

## НЕСТАЦІОНАРНИЙ ПРОЦЕС РОЗЧИНЕННЯ ШАРУ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРІАЛУ

© Симак Д. М., Люта О. В., 2015

Проаналізовано розчинення твердої фази у нерухомому шарі матеріалу на початкових стадіях, які характеризуються нестационарністю. Визначено коефіцієнт масовіддачі та порівняно його з теоретичним значенням. Подано розраховані зміни розмірів частинок з висотою. У роботі наведено рівняння, згідно з яким визначалося експериментальне значення коефіцієнта масовіддачі, яке дорівнювало  $1,34 \cdot 10^{-5}$  м/с. Цю величину порівнювали із теоретичним значенням, яке визначали за критеріальною залежністю для одинарних частинок і дорівнювало  $2,12 \cdot 10^{-5}$  м/с. Різниця у величинах коефіцієнта масовіддачі пояснюється тим, що частинки у нерухомому шарі контактують одна з однією і деяка частина поверхні не бере участі у масообміні.

**Ключові слова:** розчинення, нерухомий шар, нестационарні процеси, кінетика розчинення.

Dissolution of the solid phase in the fixed layer of the material in early stages characterized by non-stationarity has been analyzed. The mass-transfer coefficient has been determined and compared with the theoretical value. Calculated particle size changes and height as are presented. The paper gives the equation serving for determination of an experimental coefficient of mass transfer which amounted to  $1,34 \cdot 10^{-5}$  m/s. This value has been compared with the theoretical value determined according to criterial dependency for single particles and amounted to  $2,12 \times 10^{-5}$  m/s. The difference in the coefficient mass transfer values was due to the fact that the particles in a fixed layer are in contact with each other and some part of the surface is not involved in the mass transfer.

**Key words:** dissolution, fixed layer, non-stationary processes, kinetics of dissolution.

**Постановка проблеми.** Розчинення твердих речовин у промисловості реалізується різними методами: розчинення в апараті з механічним чи пневматичним перемішуванням, в апаратах із псевдозрідженим шаром зернистого матеріалу, у шнекових розчинниках та апаратах з нерухомим та рухомим шаром твердої фази [1]. Останній метод називається розчиненням у стаціонарному шарі, крізь який фільтрується рідка фаза. Розчинення твердих речовин методом фільтрування крізь шар зернистого матеріалу реалізується у природному середовищі під час атмосферних опадів у вигляді дощу та танення снігового покриву. Вода з розчиненими у ній солями збирається у підземних сховищах і використовується для потреб водопостачання населення [2].

Наведені у літературі математичні моделі розчинення стосуються стаціонарних або квазістаціонарних процесів у шарі зернистого матеріалу. Насправді початкова стадія розчинення завжди є нестационарною і характер зміни розмірів частинок за висотою не відповідає стаціонарному процесу розчинення.

**Аналіз літературних джерел.** Розчинення належить до одного з найпоширеніших масообмінних процесів. Найпоширеніше застосування розчинення у галузгії [2], а також у хімічній, харчовій, фармацевтичній промисловості. Основну увагу під час аналізу процесу розчинення

приділяють кінетиці процесу на прикладі розчинення одинарних частинок кулястої форми [1]. Аналіз розчинення у шарі зернистого матеріалу розглядають як стаціонарний процес, коли тверда фаза надходить на розчинення та, переміщуючись за довжиною апарату, зменшується у розмірах до повного розчинення. Цей процес аналітично розглянуто у [1]. Разом з цим зазначено нестаціонарність цього процесу [3]. У [4, 5] розглянуто складний нестаціонарний процес розчинення, що супроводжується одночасною кристалізацією, тобто процесом, оберненим до розчинення.

Дослідженню нестаціонарної стадії розчинення шару зернистого матеріалу, яка завжди існує на початковій стадії розчинення, не приділяли належної уваги, хоч у інших масообмінних процесах з шаром зернистого матеріалу ( адсорбція, екстрагування з твердої фази, сушіння у фільтраційному шарі) це явище досліджують з належною увагою [6, 7].

**Метою роботи** є експериментальне дослідження нестаціонарного процесу розчинення солі натрію хлориду у нерухомому шарі.

