А.Г.¹, д.т.н., професор, ORCID:0000-0002-4552-4997, agchern@ua.fm

Сігарьов Є.М.², д.т.н., професор, ORCID:0000-0002-8229-7877, en_sigarev@ua.fm

Похвалітий А.А.², к.т.н., доцент, ORCID:0000-0002-9652-767X, artemmslp@gmail.com

Надригайло Т.Ж.², к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1239-5946, e-mail: ntatiana62@gmail.com

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

²Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Samokhvalov Serhii¹, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Senior researcher

Chernyatevich Anatoliy¹, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Chief researcher

Sigarev Yevhen², Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Metallurgy

Pokhvalityi Artem², Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy

Nadryhailo Tetiana², Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of mathematical modeling and system analysis

¹Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasova National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

²Dniprovsky State Technical University, Kamianske

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАГРІВАННЯ МЕТАЛЕВОГО БРУХТУ В КОНВЕРТЕРІ ПИЛОВУГІЛЬНИМ ФАКЕЛОМ

Метою дослідження є розробка математичної моделі попереднього підігріву металобрухту у робочому просторі кисневого конвертера із використанням високотемпературного факела, який утворено подаванням пиловугільного палива у потоці кисню крізь сопла наконечника верхньої фурми, чисельна та програмна реалізація даної моделі, а також встановлення її якісної адекватності процесу, що розглядається

Ключові слова: металобрухт, кисень, конвертер, підігрівання, пиловугільне паливо, фурма.

The purpose of the research is the development of a mathematical model of preheating of scrap metal in the working space of an oxygen converter using a high-temperature torch, which is formed by feeding pulverized coal fuel in an oxygen stream through the nozzles of the tip of the upper lance, the numerical and software implementation of this model, as well as its installation qualitative adequacy of the process under consideration

Keywords: scrap, oxygen, converter, heating, pulverized coal fuel, lance.

Постановка проблеми

У створених на сьогоднішній день в Україні умовах дефіциту рідкого чавуну та зростаючої кількості металевих брухтів забезпечити належне виробництво киснево-конвертерної сталі можливо тільки за рахунок розробки і впровадження багатосоплових паливно-кисневих фурм, які пристосовані для попереднього нагріву металобрухту в порожнині конвертера високотемпературними пиловугільними факелами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Чисельне моделювання попереднього підігріву брухту в конвертері з використанням кускового вугілля представлено у роботі [1]. В роботі [2] запропоновано математичну модель підігріву брухту в чавуновізному 90-тонному ковші за допомогою киснево-паливної фурми, де в якості палива використовується природний газ. Цю модель було використано для чисельного вивчення впливу параметрів фурми на температуру попереднього підігріву брухту в ковші. У

вступі до роботи [2] зроблено досить ґрунтовний огляд останніх публікацій з даної тематики. В [3] представлено математичну модель пиловугільного факелу.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є побудова математичної моделі підігрівання металобрухту в конвертері пиловугільним факелом перед заливанням рідкого чавуну, чисельна та програмна реалізація даної моделі, а також встановлення її якісної адекватності процесу, що розглядається.

Виклад основного матеріалу

В основу математичної моделі покладені наступні спрощуючі припущення:

1. Задача прийнята циліндрично-симетричною відносно осі конвертера.
2. Сумарний об'ємний вміст порошків вугілля в газовій фазі при витратах, що вивчаються, невеликий, тому порошкове вугілля виступає в якості дисперсної фази суспензії, в якій газова фаза є несучім середовищем.
3. Розглядається режим, коли порошкоподібне вугілля встигає повністю згорати у факелі, що виходить із сопла паливно-кисневої фурми.
4. Газова фаза в порожнині конвертера, яка складається з повітря, що знаходилося в конвертері до початку процесу, інертного газу, який використовується для пневмотранспортування порошку вугілля, а також продуктів горіння вугілля, розглядається як єдина газова фаза, яка за межами факелу рухається як нестислива субстанція.
5. Рух газової фази є турбулентним, що враховується за допомогою трипараметричної алгебраїчної моделі турбулентності.
6. Металевий брухт розглядається як поруване середовище, переносні процеси в якому враховуються за допомогою ефективних коефіцієнтів переносу. Він нагрівається до температур нижчих за температуру плавлення металу, тому просторове розташування брухту не змінюється під час процесу.
7. Граничні умови для рівнянь руху газової фази вибрані умовами вільного ковзання на твердих поверхнях (на внутрішніх поверхнях порожнини конвертера і поверхні брухту). Граничні умови для рівнянь теплопереносу вибрані умовами спряження на внутрішніх поверхнях розрахункової області і умовою тепловіддачі з ефективним коефіцієнтом тепловіддачі (який враховує як конвективний, так і променевий механізми тепловіддачі) на зовнішніх поверхнях конвертера. В обох випадках у горловині конвертера вибрано умову вільного протікання (як газу, так і тепла).

