https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-95-108

УДК 669.162.21.27.012.3

І. Г. Муравйова, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5926-7787
М. Г. Іванча, с.н.с., ORCID 0000-0002-5366-9328
В. Р. Щербачов, пров. інж., аспірант, ORCID 0000-0002-6734-0451
В. І. Вишняков, н.с., ORCID 0000-0002-5538-6962
К. П. Єрмоліна, пров. інж., ORCID 0000-0001-6819-9886
О. О. Білошапка, м.н.с., ORCID 0000-0003-3103-0512
Н. Є. Ходотова, м.н.с., ORCID 0000-0002-6958-4636

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

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ І ФОРМИ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОКАЗНИКІВ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВОГО ПОТОКУ

Анотація. Метою роботи є розроблення аналітичних і непрямих методів визначення форми та положення пластичної зони стовпа шихтових матеріалів доменної печі. Показано, що найбільшу перспективу подальшого використання для вирішення задач ефективного управління доменною плавкою має розробка нових математичних моделей та методів оперативного визначення параметрів пластичної зони для умов встановлення на доменних печах різних засобів контролю розподілу шихти та газового потоку. Запропоновано новий метод визначення параметрів пластичної зони (форми, товщини та положення) у доменній печі, який є сукупністю відомих та удосконалених в результаті досліджень математичних моделей: завантаження шихтових матеріалів у доменну піч, визначення температур плавлення та розм'якшення залізовмісних компонентів шихти у різних її зонах, визначення параметрів стовпа шихти у сухій зоні доменної печі, визначення площі поверхні плавлення та нового способу визначення положення ліній розм’якшення та плавлення у доменній печі з використанням інформації засобів контролю розподілу температури газового потоку та поверхні засипу шихти. Конфігурація лінії (поверхні) плавлення визначається, виходячи з умов подібності цієї лінії до кривої розподілу температур газового потоку (поверхні засипу) на колошнику печі, а також рівності площі бокової поверхні фігури обертання лінії, що формується, навколо осі печі, та розрахункової площі плавлення. Розрахунок координат точок лінії розм'якшення базується на результатах математичного моделювання процесів завантаження та розподілу компонентів шихти по радіусу колошника, що забезпечує можливість визначення компонентного складу залізорудних шарів шихтових матеріалів у заданій зоні печі, та прогнозу формування розплавів та їх властивостей за допомогою моделей високотемпературних перетворень. На відміну від відомого підходу, згідно з яким при визначенні площі поверхні плавлення кількість тепла у нижній частині печі задається у виді константи, запропонований метод передбачає розрахунок цієї величини з урахуванням поточних технологічних умов доменної плавки.

Ключові слова: доменна піч, параметри пластичної зони, термовимірювальні зонди, математична модель, лінії розм’якшення та плавлення, метод визначення

пластичної зони.

Посилання для цитування: Метод визначення положення і форми пластичної зони в доменній печі з використанням показників розподілу температури газового потоку / І. Г. Муравйова, М. Г. Іванча, В. Р. Щербачов, В. І. Вишняков, К. П. Єрмоліна, О. О. Білошапка, Н. Є. Ходотова // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії.* 2022. Вип. 36. С. 95-108. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-95-108.

Постановка проблеми. Ефективність доменної плавки та якість чавуну, який виплавляється, багато в чому визначаються характеристиками структури стовпа шихтових матеріалів, що формується у процесі завантаження доменної печі. Аналіз результатів, отриманих провідними спеціалістами світу, та особистий досвід досліджень доменної плавки показав, що розробка нових науково обґрунтованих способів управління процесом плавки, які забезпечують досягнення високої її ефективності, повинна у максимально можливій мірі враховувати закономірності та особливості формування структури стовпа шихти у доменній печі, одним з найважливіших елементів якої є пластична зона. В залежності від розподілу шихтових матеріалів, їх якості та параметрів дуттєвого режиму, у доменній печі формується пластична зона різного профілю, який суттєво впливає на техніко-економічну ефективність доменної плавки, експлуатаційні показники та тривалість кампанії доменної печі. Безпосередньо контролювати формування пластичної зони у доменній печі не представляється можливим, тому актуальним є розроблення аналітичних і непрямих методів визначення форми та положення пластичної зони стовпа шихтових матеріалів доменної печі.

