УДК 669.181.428

Гришин О.М., Надточій А.А.

Швидкість газових потоків при комплексному відновленні рудних матеріалів

Grishin O.M., Nadtochii A.A.

Velocity of gas flows during complex recovery of ore materials

Мета. Встановити оптимальні параметри комплексного відновлення рудовуглецевого окатиша в умовах відсутності рідких фаз і визначити вплив розміру окатиша, частки вуглецю, що газифікується, і температури на глибину проникнення водню всередину окатиша. Встановити залежність положення кордону, що поділяє окатиш на зону комплексного відновлення та зону вуглецевотермії, від зазначених параметрів процесу твердофазного відновлення.

Методика. У роботі використовується розроблена методика розрахунку вхідного та вихідного газових потоків стосовно моделі рудовуглецевого окатиша, що обдувається потоком водню. При розрахунку величин газових потоків варіювали параметрами: розмір окатиша, частка вуглецю, що газифікується, і температура у встановлених межах. За розробленою методикою розрахунку концентрації водню на зовнішній поверхні окатиша виконано оцінку впливу зовнішньодифузійної ланки на величину вхідного потоку.

Наукова новизна. Вперше розраховані величини вхідного та вихідного газових потоків стосовно процесу комплексного твердофазного відновлення рудовуглецевого окатиша. Теоретично обґрунтовано та підтверджено розрахунком вплив розміру окатиша, частки газифікованого вуглецю та температури на глибину проникнення водню вглиб окатиша. Отримано рівняння, що описують вплив аналізованих параметрів процесу на величини газових потоків. Встановлено, що збільшення розміру окатиша звужує зону проникнення водню, зменшуючи обсяг окатиша, який відновлюється комплексно. У такому напрямі впливає підвищення частки газифікованого вуглецю, тобто інтенсифікація процесу. При постійних значеннях частки газифікації вуглецю та розміру окатиша підвищення температури процесу сприяє розширенню меж комплексного відновлення. Проаналізовано вплив швидкості зовнішнього газового потоку на величину вхідного потоку. Встановлено, що зростання лінійної швидкості потоку водню дещо інтенсифікує вхідний потік, проте цей ефект має загасаючий характер. На завершальній стадії процесу, коли повністю відновлено оксид в зоні комплексного відновлення, проходить процес комплексного довідновлення у зоні вуглецевотермії за рахунок потоків водню, що проникають, і вуглецю, що залишився.

Практична значимість. Отримані результати розрахунків дозволяють визначити оптимальні параметри процесу комплексного відновлення рудовуглевецого окатиша, які забезпечують найбільше проникнення водню вглиб окатиша.

Ключові слова: оксид, вуглецевотермічне та комплексне відновлення, вхідний та вихідний газові потоки, зовнішньодифузійний опір

Purpose. To establish the optimal parameters for the complex reduction of an ore-carbon pellet in the absence of liquid phases and to determine the effect of the pellet size, the proportion of gasified carbon and temperature on the depth of hydrogen penetration into the pellet. Determine the dependence of the position of the boundary separating the pellet into the zone of complex reduction and the zone of carbonothermia, on the indicated parameters of the process of solid-phase reduction.

Methodology. The work uses the developed method for calculating the incoming and outgoing gas flows in relation to the model of an ore-carbon pellet blown by a hydrogen flow. When calculating the values of gas flows, the following parameters were varied: the size of the pellet, the proportion of gasified carbon and temperature within the established limits. According to the developed method for calculating the hydrogen concentration on the outer surface of the pellet, an assessment was made of the influence of the external diffusion link on the input flow.

Scientific novelty. For the first time, the values of inlet and outlet gas flows were calculated in relation to the process of complex solid-phase reduction of ore-carbon pellet. The influence of the pellet size, the proportion of gasified carbon and temperature on the depth of hydrogen penetration into the pellet is theoretically substantiated and confirmed by calculation. Equations are obtained that describe the influence of the considered process parameters on the values of gas flows. It has been established that an increase in the size of the pellet narrows the zone of hydrogen penetration, reducing the volume of the pellet, which is reduced in a complex manner. An increase in the share of gasified carbon affects in the same direction, i.e. process intensification. At constant values of the share of carbon gasification and the size of the pellet, an increase in the temperature of the process contributes to the expansion of the boundaries of complex reduction.

The influence of the velocity of the external gas flow on the value of the incoming flow is analyzed. It has been established that an increase in the linear velocity of the hydrogen flow somewhat intensifies the incoming flow, but this effect is damped. At the final stage of the process, when the oxide is completely reduced in the zone of complex reduction, the process of complex additional reduction takes place in the zone of carbonothermy due to the penetrating flows of hydrogen and the remaining carbon.