Математична модель, з урахуванням зроблених припущень, будується за методикою, що описана в роботі [4] (позначення, що використовуються, також вибрані у відповідності з даною роботою).

Рівняння, що визначає динаміку середовища в об'ємі конвертера, є рівнянням Нав'є-Стокса (або в усередненому вигляді рівнянням Рейнольдса):

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} + \nu' \Delta \vec{v} - \vec{\nabla} p', \quad (1)$$

де \vec{v} — барицентрична швидкість середовища; ν' — ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості, що враховує турбулентний характер руху середовища; $p' = p/\rho$ — динамічна складова поля тиску p , нормованого на густину ρ , для знаходження якого, згідно припущення 4, до рівняння (1) додається умова соленоїдальності:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0. \quad (2)$$

Теплова сторона процесу визначається рівнянням конвективного теплопереносу:

$$C \frac{dT}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda' \vec{\nabla} T) + Q', \quad (3)$$

де C і λ' — ефективні теплоємність і нормована на густину теплопровідність середовища, яка в зоні конвективного руху враховує турбулентні ефекти; Q' — об'ємна густина джерела тепла, що виділяється при спаленні вугілля згідно з даними Бабія В.І. та Куваєва Ю.Ф. (1986 р.);

$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$ — субстанційна похідна. В рівнянні (3) T є середньооб'ємною температурою середовища, яка в нашому наближенні малості об'ємного вмісту твердої фази в середовищі (припущення 2) наближено співпадає з температурою газової фази. Що стосується ефективної нормованої на густину теплопровідності середовища λ' , то внаслідок явно турбулентного режиму руху середовища, вона визначається, в основному, турбулентними ефектами, оскільки в нашому випадку турбулентний механізм переносу тепла набагато перевищує молекулярний.

Згідно припущення 5, ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості визначається формулою:

$$v' = v + \frac{\Delta}{\text{Re}_\Delta} v_\Delta + l^2 \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right|, \quad (4)$$

де Δ — характерний розмір турбулентних вихорів, по значенням нижче якого відбувається усереднення (при чисельному розв'язанні у якості Δ зазвичай вибирається характерний розмір розрахункової сітки); v — ізотропна складова ефективної кінематичної в'язкості середовища, яка крім складової, що описує молекулярну в'язкість середовища, має ще й складову турбулентної в'язкості; Re_Δ — сіткове число Рейнольдса; l — довжина перемішування. Підбором цих параметрів можна забезпечити адекватність розрахунків течій рідких середовищ для широкого кола задач.

Крім ефективного збільшення в'язкості, в турбулентному потоці будуть підсилюватись також всі інші ефекти, пов'язані з дифузією — теплопровідність і дифузія будь-якого компонента середовища, що зумовлюється інтенсивним перемішуванням струму турбулентними вихорами. Однакова природа формування в турбулентному струмі ефективних коефіцієнтів в'язкості v' і температуропровідності $a' = \lambda' / C\rho$, які мають однакову розмірність $\text{м}^2/\text{с}$, дозволяє використати для a' вираз, аналогічний виразу (4), що для ефективного коефіцієнта теплопровідності $\lambda' = C\rho a'$ дає:

$$\lambda' = \lambda + C\rho \frac{\Delta}{\text{Re}_\Delta} v_\Delta + C\rho l_\lambda^2 \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right|, \quad (5)$$

де λ — стала складова ефективного коефіцієнта теплопровідності, в яку входить і незмінна молекулярна складова; Re_Δ — сіткове число Пекле; l_λ — довжина перемішування. Із загальних міркувань ясно, що величини, що параметризують турбулентність, залежать від характеру руху в цілому, а не від того, який конкретно коефіцієнт моделюється. Тому, наприклад, довжини перемішування l і l_λ , які входять у формули (4) та (5), повинні мати одну величину. Те саме стосується й інших параметрів турбулентності:

$$v = \lambda / C\rho; \quad \text{Re}_\Delta = \text{Pe}_\Delta; \quad l = l_\lambda. \quad (6)$$

Рівняння (1)—(3) розв'язуються чисельно методом розщеплення за фізичними факторами [5]. В якості розрахункової області вибрано половину осьового розрізу конвертера (рис. 1).