Аналіз останніх публікацій. Результати виконаних раніше досліджень з аналізом відомих способів визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі опубліковані у статті [1]. Активне виконання досліджень по визначенню параметрів пластичної зони, які базувалися на результатах отриманої перед тим інформації про структуру стовпа шихти у «заморожених» доменних печах, припадає на 80 – 90- ті роки минулого століття. Публікації останніх років свідчать, що подальший розвиток досліджень розвивається у напрямку створення математичних моделей для визначення параметрів пластичної зони. У даний час розробляються моделі, що враховують нестаціонарні процеси у печі. У цьому напрямку активно працюють японські вчені фірми «Nippon Steel corp» [2]. Особливий акцент у їх статті зроблено на необхідності оцінки положення, товщини та форми пластичної зони по колу доменної печі. Авторами розроблено метод визначення та візуалізації положення кореня пластичної зони, для чого застосовано методику кількісної оцінки нестаціонарної поведінки процесів у доменної печі. При визначенні положення кореня пластичної зони приймається припущення, згідно з яким корінь пластичної зони примикає

до кладки печі в області, де фіксуються максимальні зміни температури кожуха у одиницю часу.

У статті [3] наведено результати вдосконалення моделі доменної плавки, раніше розробленої фірмою «Nippon Steel Corp». На додаток до існуючих моделей (масоперенесення, реакцій та теплообміну в сухій та пластичній зонах печі) розроблено моделі для оцінки розподілу рудних навантажень на колошнику, модель фурменого вогнища, а також модель для оцінки теплопередачі та плинності тотермана. Загальна модель доменної печі, яка поєднує всі ці моделі, використовується для розрахунку профілю пластичної зони.

Дослідники США та Канади моделюють процеси у шахті доменної печі [4], включаючи процес формування пластичної зони. Верхня межа пластичної зони визначається, як постійна температура, а нижня межа – лінія плавлення визначається, як температура ліквідусу. Причому, температура ліквідусу встановлена, як функція хімічного складу шлаку. Для отримання такої функції авторами виконано регресійний аналіз на основі даних, представлених у літературних джерелах. Отримано поліноміальну регресію 3- го порядку для розрахунку температури ліквідусу (°С):

$$T_{liq} = s + a_1\cdot(Al_2O_3) + b_1\cdot(CaO) + c_1\cdot(MgO) + d_1\cdot(SiO_2) + \\ + a_2\cdot(Al_2O_3)^2 + b_2\cdot(CaO)^2 + c_2\cdot(MgO)^2 + d_2\cdot(SiO_2)^2 + \\ + a_3\cdot(Al_2O_3)^3 + b_3\cdot(CaO)^3 + c_3\cdot(MgO)^3 + d_3\cdot(SiO_2)^3, \quad (1)$$

де s, $a_{1\text{-}3}$, $b_{1\text{-}3}$, $c_{1\text{-}3}$, $d_{1\text{-}3}$ – чисельні коефіцієнти; (Al_2O_3), (CaO), (MgO), (SiO_2) – вміст компонентів шлаку, %.

Ряд дослідників визначають параметри пластичної зони за допомогою математичних моделей, що ґрунтуються на положеннях диференціальної алгебри, та використовують векторний диференціальний оператор – оператор Набла [5, 6].

У напрямку розробки двомірних математичних моделей для визначення параметрів пластичної зони, заснованих на використанні матеріального, енергетичного та миттєвого балансів, продовжують дослідження вчені Китаю та США [7].

Австралійськими вченими розроблена математична модель, що описує перебіг рідини, тепло- та масоперенесення, а також хімічні реакції у доменній печі [8]. На відміну від попередніх моделей, запропонована розглядає три варіанти структури шарів пластичної зони – шаруваті, ізотропні нешаровані та анізотропні. Авторами виконано дослідження впливу цих трьох варіантів на процеси розподілу газового потоку в печі. Показано, що розгляд пластичної зони, що представляє собою шари залізовмісних матеріалів і коксу, що чергуються, (що відповідає пошаровому завантаженню шихти), дозволяє прогнозувати (моделювати)

проходження газового потоку через коксові шари. Крім того, вченими Австралії з використанням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) створено тривимірну модель доменної плавки, яка, у тому числі, визначає шарувату структуру пластичної зони [9].

На поточний час відомі також розробки моделей процесів доменної плавки, зокрема моделі визначення пластичної зони, які поєднують континуальну та дискретну моделі. Об'єднана в такий спосіб модель отримала термінологію CFD - DEM- модель [10].

Дослідниками Японії вивчений вплив форми пластичної зони в режимі роботи печі з низькою витратою коксу [11]. У цьому дослідженні поведінка плавлення залізної руди і структура шарів при роботі з низькою витратою коксу були введені в модель DEM - CFD, а потім змодельована поведінка газу та шару, що рухається в доменній печі. В результаті розрахунку продемонстровано вплив ширини коксового вікна пластичної зони на витрати газу.

У статті [12] описаний метод прогнозування параметрів пластичної зони у доменній печі, основу алгоритму якого становлять рівняння збереження маси та рівняння збереження теплоти, яким, на думку авторів, підпорядковуються хімічні реакції руда - кокс та газ. Виходячи з цього припущення, розділивши доменну піч на ряд концентричних кіл, автори визначають температурне поле печі, а потім, залежно від плавкості залізовмісних шихтових матеріалів, прогнозуються форма та положення пластичної зони.