Practical significance. The obtained results of calculations make it possible to determine the optimal parameters of the process of complex reduction of ore-coal pellet, which provide the greatest penetration of hydrogen into the depth of the pellet.

Keywords: oxide, carbon-thermal and complex reduction, incoming and outgoing gas flows, external diffusion resistance

Вступ. Численні процеси твердофазного відновлення оксидів здійснюється за участю твердого вуглецю та газів CO, H_2. Фізико-хімічна модель механізму такого процесу дуже складна та детально не розроблена. В даний час існують різні уявлення про механізм процесу, однак немає єдиної моделі, яка б задовольняла різним системам [1-3]. Поява нових методів дослідження високотемпературних процесів, а також спеціальних комп'ютерних програм дозволяє більш глибоко аналізувати як кристалохімічну ланку, так і процеси масопереносу. Істотно ускладнюють ці ланки процеси формування карбідної фази, а також рух газових потоків.

Аналіз літературних даних та постановка задачі. Співвідношення газових потоків надає значний вплив як на процеси масопереносу, так і на режим відновлення оксиду, що виражається в переході від комплексного відновлення до вуглецевотермічного і навпаки. Значною мірою це стосується процесів відновлення рудо-вугільного брикету або окатиша. У процесі відновлення можна уявити окатиш, що складається з двох сфер: внутрішнього, де протікає вуглецевотермічне відновлення і зовнішнього шару, де проходить комплексне відновлення. Положення кордону між ними визначається співвідношенням вхідних та вихідних газових потоків. Що стосується процесів твердофазного відновлення хромовмісних матеріалів найбільш ефективним є комплексне відновлення, вуглецем спільно з газами (наприклад продуктами конверсії метану $CO+2H_2$) [4,5].

Теоретичні дослідження. В умовах температурних обмежень твердофазного відновлення важливо створити умови, що забезпечують залучення максимального обсягу рудо-вугільного окатиша в комплексне відновлення. Це дозволить вести процес ефективніше. Якщо процес комплексного відновлення оксидів, організований у потоці CO, то механізм його, подібно до вуглецевотермічного відновлення, схематично описується сукупністю реакцій:

$Me_xO_y + CO = Me_xO_{y-1} + CO_2$; (1)

$CO_2 + C = 2CO$. (2)

При цьому, природно, у розвитку ланки (1) бере участь як CO, що надійшов з газовим потоком, так і CO, що утворився в ході газифікації $C_{тв}$. З іншого боку, у реалізації ланки (2) бере участь уся сукупність діоксиду вуглецю, що утворився.

Якщо комплексне відновлення здійснюється за участю водню, додатково слід врахувати реакції:

$Me_xO_y + H_2 = Me_xO_{y-1} + H_2O$; (3)

$H_2O + C = H_2O + CO$ (4)

і реакцію водяного газу, що перерозподіляє кисень між H_2 та CO:

$H_2O + CO = H_2 + CO_2$. (5)

Ланки (2) і (4) розвиваються зі збільшенням обсягу газів, що призводить до більш менш інтенсивного виділення їх з обсягу шихти. Разом з тим, це ускладнює проникнення газів-відновлювачів із потоку вглиб рудовуглецевої шихти. При досить інтенсивному газовиділенні замість комплексного відновлення може фактично розвиватися тільки вуглецевотермічне відновлення.

Для оцінки виникаючих співвідношень розглянемо відновлення рудовуглецевого окатиша радіусом r_0 в потоці водню. Приймемо, що усі частинки руди та твердого вуглецю мають сферичну форму та однаковий радіус R_r.

Газовий потік ($I_{вих}$, см^3/с), що виходить з окатиша, при температурі відновлення T визначається співвідношенням:

$$I_{вих} = \frac{\Delta q_C \cdot 22,4}{12 \cdot \Delta\tau \cdot 60} \cdot \frac{T}{273}, \quad (6)$$

де Δq_C – кількість вуглецю (мг), газифікованого за проміжок часу Δт (хв).

Потік проникаючого в окатиш водню ($I_{вх}$, моль/с) описується рівнянням

$$I_{вх} = D_e S \frac{\Delta C}{X}, \quad (7)$$

де D_e – ефективний коефіцієнт міжчасткової дифузії; S – площа поверхні дифузії водню; ΔC – різниця концентрацій H_2 біля зовнішньої поверхні окатиша (її можна прийняти, що дорівнює концентрації водню в газовому потоці) та на граничній глибині проникнення H_2 в окатиш X.