Згідно з методом розщеплення за фізичними факторами часова вісь розбивається на шари з кроком τ , які нумеруються індексом n , і останній доданок рівняння (1) на кожному часовому шарі відщеплюється за допомогою введення проміжної швидкості \vec{v} :

$$\vec{v} - \vec{v}^n = \tau \left[-(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} \right]; \quad (7)$$

$$\vec{v}^{n+1} - \vec{v} = -\tau \vec{\nabla} p'. \quad (8)$$

В останнє рівняння входить невідоме поле тиску. Очевидно, воно повинно бути знайдене до обчислення швидкості \vec{v}^{n+1} на $n+1$ -му часовому шарі. Для його визначення використовується умова соленоїдальності поля швидкості (2), а саме вимагається її виконання на $n+1$ -му часовому шарі:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v}^{n+1} = 0. \quad (9)$$

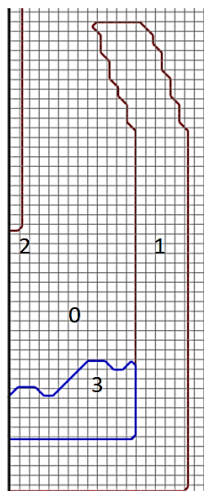


Рис. 1. Розрахункова область: 0 — порожнина конвертера; 1 — стінки і днище конвертера; 2 — фурма; 3 — розташування брухту (вибрано довільно згідно рівняння поверхні насипу брухту $z = h_s + A \sin(Br/r_i) + Cr$, де r_i — радіус порожнини конвертера, а h_s , A , B і C — числові параметри)

Застосування оператора $\vec{\nabla}$ до правої та лівої частин формули (8), з використанням умови (9), дозволяє знайти рівняння для знаходження поля тиску:

$$\Delta p' = \vec{\nabla} \cdot \vec{v} / \tau, \quad (10)$$

яке являє собою рівняння Пуассона. Припускаючи, що праві частини формул в схемі (7), (8) підраховуються на n -му часовому шарі, приходимо до явної за часом розрахункової схеми:

$$\text{I} \quad \vec{v} = \vec{v}^n + \tau \left[-(\vec{v}^n \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}^n + \nu \Delta \vec{v}^n \right]; \quad (11)$$

$$\text{II} \quad \Delta p'^{n+1} = \vec{\nabla} \cdot \vec{v} / \tau; \quad (12)$$

$$\text{III} \quad \vec{v}^{n+1} = \vec{v} - \tau \vec{\nabla} p'^{n+1}. \quad (13)$$

Таким чином, на першому етапі (11) за вихідним полем швидкостей обчислюється проміжна швидкість \vec{v} , причому допускається стисливість середовища, бо не враховується тиск, який заважає його стисливості. На другому етапі (12) із умови соленоїдальності вектора швидкості на $n+1$ -му часовому шарі обчислюється поле тиску (розв'язується рівняння Пуассона (10) з джерелом, яке являє собою дивергенцію знайденої проміжної швидкості, поділеної на τ : $\vec{\nabla} \cdot \vec{v} / \tau$). Спосіб отримання рівняння для поля тиску вказує на те, що це поле саме таке, щоб забезпечити нестисливість середовища. На третьому, заключному на даному кроці за часом етапі (13), поле швидкостей підправляється за допомогою знайденого поля тиску. В підсумку поле швидкостей стає соленоїдальним.

Для розв'язання рівняння теплопереносу (3) також використовується явна схема:

$$T^{n+1} = T^n + \tau \left[-\vec{\nabla} (T^n \vec{v}^n) + \vec{\nabla} (\lambda' \vec{\nabla} T^n) / C + Q^n / C \right]. \quad (14)$$

Просторова апроксимація правих частин рівнянь (11)—(14) виконується на шаховій сітці, де значення скалярних величин (температури T , тиску p') визначаються в центрах розрахункових комірок, а компонентів швидкостей \vec{v} та \vec{v} на їх границях.

