https://www.proconference.org/index.php/gec/article/view/gec36-00-013
DOI: 10.30890/2709-1783.2024-36-00-013

УДК 669.162.215

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THERMAL INDICATORS OF A BLAST MELTING FACTOR AT ANY POINT OF THE LAYER

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ У БУДЬ-ЯКІЙ ТОЧЦІ ШАРУ

Hlushchenko O. / Глущенко О.Л.
c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.
ORCID: 0000-0002-9230-9958
Kuvaev V. / Куваєв В.І.
master's degree / магістр
Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Dneprostroievskaia 2, 51918
Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Дніпробудівська 2, 51918

Анотація. *В роботі проводяться дослідження, пов'язані із розробкою математичної моделі визначення теплових показників доменної плавки. Можливість визначати ці показники у бідь-якій точці шару дозволить врахувати особливості тепломасообмінних процесів на різних рівнях доменної печі та розробити енергоефективні режими експлуатації високотемпературного агрегату, що, в кінцевому результаті, дозволить знизити витрати (енергетичні, матеріалі) на виробництво 1 т чавуну. Отримано рішення задачі по дослідженню теплового стану доменної плавки, тобто нагріву тіл в рухомому шарі при лінійних і нелінійних граничних умовах з урахуванням внутрішніх джерел тепла фізико-хімічних реакцій і потенціалу теплоти через кладку печі; рішення для визначення температури газу та матеріалів з урахуванням змін коефіцієнта тепловіддачі.*

Ключові слова: *доменна піч, шихта, газ, тиск, математична постановка, профіль печі, теплова робота печі, теплові показники доменної плавки, одновимірна модель течії газу, рівень засипу матеріалів, порізність та просвітність шару, живий перетин.*

Abstract. *The work is devoted to the development of a mathematical model for determining the thermal parameters of blast furnace smelting. The ability to determine these parameters at any point in the layer will allow us to take into account the peculiarities of heat and mass transfer processes at different levels of the blast furnace and develop energy-efficient operating modes of the high-temperature unit, which, ultimately, will reduce costs (energy, material) for the production of 1 ton of pig iron. The solution to the problem of studying the thermal state of blast furnace smelting, i.e. heating of bodies in a moving layer under linear and nonlinear boundary conditions taking into account internal heat sources of physicochemical reactions and the heat potential through the furnace lining, is obtained; a solution for determining the temperature of gas and materials taking into account changes in the heat transfer coefficient.*

Keywords: *blast furnace, charge, gas, pressure, mathematical formulation, furnace profile, furnace thermal work, thermal performance of blast furnace melting, one-dimensional gas flow model, material filling level, layer porosity and transparency, live cross-section*

Вступ.

Розвиток підприємств металургійного комплексу, рішення проблем енергозбереження, підвищення якості та конкурентоспроможності продукції на світовому ринку вимагає вдосконалення систем використання інформації для управління окремими технологічними процесами та виробництва в цілому. Одним з найважливіших умов створення ефективних систем управління таких об'єктів є вдосконалення математичних моделей, які дозволяють отримати інформацію про процеси в промислових агрегатах, здійснювати оптимізацію їх режимних параметрів, розробляти і удосконалювати алгоритми управління технологічними і технічними системами.

Економія енергетичних ресурсів стає все більш важливою проблемою металургійного комплексу України, в зв'язку з чим безсумнівно актуальним є коло питань, які розглядають доменну плавку з енергетичних позицій. Підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів на підприємствах гірничо-металургійного комплексу в сучасних умовах є одним з головних напрямків. При розгляді проблеми управління енергією в металургії в технічному аспекті домінуюча роль належить виплавці чавуну, де споживається основна частка енергетичних ресурсів і витрачається найбільш дефіцитний вид металургійного палива - кокс. Для виробництва чавуну характерна не тільки взаємозамінність сировини і енергії, технологічне різноманіття, а й багатоваріантність шляхів організації виробництва, в тому числі складу і параметрів функціонування основних агрегатів і устаткування, що забезпечують виробництво чавуну. Вибір ефективних шляхів зниження витрат енергії в сучасних умовах роботи доменних печей є найважливішою ланкою вирішення глобальної задачі раціонального використання ресурсів.

Таким чином, в сучасних умовах зберігається актуальність робіт, спрямованих на вдосконалення теплового режиму доменної плавки.