На увагу заслуговує розроблена в ІЧМ д.т.н. Й. Г. Товаровським багатозонна математична модель процесів доменної плавки, яка включає методику оцінки параметрів пластичної зони з урахуванням впливу ступеня відновлення заліза та приходу лужних оксидів, що сприяє підвищенню системності аналізу процесів та дозволяє кількісно оцінити вплив параметрів пластичної зони на кінцеві показники плавки [13].

З аналізу розробок останніх років випливає, що розвиток методів визначення параметрів пластичної зони здійснюється у напрямі створення математичних моделей, розроблених з урахуванням низки припущень та не описуючих динаміку процесу плавки. Ці особливості не дозволяють використовувати моделі в оперативному процесі вибору управляючих впливів на хід плавки. Винятком (згідно з наявними відомостями) є модель ПЗ, розроблена під керівництвом В. М. Паршакова, яка функціонує у складі автоматизованої системи оперативного автоматичного визначення зони плавлення у доменній печі та дозволяє здійснювати безперервний автоматичний контроль у реальному часі її параметрів [14]. Ефективність цієї моделі оцінити неможливо у зв'язку з відсутністю обсягу опублікованих даних, достатнього для проведення ґрунтовного аналізу.

Незважаючи на розширення можливостей визначення положення пластичної зони у доменній печі за допомогою математичного

моделювання, актуальними залишаються питання створення методів оперативного контролю її положення та оцінки зміни у процесі плавки. В останні роки за результатами освоєння на ДП № 9 ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» першої вітчизняної системи контролю поверхні засипу шихти ІЧМ розроблено метод визначення положення пластичної зони в доменній печі, що ґрунтується на оцінці варіації швидкості опускання поверхні шихти на колошнику [15]. Відповідно до цього методу приймається припущення, що відстань від «технологічного нуля» до точки початку утворення рідких фаз визначається добутком інтервалу часу між максимальними середньоквадратичними відхиленнями швидкості, які перевищують середнє їх значення, та середніх за ці інтервали значень швидкостей опускання шихти у кожній зоні. Як показали дослідження, розраховане за допомогою запропонованого методу положення пластичної зони ДП № 9 узгоджується з вихідними показниками плавки. Запропонований метод дозволяє оцінити положення пластичної зони у доменній печі в реальному часі, що може бути застосоване для управління ходом доменної плавки, а також оцінити вплив програми завантаження та технологічних параметрів на формування зони плавлення [15].

Одним з найбільш поширених у практиці засобів оцінки розподілу шихтових матеріалів у робочому просторі доменної печі є оснащення її термовимірювальними зондами над поверхнею засипу В. М. Паршаковим запропонований метод визначення форми пластичної зони за показаннями радіальних багатоточкових зондів з термопарами, встановлених над поверхнею засипу шихти на колошнику печі [16]. Показання зондів, крім оцінки розподілу температур газового потоку на колошнику, використовують для контролю форми пластичної зони за допомогою двовимірної математичної моделі.

Мета досліджень. Розробка методу визначення параметрів пластичної зони в доменній печі, який може бути реалізовано у складі АСУ ТП доменних печей для роботи в оперативному режимі.

Результати досліджень. Ґрунтуючись на результатах раніше виконаних аналітичних досліджень, а також накопиченому практичному досвіді, запропоновано новий метод визначення параметрів пластичної зони (форми, товщини та положення) у доменній печі, оснащеної термовимірювальними зондами над поверхнею засипу або іншими засобами контролю розподілу температур газового потоку або ж поверхні засипу. Розроблений метод ґрунтується на синтезі відомих методів і способів, а також на новому методі визначення ліній розм’якшення та плавлення у доменній печі з використанням інформації, отриманої від засобів контролю розподілу температур газового потоку. Основним прийнятим припущенням нового методу є те, що форма лінії плавлення подібна до кривої, що характеризує розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу шихти. Вхідні дані для виконання розрахунків –

технологічні параметри та показники доменної плавки; геометричні параметри доменної печі та завантажувального пристрою; фізико-хімічні властивості шихтових матеріалів та програма їх завантаження у доменну піч; показання засобів контролю температур газового потоку, розташованих над поверхнею засипу шихти.

Запропонований метод передбачає застосування нового способу визначення меж пластичної зони та розрахунки характеристик розподілу компонентів шихти в кільцевих зонах печі, складу сформованих сумішей шихтових матеріалів та їх високотемпературних властивостей за допомогою нижченаведених математичних моделей.

1. Комплексної математичної моделі завантаження шихтових матеріалів в бункер завантажувального пристрою, вивантаження з нього, руху шихтових матеріалів по тракту завантажувального пристрою та розподілу на поверхні засипу [17].

2. Математичних моделей визначення температур плавлення та розм'якшення залізовмісних компонентів шихти у різних зонах печі.