Граничні умови для всіх величин, що розраховуються, вибираються у відповідності до припущення 7.

Програмну реалізацію розробленої математичної моделі було зроблено у середовищі Visual Studio 2022 на мові програмування C#, за допомогою якої було виконано серію тестових розрахунків, які засвідчили якісну адекватність розробленої моделі.

На рис. 2 представлено результати розрахунку полів швидкостей і температур у динаміці (числові характеристики тут не наводимо, оскільки нашою метою на даному етапі є встановлення якісної адекватності розробленої моделі). Газові потоки в робочому просторі конвертера, спричинені високотемпературним факелом, визначають напрямок теплопереносу. Досягаючи

металевого брухту вони призводять до його поступового прогрівання, що в цілому відповідає якісній картині процесу, що моделюється. Результати розрахунків показали залежність картини газових потоків від форми поверхні завантаженого у конвертер брухту. Зокрема, у заглибинах поверхні брухту можуть утворюватися локальні вихори. Але загальною характеристикою газодинамічної картини в робочому просторі конвертера є формування двох глобальних вихорів (рис. 2): одного біля факелу з обертанням проти годинникової стрілки (у наведених розрізах), а іншого — за годинниковою стрілкою з формуванням низхідних газових потоків біля внутрішньої поверхні конвертера. Ці вихори в основному і визначають теплову картину у робочому просторі конвертера і зокрема той факт, що брухт, який знаходиться біля стінки конвертера, буде прогріватися менше.

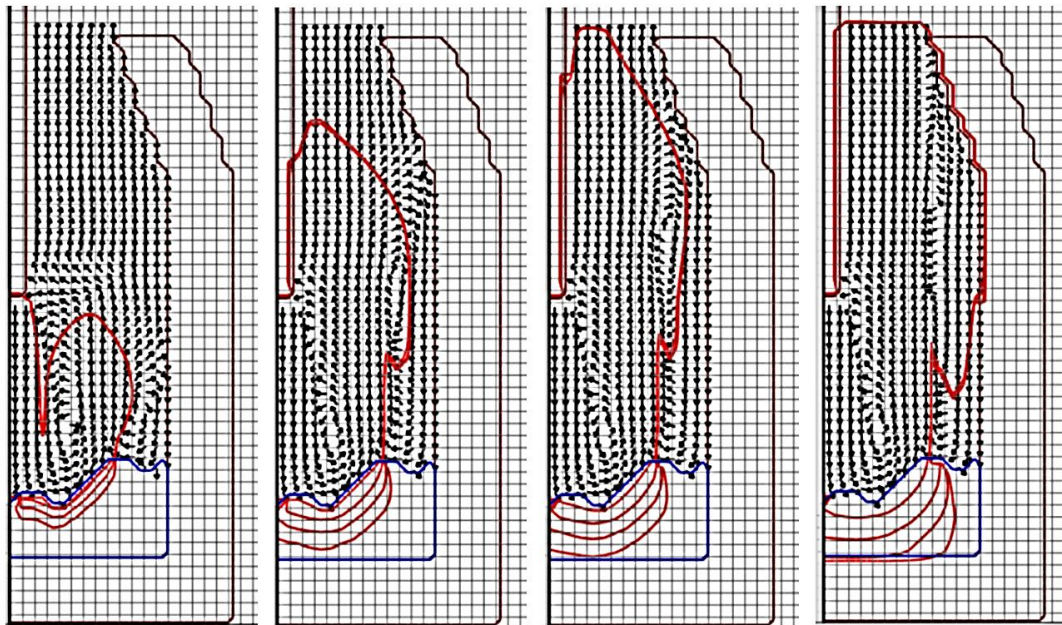


Рис. 2. Розрахункова динаміка тепломасопереносних процесів у робочому просторі конвертера під час підігрівання металевого брухту пиловугільним факелом. Стрілки вказують напрямки руху газової фази, криві — ізотерми

Висновки

1. Побудовано математичну модель підігріву металевого брухту в робочому просторі конвертера пиловугільним факелом та виконано її програмну реалізацію в середовищі Visual Studio 2022 на мові C#.