Коефіцієнт D_e може бути розрахований за рівнянням

$$D_e = D\frac{\varepsilon}{q}. \quad (8)$$

Якщо прийняти склад потоку $I_{вих}$ близьким до чистого монооксиду вуглецю (що цілком справедливо при відновленні оксидів високої хімічної міцності, наприклад Cr_2O_3), то для розрахунку коефіцієнта взаємодифузії D (см^2/с) у системі H_2 – CO слід використовувати рівняння

$$D_{H_2-CO} = 0,597\left(\frac{T}{273}\right)^{1,748} \cdot \frac{1}{P}. \quad (9)$$

Питомий об'єм міжчастинних порожнин ε легко оцінити на базі прийнятої моделі та розмірів окатиша. Виділивши в ньому куб, що складається, наприклад, із восьми кульок радіусу R_r, знайдемо їх об'єм: $8 \cdot 4/3\pi R_r^3$. Загальний обсяг куба дорівнює $(4R_r)^3$. Тому

$$\varepsilon = \frac{64R_r^3 - 8\cdot\frac{4}{3}\pi R_r^3}{64R_r^3} = 1 - \frac{1}{6}\pi = 0,476. \quad (10)$$

Коефіцієнт звивистості q можна прийняти рівним двом.

Фронт дифузії водню в окатиш, що стискається, на деяку глибину $X = r_0 - r_i$ визначається виразом

$$S = 4\pi r_0 r_i. \quad (11)$$

При цьому величина r_i на різних стадіях відновлення може бути різною. Її доцільно використовувати у частках r_0.

Позначивши концентрацію водню в газовому потоці через $(\%H_2)_{вих}$ і прийнявши її рівною нулю на глибині окатиша $(r_0 - r_i)$, можна записати

$$\Delta C = \frac{(\%H_2)_{вих}}{100 \cdot R \cdot T} \cdot P, \text{ моль/м}^3. \quad (12)$$

Тут тиск P виражений в атмосферах (1 атм = $1,01325\cdot10^5$ н/м^2).

Для зіставлення величин $I_{вих}$ та $I_{вх}$ обидва потоки мають бути подані в однакових розмірностях. Тому рівняння (7) перетворимо на

$$I_{вх} = D_e \frac{4\pi r_0 r_i}{r_0 - r_i} \cdot \frac{(\%H_2)_{вих}}{100RT} \cdot P \cdot \frac{22400}{10^6} \cdot \frac{T}{273}$$

або

$$I_{вх} = D_e \frac{4\pi r_0 r_i}{r_0 - r_i} \cdot \frac{22,4\cdot(\%H_2)_{вих}\cdot P}{273\cdot10^5\cdot R}, \text{ см/с}. \quad (13)$$

Якщо $I_{вих} \geq I_{вх}$, то в процесі відновлення бере участь лише $C_{тв}$. Швидкість його газифікації, при якій проникнення H_2 всередину окатиша стає неможливою ($V_г^{кр}$), визначають із співвідношення

$$V_г^{кр} = \frac{\Delta q_C}{\Delta\tau} = \frac{12 \cdot 60 \cdot 273}{22,4 \cdot T} \cdot I_{вх}$$

або $V_г^{кр} = D_e \frac{4\pi r_0 r_i}{r_0 - r_i} \cdot \frac{12\cdot60\cdot(\%H_2)_{вих}}{10^5 \cdot R \cdot T} \cdot P$, мгС/хв. (14)

Разом з тим зручнішим технологічним параметром, який визначає зміну режиму відновлення, є температура.

Використовуючи наведений вище алгоритм розрахунку газових потоків, оцінимо вплив деяких параметрів комплексного відновлення рудовуглецевого окатиша на швидкісні характеристики. Проаналізуємо вплив на газові потоки температури (T) та ступеня газифікації вуглецю (Δq_C) при постійному загальному тиску в системі при розмірі окатиша (r_0), а також глибини проникнення водню в окатиш. Вибрані параметри є керованими, що дозволяє впливати на швидкісні закономірності газових потоків та в цілому на процес.

У розрахунку використано фізико-хімічні характеристики деяких реагуючих фаз, взяті з довідкових джерел.

Результати та їх обговорення. Процес комплексного відновлення рудовуглецевого окатиша радіусом r_0 = 0,7 см здійснюється в потоці H_2 при 1273К і P = 1. Припустимо, водень проникає вглиб зразка на 0,5 см, тобто r_i = 0,2 см, і кількість вуглецю, що газифікується Δq_C = 35 мг/хв.

Газовий потік, що виходить з глибин зразка:

$I_{вих} = \frac{35 \cdot 22,4}{12 \cdot 60} \cdot \frac{1273}{273} = 5,08 \ \frac{см^3}{с}$ або $I_{вих} = 304,8 \ \frac{см^3}{хв}$.