3. Моделі визначення параметрів стовпа шихти у сухій зоні доменної печі.

4. Моделі визначення площі поверхні плавлення, удосконаленої шляхом розрахунку кількості тепла у нижній зоні печі.

Математична модель визначення площі поверхні плавлення, запропонована Г. В. Гуденау, передбачає розрахунок площі розплавленої поверхні пластичної зони згідно з виразом [18]:

$$A_{\text{еф}} = \frac{K \cdot Q_{\text{заг}} \cdot П_{\text{р}}}{24\left\{C \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{вип}} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пл}} + 273}{100}\right)^4\right] + h_{\text{с}}\left(T_{\text{газ}} - T_{\text{пл}}\right)\right\}}, \qquad (2)$$

де K = 2 – геометрична постійна моделі, що залежить від рудного навантаження та його розподілу, що зменшується зі зростанням навантаження і призводить до зниження величини $A_{\text{заг}}$; $Q_{\text{заг}}$ – кількість тепла, що витрачається на утворення рідких продуктів плавки, яке залежить від якості залізорудних матеріалів, зокрема, від їх відновлюваності. При відносно постійному складі передільного чавуну і обмежених інтервалах виходу і якості шлаку авторами [18] при визначенні загальної поверхні розплаву приймається припущення про сталість величини $Q_{\text{заг}}$ на рівні $21{,}3 \cdot 10^4$ кДж на одиницю виробництва загальної кількості розплаву $П_{\text{р}}$ (т/год), яке визначається за формулою:

$$П_{\text{р}} = П_{\text{чав}} \cdot (1 + 1{,}77 \cdot П_{\text{шл}}/1000), \qquad (3)$$

де $П_{\text{чав}}$ – виробництво чавуну, т/добу; $П_{\text{шл}}$ – вихід шлаку в т/т чавуну; C – постійна випромінювання, рівна 2,91 кДж/год.·м^2 ·К^4; $T_{\text{вип}}$ – температура

випромінюючої речовини (головним чином коксу), °С; $T_{пл}$ – температура плавлення рудних компонентів, °С; $T_{газ}$ – середня температура газу у фурменій зоні, °С; h_c – коефіцієнт теплопередачі конвекцією (кДж/м^2·год.·°С).

Коефіцієнт теплопередачі може бути визначений відповідно до виразу:

$$h_c = 0{,}62\cdot(\lambda_г/D_{н.о})\cdot(D_{н.о}\cdot U_г/\eta_г)^{0,7}\cdot(C_р\cdot\eta_г/\lambda_г\cdot\rho_г)^{0,33}, \quad (4)$$

де $\lambda_г$ – теплопровідність газу, кДж/м·год·°С; $D_{н.о.}$ – поточний діаметр, м; $U_г$ – масовий газовий потік, кг/м^2·год; $\eta_г$ – динамічна в'язкість газу, кг/м·год; $C_р$ – середня теплоємність газу, кДж/нм^3·К; $\rho_г$ – щільність газу, кг/м^3.

Для визначення величини $Q_{заг}$ у змінних умовах плавки пропонується розраховувати кількість тепла у нижній частині доменної печі для конкретних технологічних умов. Для цього може бути використана методика А. Н. Рамма, згідно з якою джерелами теплової енергії є тепло, яке надходить в зону горіння з гарячим дуттьом, з паливними елементами, а також тепло, що виділилося в результаті екзотермічних реакцій в зоні відновлення [19].

Для визначення меж пластичної зони, перш за все, за допомогою вище приведених математичних моделей розраховуються: площа поверхні плавлення; розподіл компонентів шихти в кільцевих зонах печі; температури розм’якшення та плавлення сумішей, які знаходяться в цих зонах. Отримані в результаті моделювання значення цих параметрів є початковою інформацією для визначення меж пластичної зони в об’ємі печі.

Запропонований спосіб визначення меж пластичної зони передбачає наступну послідовність операцій:

Визначення положення лінії плавлення у доменній печі.

Спосіб передбачає два варіанти розрахунків - при наявності периферійних термопар у нижній частині шахти доменної печі та у випадку їх відсутності.

Для варіанту наявності периферійних термопар у нижній частині шахти доменної печі пропонується наступна послідовність виконання розрахункових операцій.

1. Визначення положення кореня пластичної зони із аналізу зміни показань периферійних термопар по висоті шахти та заплечиків печі. Положення кореня пластичної зони визначається областю знаходження максимального значення температур периферійних термопар (екстремуму).

2. Координати точок лінії плавлення (кількість точок для побудови лінії плавлення відповідає кількості рівновеликих зон колошника печі) визначаються, виходячи із припущення, що форма лінії плавлення подібна до кривої розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу

шихти (або розподілу температур самої поверхні засипу).

Ця операція може мати два варіанти реалізації.