**Експериментальна установка та методика експерименту.** Досліди у шарі проводили у скляній колонці 1, яка у нижній частині містить решітку 2, на яку засипали фракцію солі натрію хлориду +2,5-3,5 мм. Дистильовану воду подавали згори, витрату якої регулювали кранами 4.

Після проходження колонки рідина збиралась у мірному стакані 4. За висотою шару можна спостерігати за міліметровою шкалою, що нанесена на колонку. Діаметр колонки становив  $1 \cdot 10^{-2}$  м; початкова висота шару дорівнювала  $5 \cdot 10^{-2}$  м, тобто лінійні співвідношення діаметрів та висоти з гідродинамічного погляду витримувались. Температура проведення дослідів становила  $20 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ .

У першій серії дослідів експериментально визначали коефіцієнт масовіддачі під час розчинення твердої речовини у стаціонарному шарі та порівнювали його з теоретичним значенням, яке визначали за критеріальними рівняннями. Швидкість руху рідини, віднесена до всієї площі поперечного перерізу колонки (фіктивна швидкість), становила  $w_0 = 0,005$  м/с, відповідно у шарі зернистого матеріалу за його порозності  $e = 0,4$  швидкість дорівнювала  $w = 0,0125$  м/с. Дослідження проводили лише на початкових стадіях розчинення, щоб діаметр частинок за час розчинення змінювався незначно. Цей час нами оцінено у 100 с. За цей час у мірний циліндр набиралось 40 мл рідини, об'єм якої був достатній для визначення концентрації солі.

**Аналіз дослідних результатів.** У відібраній пробі концентрація  $\text{NaCl}$  становила  $41,65 \text{ кг/м}^3$ . З метою визначення експериментального значення коефіцієнта масовіддачі  $b$  в умовах розчинення шару зернистого матеріалу виділимо на певній висоті шару  $h$  елементарну висоту  $dh$ , на якій концентрація змінюється від  $c$  до  $c + \frac{dc}{dh} dh$ . Для цього елемента шару рівняння масовіддачі має вигляд

$$V_c \frac{dc}{dh} dh = b S dh S (c_s - c), \quad (1)$$

де  $V_c$  – об'ємна витрата рідини,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S$  – площа поперечного перерізу апарату,  $\text{м}^2$ ;  $S$  – питома поверхня твердої фази,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $c_s$  – концентрація насичення,  $\text{кг/м}^3$ .

Інтегрування рівняння (1) приводить до результату

$$\ln \frac{c_s}{c_s - c_k} = b \frac{SHS}{V_c}, \quad (2)$$

де  $c_k$  – кінцева концентрація солі.

Визначене за рівнянням (2) значення коефіцієнта масовіддачі  $b$  на основі експериментальних даних дорівнює  $1,34 \cdot 10^{-5}$  м/с.

Визначене нами експериментальне значення порівнювали з теоретичним, яке одержано для закріплених одинарних частинок, що омивались рухомих потоком рідини. Критеріальна залежність має вигляд:

$$Sh = 0,8 \sqrt{Re} \sqrt[3]{Sc}, \quad (3)$$

де  $Sh = \frac{bd}{D}$  – число Шервуда;  $Re = \frac{wd}{n}$  – число Рейнольдса;  $Sc = \frac{n}{D}$  – число Шмідта;  $w$  – швидкість руху рідини, м/с;  $n$  – кінематична в'язкість рідини, м<sup>2</sup>/с;  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії NaCl у воді, м<sup>2</sup>/с.

