

О. А. Сохацький, молодший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Розглядається можливість застосування інформаційних технологій для математичного моделювання теплообмінних та газодинамічних процесів у технологічних агрегатах. Запропоновано математичну модель, яка описує теплообмінні та газодинамічні процеси у протитечії газів та кускових матеріалів з урахуванням охолодження стінки. Виконано тестування програми шляхом порівняння числових результатів розрахунків з відомими експериментальними й теоретичними дослідженнями. Наведено результати обчислювального експерименту.

Рассматривается возможность применения информационных технологий для математического моделирования теплообменных и газодинамических процессов в технологических агрегатах. Предложена математическая модель, описывающая теплообменные и газодинамические процессы в противотоке газов и кусковых материалов с учетом охлаждения стенки. Выполнено тестирование программы путем сопоставления численных результатов расчетов с известными экспериментальными и теоретическими исследованиями. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

The possibility of application of information technology for mathematical modeling of heat exchange and gas dynamic processes in technological aggregates are analyzed. A mathematical model that describes the heat exchange and gas-dynamic processes in the backflow of gases and lumpy materials with regard to the cooling wall is offered. Testing of program by comparing numerical results of calculations with known experimental and theoretical studies has been done. The results numerical experiment are presented.

Ключові слова. Теплообмін, газодинаміка, математичне моделювання, числові методи, температура, тиск, швидкість.

Вступ. Необхідність швидкого розв'язування різноманітних технічних задач та розвиток комп'ютерної техніки спричинили широке використання числових методів для математичного моделювання теплообмінних і газодинамічних процесів. Складність, дорожнеча та іноді неможливість експериментального дослідження перебігу теплообмінних і газодинамічних процесів у технологічних агрегатах зумовили необхідність їх математичного моделювання. Використання математичного моделювання дозволяє оперативно прогнозувати перебіг теплогазодинамічних процесів і вибирати оптимальні режими їх роботи. Це дасть змогу досягти потрібних техніко-економічних показників та безпечності функціонування технологічного агрегату.

Розробка нових математичних моделей пов'язана з рядом труднощів. Зображена нижче схема відображає ці труднощі й відповідає структурі будь-якої моделі, що розробляється для проведення обчислювального експерименту і дає уявлення про нього (рис. 1) [1].

Схема обчислювального експерименту включає: математичну постановку задачі; розробку обчислювальних алгоритмів і їх дослідження, методичне налагоджування алгоритмів, у тому числі їх перевірку на тестових задачах, усунення помічених недоліків та експериментальне дослідження алгоритмів під час обчислень різноманітними методами у випадку різних параметрів розрахунку, серійні розрахунки, накопичення досвіду, оцінку ефективності та меж використання розроблених алгоритмів під час розв'язання конкретних задач тощо.

