

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ,
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

КАФЕДРА ТЕОРІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ХІМІЇ

Напрямок: *136 – Металургія*
Спеціальність: *8.090401 – Металургія чорних металів*

Дисципліна: *Фізико-хімічне та науково-дослідницьке супроводження технології відновлювальних процесів*

ПАКЕТ МАТЕРІАЛІВ
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Затверджено на засіданні кафедри ТМП і Х
Протокол № 1 від 29.08. 2018 р.

Завідувач кафедри ТМП і Х
Проф., д.т.н. Ковалев Д.А.

Розробник: доц. Колбін М.О.

Практичне заняття № 2 до модуля 1
Дисципліна: "Фізико-хімічне та науково-дослідницьке супроводження
технології відновлювальних процесів"
для студентів напрямку 136-Металургія

Розрахунок коефіцієнта масовіддачі при обтіканні твердого оксиду газом

Мета заняття

Познайомити студентів з розрахунком коефіцієнта масовіддачі та розмірів приведеної плівки при лімітуванні процесу відновлення газовим потоком.

Знання й уміння

У результаті проведення занять студенти повинні:

- вміти визначати коефіцієнт масовіддачі в залежності від температури та витрати газу-відновника.

Сучасна дифузійно - хімічна теорія відновлення твердих оксидів газами виділяє три ланки в розвитку процесу: зовнішньо, внутрішньодифузійний газообмін і кристалохімічні перетворення. До утворення достатньо товстого шару твердого продукту відновлення зовнішній масоперенос може грати значну роль у кінетичних закономірностях процесу. Швидкість цього переносу описується рівнянням:

$$V = K_r S \Delta C, \quad (1)$$

где: K_r – коефіцієнт масовіддачі; S – площа поверхні рудного тіла; ΔC – різниця концентрацій відновника в ядрі газового потоку и зовнішній поверхні рудного тіла.

Коефіцієнт масовіддачі пов'язан з критерієм Шервуда (Sh) співвідношенням

$$K_r = Sh \frac{D}{d}. \quad (2)$$

Здесь: D – коефіцієнт вільної дифузії газу; d – діаметр сферичного оксидного зразка.

При обтіканні такого зразка газом критерій Шервуда можна розрахувати на підставі рівняння

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

У свою чергу критерій Рейнольдса (Re) и Шмидта (Sc) визначається з співвідношення

$$Re = \frac{ud}{\nu} = \frac{ud\rho}{\eta} \quad (4) \quad \text{и} \quad Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\eta}{D\rho}, \quad (5)$$

де: u – лінійна швидкість газу; ν и η – кінематична і динамічна в'язкість його відповідно; ρ – щільність газу.

При відновленні оксидів металів воднем і моно оксидом вуглецю утворюються газові суміші $H_2 - H_2O$ або $CO - CO_2$. У таких бінарних системах вільний газообмін визначається єдиним коефіцієнтом взаємодифузії. Величину його (cm^2/c) при тиску P у відносних одиницях можна розрахувати за допомогою рівнянь.

$$D_{\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}} = 0,7481 \left(\frac{T}{273} \right)^{1,7492} \cdot \frac{1}{P} \quad (6) \quad \text{і} \quad D_{\text{CO-CO}_2} = 0,11635 \left(\frac{T}{273} \right)^{2,016} \cdot \frac{1}{P} \quad (7)$$

Щільність газів-відновників (кг/м³) визначається з співвідношень

$$\rho_{\text{H}_2} = 0,08987 \frac{273}{T} P \quad (8) \quad \text{і} \quad \rho_{\text{CO}} = 1,25 \frac{273}{T} P. \quad (9)$$

Величини в'язкості газів знаходять по довідковим джерелам. Для розрахунку динамічної в'язкості (кг/м·с) у температурному діапазоні 873...1273 К можна використовувати рівняння:

$$\eta_{\text{H}_2} = [1828 + 1,33(1 - 873)] \cdot 10^{-8}$$

$$\eta_{\text{CO}} = [3630 + 2,3(1 - 873)] \cdot 10^{-8} \quad (11)$$

Критерій Шервуда і, отже, коефіцієнт масовіддачі залежать від лінійної швидкості газового потоку. Величину її при відновленні сферичного зразка (окатиша) в реакторі з внутрішнім діаметром d_p можна визначити з урахуванням об'ємної витрати відновлювального газу і температури організації процесу. Якщо витрата газу яка вимірюється ротаметром або реометром (в розрахунку на нормальні умови) позначити через w , з урахуванням температури процесу T він складає:

$$W_T = w \frac{T}{273}. \quad (12)$$

Площа кільцевого зазору між окатишем і стінками реактора можна знайти з співвідношення

$$S_{\text{зая.}} = \pi/4(d_p^2 - d^2). \quad (13)$$

Отже

$$U = \frac{W_T}{S_{\text{зая.}}} = \frac{4W_T}{273\pi(d_p^2 - d^2)}. \quad (14)$$

Сукупність наведених вище рівнянь дозволяє розрахувати Sh і D , а відповідно, величину K_T із соотношения (4.2). Варюючи W можна встановити залежність коефіцієнту масовіддачі від лінійної швидкості газового потоку (і витраті газу).