Коефіцієнт взаємодифузії у суміші H_2 – CO відповідно до рівняння (9)

$D_{H_2-CO} = 0,597 \left(\frac{1273}{273}\right)^{1,748} \cdot \frac{1}{1} = 8,806 \ см^2/с.$

Ефективний коефіцієнт міжчасткової дифузії

$D_e = 8,806 \frac{0,476}{2} = 2,096 \ см^2/с.$

Відповідно до рівняння (12) різниця концентрацій водню:

$\Delta C = \frac{100 \cdot 1,01325}{10^3 \cdot 8,314 \cdot 1273} = 9,574 \cdot 10^{-6}$ моль $H_2/см^3$.

З урахуванням вихідних та розрахункових даних потік водню, що проникає в окатиш, можна знайти з співвідношення (13):

$I_{вх} = 2,096 \frac{4\pi \cdot 0,7 \cdot 0,2}{0,7-0,2} \cdot \frac{100 \cdot 1,01325}{1273 \cdot 10^3 \cdot 8,314} = 7,06 \cdot 10^{-5} \frac{моль}{с}$.

У перерахунку на $см^3$ це дає

$I_{вх} = 7,06 \cdot 10^{-5} \cdot 22400 \cdot \frac{1273}{273} = 7,37 \frac{см^3}{с}$ або $I_{вх} = 442,2 \frac{см^3}{хв}$.

Зі зіставлення $I_{вх}$ і $I_{вих}$ випливає, що перша величина значно перевищує другу. Отже, у відновленні оксиду одночасно беруть участь H_2 і $C_{тв}$. Швидкість газифікації вуглецю, за якої комплексне відновлення переходить у вуглецевотермічне, знайдемо із співвідношення

$V_г^{кр} = \frac{I_{вх}}{22,4} \cdot 12 \cdot \frac{273}{T} = 0,84 \ \frac{мгС}{с}$ або $V_г^{кр} = 50,8 \ \frac{мгС}{хв}$.

Ця величина істотно перевищує Δq_C, прийняту у цьому розрахунку. З підвищенням температури та r_i збільшується $V_г^{кр}$, з підвищенням r_0 зменшується $V_г^{кр}$.

У цьому розрахунку не враховується те що, що Δq_C є функцією часу, температури, складу рівноважної газової фази. Отримані розрахункові дані дозволяють визначити умови, що забезпечують режим комплексного відновлення оксиду металу більшої частини об'єму окатиша.

В основу виконаних розрахунків покладено фізичну модель: рудовугільний окатиш обдувається потоком водню. Глибина проникнення водню в окатиш ($l_{вх}$) залежить від пористості останнього, і навіть від концентрації H_2 на поверхні окатиша, величина якої визначається зовнішніми дифузійними особливостями, молекулярною дифузією через умовну наведену плівку. Швидкісні закономірності зовнішньодифузійної ланки процесу твердофазного відновлення можна подати у формі першого закону Фіка:

$$\upsilon_I = D \cdot S \cdot \frac{\Delta C}{\delta}, \qquad (15)$$

де D – коефіцієнт вільної дифузії газу; S – площа поверхні транспорту газу; ΔC – різниця концентрацій, що зумовлює його перенесення.

Аналіз впливу температури (T) та тиску (P) на швидкість зовнішньодифузійного газообміну може бути виконаний на основі законів вільної дифузії [6-14]. Інтенсивність зовнішньодифузійного перенесення дещо зростає з підвищенням температури – пропорційно $T^{0,7\text{-}1}$, і залежить від тиску газової фази. Цим, однак, не враховується залежність від T та P критерію Шервуда. Останній, у разі обтікання газом сферичного тіла, може бути описаний виразом [7,8,15]:

$$\mathrm{Sh} = 2,0 + 0,6 \cdot \mathrm{Re}^{1/2} \cdot \mathrm{Sc}^{1/3}. \qquad (16)$$

Для критеріїв Рейнольдса (Re) та Шмідта (Sc) існують співвідношення:

$$\mathrm{Re} = \frac{U \cdot \rho \cdot d}{\eta} = \frac{U_м \cdot d}{\eta}, \qquad (17)$$

$$\mathrm{Sc} = \frac{\eta}{D \cdot \rho}, \qquad (18)$$

де U – лінійна швидкість газового потоку; η – динамічна в'язкість газу; ρ – щільність газу; $U_м = U \cdot \rho$ - масова швидкість газу.

З кінетичної теорії газів випливає, що η пропорційна $T^{1/2}$ і не залежить від тиску [13,16]. Щільність газу обернено пропорційна його температурі і прямо пропорційна P. Враховуючи це неважко показати, що критерій Шервуда не залежить від тиску і слабо зменшується з підйомом температури. Остання помітно впливає на Sh лише при досить високих швидкостях газового потоку. Коли другий доданок у рівнянні (16) набагато більше двох, критерій Шервуда змінюється пропорційно $T^{(0,3\text{-}0,4)}$. Тому зазначена раніше незалежність υ_I від тиску газів зберігає свою справедливість, а прискорююча дія підвищення температури стає меншою: у межі воно пропорційно $T^{0,4\text{-}0,6}$.