© О. А. Сохацький, 2011

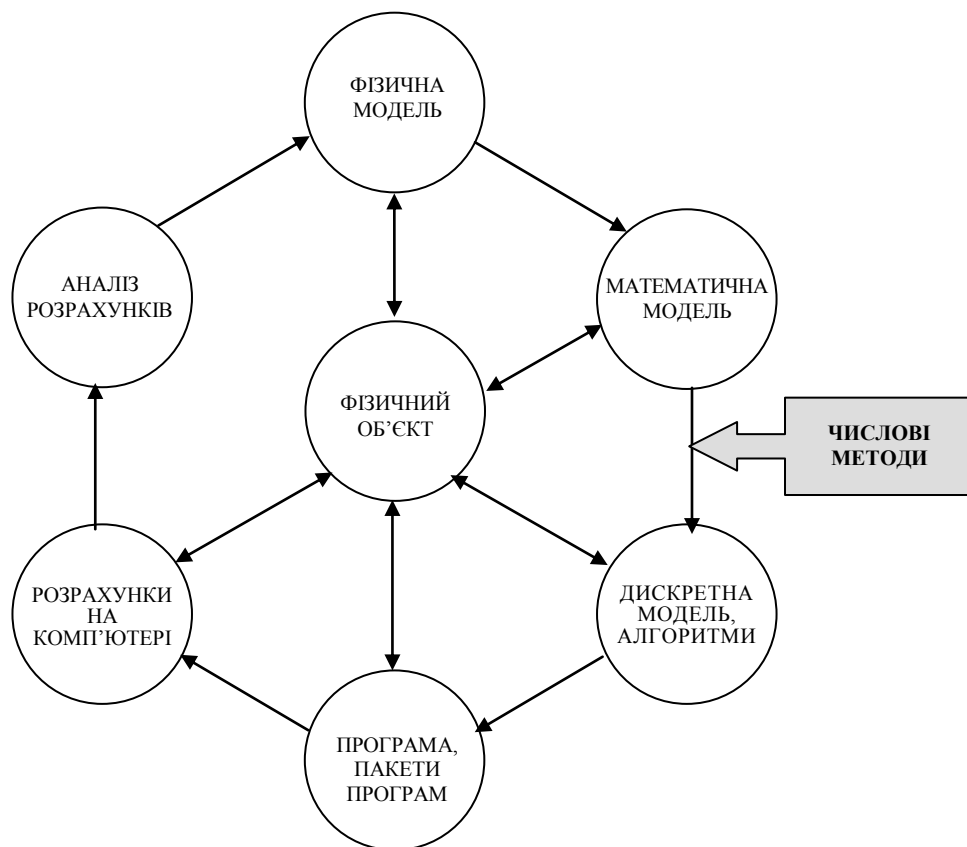


Рис. 1. Схема обчислювального експерименту

Постановка завдання. Для дослідження теплогазодинамічних процесів, що відбуваються в “сухий” зоні доменної печі, використано модернізовану математичну модель [2, 3]. Цю модель реалізовано в середовищі Visual Fortran, доповнено межовими умовами і залежностями розподілу геометричних, теплофізичних властивостей шихти і газу в шахті печі, що уточнюють розрахунок теплового стану периферійної зони. Це розширило можливості застосування моделі в різних умовах роботи печі, починаючи з її задувки і закінчуючи видувкою.

Математична модель, що описує теплообмінні процеси в протитечії газів і шихтових матеріалів, ґрунтується на законах газодинаміки і теплопередачі, які описані стосовно доменного виробництва диференціальними та інтегральними рівняннями (1–7) з межовими умовами (8–11).

Теплогазодинамічна модель складається з рівнянь: кількості руху (1), в якому сила опору проходження газу через шар обчислювалася з використанням залежності Ергана, нерозривності газу й шихти (2) (закони збереження маси), стану ідеального газу (3), енергії для газу (4) і шихти (5), теплового балансу для води (6) і межових умов (7–10) (рис. 2).

У загальному випадку задача, яка моделюється, двовимірна, осесиметрична і стаціонарна, розглядається в циліндричній системі координат у постановці, відображеній на рис. 2.

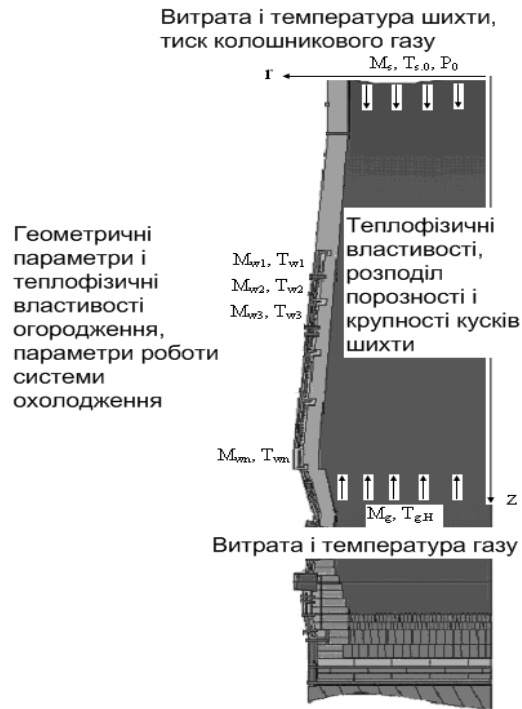


Рис. 2. Схематична постановка межових умов

Шар кускових матеріалів (шихта) із заданою температурою $T_{s/z=0}$ на верхній межі даної області (колошник) рухається вертикально вниз зі швидкістю $u_s(z)$. Швидкість руху шихти визначається продуктивністю печі. Через нижню межу розглянутої області протитечією до твердої фази рухається газ з температурою $T_{g/z=H} > T_{g/z=0}$ і масовою витратою M_g . Холодильні плити розташовуються по периметру охолоджуваної частини шахти, в них циркулює вода або пара. На верхній межі (колошник) підтримується середній постійний тиск газу $p_0 = p_0(r)$. Щоб виконати поставлене завдання, використано межові умови (7–10):

- на колошнику задано тиск газу, температура шихти на рівні засипу;
- на рівні низу розрахункової області (шахта, розпар, заплічки) – температура газового потоку на вході в задану область;
- на осі печі задано умову симетрії, а на внутрішній стінці печі – розрахунковий тепловий потік і умову прилипання (рівність нулю дотичної складової швидкості газу) [4];
- на зовнішньому боці печі задано витрату і температуру води на вході в ряд холодильників.