Результати досліджень. Теплообмінні процеси визначають теплову підготовку шихти, від якої залежить не тільки розвиток та протікання хімічних процесів але і техніко-економічні показники роботи самої доменної печі.

В роботі проведені дослідження щодо визначення температури, швидкості та тиску в будь-якій точці шару, якщо задана об'ємна витрата $V_д$ та тиск дуття $p_д$.

Фізична та математична постановки задачі.

Шар висотою H_0, який складається із кусків матеріалу шихти з відомою порозностю ε і просвітністю $\varepsilon_п$, опускається в шахті змінного перетину S зі швидкістю $w_м$ (витратою $G_м$). Шматки, що завантажуються на рівні засипі (z=0) мають однакову по об’єму температуру $t'_м$ (рисунок 1).

На висоті $H_ф$ від рівня засипі через $n_ф$ фурм діаметром $d_ф$ вдувається газ (дуття) з відповідним хімічним складом і температурою $T'_г$, який рухається назустріч шихті.

Рівняння закону збереження маси можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\varepsilon \cdot \rho) + \nabla(\varepsilon_п \cdot \rho \cdot \vec{w}) = q_{vm}, \qquad (1)$$

де τ - час процесу, с; ρ - густина газу, кг/м^3; w - швидкість газу, м/с; q_{vm} - внутрішні джерела (стоки) маси газу, тобто виділення-поглинання за рахунок хімічних процесів в шарі, кг/(м^3·с); $\varepsilon = dV'/dV$ - порозность шару; $\varepsilon_п = dS'/dS$ - просвітність шару; V' і S' - об’єм та живий перетин для проходу газу; V і S – повний об’єм та площа поперечного перерізу порожнього простору печі; ∇ - диференційний векторний оператор.

