

Математична модель теплового балансу нижньої зони доменної печі

Ю. Л. Курбатов, кандидат технічних наук, професор
С. Л. Ярошевський, доктор технічних наук, професор
І. В. Мішин

Донецький національний технічний університет, Донецьк

Для дослідження теплового стану доменної печі розроблено математичну модель теплового балансу нижньої зони доменної печі. Показано чітку залежність між теоретичною температурою та виходом горючих газів і ступенем прямого відновлення заліза.

Історія вивчення теплообміну пов'язана з іменами таких видатних вчених як Ж. Ебельман, Л. Белл, Е. Діпшляг, О. С. Саркісянц. Найбільший прогрес у теорію теплообміну в доменній печі вніс Б. І. Кітаєв, що розділив доменну піч на три зони – верхню, нижню ступені теплообміну і зону помірних температур (теплообмін відсутній або незначний) [1]. Оскільки значний вплив на тепловий баланс в печі надають реакції відновлення та окислення й витрати тепла, Б. І. Кітаєв, доповнивши водяний еквівалент шихти часовими витратами тепла на тепловий ефект реакцій і витратами тепла через кладку печі, запропонував термін «уявна» теплоємність шихти [2].

Подальший розвиток теплообміну було спрямовано на вивчення зональних теплових балансів, уточнення витрат коксу – роботи Ж. Мішара і А. Н. Рама [3]. У 1979 році канадськими вченими Дж. Г. Пісі і В. Г. Давенпортом була опублікована модель доменного процесу, заснована на завершеності теплообміну в нижній зоні і нестачі газу-відновника, що визначає рівновагу реакції відновлення вугілля в зоні помірних температур. Модель дозволила визначити прогнозу витрату коксу з більшою точністю, проте через велику кількість допущень розрахункові значення складу і температури колошникових газів виявилися недостовірними [4].

Сучасне дослідження тепло-масообмінних процесів в доменній печі ґрунтується на комплексних математичних моделях, що включають наступні підмоделі: матеріальний і тепловий баланс, статистичні залежності, гідро- і газодинамічні рівняння руху матеріалів і газів по висоті печі, кінетичні рівняння відновлення оксидів заліза, теплообмін. На території країн СНД прикладами можуть слугувати балансова логіко-статистична модель доменного процесу, розроблена в Інституті металургії УрО РАН [5], математична модель, розроблена в ІЧМ НАН України [6], за кордоном – двовимірна математична модель японської фірми “Nippon Steel” під назвою BRIGHT [7], багатовимірні математичні моделі (Японія) [8].

Зазначені моделі та методики дозволяють спрогнозувати витрату коксу і загальний тепловий режим доменної печі, але головним їх недоліком є спрощення обліку процесів прямого і непрямого відновлення, температури колошника, теплових витрат, відсутність обліку впливу теоретичної температури в зоні фурми на нагрів продуктів плавки – чавуну і шлаку.

Плавлення і кристалізація

Метою даної роботи є створення математичної моделі нагрівання горна на базі використання теплового балансу нижньої зони печі на основі існуючих теоретичних і практичних розробок.

На рис. 1 представлена схема потоків матеріалів і газів у нижній ступені теплообміну. До фурменної зони печі разом із дуттям надходять замітники коксу – пиловугільне паливо (ПВП), гарячі відновлювальні гази (ГВГ) та природний газ (ПГ). Із зони помірних температур надходять нагріті до 900 °С кокс, залізорудна сировина у вигляді заліза, відновленого шляхом непрямого відновлення у верхній зоні і за рахунок використання металодобавок, вюстит (FeO), SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃ і оксиди MnO, P₂O₅ та ін. Гази, що відходять з нижньої зони, мають температуру, близьку до температури шихти: для печей з високим коефіцієнтом використання тепла і рівним ходом різниця температур між газом і шихтою Δt становить 20 – 50 °С, для печей з порушенням рівного ходу, високою витратою коксу Δt може досягати 100 °С і більше [9].