$$\frac{\partial \varepsilon p}{\partial z} = - \left[150 \frac{1-\varepsilon \cdot \mu_g}{\varepsilon \cdot d_s \cdot \Phi_s} + 1,75 \cdot \rho_g \cdot |u_g - u_s| \right] \frac{1-\varepsilon}{d_s \cdot \Phi_s} u_g - u_s + \frac{1}{r \cdot \Phi_w^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_g \cdot r \frac{\partial u_g}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$M_g = 2\pi \int_0^{R_{bf}} \rho_g \cdot u_g \cdot \varepsilon \cdot \Phi_w^2 \cdot r \cdot dr = const; \quad M_s = 2\pi \int_0^{R_{bf}} \rho_s \cdot u_s \cdot (1-\varepsilon) \cdot \Phi_w^2 \cdot r \cdot dr = const; \quad (2)$$

$$p = r_g R_g T_g + 273; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_g \cdot u_g \cdot C_g \cdot T_g \cdot \varepsilon \cdot \Phi_w^2 \right] = \Phi_w^2 \cdot K_v \cdot T_s - T_g; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_s \cdot u_s \cdot C_s \cdot T_s \cdot (1-\varepsilon) \cdot \Phi_w^2 \right] = \Phi_w^2 \cdot K_v \cdot T_g - T_s + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[(1-\varepsilon) \cdot \lambda_s \cdot r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial z} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot \Phi_w^2}{M_w \psi C_w \psi \left[\left(\frac{h}{l} \right)_{gar} + \left(\frac{h}{l} \right)_p + \left(\frac{h}{l} \right)_{nm} + \left(\frac{h}{l} \right)_c + \left(\frac{h}{l} \right)_{zc} + \frac{1}{a_w} \right]} \left(T_w - T_s \Big|_{r=R_{bf}} \right), \quad (6)$$

$$p \Big|_{z=0} = p_0, \quad T_g \Big|_{z=H} = T_g \cdot H, \quad T_s \Big|_{z=0} = T_s \cdot 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad -(1-\varepsilon) \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=R_{bf}} - a_g (T_g - T_s \Big|_{r=R_{bf}}) = q_w \cdot z; \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_g}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad u_g \Big|_{r=R_{bf}} = 0, \quad (9)$$

$$T_w \Big|_{z=z(i)} = T_w \cdot i, \quad M_w \Big|_{z=z(i)} = M_w \cdot i, \quad i = 1, N_c, \quad (10)$$

де індекси g, s і w – газ, шихта й вода (пара); z, r – циліндричні координати; ε – порозність шихти ($\text{м}^3/\text{м}^3$); p, u та T – тиск (Па), швидкість (м/с) і температура (К); ρ – густина, ($\text{кг}/\text{м}^3$), μ_g – динамічний коефіцієнт в'язкості газу, що обчислюється за залежністю Саттерленда ($\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$); $\Phi_w = 1 + z \cdot tg \alpha$ – вираз для перетворення координат; α – кут конусності шахти печі; d_s і Φ_s – середній діаметр (м) і коефіцієнт форми кусків шихти відповідно; M_g і M_s – масові витрати газу ($\text{кг}/\text{с}$) й шихти ($\text{кг}/\text{с}$); R_g – газова стала ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$); C – теплоємність ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$) та $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$); K_v – об'ємний коефіцієнт тепловіддачі між газом і шихтою, що обчислюється за залежністю Б. І. Китаєва ($\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$); R_0 – радіус колошника (м); λ_s – коефіцієнт теплопровідності твердих часток, α_w – коефіцієнт тепловіддачі від стінок холодильника до води (пари) в охолоджуваній зоні (від кожуха до повітря в неохолоджуваній) ($\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$); $h_{gar}, h_p, h_{nm}, h_c, h_{zc}$ – товщина (м) й $\lambda_{gar}, \lambda_p, \lambda_{nm}, \lambda_c, \lambda_{zc}$ – коефіцієнти теплопровідності гарнісажу, футерівки, набив-

ної маси, тіла й трубки змійовика холодильника в охолоджуваній зоні (кожуха в неохолоджуваній) відповідно ($Вт/(м\cdot К)$); M_w – масові витрати води (пари) горизонтального ряду холодильників ($кг/с$); N_c – кількість горизонтальних рядів охолодження на розглянутій ділянці печі; $(T_w)_i$ – температура води (пари) на вході в холодильники ряду з номером i ($К$).

Теплофізичні властивості газу і шихти залежать від температури. Порозність і крупність кусків шихтових матеріалів, їх теплофізичні властивості задаються, виходячи з особливостей їх завантаження в піч.

Припущення і теплофізичні основи розрахунку теплообміну в “сухій” зоні доменної печі. Вивчення процесів теплообміну в шарі кускових матеріалів пов’язано з великими труднощами. Перш за все, це викликано різноманітністю і складністю форм матеріалів, а також їх неоднорідним розподілом у доменній печі, що заздалегідь невідомо.