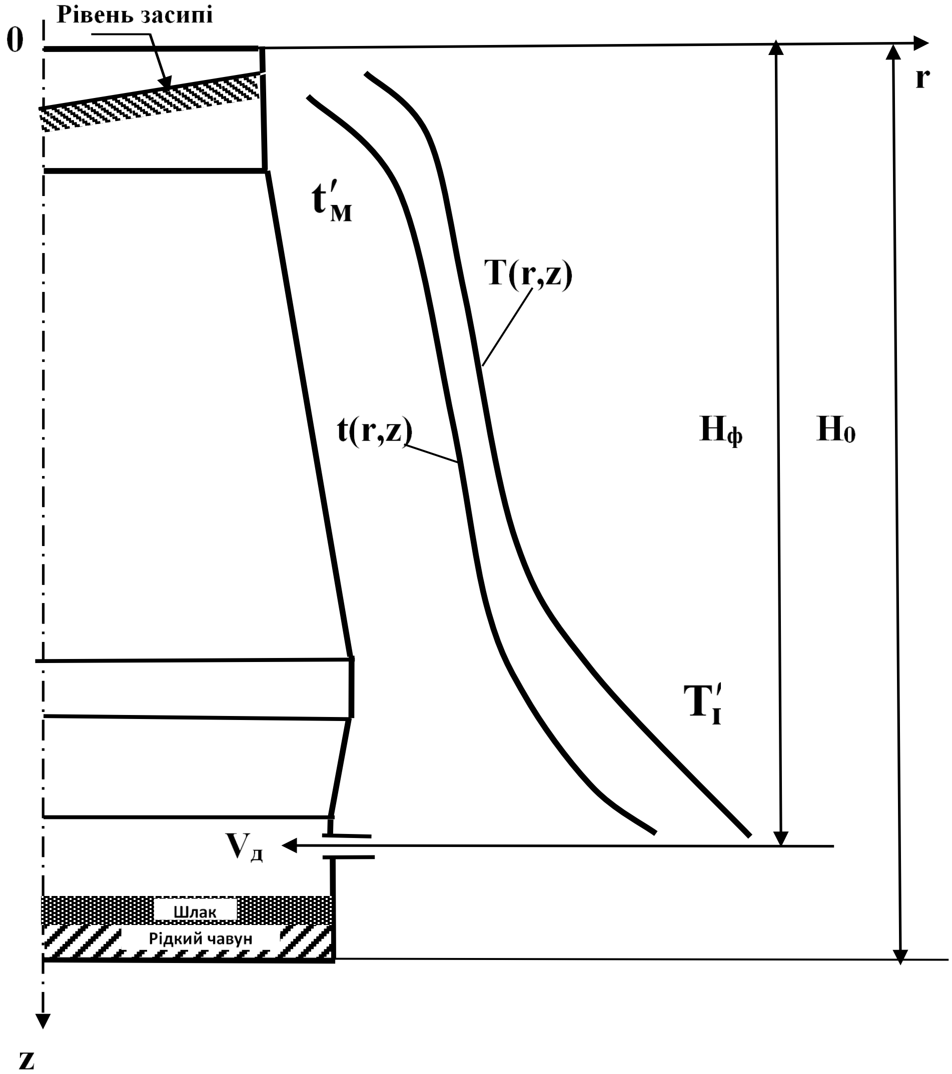

Рисунок 1 – До фізичної постановки задачі

Рівняння руху в'язкого стиснення газу в шарі:

$$\varepsilon \cdot \rho \frac{d(\varepsilon_П \cdot \vec{w}/\varepsilon)}{d\tau} = \varepsilon\,\rho\,\vec{g} - \mathrm{grad}(\varepsilon_П \cdot p) - \frac{2}{3}\mathrm{grad}[\varepsilon_П \eta\ \mathrm{div}(\varepsilon_П \cdot \vec{w}/\varepsilon)] + 2\mathrm{div}\left(\varepsilon_П \cdot \eta \cdot \vec{\vec{D}}\right) + \vec{R}, \quad (2)$$

де η - коефіцієнт динамічної в’язкості, Па·с; div - оператор дивергенції, наприклад, для плоскої задачі $\mathrm{div}\,\vec{w} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r^к} \cdot \frac{\partial (r^к \cdot v)}{\partial r}$; $u = w_z$, $v = w_r$ - осьова і радіальна швидкості газу, м/с (рисунок 1); $\vec{\vec{D}}$ - тензор швидкості деформації з компонентами

$$D_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i}\right),\ 1/с;$$

$\vec{R}$ - вектор сили опору, проштовхування газу крізь шар, кг/(м²·с²).

Рівняння (2) можна представити в наступному вигляді, використавши математичні припущення, представлені в [1, 2]:

$$2\operatorname{div}\left(\varepsilon_{п}\cdot\eta\cdot\vec{\vec{D}}\right)+\vec{R}=\operatorname{grad}\left(\varepsilon_{п}p+\varepsilon\,\rho\,g\,z\right)= \\ =-\left[150\cdot\left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon\,d_{м}\Phi}\right)\cdot\eta+1{,}75\rho\frac{\varepsilon_{п}}{\varepsilon}\cdot w_0\right]\cdot\left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon\,d_{м}\Phi}\right)\frac{\varepsilon_{п}^2}{\varepsilon}\cdot\vec{w}, \tag{3}$$

де $d_{м}$ - середній еквівалентний діаметр шматків матеріалу шихти, м; $w_0=|\vec{w}|=\sqrt{u^2+v^2}$ - модуль вектора швидкості, м/с; Φ - фактор форми частки.

Рівняння енергії для газу має наступний вигляд

$$\varepsilon\,\rho\,c_v\frac{dT}{d\tau}=\varepsilon\,\rho\,q_R+\operatorname{div}\left(\varepsilon_{п}\lambda\operatorname{grad}T\right)-\varepsilon_{п}p\operatorname{div}\left(\varepsilon_{п}\vec{w}/\varepsilon\right)- \\ \frac{2}{3}\varepsilon_{п}\cdot\eta\cdot\left[\operatorname{div}\left(\varepsilon_{п}\vec{w}/\varepsilon\right)\right]^2+2\varepsilon_{п}\eta\sum_{ij}D_{ij}^2+q_{vг}, \tag{4}$$

де λ і c_v - теплопровідність, Вт/(м·К) й ізохорна масова теплоємкість газу, Дж/(кг·К); p – тиск газу, Па; q_R - швидкість притоку тепла за рахунок випромінювання, Вт/кг; $q_{vг}$ - внутрішнє джерело (стік) тепла, діючий в газі, й який враховує дисипацію механічної енергії, що відбувається на поверхні частинок матеріалу, Вт/м^3; T і t – поточна температура газу і шихти, °С; $\frac{dT}{d\tau}=\frac{\partial T}{\partial\tau}+u\frac{\partial T}{\partial z}+v\frac{\partial T}{\partial r}$ - повна похідна.

