



Д. М. Симак, Я. М. Гумницький, В. М. Атаманюк

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ТЕПЛОМАСООБМІН У СИСТЕМІ ТВЕРДЕ ТІЛО – РІДИНА З ПОВЕРХНЕВИМ ДЖЕРЕЛОМ ТЕПЛА

Теоретично та експериментально досліджено взаємодію між твердим тілом (цинком) та рідким реагентом (розчин соляної кислоти). Такі процеси використовують у розмірному обробленні металів для надання їм відповідних форм. Об'єктом дослідження обрано циліндричну заготовку цинку, бокова поверхня якої захищена кислотостійким покриттям, а процес розчинення відбувався лише по площині перерізу заготовки. Ця реакція відбувається з виділенням газоподібної фази, яка у процесі зародження бульбашок, росту та відриву їх від твердої поверхні, на якій вони зароджуються, сприяє інтенсивному перемішуванню рідини та турбулізує пограничний дифузійний шар. Внаслідок цього процес масовіддачі інтенсифікується. Цей процес контролюється дифузією і його інтенсивність визначається коефіцієнтом масовіддачі, значення якого наведено у роботі. Ця взаємодія супроводжується значними тепловими ефектами, що своєю чергою також інтенсифікує процес розчинення цинку соляною кислотою. Джерело тепла знаходиться на поверхні взаємодії і поширюється конвекцією у рідкому реагенті та теплопровідністю у твердому тілі. Важливо знати температуру на поверхні взаємодії, тому що вона визначає значення фізичних величин, які використовують під час розрахунків масообмінного процесу. Розглянуто процес теплопровідності у напівобмежене тіло з неперервно діючим поверхневим джерелом тепла за умови постійності конвективного теплового потоку у рідинне середовище. Визначено температуру поверхні взаємодії як функцію часу та встановлено, що найбільші поверхневі градієнти температур спостерігаються у початковій періоді часу. Теоретично та експериментально визначено температуру поле у металічній заготовці стержневого типу та підтверджено їх адекватність.

Ключові слова: хімічне кипіння; температурне поле; теплопровідність; напівобмежене тіло.

Вступ. У промисловій практиці використовують процеси, у яких тверде тіло взаємодіє з рідким реагентом. Така взаємодія супроводжується додатним чи від'ємним тепловим ефектом, який впливає на перебіг хімічної взаємодії. Ці процеси можуть контролюватися хімічною чи дифузійною кінетикою або обидві кінетики є співрозмірними і цей факт потрібно враховувати під час дослідження та у процесі оброблення експериментальних даних.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Особливої уваги заслуговують процеси взаємодії металів з кислотами, що супроводжуються значними тепловими ефектами. Такі процеси використовують у гідрометалургії (Voskoboynikov, Kudryn & Yakushev, 2002), розмірному обробленні металів (Antosyak & Mohoyan, 1985), знешкодженні важких металів з екологічною метою (Gumnytsky & Petrushka, 2016). Процеси хімічної взаємодії у системі тверде тіло – рідина можуть супроводжуватись виділенням побічних фаз (твердої чи газоподібної), які значною мірою впливають на кінетику (Mallik & Gumnytsky, 1986). Виділення газоподібної фази впливає на кінетику дифузійних процесів, тому що у процесі росту та відриву бульбашок газу турбулізується

дифузійний пограничний шар рідини, зменшується його товщина і, відповідно, зростає коефіцієнт масовіддачі. Окрім цього, газовими бульбашками перемішується рідинна фаза в її об'ємі, що створює ефекти нестационарності, які також впливають на коефіцієнт масовіддачі (Natareev et al., 2015; Babenko & Ivanov, 2013). Досягнути цього ефекту, як встановлено у (Gumnytsky, Symak & Nahursky, 2017), можливо вакуумуванням системи під час розчинення твердих тіл у рідині. Вакуумуванням системи досягається холодне кипіння рідини і виникають ефекти, аналогічні хімічному кипінню.

У літературних джерелах основну увагу приділяють процесам хімічної взаємодії, ігноруючи при цьому теплові ефекти, що супроводжують ці взаємодії. Процес протікає на поверхні твердого тіла і це впливає на масообмін. У роботі (Gumnytsky et al., 2017) розглянуто тепломасообмін під час взаємодії твердого тіла кулястої форми з рідким реагентом, який лімітується дифузійною кінетикою. Теоретично визначено температури поверхні твердого тіла, розподіл температур у рідині та твердому тілі та розраховано коефіцієнти масовіддачі для різних концентрацій реагента.