У зв’язку з цим прийнято припущення, що куски матеріалів мають форму куль або еліпсоподібних тіл певного діаметра. Усереднення порозності здійснюється за розглянутими елементарними об’ємами, які визначаються розмірами розрахункової сітки. Середні “просвітності” шару, згідно з Б. І. Китаєвим, бралися рівними між собою [5].

Зміна густини газу враховується за допомогою термічного рівняння стану ідеального газу. У численних публікаціях, зокрема у праці [6], показано, що теплопровідність газів у доменних печах мала і її можна не враховувати. Це припущення також використано при моделюванні теплогазодинамічних процесів у “сухій” зоні доменної печі.

Параметри газу в розглянутих елементарних об’ємах підкоряються законам:

▪ Менделєєва – Клайперона, $p/\rho = RT$;

▪ залежності Саттерленда $\mu T = \mu_0 T/T_0 \sqrt[3]{2} T_0 + T_s / T + T_s$, яка зв’язує динамічний коефіцієнт в’язкості (μ) з температурою (T), де T_s – стала Саттерленда, що має для повітря значення, близьке до $122^\circ К$, а T_0 і μ_0 – абсолютна температура і коефіцієнт в’язкості, які відповідають деякому початковому стану газу, p – тиск, ρ – густина, T – температура, R – універсальна газова стала.

Зазначимо припущення, які використано для моделювання процесів теплообміну і газодинаміки в “сухій” зоні печі:

- 1) розподіл газового потоку не залежить від способу підведення дуття;
- 2) профіль осьової швидкості газу u_g стабілізується і визначається структурою шару, яка сформована при завантаженні шихти;
- 3) тепловий ефект хімічних реакцій не враховується;
- 4) радіальна складова швидкості газу мала в порівнянні з осьовою швидкістю газу, тому її не враховували;
- 5) молекулярне перенесення теплоти в газі незначне в порівнянні з перенесенням теплоти конвекцією, тому воно не враховується;
- 6) теплопровідність шихти в осьовому напрямку не враховується через її малість у порівнянні з теплопровідністю в радіальному напрямку і теплообміном конвекцією в осьовому напрямку.

Численні експериментальні дослідження в галузі гідроаеродинаміки [7] показали, що при обтіканні тіла у формі кулі ламінарними або турбулентними потоками поперечна до основного потоку складова швидкості мала, і основний рух газу відбувається в основному напрямку до руху потоку. Враховуючи, що профіль поперечної складової швидкості досить складний і залежить від багатьох факторів, у тому числі від геометрії тіла, яка різноманітна і невідома, її не враховували. Перерозподіл витрати газу по перетину печі враховується за законом збереження (2).

Рівняння руху газу в шарі шихтових матеріалів (1) отримано з основного рівняння Нав'є – Стокса [4] для в'язкого гіпотетичного газу [5] з використанням зазначених вище припущень.

Тензор сили опору, яку відчуває газ під час проходження через шар кускових матеріалів, обчислити досить складно [5], і вжиті спроби поки що не можна визнати вдалим, лише для вкрай рідкісних випадків з простою конфігурацією каналів вдається виразити її у вигляді аналітичної функції. У зв'язку із цим прагнення дослідників отримати її експериментальним шляхом цілком природне. Досить надійна залежність, що пройшла перевірку на практиці і при моделюванні, для визначення сили опору відображається рівнянням С. Ергана [8]:

$$\bar{R}_z = -\frac{\partial \varepsilon_n p}{\partial z} = 150 \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon d_s \Phi_s} \right)^2 \mu_g \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon} \bar{v} + 1,75 \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon d_s \Phi_s} \right) \rho_g \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} |\bar{v}| \right) \bar{v}, \quad (11)$$

в якому вираз $150 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon d_s \Phi_s} \mu_g \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon} \bar{v}$ являє собою втрату енергії на подолання в'язкості від тертя між шарами газу, а вираз $1,75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon d_s \Phi_s} \rho_g \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon} |\bar{v}| \bar{v}$ – втрату кінетичної енергії газу від опору кускових матеріалів. При $Re \leq 10$ основну роль в (11) відіграє перший доданок, а при $Re \geq 1000$ – другий [9].

Рівняння теплового балансу для газу і шихти отримані з рівняння енергії для гіпотетичного середовища [10] з урахуванням вищеописаних припущень.

З причини того, що газ віддає теплоту шихті, член q_v є стоком теплоти і він береться зі знаком мінус $-q_v$ і згідно із законом Ньютона – Ріхмана $-q_v = K_v \cdot (T_s - T_g)$, а шихта відбирає тепло у газу, член q_v є джерелом тепла, і його потрібно брати зі знаком плюс $q_v = K_v \cdot (T_g - T_s)$.