Частіше рівняння (1) представляють у формі першого закону Фіка, підставляючи для цього вираз K_T зі співвідношення (2)

$$V = DS \frac{\Delta C}{d/Sh} = DS \frac{\Delta C}{\delta}, \quad (15)$$

де: $\delta = d/Sh$ – товщина приведеної плівки газу у поверхні зразка, котра характеризує величину зовнішньодифузійного опору в процесі відновлення. Варіації витрати газу дозволяють встановити зв'язок $\delta = f(u)$.

Східним чином розраховують коефіцієнт масовіддачі в інших гетерогенних реакціях «тверде тіло – газ), наприклад, при окислювальній газифікації $C_{\text{ТВ}}$ диоксидом вуглецю або водяною парою.

Зразковий розрахунок

Допустимо, сферичний зразок оксиду $d=1,4$ см розташовано у реакторі, внутрішній діаметр якого $d_p=2,2$ см. Відновлення зразка здійснюється воднем при 800°C . Витрата останнього (при нормальних умовах) складає $150\text{см}^3/\text{мин}$. В перерахунку на вказану температуру

$$W_T = 150 \frac{1073}{273} = 589,56 \text{ см}^3/\text{мин.}$$

Згідно з рівнянням (13) площа кільцевого зазору між зразком і стінками реактору

$$S_{\text{зас.}} = \frac{\pi}{4} (2,2^2 - 1,4^2) = 2,262 \text{ см}^2.$$

Тому лінійна швидкість газового потоку

$$U = \frac{589,56}{2,262 \cdot 60} = 4,344 \text{ см/с.}$$

Найдемо щільність і динамічну в'язкість водню при 800°C і P=1:

$$\rho_{H_2} = 0,08987 \frac{273}{1073} \cdot 1 = 0,0229 \text{ кг/м}^3;$$

$$\eta_{H_2} = [1828 + 1,33(1073 - 873)] \cdot 10^{-8} = 2094 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}.$$

Отже, критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{4,344 \cdot 1,4 \cdot 0,0229}{2094 \cdot 10^{-8} \cdot 10^4} = 0,665.$$

Коефіцієнт взаємодифузії у суміші H₂-H₂O

$$D = 0,7481 \left(\frac{1073}{273} \right)^{1,7492} \cdot \frac{1}{1} = 8,199 \text{ см}^2/\text{с}$$

і критерій Шмидта

$$Sc = \frac{2094 \cdot 10^{-8} \cdot 10^4}{8,199 \cdot 0,0229} = 1,115.$$

Отже, критерій Шервуда

$$Sh = 2,0 + 0,6 \cdot 0,665^{1/2} \cdot 1,115^{1/3} = 2,507.$$

Коефіцієнт масовіддачі визначимо за допомогою рівняння (2):

$$K_r = 2,507 \frac{8,199}{1,4} = 14,682 \text{ см/с.}$$

Зі цього витикає, що товщина приведеної

$$\delta = \frac{d}{Sh} = \frac{1,4}{2,597} = 0,559 \tilde{m}$$

Варіанти завдань для розрахунку коефіцієнта масовіддачі

№ варіанту	T°C	d, см	d _p , см	W _{H₂} , см ³ /XB
1	700	1,4	2,2	100
2	800	1,4	2,4	120
3	900	1,4	2,6	150
4	1000	1,6	2,8	200
5	700	1,6	3	100
6	800	1,6	2,8	120
7	900	1,8	2,6	150
8	1000	1,8	2,4	200
9	700	1,5	2,1	200
10	800	1,5	2,1	200
11	900	1,5	2,1	200
12	1000	1,7	2,2	200
13	700	1,7	2,2	200
14	800	1,7	2,2	200
15	900	1,8	2,5	300
16	1000	1,8	2,5	300
17	700	1,8	2,5	300
18	800	1,8	2,5	300
19	900	1,8	2,5	300
20	1000	1,8	2,5	300
21	700	1,2	2,0	250
22	800	1,2	2,1	250
23	900	1,2	2,0	250
24	1000	1,2	2,0	250
25	900	1,2	2,0	250
26	1000	1,1	2,0	250
27	700	1,1	2,1	250
28	800	1,1	2,0	250
29	900	1,1	2,0	250
30	1000	1,1	2,0	250