Інформація про авторів:

Симак Дмитро Михайлович, канд. техн. наук, асистент кафедри екології та збалансованого природокористування. **Email:** dsymak13@gmail.com

Гумницький Ярослав Михайлович, д-р техн. наук, професор кафедри екології та збалансованого природокористування. **Email:** jgumnytsky@ukr.net

Атаманюк Володимир Михайлович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри хімічної інженерії. **Email:** Atamanyuk@ukr.net

Цитування за ДСТУ: Симак Д. М., Гумницький Я. М., Атаманюк В. М. Тепломасообмін у системі тверде тіло – рідина з поверхневим джерелом тепла. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(9). С. 133–136.

Citation APA: Simak, D. M., Gumnytsky, Ya. M., & Atamanyuk, V. M. (2017). Heat and Mass Transfer in Solid – Liquid System with Superficial Heat Source. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(9), 133–136. <https://doi.org/10.15421/40270929>

Мета дослідження – визначення температурних полів у твердому тілі, яке може бути представлено як напівобмежене, один кінець якого взаємодіє з рідинним реагентом. Такі процеси використовують у процесах металооброблення для надання протяжним виробам певних форм, згідно з вимогами технології.

Матеріали та методи дослідження. Експериментальні дослідження проводили на експериментальній установці (рис. 1). Установа представляла скляний посуд 1, у який заливали розчин соляної кислоти концентрацією 80 кг/м^3 . Об'єм залитої кислоти становив $1 \cdot 10^3 \text{ м}^3$. Початкова температура кислоти становила $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ і підтримувалась за допомогою термостатичного пристрою 3. Використання такого пристрою давало змогу відводити тепло екзотермічної реакції, що відбувалась між цинком та розчином хлорної кислоти. Хімізм процесу відбувається згідно з реакцією



де $Q_R = 8821 \text{ кДж/кг}$ – тепловий ефект реакції.

Тверда фаза представляла собою стержень 4 площею поперечного перерізу $2 \times 2 \text{ см}$. Бокова поверхня стержня була покрита шаром ізоляції 5. По висоті стержня вставляли термопари 6, що приєднувались до реєструвального приладу 7. Температуру рідинного середовища контролювали скляним термометром 8. Реакція між цинком та хлорною кислотою відбувалась лише на відкритій верхній поверхні цинку і тепло реакції передавалось конвекцією в об'єм рідини та теплопровідністю у тверде тіло.

За допомогою термостата температура у рідині залишалась незмінною та дорівнювала T_0 . Тепло реакції спричиняє підвищення температури поверхні твердого тіла і поширюється теплопровідністю у це тіло. Таким чином поверхня твердого тіла, що контактує з реагентом, є джерелом тепла та найвищої температури. Ця температура визначається умовами перебігу хімічної реакції. Тепло поширюється у металічний стержень, у якому на певних віддальх встановлено термопари, що визначають температуру як функцію координати і часу $T(x, \tau)$. Час експериментального дослідження було вибрано невеликим, що означало незначне зменшення товщини верхньої границі твердого тіла.

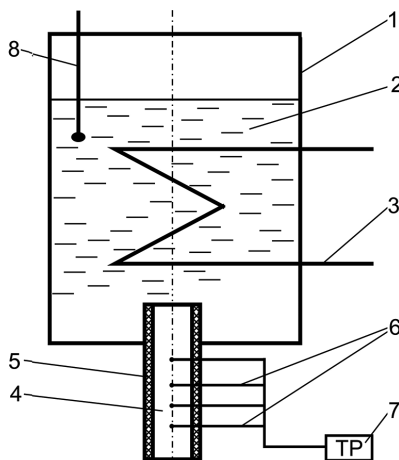


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1) скляний посуд; 2) розчин кислоти; 3) термостатична система; 4) металевий (цинковий) стержень; 5) ізоляція; 6) термопари; 7) реєструвальний прилад; 8) скляний термометр

Отримані експериментальні дані виміряних у певних точках твердого тіла температур наведено у виді

точок на графіку (рис. 3). Ці дані порівняно з теоретично розрахованими на основі нестационарної теплопровідності твердих тіл. Ця хімічна реакція лімітується не хімічною кінетикою, а належить до дифузійно контрольованих, інтенсивність перебігу яких визначається коефіцієнтом масовіддачі (Mallik & Gumnytsky, 1986). Експериментально визначене значення коефіцієнта масовіддачі для концентрації хлорної кислоти 80 кг/м^3 становить $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$.