Для обчислення середнього значення сумарного об'ємного коефіцієнта теплообміну взята залежність, запропонована Б. І. Китаєвим [5], яка отримана з критеріального рівняння теорії теплообміну [4, 10]: $Nu = k Re^{0,9} Pr^{1/3}$, має вигляд:

$$K_v = 0,1005 \cdot \frac{c_g r_g^{1/3} \cdot \lambda_g^{2/3}}{d_s^{0,1}} \cdot \frac{u_g^{0,9}}{v_g^{0,57}} \cdot F_d, \quad \text{Вт/(м}^3\text{K)}, \quad (12)$$

де K_v – об'ємний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м³ K); λ_g – коефіцієнт теплопровідності газу Вт/(м K); u_g – швидкість газу, м/с; d_s – крупність куску шихтових матеріалів, м; v_g – кінематична в'язкість газу, м²/с; $a_g = \lambda_g / (c_g \rho_g)$ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; $Pr = \nu/a$ – число Прандтля, міра подібності швидкісних та температурних полів, $F_d = 6 \cdot (1-\varepsilon) / d_s$ – поверхня кулеподібних кусків шихти, м².

Наведені рівняння з використанням скінченно-різницевого методу були реалізовані в середовищі Compaq Visual Fortran 6.6.

Результати дослідження. Для настроювання математичної моделі виконано розрахунки та їх порівняння з результатами експериментальних і теоретичних досліджень, які показали їх добру збіжність:

- розподіл температури, тиску за радіусом і висотою в шахті печі, виконали S. P. Kinney [11–15] і Л. А. Бялий [16];
- розподіл температур при задувці печі, виконали фірми “Ніппон кокан”, “Сумітомо кіндзоку гоке” [17], Б. І. Китаєв і Ю. Г. Ярошенко [18];
- розподіл температур у периферійній зоні, виконав П. Г. Васильєв [19–21];
- зовнішніх теплових втрат, виконали О. В. Бородулін [22] і С. М. Андоньєв [23];
- розподіл тиску в шахті печі, виконав О. А. Томаш [24].

З використанням теплогазодинамічної моделі “сухої” зони шахти уточнено закономірності й дано кількісну оцінку процесів теплообміну й газодинаміки в шахті ДП залежно від витрат і температури шахтного газу, тиску колошникового газу, порозності й крупності кусків шихти. Результати розрахунків наведено в табл. 1.

Розрахунки виконано за даними роботи доменної печі № 6 ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг” об’ємом 2000 м³, на якій у 2007 р. було проведено дослідження її теплового стану й отримано експериментальні дані про характер її роботи.

Підтверджено, що витрати шахтного газу, який продувається через шар шихтових матеріалів, у порівнянні з іншими параметрами газового потоку, властивостями шихтових матеріалів мають визначальний вплив на їх прогрівання, зміни температури, тиску й швидкості газового потоку. Зменшення витрат шахтного газу на 10 %, за інших однакових умов, призводить до уповільнення теплообмінних процесів і зменшення газодинамічного напору в шахті ДП: температура шихти, теплові втрати, перепад тиску, швидкість газу зменшуються в середньому на 15÷20 % (табл. 1).

На перепад тиску найбільше впливає порозність і крупність кусків шихти в межах їх зміни 0,2÷0,3 м³/м³ і 5÷30 мм відповідно.

З використанням теплогазодинамічної моделі визначено вплив нерівномірності розподілу газового потоку по радіусу печі на перебіг теплообмінних і газодинамічних процесів за умови збереження середньої газопроникності шихти в горизонтальних перетинах. Розглядалися чотири найбільш типові варіанти їх розподілу по радіусу печі (порозності), за інших рівних умов, які відповідають рівномірному, центральному, периферійному і фактичному газорозподілу доменної печі № 6. У разі варіювання розподілу порозності по радіусу печі перерозподіл газового потоку спостерігається в зону вищої порозності, оскільки це найбільш газопроникний матеріал, що сприяє кращому прогріванню шихти в цих зонах.

Установлено, що розподіл газового потоку, за інших однакових умов, впливає на зміну середньої по перерізу або об’єму температури газу й шихти, тиску й швидкості газу на ~1÷5 %, зовнішніх теплових втрат у шахті на ~10÷20 %.