З рівнянь (15) і (16) випливає, що υ_I знижується зі збільшенням розмірів рудного тіла. Ступінь цього впливу зменшується від d^1 до $d^{1/2}$ зі зростанням U.

Зіставлення показує, що зовнішня масопередача при відновленні оксидів металів воднем здійснюється швидше, ніж у потоці CO (за інших рівних

умов). Дійсно, критерій Шервуда для монооксиду вуглецю перевищує Sh для водню за рахунок відмінності значення Re. Однак $D_{H_2/H_2O} > D_{CO/CO_2}$ у 4-5 разів [7,9,11], що забезпечує в кінцевому рахунку переваги H_2 перед CO.

Ефективним важелем зниження зовнішньодифузійного опору є підвищення швидкості газового потоку. Як видно з рівнянь (16) та (17), критерій Шервуда зростає одночасно з U. Відповідно, повинна збільшуватися і υ_l. Однак це збільшення небезмежне. При досягненні деякої критичної швидкості газу υ_l стабілізується, так як товщина «незмивної» плівки δ зводиться до мінімуму - у поверхні оксиду залишається тонкий шар газу, що утримується адсорбційними силами [17]. Залишковий опір може бути пов'язаний з шорсткістю поверхні рудного тіла, наявністю порожнин та інші [18].

Зовнішньодифузійний газообмін може відігравати істотну роль у кінетичних закономірностях відновлення у початковому періоді його, до утворення шару твердих продуктів значної товщини. Надалі вирішальний внесок на величини вхідного та вихідного газових потоків впливає внутрішньодифузійне перенесення, а також перетворення, що відбуваються в процесі відновлення. Значно ускладнює аналіз характеристик процесу з використанням газової фази складного складу, наприклад продуктів парової конверсії метану. В даної роботі ці фактори не аналізувались.

Найважливішою ланкою процесу вуглецевотермічного та комплексного відновлення оксиду є газифікація вуглецю, швидкість якого залежить від багатьох факторів, які умовно можна поділити на дві групи:

1) що впливають тільки на ланку газифікації;

2) що впливають на обидві ланки процесу.

Впливати на швидкість газифікації вуглецю можливо через використання активнішого вуглецевого відновника, вибором оптимального фракційного складу його, хіміко-каталітичним впливом на вуглецевий відновник, фізичними властивостями (пористість, величина активної поверхні) та ін. Облік усіх факторів реалізується через рівняння швидкості газифікації, що структурно входить до алгоритму розрахунку, наведеного вище, та визначення на кожному етапі відновлення величину Δq_C.

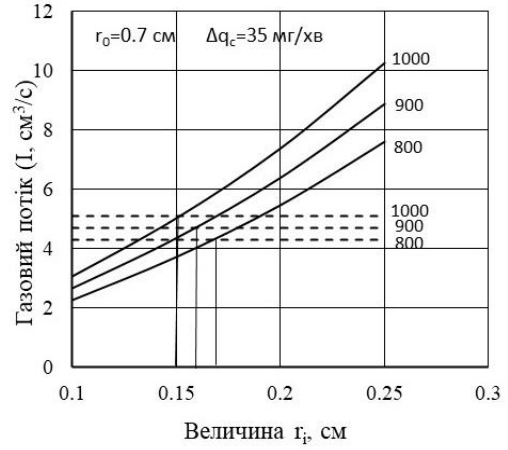
До другої групи факторів можна віднести: хіміко-каталітичний вплив одночасно на всю систему, температуру, співвідношення розмірів частинок руди та вугілля та ін. Однак, і тут слід враховувати, можливо різний за величиною вплив окремих факторів.

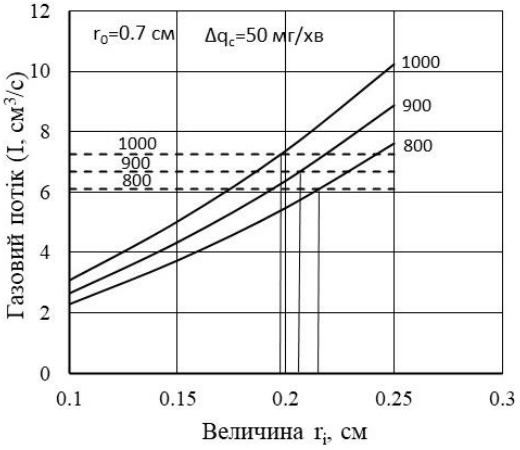
На рисунках 1,2 представлені результати виконаних розрахунків величин газових потоків. Отримано рівняння регресії для вхідного та вихідного газових потоків та рівняння швидкості газифікації вуглецю, при якій комплексне відновлення перетворюється на вуглецевотермічне, тобто

$$I_{\text{ВИХ.}} = -5.476 + 0{,}004 \cdot T + 0{,}1565 \cdot \Delta q_C, \quad (19)$$

$$I_{\text{ВХ.}} = -6{,}222 + 0{,}0117 \cdot T - 0{,}003 \cdot \Delta q_C, \quad (20)$$

$$V_{\Gamma}^{\text{КР}} = -39{,}67 - 48{,}7 \cdot r_0 + 416 \cdot r_i + 0{,}034 \cdot T \quad (21)$$