Теоретичний аналіз розподілу температури у твердому тілі. Задача зводиться до розгляду процесу теплообміну всередині твердого тіла, на одному кінці якого є постійне джерело тепла. У цьому разі тверде тіло можна розглядати як напівобмежене. Особливістю наших досліджень є та обставина, що поверхнєве тепло поширюється не лише у тверде тіло теплопровідністю, але і у рідину конвективним теплообміном. Густина теплових потоків будуть дорівнювати сумарному тепловому потоку внаслідок хімічної реакції на поверхні твердого тіла

$$q = q_k + q_t, \quad (2)$$

де: q – густина теплового потоку на поверхні контакту фаз, Вт/м^2 ; q_k – густина теплового потоку, що конвективно передається від поверхні твердого тіла до рідини Вт/м^2 ; q_t – густина теплового потоку, що передається від поверхні твердого тіла теплопровідністю у це тіло, Вт/м^2 .

Густина теплового потоку q на поверхні розділу фаз визначають залежністю

$$q = C_0 \cdot \beta \cdot Q_R = 141136 \text{ Вт/м}^2. \quad (3)$$

Математично ця задача формулюється у вигляді диференціального рівняння теплопровідності з постійно діючим джерелом тепла на поверхні твердого тіла, питомою потужністю якого γ [Вт/м^3]. Питому потужність визначають як кількість тепла Q , віднесена до одиниці об'єму рідини

$$Q = q \cdot F = 55,6 \text{ Вт}; \quad \gamma = \frac{Q}{W} = 5,65 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3,$$

де: F – поверхня твердого тіла, що бере участь у хімічній взаємодії; W – об'єм рідкого реагента.

Визначення температури поверхні взаємодії. Запишемо цю задачу у вигляді диференціального рівняння теплопровідності з постійно діючим джерелом тепла на поверхні твердого тіла, початковою умовою та граничною умовою третього роду

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\gamma}{c \cdot \rho}; \quad (4)$$

$$T_1(x, 0) = T_0; \quad T_1(\infty, 0) = T_0; \quad (5)$$

$$\alpha(T_n - T_1) - \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = k_R Q_R c_0; \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=\infty} = 0. \quad (7)$$

Розв'язок подібної задачі щодо температури у твердому тілі як функції координати та часу, а також густини теплового потоку наведено у (Lyikov, 1967). Відмінність нашого рішення від розглянутого у (Lyikov, 1967) полягає у тому, що ми розглядаємо поверхнєве джерело тепла, а у (Voskoboynikov, Kudryn & Yakushev, 2002) – об'ємне. Скористатись граничною умовою (Lyikov, 1967) можливо за умови визначення густини теплового

поток на поверхні взаємодії, що передається у тверде тіло теплопровідністю q_t . Відповідно до представленої задачі та користуючись рішенням (Lyikov, 1967) величина q_t може набути значення

$$q_t = (T_n - T_0) \sqrt{\frac{\lambda c \rho}{\pi \tau}} - 2\gamma \sqrt{\frac{a \tau}{\pi}}, \quad (8)$$

де: λ – коефіцієнт теплопровідності твердого тіла, Вт/(м·К); c – теплоємність твердого тіла, Дж/(кг·К); ρ – густина твердого тіла, кг/м³; a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с; T_n – температура поверхні твердого тіла.

З урахуванням залежності (8) гранична умова (6) набуває вигляду

$$\alpha(T_n - T_0) + (T_n - T_0) \sqrt{\frac{\lambda c \rho}{\pi \tau}} - 2\gamma \sqrt{\frac{a \tau}{\pi}} = k_R Q_R c_0. \quad (9)$$

З рівняння (9) можна визначити температуру поверхні T_n як функцію часу. Підстановка значень параметрів, що входять у залежність (9), приводить її до вигляду

$$141136 = (T_n - T_0) \left(2110 - \frac{10111,5}{\sqrt{\tau}} \right) - 412,8\sqrt{\tau}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлено результати розрахунків температури поверхні твердого тіла для наведеної реакції та умов її проведення. Наведені дані показують, що значна зміна температури поверхні твердого тіла спостерігається у початкові моменти часу. Якщо у перший період температура поверхні за 500 с зростає від 20 до 79,4 °С і різниця становить 59,4 °С, то у другий період від 500 до 1000 с температура змінюється від 79,4 °С до 80,7 °С і різниця температур становить 1,3 °С. Це означає, що з часом процес з нестационарного переходить у стаціонарний.