**Вплив параметрів газового потоку та властивостей шихтових матеріалів
на теплогазодинамічні параметри (+ збільшення; – зменшення)¹**

№	Фактор	Теплові втрати в шахті / температура шихти в шахті, %	Верхній перепад тиску / перепад тиску в шахті, %	Температура газу в шахті / на колошнику, %	Швидкість газу в шахті / на колошнику, %
1	Зменшення витрат шахтного газу на величину зазначеного інтервалу відносно варіанта при витраті шахтного газу 100 %:				
1а	100÷90 %	– 19/– 20	– 32/– 24	– 19/– 32	– 20/– 28
1б	100÷80 %	– 56/– 58	– 66/– 53	– 57/– 63	– 50/– 51
1в	100÷60 %	– 80/– 79	– 84/– 79	– 78/– 66	– 72/– 64
2	Збільшення тиску колошникового газу на величину зазначеного інтервалу відносно варіанта при тиску колошникового газу 0,5 атн:				
2а	0,5÷1,0 атн	+2/+3	– 36/– 32	– 23 ¹ /–	+1/– 1
2б	0,5÷1,5 атн	+3/+5	– 54/– 50	– 37 ¹ /–	+2/– 2
2в	0,5÷2,0 атн	+4/+6	– 64/– 61	– 47 ¹ /– 43 ¹	+3/– 3
3	Збільшення температури шахтного газу на 100°С відносно варіанта при температурі шахтного газу 900°С в інтервалі:				
3а	900÷1500 °С	+12/+10	+6/+5	+11/+10	+6/+5
4	Збільшення середньої порозності шихти на величину зазначеного інтервалу відносно варіанта при середній порозності шихти 0,2 м ³ /м ³ :				
4а	0,2÷0,3 м ³ /м ³	– 3/– 4	– 60/– 58	– 3/+2	– 4/– 32
4б	0,2÷0,4 м ³ /м ³	– 8/– 9	– 82/– 80	– 6/+4	– 14/– 49
4в	0,2÷0,5 м ³ /м ³	– 14/– 15	– 92/– 90	– 9/+7	– 26/– 58
4г	0,2÷0,7 м ³ /м ³	– 31/– 28	– 98/– 98	– 13/+21	– 44/– 68
5	Збільшення середньої крупності куска шихти на величину зазначеного інтервалу відносно варіанта при середній крупності куска шихти 5 мм:				
5а	5÷10 мм	– 0,4/– 3	– 26/– 22	– 2/+3	+5/+2
5б	5÷30 мм	– 8/– 16	– 70/– 66	– 10/+10	+11/+6
5в	5÷50 мм	– 15/– 24	– 82/– 78	– 13/+18	+13/+12
5г	5÷80 мм	– 24/– 33	– 88/– 86	– 14/+31	+14/+20

¹ За даними О. А. Томаша [24].