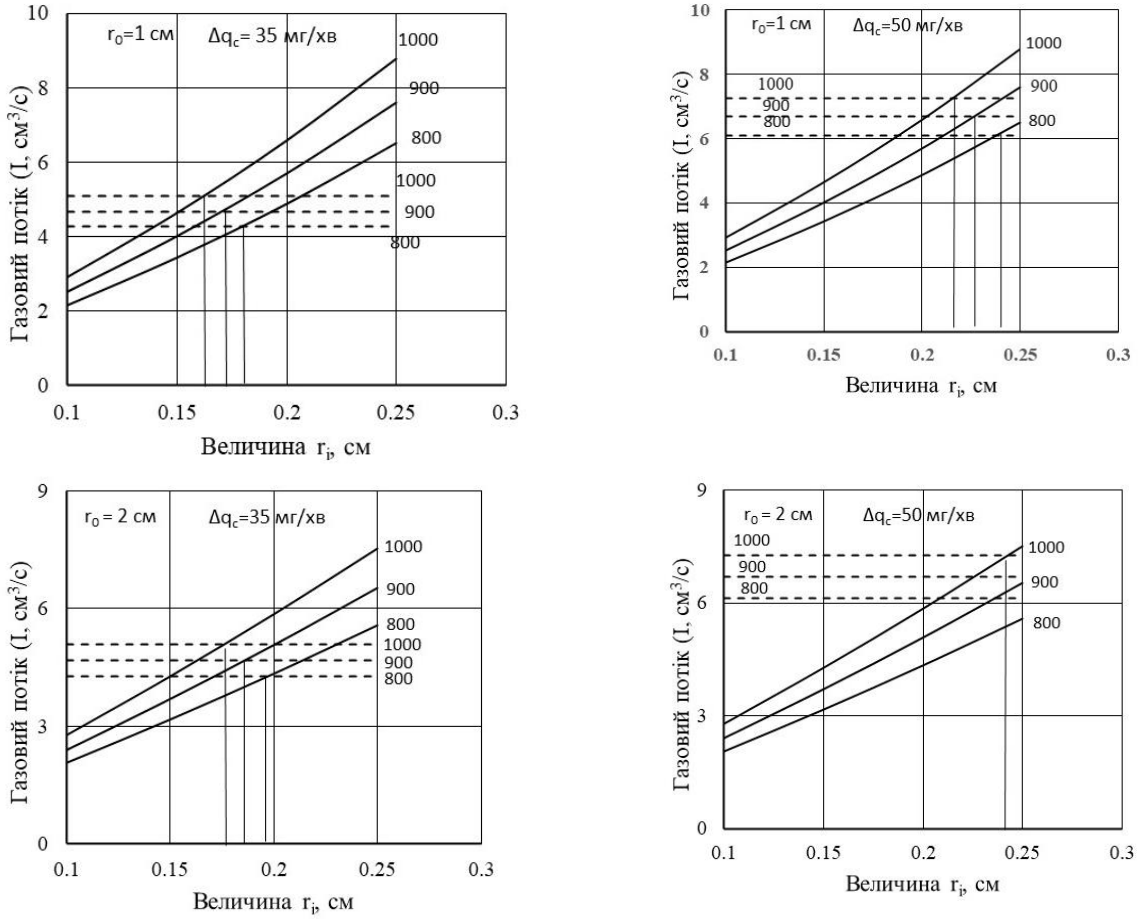


Рис.1. Залежність газових потоків від глибини проникнення водню: суцільна лінія – вхідний потік; пунктирна – вихідний; цифри у кривих – температура, ^{0}C; r_0 - радіус окатиша, см