1. Шляхом визначення у кожній кільцевій зоні частин площі поверхні плавлення в залежності від температури газового потоку в цій зоні та величини рудного навантаження, після чого, здійснюється геометричне відображення розрахованих відрізків (ділянок кривої), що характеризують площу плавлення у конкретній кільцевій зоні, в об'ємі печі з урахуванням направленості зміни температур газового потоку в суміжних зонах, починаючи з периферійної. У цьому варіанті координати точок лінії плавлення у кільцевих зонах визначаються перетином вказаних відрізків (ділянок кривої) з променями, які проведено з точки умовного перехрещення утворюючої шахти печі з віссю печі до перетину із середніми лініями кільцевих зон.

2. За допомогою засобів комп'ютерної графіки шляхом формування лінії плавлення, виходячи з умов подібності цієї лінії до кривої розподілу температур газового потоку (поверхні засипу) на колошнику печі, а також рівності площі бокової поверхні фігури обертання лінії, що формується, навколо осі печі, та розрахункової площі плавлення.

Визначеним координатам лінії плавлення у кільцевих зонах печі відповідають температури плавлення сумішей компонентів шихти, які формуються у цих зонах у результаті процесів завантаження шихтових матеріалів у піч та їх розподілу на поверхні засипу.

У варіанті відсутності на печі периферійних термопар у нижній зоні доменної печі спосіб передбачає припущення про лінійний розподіл температур по висоті печі (між температурами на колошнику та температурами в горні по осі фурменої зони). Температура горнового газу по радіусу доменної печі на рівні фурм описується лінійною залежністю та зменшується від температури на фурмах до величини порядку 1350 – 1400 °С в осі печі. Максимальна величина температури біля фурм – теоретична температура горіння. Визначення положення лінії плавлення в об'ємі печі виконується на основі розрахунку розподілу компонентів в зонах печі, температур плавлення їх сумішей з використанням масштабного коефіцієнта, який розраховується, виходячи з вказаного вище припущення про лінійний розподіл температур по висоті печі.

Масштабний коефіцієнт для i – ої кільцевої зони розраховується по формулі:

$$k_i = \frac{T_{\text{пл}}^i - T_i}{S_{\text{пл}}^i - h_i}, \qquad (5)$$

де $S^i_{\text{пл}}$ – вертикальна координата точки на лінії плавлення, м; h_i – вертикальна координата точки на поверхні засипу, м; $T^i_{пл}$ – температура плавления суміші залізорудних матеріалів в i- ій кільцевій зоні, ˚С; T_i – температура в i - й точці на поверхні засипу, °С.

Визначення положення лінії розм'якшення. Положення та форма лінії розм'якшення визначається розподілом залізовмісних компонентів і, відповідно, розподілом температур зміни їх фазового стану. Лінія розм'якшення може бути визначена, як крива, що з'єднує точки, відповідні температурам початку розм'якшення матеріалів, в кільцевих зонах печі. Для побудови лінії розм'якшення відповідно до розрахованих температур розм'якшення сумішей залізовмісних компонентів, що сформувалися у різних кільцевих зонах печі, використовується масштабний коефіцієнт, що характеризує зміну розрахованих температур плавлення в цих зонах по висоті.

Визначення товщини пластичної у контрольованих зонах печі, як різниці координат, що визначають положення ліній плавлення та розм'якшення. Товщина пластичної зони може бути визначена за формулою:

$$\Delta H^{i}_{\text{пз}} = \frac{T^{i}_{\text{пл}} - T^{i}_{\text{р}}}{k_i} \Delta,H\text{-пл-}i.=,,,T\text{-р.}-,T\text{-нр..-}k., \qquad (6)$$

де $\Delta H^{i}_{\text{пз}}$ – товщина пластичної зони у і-й точці, м; $T^{i}_{\text{пл}}$ – температура початку розм'якшення, °С; $T^{i}_{\text{р}}$ – температура плавлення, °С; k_i – масштабний коефіцієнт, °С/м.

У якості прикладу застосування запропонованого методу, на рис. 1 представлено результати визначення положення та форми пластичної зони для одного з періодів роботи доменної печі.

Рисунок 1– Результати реалізації запропонованого метода визначення параметрів пластичної зони.

Висновки

Показано, що для вирішення задачі визначення параметрів пластичної зони перспективною є розробка нових математичних моделей та методів оперативного визначення параметрів пластичної зони у змінних умовах

плавки з використанням різних засобів контролю розподілу шихти та газового потоку. Запропоновано для урахування особливостей протікання плавки та формування пластичної зони у конкретних технологічних умовах доповнити математичну модель визначення площі поверхні плавлення пластичної зони розрахунком кількості тепла у нижній частині шахти, що наблизить вхідні дані розрахунків до поточних умов плавки.