Рівняння енергії, яке враховує нагрів шматків матеріалу шихти:

$$(1-\varepsilon)\rho_{м}c_{м}\frac{dt}{d\tau}=\operatorname{div}\left[(1-\varepsilon_{п})\cdot\lambda_{м}\operatorname{grad}t\right]+q_{vм}, \tag{5}$$

де $\rho_{м}$, $\lambda_{м}$ і $c_{м}$ - густина, теплопровідність і теплоємкість матеріалів; $q_{vм}$ - джерела (стоки) тепла за рахунок фізико-хімічних реакцій, які протікають всередині шматків шихти, Вт/м^3; $\frac{dt}{d\tau}=\frac{\partial t}{\partial\tau}+u_{м}\frac{\partial t}{\partial z}+v_{м}\frac{\partial t}{\partial r}$; $u_{м}$ і $v_{м}$ - осьова і радіальна швидкість матеріалів, м/с.

Для замикання системи необхідно додати рівняння стану газу:

$$p=K_z\,\rho\,R_{см}T, \tag{6}$$

де K_z – коефіцієнт стиснення реального газу; $R_{см}=\frac{8314}{\mu_{см}}$ - газова стала для газової суміші, Дж/(кг·К); $\mu_{см}=\sum_{i=1}^{n}r_i\cdot\mu_i$ - молекулярна маса суміші газів; r_i - об’ємна частка $i-$го компоненту газу; μ - молекулярна маса, кг/кмоль; n - число газів в суміші.

При $\varepsilon=0$ і $\varepsilon_{п}=0$ рівняння (5) являє собою рівняння нестаціонарної теплопровідності Фур'є-Кірхгофа і описує процес нагріву суцільного термічно масивного тіла.

Швидкість руху газів в доменній печі відносно велика, тому в кожен даний момент часу встигає встановитися рівновага і можна знехтувати приватними похідними параметрів за часом в рівняннях закону збереження мас (1) і руху (2), тобто розглядати рух газу як усталений.

Тоді зазначені рівняння спрощуються до виду:

$$\operatorname{div}\left(\varepsilon_{П}\rho\vec{w}\right)=0 \tag{7}$$

$$-\operatorname{grad}\left(\varepsilon_{П}p\right)=\varepsilon_{П}\rho\operatorname{grad}\left(w_0^2/2\right)+\varepsilon\rho\vec{w}\left(\vec{w}\operatorname{grad}\left(\varepsilon_{П}/\varepsilon\right)\right)+$$

$$+\frac{2}{3}\operatorname{grad}\left[\varepsilon_{П}\eta\operatorname{div}\left(\frac{\varepsilon_{П}\vec{w}}{\varepsilon}\right)\right]+\left(a_2 w_0+a_1\right)\vec{w}-\varepsilon\rho\vec{g}, \tag{8}$$

де $a_1=150\cdot\left(\dfrac{1-\varepsilon}{\varepsilon\, d_м \Phi}\right)^2\eta\,\dfrac{\varepsilon_П^2}{\varepsilon}$; $\quad a_2=1{,}75\cdot\left(\dfrac{1-\varepsilon}{\varepsilon\, d_м\,\Phi}\right)\varepsilon_П\rho\left(\dfrac{\varepsilon_П}{\varepsilon}\right)^2$.

З теорії поля відомо, що, якщо виконується умова відсутності завихрювання, тобто $\nabla\vec{w}=\operatorname{rot}\vec{w}=0$ то існує така скалярна функція $\varphi\left(x,y,z\right)$, градієнт якої дорівнює швидкості $\vec{w}$, тобто

$$\vec{w}=-\operatorname{grad}\varphi=-\nabla\varphi=-\left(\vec{i}\frac{\partial\varphi}{\partial x}+\vec{j}\frac{\partial\varphi}{\partial y}+\vec{k}\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right), \tag{9}$$

де знак мінус означає, що потік рухається від більшого потенціалу до меншого.

Підставивши (9) в (7), отримаємо рівняння для знаходження потенціалу швидкостей $\varphi(r,z)$ в разі плоскої (двовимірної) течії газу:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_П\rho\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)+\frac{1}{r^{к}}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^{к}\varepsilon_П\rho\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right)=0, \tag{10}$$

де $к$ - фактор форми, рівний 0 для декартової системи координат і 1 - для циліндричної; вісь z спрямована вздовж печі, а r - поперек з нулем на осі симетрії.