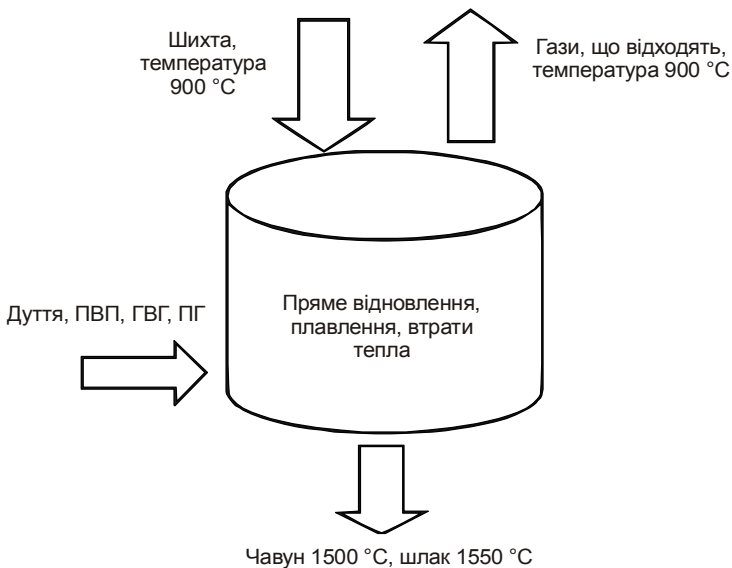


Рис. 1. Загальна схема теплового балансу нижньої зони печі.

Вхідні і вихідні параметри моделі представлені в таблиці. Хімічний склад чавуну і шлаку формується на основі розрахунку шихти з комплексного методу А. Н. Рама або задається з урахуванням показників реальної доменної плавки.

За основу математичної моделі прийнято рівняння теплового балансу нижньої зони, при цьому ліва частина рівняння відповідає надходженню тепла, а права – витраті тепла:

$$Q_C + Q_D + Q_{ПВП} = \Delta Q_{чав} + \Delta Q_{шл} + Q_{rd} + Q_{ел} + \Delta Q_{кокса} + Q_{витрат} + Q_{газа} , \quad (1)$$

де Q_C – теплота горіння вуглецю коксу біля фурм, кДж/т чавуну; Q_D – теплота, що вноситься дуттям, за винятком теплоти розкладання вологи дуття, кДж/м³; $Q_{ПВП}$ – теплота горіння ПВП біля фурм, кДж/т чавуну; $\Delta Q_{шл}$, $\Delta Q_{чав}$, $\Delta Q_{коксу}$ – зміна ентальпії шлаку, чавуну і коксу в нижній зоні, кДж/т чавуну; Q_{rd} – витрати тепла на пряме відновлення заліза, кДж/т чавуну; $Q_{витрат}$ – витрати тепла в нижній зоні печі (нижня

Плавлення і кристалізація

Основні параметри математичної моделі нижньої зони печі

| <i>Вхідні параметри</i> | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Дуттєвий режим | t_d – температура дуття, °С |
| | φ – вологість дуття, м ³ Н ₂ О/м ³ |
| | ω – вміст кисню в дутті, % по масі |
| Пиловугільне паливо (ПВП) | $G_{\text{ПВП}}$ – витрата ПВП, кг/т чавуна |
| | Склад ПВП на робочу масу * ¹ , % по масі: С ^р , Н ^р , О ^р , N ^р , S ^р , А ^р , W ^р |
| | $T_{\text{ПВП}}$ – температура вдування ПВП, °С |
| Залізорудна шихта, кокс і флюс, що надходять до нижньої зони печі | G_i – витрата і-го компонента, кг/т чавуна |
| | Хімічний склад, % по масі: FeO, Fe, SiO ₂ , CaO, MgO, Al ₂ O ₃ , P ₂ O ₅ , S _{орг} , MnO |
| <i>Вихідні параметри</i> | |
| Чавун | $T_{\text{чав}}$ – температура чавуну, °С |
| | Хімічний склад, % по масі: [C], [Si], [Mn], [P], [S] |
| Шлак | U – вихід шлаку, кг/т чавуну |
| | $T_{\text{шл}}$ – температура шлаку, °С |
| | Хімічний склад, % по масі: (CaO), (MgO), (Al ₂ O ₃), (S), (SiO ₂) |
| | $B = \text{CaO/SiO}_2$ – основність шлаку |
| Гази, що відходять з нижньої зони печі | T_g – температура газів, що відходять, °С |
| | Хімічний склад * ² , %: CO, Н ₂ , N ₂ , Н ₂ О |
| | η_{H_2} – ступінь використання водороду |
| *1 – склад наведений на робочу масу вугілля, тобто з урахуванням вологи; | |
| *2 – зроблено припущення, що в нижній зоні печі відбувається тільки пряме відновлення вуглецем коксу і непряме воднем. | |