Запропоновано новий метод визначення параметрів пластичної зони (форми, товщини та положення) у доменній печі, оснащеній засобами контролю розподілу температури газового потоку або поверхні засипу. Метод базується на систематизованій сукупності математичних моделей, у тому числі, розроблених ІЧМ, а також на використанні нового способу визначення ліній розм'якшення та плавлення (меж пластичної зони) у доменній печі.

Перелік посилань

1. Анализ методов определения формы и положения пластичной зоны в доменной печи / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Н. А. Гладков, Е. А. Белошапка // Сборник научных трудов ИЧМ «*Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*», Днепропетровск, 2011. № 23. С. 80–89.
2. Masahiro Ito, Shinroku Matsuzaki, Kazumoto Kakiuchi, Makoto Isobe. Development of Visual Evaluation and Numerical Analysis System of Blast Furnace «Development of Visual Information Technique of Blast Furnace Process Data». *Nippon Steel Technical Report*, January 2004, No. 89. UDC 669.162.26:681.3. P. 38–45.
3. Shinroku Matsuzaki, Akihiko Shinotake, Masaaki Naito, Tsunehisa Nishimura, Kazuya Kunitomo, Takashi Sugiyama. Development of Mathematical Model of Blast Furnace. *Nippon Steel Technical Report*, July 2006, No. 94 UDC 699.162.26:681.3. P. 87–95.
4. Dong Fu and Chenn Q. Zhou, Yongfu Zhao, John D'Alessio, Kyle J. Ferron. Numerical Simulation Of Blast Furnace Shaft Process. *Proceedings of 4th International Conference on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking. Düsseldorf*, 27 June – 1 July 2011. P. 1 – 10.
5. Snigdha Ghosh, Nurni Nilekantan Viswanathan, N. Bharath Ballal. Flow Phenomena in the Dripping Zone of Blast Furnace − A Review. *Steel research int*. 87 (2017) No. 9999.
6. Dong Fu, Yan Chen, Yongfu Zhao, John D'Alessio, Kyle J. Ferron, Chenn Q. Zhou. CFD modeling of multiphase reacting flow in blast furnace shaft with layered burden. May 2014. P. 38 – 45. P. 299 – 308.
7. Ping Zhou, Hao-lan Li, Peng-yu Shi, Chenn Q. Zhou. Simulation of the transfer process in the blast furnace shaft with layered burden. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 95. P. 296–302.
8. X. F. Dong, A. B. Yu, S. J. Cew, P. Zulli. Modeling of Blast Furnace with Layered Cohesive Zone. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2009*. Metallurgical And Materials Transactions B, Vol. 41B, April 2010-331.
9. Lulu Jiao, Shibo Kuang, Aibing Yu, Yuntao Li, Xiaoming Mao, Hui Xu. Three-dimensional modeling of an ironmaking blast furnace with a layered cohesive zone/ *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials*

Processing Science. Feb 2020. P. 258-275.
10. Shibo Kuang, Zhaoyang Li, Aibing Yu. Review on modelling and simulation of blast furnace. Steel research int. 89 (2018) No. 1.
11. Shigeru Ueda, Tatsuya Kon, Hiroyuki Kurosawa, Shungo Natsui, Tatsuro Ariyama, Hiroshi Nogami. Influence of Shape of Cohesive Zone on Gas Flow and Permeability in the Blast Furnace Analyzed by DEM-CFD Model. *ISIJ International*, Vol. 55 (2015), No. 6, pp. 1232–1236.
12. Li S. Z., et al. A Method to Forecast the Cohesive Zone of Blast Furnace. *Materials Science Forum*, vol. 471–472, Trans Tech Publications, Ltd., Dec. 2004, pp. 358–361. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.471-472.358.
13. Товаровский И. Г. Доменная плавка. Монография. 2–е издание. Днепропетровск : Пороги, 2009. 768 с.
14. Непрерывный автоматический контроль параметров зоны плавления с помощью двумерной математической модели, функционирующей в реальном масштабе времени в составе АСУ ТП Дп-2 и ДП-10 ОАО «ММК» / В. М. Паршаков, А. А. Полинов, А. В. Павлов и др. // *Сборник трудов международного Союза Доменщиков*. 2017. Выпуск 1. С. 54-69.
15. Создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой / И. Г. Муравьева, Д. Н. Тогобицкая, Ю. С. Семенов, Н. Г. Иванча, А. И. Белькова, Е. И. Шумельчик, Д. А. Степаненко // *Новые подходы*. (Монография). К. : Наук. думка, 2019. 272 с.
16. Комплексная автоматизированная система контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки – предшественница системы «Когезия» и инструмент для реализации вырабатываемых ею решений / В. М. Паршаков, А. А. Полинов, А. В. Павлов и др. // *Сборник трудов международного Союза Доменщиков*. 2017. Выпуск 1. С. 76-88.
17. Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace / N. G. Ivancha, I. G. Muraveva, E. I. Shumelchik, V. I. Vishnyakov, Yu. S. Semenov // *Metallurgist*, May 2018, Volume 62, Issue 1–2. P. 95–100.
18. Физические условия в области пластической зоны доменной печи. Часть 1. Основные принципы модели / Гуденау Г. В., Стендиш Н., Герлах В. // *Черные металлы*. 1992. № 8. С. 34–41.
19. Рамм А. Н. Определение технических показателей доменной плавки. Ленинград, 1960. 37 с.