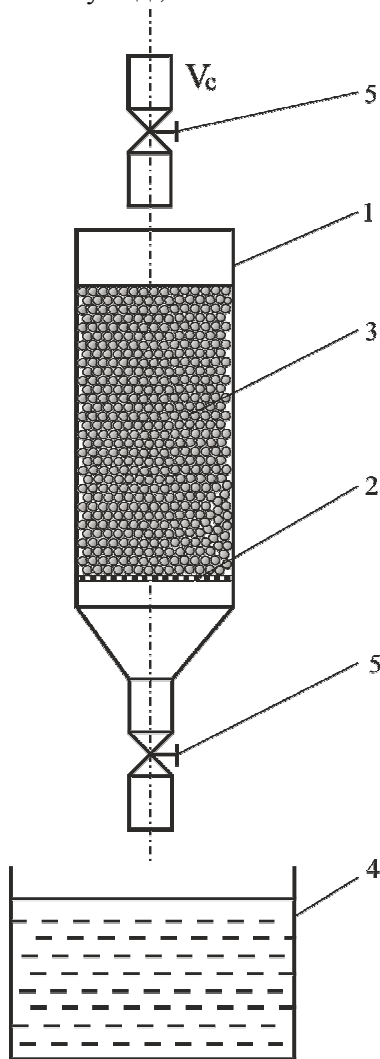


Рис. 1. Схема дослідної установки:  
1 – скляна колонка; 2 – решітка;  
3 – шар солі; 4 – мірний циліндр;  
5 – регулювальні крани

Визначена за залежністю (3) величина коефіцієнта масовіддачі  $b$  для умов досліду (швидкості руху рідини, температури, діаметра частинок) дала змогу встановити, що теоретичне значення  $b$  дорівнює  $2,12 \cdot 10^{-5}$  м/с.

Порівняння експериментального значення з теоретично розрахованим показує, що теоретична величина є більшою за експериментальну, хоч вони є одного порядку. Ця різниця викликана тим, що частинки, які знаходяться у шарі, контактують одна з однією, і ця поверхня не бере участі у масообміні. Крім цього, формулу (3) одержано для одинарних частинок кулястої форми, що не справджується для частинок натрій хлориду, форма яких відрізняється від кулястої.

**Нестаціонарність процесу розчинення.** Під час стаціонарного розчинення твердої фази у шарі тверда фаза зменшується у своїх розмірах від місця її введення до вивантаження з апарату, причому в ідеальних випадках до повного розчинення частинок. Нестаціонарність проявляється на початкових стадіях під час пуску апарату. Вона триватиме доти, поки частинки з верхнього шару не досягнуть зони вивантаження. Цей процес характеризується зростанням діаметра частинок згори донизу, на відміну від стаціонарного стану, де розміри зменшуються. Фізично цей процес пояснюється тим, що верхній шар контактує зі свіжим розчинником, і рушійна сила процесу є найбільшою. Підтвердженням цього є наведений нижче розрахунок нестаціонарного розчинення.

Розбиваємо висоту  $H$  на окремі шари, кожен з яких дорівнює початковому діаметру частинок солі  $\Delta h = d_0$ . Початковою умовою є нульова концентрація рідини, що поступає на верхній шар зернистого матеріалу. Рівняння кінетики розчинення верхнього шару має вигляд:

$$-\frac{d(d)}{dt} = \frac{2b}{r_s} c_s, \quad (4)$$

де  $t$  – поточний час, с.

Поділимо ліву і праву частини рівняння на початковий діаметр  $d_0$  і позначимо  $\frac{d}{d_0} = j$ , що являє собою частку нерозчиненої твердої частинки. Рівняння (4) набуде вигляду

$$-\frac{dj}{dt} = \frac{2b}{d_0 r_s} c_s. \quad (5)$$

Інтегрування рівняння (5) дає результат

$$1 - j = \frac{2b}{d_0 r_s} c_s t. \quad (6)$$

Повне розчинення частинки діаметром  $d_0$  означає, що  $t = T_s$ , а для шару – зникнення верхнього шару частинок

$$T_s = \frac{d_0 r_s}{2bc_s}. \quad (7)$$

Визначений нами час повного розчинення верхнього шару частинок згідно із рівнянням (7) становив 322 с. Початкову масу частинок першого шару  $M_0$  можна визначити

$$M_{10} = SH(1 - e)r_s. \quad (8)$$

Поділивши масу на об'єм рідини, що контактує з першим шаром, визначаємо середню концентрацію, що залишає перший шар і є початковою концентрацією для другого шару  $c_1$ . Для будь-якого  $i$ -го шару, який є кратним  $d_0$ , час його повного розчинення  $t_i$  буде більшим за  $T_s$  через зменшення рушійної сили процесу