частина шахти, розпар, заплічки), кДж/т чавуну; $Q_{\text{газу}}$ – ентальпія газів, що виходять з нижньої зони печі, кДж/т чавуну; $Q_{\text{ел}}$ – витрати тепла на відновлення домішок чавуну і на перехід сірки в шлак, кДж/т чавуну.

Показником теплового режиму горна є теоретична температура горіння, що характеризує загальне надходження тепла до фурменної зони, температура продуктів плавки – чавуну і шлаку:

$$T_{\text{теор}} = \frac{w_c + i_c + w_{\text{ПВП}} + i_d \cdot V_d}{c_o \cdot V_{22}}, \quad (2)$$

де w_c – тепловий ефект горіння вуглецю коксу до СО, кДж/кг коксу, що дійшов до фурми ($C_{\text{ф}}$); i_c та i_d – теплоємність вуглецю коксу у фурмі дуття, кДж/кг $C_{\text{ф}}$ і кДж/м³ $C_{\text{ф}}$, $w_{\text{ПВП}}$ – теплота горіння ПВП у фурмі; c_o – теплоємність горнових газів при

Плавлення і кристалізація

теоретичній температурі горіння; V_d – сумарна витрата дуття на горіння вуглецю коксу та ПВП у фурм, м³/кг C_ϕ ; V_{zz} – вихід горнових газів, м³/кг C_ϕ .

Чисельник формули (2) представляє ліву частину рівняння теплового балансу нижньої зони за винятком ентальпії вуглецю коксу i_c . Тоді рівняння (1) може бути представлено у наступному вигляді:

$$c_o \cdot T_{теор} = \frac{\Delta Q_{чав} + \Delta Q_{шл} + Q_{r_d} + Q_{эл} + \Delta Q_{кокса} + Q_{витрат} + Q_{газа} + i_c}{V_{zz}} \quad (3)$$

Величини $Q_{шл}$, $Q_{чав}$, $Q_{ел}$ можуть бути обчислені заздалегідь і зазвичай змінюються у вузьких межах. Q_{r_d} , $Q_{кокса}$, $Q_{витрат}$, $Q_{газа}$, $Q_{шхти}$, V_{zz} залежать від показників r_d і C_ϕ . Таким чином, для знаходження теоретичної температури необхідно знайти невідомі – вуглець коксу, що згоряє на фурмах, і ступінь прямого відновлення.

Ступінь прямого відновлення не піддається досить точному розрахунку, тому в основному використовують емпіричні формули [10]. Дослідивши матеріально-теплові баланси роботи доменних печей заводів Європи, України та Росії, була отримана статистична залежність ступеня прямого відновлення заліза r_d (r_d визначається як кількість відновленого заліза до загальної кількості його у вихідному стані, %) від виходу відновлювальних газів, рис. 2.

$$r_d = -0,077 \cdot V_{вр} + 94,09, \quad \text{при } R^2 = 0,902, \quad (4)$$

де $V_{вр}$ – вихід відновлювальних газів, м³/т чавуну.