References

1. Bolshakov V. Y., Muraveva Y. H., Hladkov N. A., Beloshapka E. A. Analyz metodov opredelenyia formi y polozhenyia plastychnoi zony v domennoi pechy [Analysis of methods for determining the shape and position of the plastic zone in a blast furnace]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii*. Dnepropetrovsk, 2011. No. 23. P. 80-89.
2. Masahiro Ito, Shinroku Matsuzaki, Kazumoto Kakiuchi, Makoto Isobe. Development of Visual Evaluation and Numerical Analysis System of Blast Furnace «Development of Visual Information Technique of Blast Furnace Process Data». *Nippon Steel Technical Report*, January 2004, No. 89. UDC 669.162.26:681.3. P. 38–45.
3. Shinroku Matsuzaki, Akihiko Shinotake, Masaaki Naito, Tsunehisa Nishimura, Kazuya Kunitomo, Takashi Sugiyama. Development of Mathematical Model of

Blast Furnace. *Nippon Steel Technical Report,* July 2006, No. 94 UDC 699.162.26:681.3. P. 87–95.
4. Dong Fu and Chenn Q. Zhou, Yongfu Zhao, John D'Alessio, Kyle J. Ferron. Numerical Simulation Of Blast Furnace Shaft Process. *Proceedings of 4th International Conference on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking. Düsseldorf*, 27 June – 1 July 2011. P. 1 – 10.
5. Snigdha Ghosh, Nurni Nilekantan Viswanathan, N. Bharath Ballal. Flow Phenomena in the Dripping Zone of Blast Furnace − A Review. *Steel research int*. 87 (2017) No. 9999.
6. Dong Fu, Yan Chen, Yongfu Zhao, John D'Alessio, Kyle J. Ferron, Chenn Q. Zhou. CFD modeling of multiphase reacting flow in blast furnace shaft with layered burden. May 2014. P. 38 – 45. P. 299 – 308.
7. Ping Zhou, Hao-lan Li, Peng-yu Shi, Chenn Q. Zhou. Simulation of the transfer process in the blast furnace shaft with layered burden. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 95. P. 296–302.
8. X. F. Dong, A. B. Yu, S. J. Cew, P. Zulli. Modeling of Blast Furnace with Layered Cohesive Zone. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2009*. Metallurgical And Materials Transactions B, Vol. 41B, April 2010-331.
9. Lulu Jiao, Shibo Kuang, Aibing Yu, Yuntao Li, Xiaoming Mao, Hui Xu. Three-dimensional modeling of an ironmaking blast furnace with a layered cohesive zone/ *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. Feb 2020. P. 258-275.
10. Shibo Kuang, Zhaoyang Li, Aibing Yu. Review on modelling and simulation of blast furnace. Steel research int. 89 (2018) No. 1.
11. Shigeru Ueda, Tatsuya Kon, Hiroyuki Kurosawa, Shungo Natsui, Tatsuro Ariyama, Hiroshi Nogami. Influence of Shape of Cohesive Zone on Gas Flow and Permeability in the Blast Furnace Analyzed by DEM-CFD Model. *ISIJ International*, Vol. 55 (2015), No. 6, pp. 1232–1236.
12. Li S. Z., et al. A Method to Forecast the Cohesive Zone of Blast Furnace. *Materials Science Forum*, vol. 471–472, Trans Tech Publications, Ltd., Dec. 2004, pp. 358–361. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.471-472.358.
13. Tovarovskyi Y. H. Domennaia plavka. Monohrafyia. 2–e yzdanye. [Blast furnace. Monograph. 2nd edition]. Dnepropetrovsk: Porohy, 2009. 768 p.
14. Nepreryvnyi avtomatycheskyi kontrol parametrov zony plavlenyia s pomoshchiu dvumernoi ma-tematycheskoi modely, funktsyonyruiushchei v realnom masshtabe vremeny v sostave ASU TP Dp-2 y DP-10 OAO "MMK". [Continuous automatic control of the parameters of the melting zone using a two-dimensional mathematical model operating in real time as part of the automated process control system BF-2 and BF-10 of JSC MMK] / Parshakov V. M., Polynov A. A., Pavlov A. V. et al. // *Sbornyk trudov mezhdunarodnoho Soiuza Domenshchykov*. 2017. No 1. P. 54-69.
15. Sozdanye yntellektualnykh system podderzhky pryniatyia reshenyi po upravlenyiu domennoi plavkoi. Novye podkhody. (Monohrafyia). [Creation of intelligent decision support systems for the management of blast-furnace smelting. New approaches] / Y. H. Muraveva, D. N. Tohobytskaia, Yu. S. Semenov, N. H. Yvancha, A. Y. Belkova, E. Y. Shumelchyk, D. A. Stepanenko. Kyiv: Nauk. dumka, 2019. 272 p.
16. Kompleksnaia avtomatyzy-rovannaia systema kontrolia, optymyzatsyy y prohnoza domennoi plavky – pred-shestvennytsa systemy "Kohezyia" y ynstrument dlia