2. За допомогою розробленої моделі проведено серію розрахунків, які засвідчили її якісну адекватність процесу, що розглядається.

Наступним етапом даної роботи є досягнення кількісної адекватності розробленої моделі для різноманітних експериментальних та технологічних умов шляхом конкретизації належних модельних параметрів.

Список використаної літератури

1. Нугуманов Р.Ф., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Численное моделирование предварительного нагрева лома в конвертере с использованием кускового угля. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2008. №6. С. 15—19.
2. Zhuang S., Zhan D., Wang T., Li P. and Yang Y. Influence of Oxy-Fuel Lance Parameters on the Scrap Pre-Heating Temperature in the Hot Metal Ladle. *Metals*. 2023. №13. P. 847. <https://doi.org/10.3390/met13050847>

3. Самохвалов С.Є., Чернятевич А.Г., Сігарьов Є.М., Похвалітій А.А. Математична модель пилувугільного факелу. *Проблеми математичного моделювання: матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції*. 24-26 травня 2023 р. Кам'янське: ДДТУ. С. 60—62.
4. Огурцов А.П., Самохвалов С.Є. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатofазних середовищах. *К.: Наукова думка*. 2001. 412 с.
5. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. *М.: Наука*. 1984. 520 с.

MATHEMATICAL MODEL OF METAL SCRAP HEATING IN THE CONVERTER WITH A COAL TORCH

Abstract

Increasing requirements for energy efficiency and the level of competitiveness of domestic metal products led to the development of new technological solutions to increase the share of scrap metal in the charge of oxygen-converter melting. Data on temperature distribution in the working space of the converter and in the layer of scrap metal during its pre-heating using standard oxygen or special fuel-oxygen nozzles are limited and do not go beyond the scope of scientific assumptions. The results of numerous simulations of the process of heating metal scrap in the working space of an oxygen converter with a high-temperature torch formed by burning pulverized coal fuel in an oxygen stream using a fuel-oxygen nozzle are presented. A mathematical model of heating scrap metal in the working space of the converter with a pulverized coal torch was built and its software implementation has been done in the Visual Studio 2022 environment in the C# language. With the help of the model, a series of RO-calculations was carried out, which proved its qualitative adequacy of the process under consideration. The results of the calculation with the determination of the fields of velocities and temperatures in the working space of the converter during the heating of scrap metal are presented. It was established that the direction of heat transfer is determined by gas flows caused by a high-temperature torch. Upon reaching the metal scrap, the gas flows lead to its gradual heating, which generally corresponds to the qualitative picture of the simulated process. The dependence of the distribution of gas flows on the shape of the surface of the scrap loaded into the converter is shown. It was established that local vortices can form in the depths of the scrap surface during heating by a high-temperature torch. But the general characteristic of the gas-dynamic picture in the working space of the converter is the formation of two global vortices: one near the torch with counterclockwise rotation (in the sections shown), and the other clockwise with the formation of downward gas flows near the inner surface of the converter. These vortices mainly determine the thermal pattern in the working space of the converter and, in particular, the fact that the scrap near the wall of the converter will warm up less.

References

- [1] Nugumanov, R., Protopopov, E. and Chernyatevich, A. (2008). Numerical modeling of scrap pre-heating in a converter using lump coal. *News of universities. Ferrous metallurgy*, 6, 15—19. [in Russian].
- [2] Zhuang, S., Zhan, D., Wang, T., Li, P. and Yang, Y. (2023). Influence of Oxy-Fuel Lance Parameters on the Scrap Pre-Heating Temperature in the Hot Metal Ladle. *Metals*, 13, 847. <https://doi.org/10.3390/met13050847>.
- [3] Samokhvalov, S., Chernyatevich, A., Sigarev, Ye. and Pokhvalityi, A. (2023). Mathematical model of a pulverized coal torch. *Problems of mathematical modeling: materials of the All-Ukrainian scientific and methodological conference*. Kamianske: DDTU, 60—62. [in Ukrainian].
- [4] Ogurtsov, A. and Samokhvalov, S. (2001). Mathematical modeling of thermophysical processes in multiphase environments. *К.: Scientific opinion*. [in Ukrainian].
- [5] Belotserkovsky, O. (1984). Numerical modeling in continuum mechanics. *М.: Science*. [in Russian].