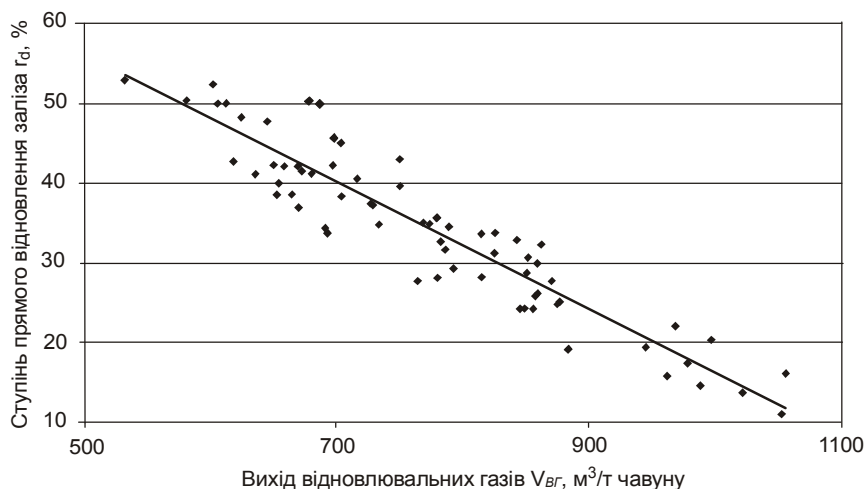


Рис. 2. Залежність ступеня прямого відновлення заліза від виходу горнових газів.

З рис. 2 видно, що зв'язок між ступенем прямого відновлення і виходом відновлювальних газів обернено пропорційний: зі збільшенням виходу відновників $CO+H_2$ ступінь прямого відновлення зменшується. Розписавши вихід відновлювальних газів у виразі (4), отримуємо рівняння 5:

$$r_d = -77 \cdot 10^{-5} \cdot C_\phi \cdot (1,8667 + \phi \cdot V_{ок}) - 77 \cdot 10^{-5} \cdot G_{ПВП} \cdot V_{CO+H_2}^{ПВП} + 0,9409, \quad (5)$$

де $V_{ок}$ – витрата дуття на горіння вуглецю коксу у фурм, м³/кг C_ϕ ; $V_{CO+H_2}^{ПВП}$ – вихід відновлювальних газів при горінні ПВП, м³/кг ПВП.

Плавлення і кристалізація

Таким чином, отримані рівняння (2), (3) і (5), що включають три невідомі величини – теоретичну температуру горіння, ступінь прямого відновлення і вихід відновлювальних газів.

Для отримання достовірних результатів при вирішенні системи рівнянь (3), (4) і (5) слід ввести ряд обмежень. З рис. 2 видно, що вихід відновників знаходиться в діапазоні $500 - 1050 \text{ м}^3 \text{ CO} + \text{H}_2 / \text{т}$ чавуну. Показник r_d не повинен бути менше мінімально можливої міри прямого відновлення заліза $r_{d\text{min}}$ як показника ідеальної доменної плавки і не більше 1. Співвідношення водяних еквівалентів газу і шихти в нижній зоні від рівня фурм до зони уповільненого теплообміну повинно бути менше одиниці.

За допомогою отриманої моделі проаналізовано вплив ступеня прямого відновлення та виходу горнових газів на теоретичну температуру горіння. Обрано 5 режимів доменної плавки з температурою дуття $900 - 1300 \text{ }^\circ\text{C}$, виходом шлаку $600 - 200 \text{ кг/т}$ чавуну (зі збільшенням температури на кожні $50 \text{ }^\circ\text{C}$ вихід шлаку знижується на 50 кг/т чавуну). Вміст кисню і води в дутті залишалися постійними – $0,21$ і $0,01 \%$. Витрата ПВП у кожному режимі змінювалася від 0 до 250 кг/т чавуну з кроком 50 кг . Отримані результати представлені на рис. 3, з якого видно, що зі збільшенням теоретичної температури вихід відновлювальних газів знижується, а ступінь прямого відновлення зростає.