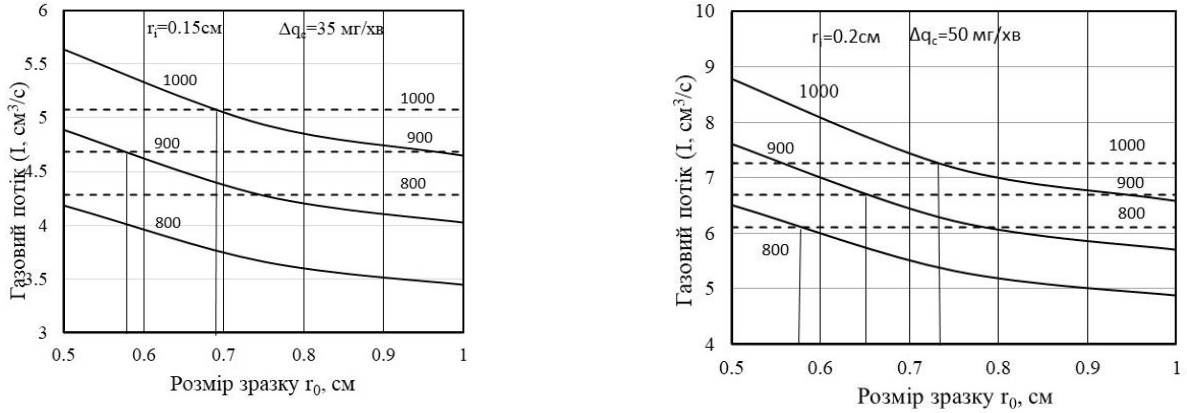


Рис.2. Залежність газових потоків від розміру окатиша: суцільна лінія – вхідний потік; пунктирна – вихідний; цифри у кривих – температура, ^{0}C; r_i - глибина проникнення водню, см

За результатами виконаних розрахунків можна визначити положення кордону, що поділяє обсяг окатиша на дві частини: внутрішню, де відбувається суто вуглецевотермічне відновлення, та зовнішню – комплексне відновлення. Положення межі визначається значеннями вибраних параметрів Δq_C, температури, розміру окатиша і глибиною проникнення водню в нього, які також визначають величини вхідного і вихідного потоків. Отже, розширення зони комплексного відновлення рудовугільного окатиша досягається за рахунок зменшення розмірів окатиша, зменшення частки газифікованого вуглецю і через збільшення проникнення водню вглиб окатиша. Останнє може зростати при оптимізації параметрів, що впливають на зовнішньодифузійну ланку, а також при зростанні температури процесу. Поширення комплексного відновлення на більший обсяг окатиша значно інтенсифікує процес за допомогою більшого залучення до процесу водню, що створює умови для зменшення С/О та загалом до зниження вуглецю в губчастій лігатурі.

Висновки. Представлена методика розрахунку величин газових потоків дає можливість оптимізу-

вати параметри процесу твердофазного відновлення рудовугільних окатишів (брикетів) з метою впливу на ефективність процесу. Отримані рівняння регресії, що зв'язують величини вхідного та вихідного газових потоків з основними фізико-хімічними характеристиками системи. Показано можливість розрахунковим шляхом встановити параметри, які визначають межу переходу комплексного у вуглецевотермічне відновлення в об-

сязі окатиша. В умовах твердофазного відновлення неможливо забезпечити комплексне відновлення по всьому об'єму окатиша. Для зменшення області суто вуглецевотермії необхідно зниження частки вуглецю, що газифікується, і зменшення розміру окатиша. Проаналізований вплив зовнішньодифузійної ланки процесу твердофазного відновлення оксидів металів на величину вхідного потоку.

Бібліографічний опис

1. Гришин О.М. Фізико-хімічні основи отримання Fe-Cr губчастих лігатур: Монографія. Дніпро: Журфонд, 2022. - 416 с. ISBN 978-966-934-342-0
2. Теоретические основы процессов производства углеродистого феррохрома из уральских руд / В.П. Чернобровин, И.Ю. Пашкеев, Г.Г. Михайлов и др. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2004. 346 с.
3. Селективное восстановление и пирометаллургическое разделение металлов титаномагнетитовых руд / А.В. Рощин, В.П. Грибанов, А.В. Асанов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2006. №10. С. 49-55. http://dspace.susu.ac.ru/handle/0001.74/183
4. Кинетика комбинированного восстановления оксидных систем Fe-Cr и Fe-Cr-Ni / А.А. Попов, П.Н. Острик, А.Н. Попов и др. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1987. №8. С. 1-4.
5. Золотарева В.В., Симонов В.К., Власенко В.Н. Кинетика и механизм восстановления хрома из оксидных фаз в отсутствие расплавов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1999. №4. С. 43-45.
6. Ростовцев С.Т. Теория металлургических процессов. М.: Металлургиздат, 1956. 515 с.
7. Богданди Л., Энгель Г-Ю. Восстановление железных руд. :Пер. с нем. М.: Металлургия, 1971. 519 с.
8. Ростовцев С.Т. Физическое и математическое моделирование восстановительных процессов. *Интенсификация восстановительных процессов. Диффузионно-химические аспекты.* М.: Наука, 1980. С. 6-26.
9. Попель С.И., Сотников А.И., Бараненков В.Н. Теория металлургических процессов. М.: Металлургия. 1986. 463 с.
10. Теорія металургійних процесів / В.Б. Охотський, О.Л. Костьолов, В.К. Симонов та ін. К.: ІЗМН, 1997. 512 с.
11. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. М.: Металлургия, 1976. 544 с.
12. Sun Zhao Ming. Рассмотрение проблем изучения кинетики металлургических реакций. *Rare Metals and Cem. Carbides*. 2001. №3. С. 27-31. Анотация в РЖ Металлургия. №9. 2002.
13. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей : Пер. с англ. Л.: Химия, 1982. 592 с.
14. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. К.: Наукова Думка, 1986. 558 с.
15. Warner N.A. Kinetics of hematite reduction and effect of gas diffusion. *Trans. Metallurg. Soc. AIME*. 1964. V.230. №1. P. 163-176.
16. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1968. 939с.
17. Warner N.A. Kinetics of gaseous reduction of hematite. *Proc. Australas Inst. Mining and Metallurgi*. 1964. №210. P. 31-57.
18. Куликов И.С., Ростовцев С.Т., Григорьев Э.Н. Физико-химические основы процессов восстановления оксидов. М.: Наука, 1978. 136 с.