При відомому полі φ компоненти швидкості газу розраховуються за допомогою співвідношень:

$$u=w_z=-\frac{\partial\varphi}{\partial z};\qquad v=w_r=-\frac{\partial\varphi}{\partial r}. \tag{11}$$

Для плоскої течії зручно також використовувати функцію струму $\psi\left(r,z\right)$, яка вводиться співвідношенням

$$u=\frac{r^{-к}}{\varepsilon_П\rho}\cdot\frac{\partial\psi}{\partial r};\qquad v=\frac{-r^{-к}}{\varepsilon_П\rho}\cdot\frac{\partial\psi}{\partial z}. \tag{12}$$

При введенні цієї функції рівняння нерозривності тотожно задовольняється, а умова відсутності завихрювання $\left(\partial u/\partial r\right)-\left(\partial v/\partial z\right)=0$ приводе до співвідношення

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\varepsilon_П\rho}\cdot\frac{\partial\psi}{\partial z}\right)+\frac{1}{r^{к}}\left(\frac{r^{к}}{\varepsilon_П\rho}\cdot\frac{\partial\psi}{\partial z}\right)=0. \tag{13}$$

Після визначення поля швидкостей поле тисків можна знайти шляхом чисельного рішення рівняння руху (8). Для потенційного руху нестисливої рідини (в припущенні, що густина – це величина, яка слабо змінюється) рівняння руху істотно спрощується і приймає вид:

$$dH = -\frac{a_1 + a_2 \cdot w_0}{\varepsilon_п \rho} d\varphi, \qquad (14)$$

де $H = w_0^2/2 + p/\rho + gz$ - питома ентальпія газу, Дж/кг.

Застосовуючи векторну форму рівняння Ергана

$$\tilde{\rho}\vec{w} = -A\,\mathrm{grad}(\varepsilon_п p), \qquad (15)$$

і підставляючи (15) у рівняння нерозривності (7), отримаємо

$$\mathrm{div}[A\,\mathrm{grad}\,\tilde{p}] = \frac{\partial}{\partial z}\left(A\frac{\partial \tilde{p}}{\partial z}\right) + \frac{1}{r^к}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^к A\frac{\partial \tilde{p}}{\partial r}\right) = 0, \qquad (16)$$

де

$$A = \frac{1}{2a_3 + a_4 w_0} \equiv \left[a_3 + \sqrt{a_3^2 + \frac{a_4}{\rho}\sqrt{\left(\frac{\partial \tilde{p}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{p}}{\partial r}\right)^2}}\right]^{-1}; \qquad (17)$$

$a_3 = a_1/2\rho$; $a_4 = a_2/\rho$; $\tilde{p} = \varepsilon_п \cdot p$; $\tilde{\rho} = \varepsilon_п \cdot \rho$ - модифікований тиск та густина газу, відповідно.

При відомих тисках поле швидкостей можна визначити за рівнянням (15) з урахуванням лівої частині виразу (17):

$$\tilde{\rho}\,u = -A\,\partial\tilde{p}/\partial z;\ \tilde{\rho}\,v = -A\,\partial\tilde{p}/\partial r. \qquad (18)$$

Аналіз рівнянь нерозривності (16) і руху (18), а також результати експериментів дозволяють зробити висновок, що висота горизонту, починаючи з якого потік стає одновимірним, визначається витратою дуття $V_д$, середнім радіусом печі R і висотою печі H_o, довжиною фурми l, її діаметром $d_ф$ та відстанню від дзеркала розплаву l_1.

Висновки. В результаті проведених досліджень отримано рішення задачі по дослідженню теплового стану доменної плавки, тобто нагрівання тіл в рухомому шарі при лінійних граничних умовах з урахуванням внутрішніх джерел теплоти фізико-хімічних реакцій і втрат теплоти через кладку печі; рішення для визначення температур газу і матеріалів з урахуванням змінності коефіцієнта тепловіддачі.

Література.

1. Расчётно-аналитический метод определения показателей и параметров доменной плавки / А.Д. Горбунов, А.И. Парфёнов, К.А. Мусиенко, Е.Л. Глущенко // Сб. тезисов Международной научно-технической конференции посвящённой 70-летию КГГМК «Криворожсталь» «Теория и практика производства чугуна». – Кривой Рог, 2004. – С. 366-367.

2. Горбунов А.Д., Глущенко Е.Л. Определение распределения давления газа по высоте доменной печи //Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: Пороги, 2006, С. 77-91.

Стаття відправлена: 19.12.2024р.