realyzatsyy vyrabatyvaemykh eiu reshenyi. [The integrated automated system for control, optimization and forecasting of blast-furnace smelting is the forerunner of the Kogeziya system and a tool for implementing the solutions developed by it] / Parshakov V. M., Polynov A. A., Pavlov A. V. et al // *Sbornyk trudov mezhdunarodnoho Soiuza Domen-shchykov.* 2017. No 1. P. 76-88.
17. Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace / N. G. Ivancha, I. G. Muraveva, E. I. Shumelchik, V. I. Vishnyakov, Yu. S. Semenov // *Metallurgist*, May 2018, Volume 62, Issue 1–2. P. 95–100.
18. Hudenau H. V., Stendysh N., Herlakh V. Fyzycheskye uslovyia v oblasty plastycheskoi zony domennoi pechy. Chast 1. Osnovnye pryntsypy modely. [Physical conditions in the plastic zone of a blast furnace. Part 1. Basic principles of the model] / *Chernye metally*, 1992. No. 8. P. 34-41.
19. Ramm A. N. Opredelenye tekhnycheskykh pokazatelei domennoi plavky. [Determination of technical indicators of blast-furnace melting]. Lenynhrad, 1960. 37 p.

I. H. Muravyova, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5926-7787
M. H. Ivancha, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5366-9328
V. R. Shcherbachov, Leading Engineer, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-6734-0451
V. I. Vishnyakov, Researcher, ORCID 0000-0002-5538-6962
K. P. Yermolina, Leading Engineer, ORCID 0000-0001-6819-9886
O. O. Biloshapka, Junior Researcher, ORCID 0000-0003-3103-0512
N. Ye. Khodotova, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-6958-4636

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

METHOD OF DETERMINING THE POSITION AND SHAPE OF THE COHEZIVE ZONE IN A BLAST FURNACE USING GAS FLOW TEMPERATURE DISTRIBUTION INDICATORS

Summary. The purpose of the work is the development of analytical and indirect methods for determining the shape and position of the plastic zone of a column of blast furnace charge materials. It is shown that the development of new mathematical models and methods for operational determination of the parameters of the cohezive zone for installation on blast furnaces of various means of controlling the distribution of the charge and gas flow has the greatest potential for further use in solving the problems of effective control of blast furnace melting. A new method for determining the parameters of the plastic zone (shape, thickness, and position) in the blast furnace is proposed, which is a combination of known and improved mathematical models as a result of research: loading of charge materials into the blast furnace, determination of melting temperatures and softening of iron-containing components of the charge in its various zones, determination parameters of the charge column in the dry zone of the blast furnace, determination of the area of the melting surface and a new method of determining the position of the softening and melting lines in the blast furnace using information on the means of controlling the temperature distribution of the gas flow and the surface of the charge backfill. The configuration of the melting line (surface) is determined on the basis of the similarity of this line to the temperature distribution curve of the gas flow (filling surface) on the furnace surface, as well as the equality of the area of the side surface of the figure of rotation of the forming line around the axis of the furnace and the calculated melting area.

The calculation of the coordinates of the points of the softening line is based on the results of mathematical modeling of loading processes and the distribution of charge components along the radius of the blast furnace top, which provides the possibility of determining the component composition of iron ore layers of charge materials in a given zone of the furnace and forecasting the formation of melts and their properties with the help of high-temperature transformation models. Unlike the known approach, according to which when determining the area of the melting surface, the amount of heat in the lower part of the furnace is set as a constant, the proposed method implies the calculation of this value taking into account the current technological conditions of blast furnace melting.

Key words: blast furnance, cohesion zone parametrs, temperature measuring probes, mathematical model, softening and melting lines, the method of determining the cohesive zone.

For citation: Metod vyznachennia polozhennia i formy plastychnoi zony v domennii pechi z vykorystanniam pokaznykiv rozpodilu temperatury hazovoho potoku [Method of determining the position and shape of the cohezive zone in a blast furnace using gas flow temperature distribution indicators] / I. H. Muravyova, M. H. Ivancha, V. R. Shcherbachov, V. I. Vishnyakov, K. P. Yermolina, O. O. Biloshapka, N. Ye. Khodotova // *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 95-108. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-95-108.

Стаття надійшла до редакції збірника 25.10.2022 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)