References

1. Gry`shy`n O.M. Fizy`ko-ximichni osnovy` otry`mannya Fe-Cr gubchasty`x ligatur: Monografiya. Dnipro: Zhurfond, 2022. - 416 s. ISBN 978-966-934-342-0
2. Teoreticheskie osnovy processov proizvodstva uglerodistogo ferrohroma iz ural'skih rud / V.P. Chernobrovin, I.Yu. Pashkeev, G.G. Mihajlov i dr. Chelyabinsk: Izdatel'skij centr YUUrGU, 2004. 346 s.
3. Selektivnoe vosstanovlenie i pirometallurgicheskoe razdelenie metallov titanomagnetitovyh rud / A.V. Roshchin, V.P. Gribanov, A.V. Asanov // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. Seriya: Metallurgiya. 2006. №10. S. 49-55. http://dspace.susu.ac.ru/handle/0001.74/183
4. Kinetika kombinirovannogo vosstanovleniya oksidnyh sistem Fe-Cr i Fe-Cr-Ni / A.A. Popov, P.N. Ostrik, A.N. Popov i dr. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1987. №8. S. 1-4.

5. Zolotareva V.V., Simonov V.K., Vlasenko V.N. Kinetika i mekhanizm vosstanovleniya hroma iz oksidnyh faz v otsutstvie rasplavov. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 1999. №4. S. 43-45.
6. Rostovcev S.T. Teoriya metallurgicheskih processov. M.: Metallurgizdat, 1956. 515 s.
7. Bogdandi L., Engel' G-YU. Vosstanovlenie zheleznyh rud. :Per. s nem. M.: Metallurgiya, 1971. 519 s.
8. Rostovcev S.T. Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie vosstanovitel'nyh processov. *Intensifi - kaciya vosstanovitel'nyh processov. Diffuzionno-himicheskie aspekty*. M.: Nauka, 1980. S. 6-26.
9. Popel' S.I., Sotnikov A.I., Baranenkov V.N. Teoriya metallurgicheskih processov. M.: Metallurgiya. 1986. 463 s.
10. Teoriya metalurgijny`x procesiv / V.B. Oxots`ky`j, O.L. Kost`olov, V.K. Sy`monov ta in. K.: IZMN, 1997. 512 s.
11. Zhuhovickij A.A., SHvarcman L.A. Fizicheskaya himiya. M.: Metallurgiya, 1976. 544 s.
12. Sun Zhao Ming. Rassmotrenie problem izucheniya kinetiki metallurgicheskih reakcij. *Rare Metals and Cem. Carbides*. 2001. №3. S. 27-31. Anotaciya v RZH Metallurgiya. №9. 2002.
13. Rid R., Prausnic Dzh., Shervud T. Svojstva gazov i zhidkostej : Per. s angl. L.: Himiya, 1982. 592 s.
14. Dubrovskij I.M., Egorov B.V., Ryaboshapka K.P. Spravochnik po fizike. K.: Naukova Dumka, 1986. 558 s.
15. Warner N.A. Kinetics of hematite reduction and effect of gas diffusion. *Trans. Metallurg. Soc. AIME*. 1964. V.230. №1. P. 163-176.
16. Yavorskij B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike. M.: Nauka, 1968. 939s.
17. Warner N.A. Kinetics of gaseous reduction of hematite. *Proc. Australas Inst. Mining and Metallurgi*. 1964. №210. P. 31-57.
18. Kulikov I.S., Rostovcev S.T., Grigor'ev E.N. Fiziko-himicheskie osnovy processov vosstanovleniya oksidov. M.: Nauka, 1978. 136 s.