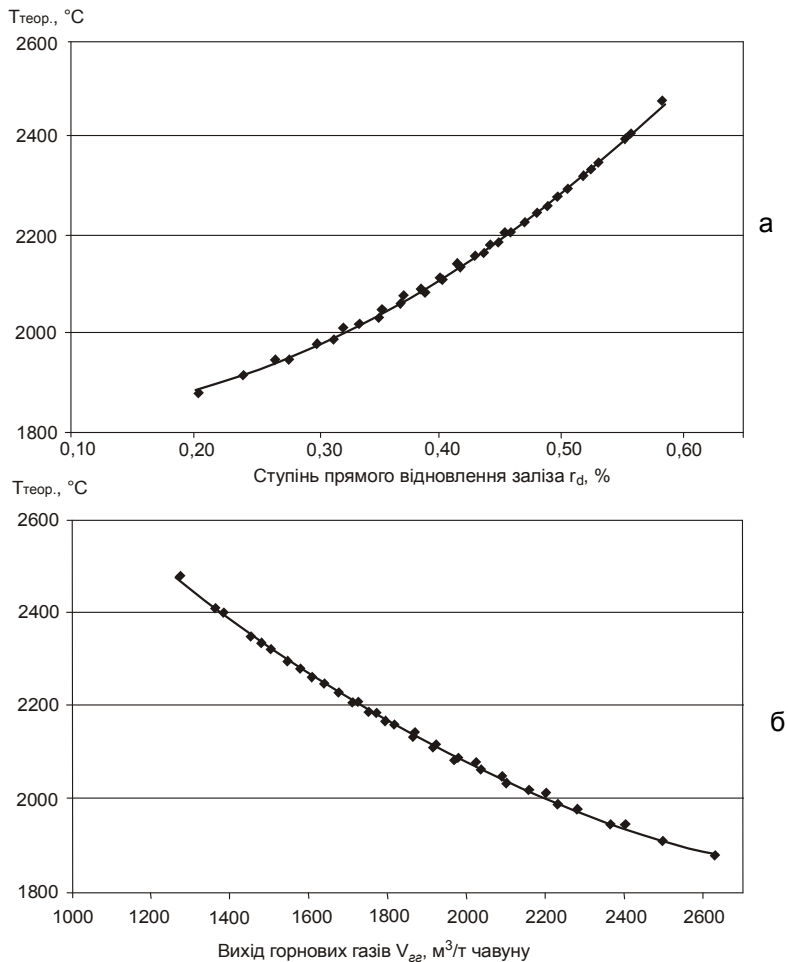


Рис. 3. Залежності теоретичної температури горіння ($T_{\text{теор.}}$) від ступеня прямого відновлення заліза r_d – (а) та виходу горнових газів ($V_{\text{газ}}$) – (б).

Висновки На основі досвіду вітчизняних і зарубіжних досліджень розроблено математичну модель нижньої зони доменної печі, що дозволяє прогнозувати загальний тепловий режим горна. Показано, що з вдосконаленням доменної технології (зниження виходу шлаку, підвищення температури дуття, зниження витрати коксу, збільшення витрати додаткового палива) теоретична температура горіння і ступінь прямого відновлення буде зростати.

Література

1. Китаев Б.И., Лазарев Б.Л., Ярошенко Ю.Г. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
2. Вегман Е.Ф. Металлургия чугуна. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
3. Мишар Ж. Тепловые балансы и теплообмен в доменных печах. – М.: ГНТИЛЧЦМ, 1963. – 151 с.
4. Давенпорт В.Г., Писи Дж. Г. Доменный процесс. Теория и практика. – М.: Металлургия, 1984. – 142 с.
5. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 164 с.
6. Меркулов А.Е., Товаровский И.Г. Исследование процессов доменной плавки при вдувании пылеугольного топлива. // Сталь. – 2012. – № 1. – С. 2 – 12.
7. Дмитриев А.Н., Леонтьев Л.И., Онорин О.П. Основы теории и технологии доменной плавки. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 545 с.
8. Austin P.R., Nogami H., Yagi J.I. A Mathematical Model of Four Phase Motion and Heat Transfer in the Blast Furnace. // ISIJ International. – 1997. – № 5. – P. 458 – 467.
9. Андронов В.Н. Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья. Доменный процесс. – Донецк: Норд-Пресс, 2009. – 377 с.
10. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – 257 с.

Одержано 24.04.12

Ю. Л. Курбатов, С. Л. Ярошевский, И. В. Мишин

Математическая модель теплового баланса нижней зоны доменной печи

Резюме

Для исследования теплового состояния доменной печи разработана математическая модель теплового баланса нижней зоны доменной печи. Показана зависимость между уровнем теоретической температуры горения и выходом горновых газов и степенью прямого восстановления железа.

Yu. L. Kurbatov, S. L. Yaroshevsky, I. V. Mishyn

A mathematical model of the thermal balance of the lower zone of blast furnace

Summary

A mathematical model of the thermal state of the lower zone of blast furnace was developed to investigate the thermal state of blast furnace. A clear relation between the level of theoretical flame temperature and hearth gas and the degree of direct reduction of iron was shown.