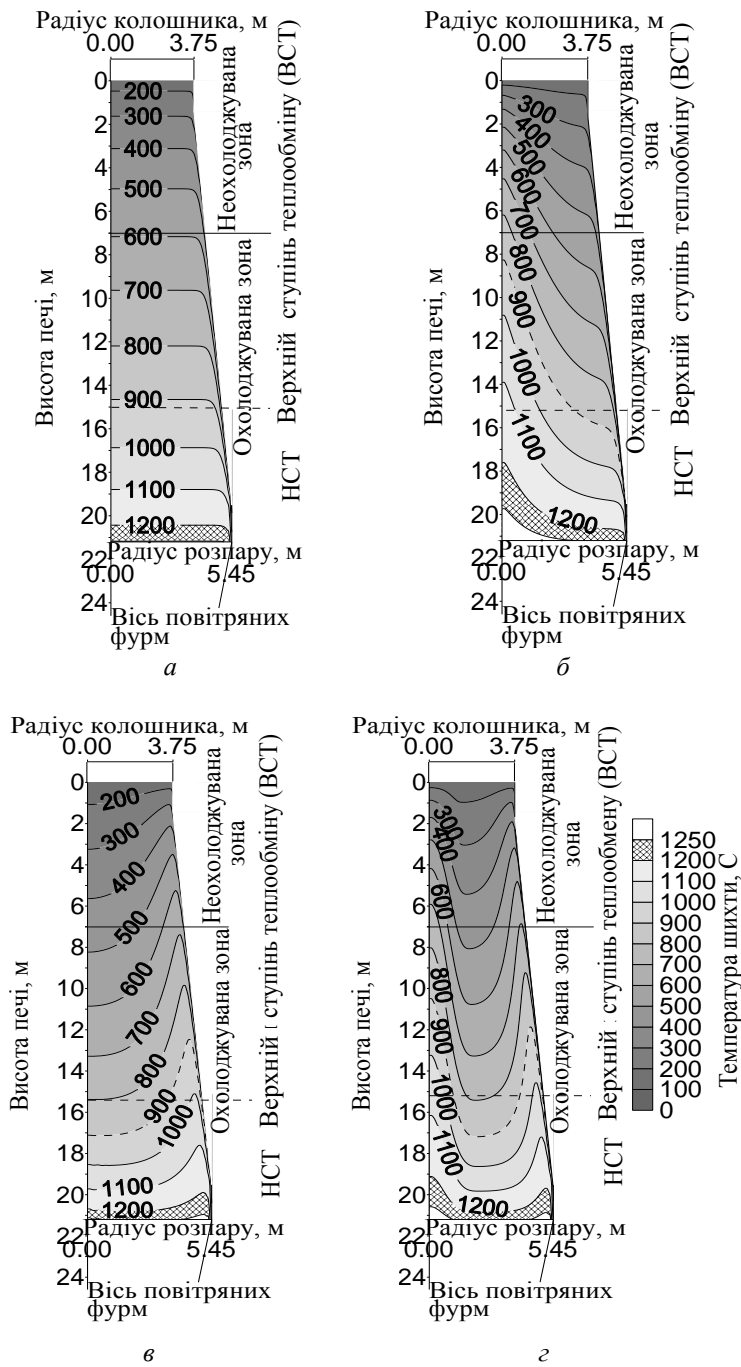


Рис. 3. Розподіл температур шихти в шахті доменної печі об'ємом 2000 м³ за різного газорозподілу: а – рівномірний, б – центральний, в – периферійний, г – фактичний

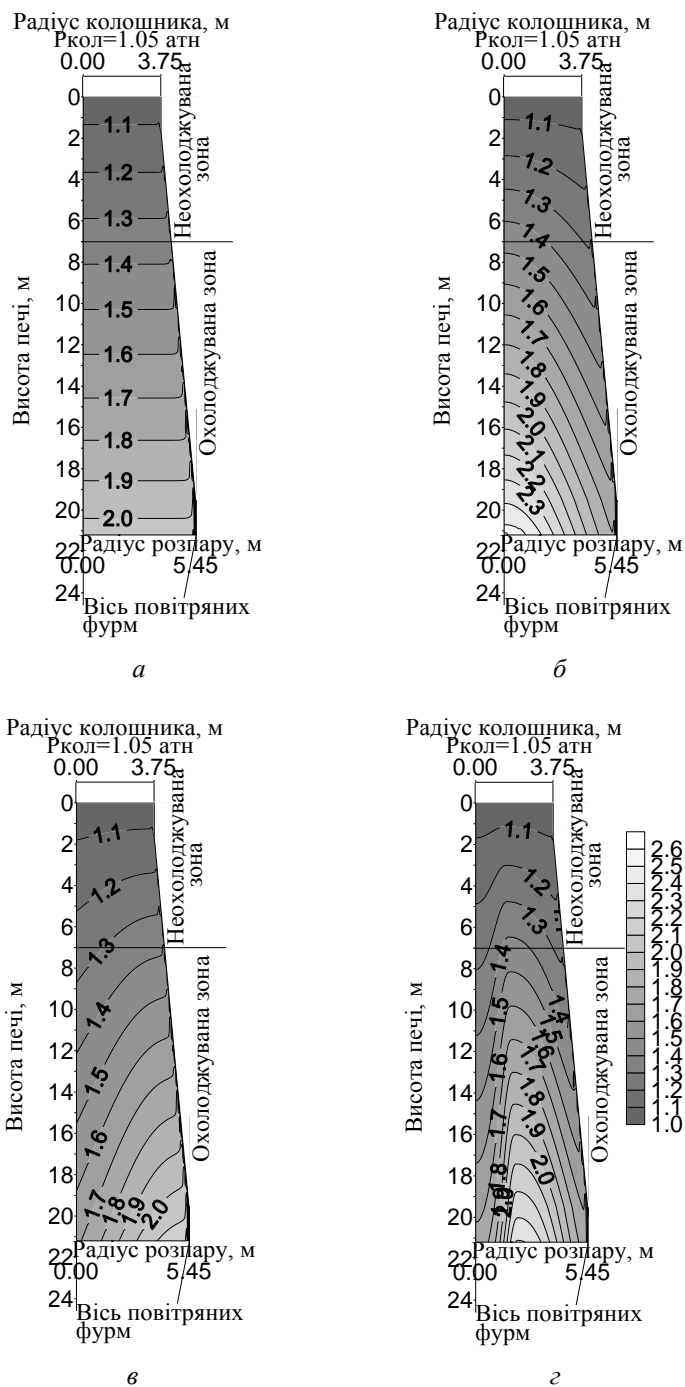


Рис. 4. Розподіл статичного тиску газу в шахті доменної печі об'ємом 2000 м^3 за різного газорозподілу: *а* – рівномірний, *б* – центральний, *в* – периферійний, *г* – фактичний

Розподіл температур шихти і статичного тиску газу в шахті ДП об'ємом 2000 м³, що відповідають рівномірному, центральному, периферійному і фактичному газорозподілу, за інших однакових умов, показані на рис. 3–4. Штриховою лінією на рис. 3 позначено межу верхнього й нижнього ступенів теплообміну (ВСТ і НСТ), яка відповідає середній температурі шихти 900°C, а заштрихованою областю показано межову зону, що відповідає температурі 1200–1250°C.