$$t_i = \frac{d_0 r_s}{2b(c_s - c_{i-1})}. \quad (9)$$

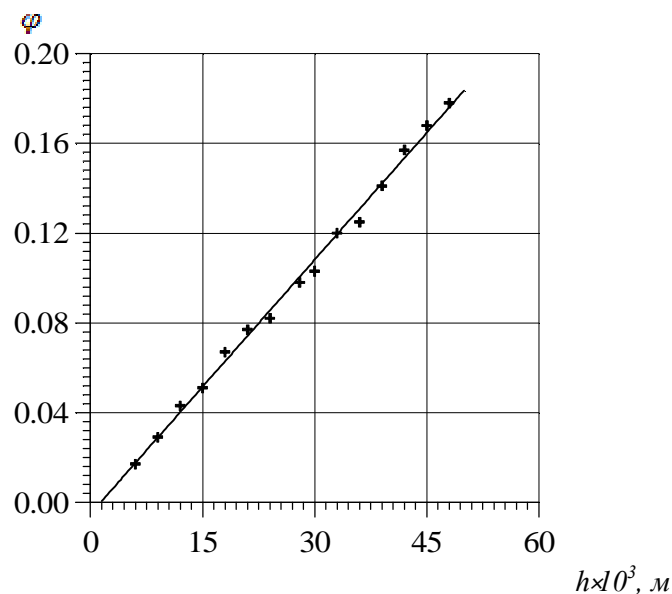


Рис. 2. Зміна відносного діаметра  $j$  залежно від висоти  $h$

Якщо розраховують розчинення на певний час, то усі обчислення проводять за цей час. Наприклад, подані нами розрахунки стосуються часу повного розчинення верхнього шару, для якого рушійна сила є максимальною. Відповідно частка нерозчинної твердої фази у  $i$ -му шарі дорівнює

$$1 - j_i = \frac{2b}{d_0 r_s} (c_s - c_{i-1}) T_s. \quad (10)$$

Маса розчиненої речовини у  $i$ -му шарі дорівнює

$$M_i = SH(1 - e) r_s (1 - j_i), \quad (11)$$

а концентрація рідини у цьому шарі дорівнює

$$c_i = c_{i-1} + \frac{M_i}{V}. \quad (12)$$

На рис. 2 наведено залежність відносного діаметра твердих частинок від висоти шару. Відлік висоти  $h$  ведеться згори апарату. Дані розрахунку наведено для часу повного розчинення верхнього шару, який для умов досліду становить 322 с.

**Висновок.** Розчинення твердих речовин у стаціонарному шарі супроводжується нестационарними процесами, які можливо встановити на основі кінетичних залежностей та рівнянь матеріального балансу (7)–(12), а кінетичні коефіцієнти можна оцінити критеріальними рівняннями.

1. Аксельруд Г. А. Растворение твердых веществ / Г. А. Аксельруд, А. Д. Молчанов. – М.: Химия, 1977. – 272 с.
2. Здановский А. Б. Галургия / А. Б. Здановский. – Л., Химия, 1972. – 528 с.
3. Бабенко Ю. И. Влияние нестационарных эффектов на скорость растворения одиночной частицы / Ю. И. Бабенко, Е. В. Иванов / Теор. основы хим. технологии. – 2013. – Т. 47, № 6. – С. 624–629.
4. Дьяконов С. Г. Кинетика растворения и роста элементов мелкодисперсной твердой фазы в аппаратах с перемешиванием / С. Г. Дьяконов, В. В. Елизаров, Д. В. Елизаров, Д. А. Кириллов // Теор. основы хим. технологии. – 2011. – Т. 45, №4. – С. 400–408.
5. Дьяконов С. Г. Оптимизация процессов растворения и кристаллизации мелкодисперсной твердой фазы в аппаратах с перемешиванием / С. Г. Дьяконов, В. В. Елизаров, Д. В. Елизаров, Д. А. Кириллов // Теор. основы хим. технологии. – 2011. – Т. 45, №5. – С. 529–540.
6. Petrus R. Wymiana masy w układzie ciało stałe – ciecz / Petrus R., Akselrud G., Gumnitsky J., Piantkowski W. – Wyd. Politechniki Rzeszowskiej. – 1998. – 365 s.
7. Атаманюк В. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. – 276 с.