Висновки. Виконані дослідження впливу газорозподілу на закономірності розвитку теплообмінних процесів у “сухий” зоні шахти показали, що економічно вигідніший варіант центрального газорозподілу за рахунок зниження зовнішніх теплових втрат, що узгоджується з висновками, отриманими під час аналізу експериментальних досліджень печей із центральним і периферійним газорозподілом. На підставі виконаних досліджень і отриманих результатів видано рекомендації, спрямовані на підвищення надійності роботи огороження печі.

Література

1. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики / Марчук Г. И. – М. : Наука, 1977. – 456 с.
2. Авцинов А. Ф. Моделирование теплообмена и газодинамики в шахте доменной печи / А. Ф. Авцинов, А. В. Бородулин, С. Ф. Бугаев и др. // Сталь. – 1996. – № 8. – С. 4–9.
3. Сохацкий А. А. Математическое моделирование и анализ процессов теплообмена и газодинамики в верхней зоне доменной печи с целью обеспечения надежной работы ограждения / А. А. Сохацкий, И. А. Лукьяненко, Г. Т. Цыганков и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2007. – Вып. 14. – С. 50–59.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Лойцянский Л. Г. – М. : Наука, 1987. – 840 с.
5. Теплотехника доменного процесса / [Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Суханов Е. Л. и др.]. – М. : Металлургия, 1978. – 248 с.
6. Тепло- и массообмен в плотном слое / [Китаев Б. И., Тимофеев В. Н., Боковиков Б. А. и др.]. – М. : Металлургия, 1972. – 432 с.
7. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа / Ван-Дайк М. ; пер. с англ. Л. В. Соколовской. – М. : Мир, 1986. – 184 с.
8. Ergin S. // Chem. Eng. Progress. – 1952. – V. 48. – P. 89–94.
9. Клименко В. А. Основы физики доменного процесса / В. А. Клименко, Л. С. Токарев. – Челябинск : Металлургия, 1991. – 288 с.
10. Исаченко В. П. Теплопередача / Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
11. Kinney S. P. Движение шихты и газов в доменной печи / S. P. Kinney // Домез. – 1930. – № 3 (9). – С. 87–93.
12. Kinney S. P. Движение шихты и газов в доменной печи / S. P. Kinney // Домез. – 1930. – № 4 (10). – С. 51–76.
13. Kinney S. P. Движение шихты и газов в доменной печи / S. P. Kinney // Домез. – 1930. – № 5 (11). – С. 89–106.
14. Kinney S. P. Движение шихты и газов в доменной печи / S. P. Kinney // Домез. – 1930. – № 6 (12). – С. 92–106.
15. Kinney S. P. Движение шихты и газов в доменной печи / S. P. Kinney // Домез. – 1930. – № 7 (13). – С. 83–103.
16. Бялый Л. А. Исследование процессов восстановления в шахте доменной печи при работе на комбинированном дутье / Л. А. Бялый, А. П. Котов // Сталь. – 1966. – № 12. – С. 1075–1081.

-
17. Кутнер С. М. Технология задувки доменных печей за рубежом / Кутнер С. М. // Обзорная информация. Ин-т “Черметинформация”, сер. “Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна”. – М., 1984. – Вып. I. – 43 с.
 18. Китаев Б. И. Теплообмен в доменной печи / Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Лазарев Б. Л. – М. : Металлургия, 1966. – 356 с.
 19. Васильев П. Г. К вопросу об определении температуры газов около стен доменной печи / П. Г. Васильев, Д. В. Ризун // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1995. – № 9. – С. 71–72.
 20. Васильев П. Г. Разработка методики расчета температур газов околофутеровочной области доменных печей / П. Г. Васильев, Д. В. Ризун А. И. Васюченко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1996. – № 1. – С. 67–68.
 21. Федотов И. А. Разработка методов диагностики состояния рабочего профиля шахт доменных печей / И. А. Федотов, П. Г. Васильев, В. Е. Левченко, Д. В. Ризун // Сталь. – 1997. – № 8. – С. 8–19.
 22. Домна в энергетическом измерении / [А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, Г. И. Орел]. – Кривой Рог : Мир, 2004. – 412 с.
 23. Андоньев А. С. Охлаждение доменных печей / Андоньев А. С., Филиппев О. В., Кудинов Г. А. – М. : Металлургия, 1972. – 362 с.
 24. Томаш А. А. Структура зернистого слоя и движение газов в доменных печах : дис. ... доктора техн. наук : 05.16.02 / Томаш Александр Анатольевич. – Донецк, 2004. – 406 с.