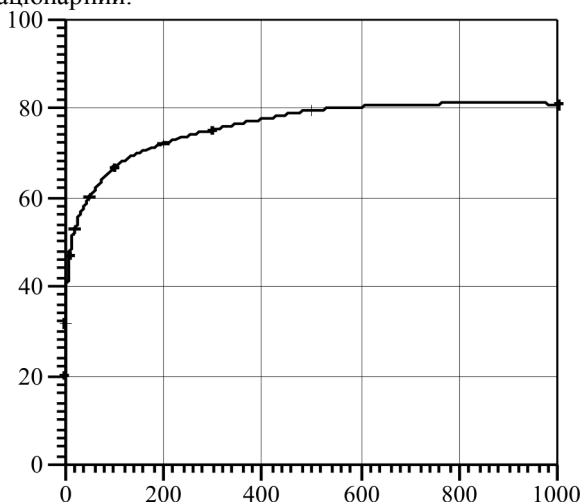


Рис. 2. Температура поверхні взаємодії твердого тіла з кислотою, визначена згідно зі залежністю (10)

Розмірне оброблення металевих виробів потребує знання температурного поля по довжині заготовки. Якщо відома температура поверхні, то у сформульованій задачі (4)–(7) змінюється гранична умова (6), яка набуває вигляд

$$T(0, \tau) = T_n = const. \quad (11)$$

Рішення цієї системи має вигляд

$$\frac{T(x, \tau) - T_0}{T_n - T_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}}\right). \quad (12)$$

Теоретично визначене значення температури $T(x, \tau)$ згідно з рішенням (12) представлено на рис. 3 у вигляді суцільних ліній. Точками подано результати експериментальних визначень температури на довжинах 1, 2, 5 см від поверхні взаємодії. Спостерігається задовільний збіг теоретичних і дослідних результатів. Дещо перевищені дослідні результати над теоретичними пояснюють незначним розчиненням твердої фази та зменшенням віддалі x , яку у теоретичних розрахунках приймають постійною.

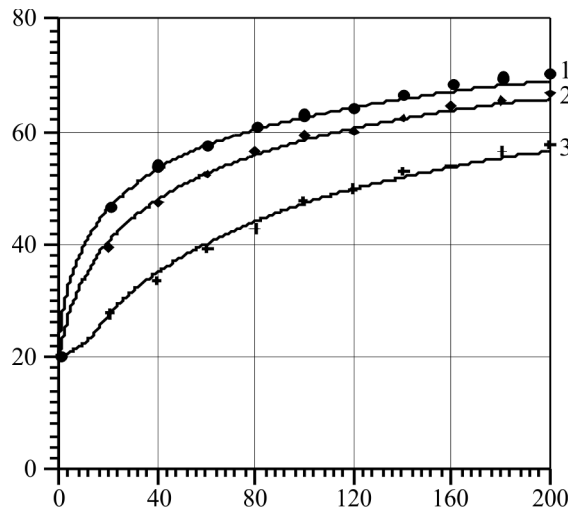


Рис. 3. Зміна температури з часом по висоті стержня: суцільні криві – теоретичне рішення згідно зі залежністю (12); точки – експериментальні результати, визначені на відстанях x : 1 – $1 \cdot 10^{-2}$ м; 2 – $2 \cdot 10^{-2}$ м; 3 – $5 \cdot 10^{-2}$ м

Висновки. Теоретично та експериментально досліджено процес дифузійно контрольованої хімічної взаємодії твердого тіла (цинку) з рідким реагентом (хлорна кислота). Тверде тіло представлене стержнем, який прирівнюється до напівобмеженого тіла, яке має ізольовані поверхні і взаємодіє з реагентом лише однією поверхнею. Теоретично визначено температуру поверхні взаємодії та у твердому тілі на різних висотах. Теоретичні результати порівняно з експериментальними і показано їх задовільний збіг.

Перелік використаних джерел

- Antosyak, V., & Mohoryan, N. (1985). *Elektrofizicheskie metody obrabotki metallov*. Kishine: Shtiintsa. 145 p.
- Babenko, Y., & Ivanov, E. (2013). Vliyanie nestatsionarnykh effektov na skorost rastvoreniya odinochnoy chastitsyi. *TOHT*, 47(6), 624–629.
- Gumnytsky, Y., & Petrushka, I. (2016). *Inzhenerna ekolohiya* (2nd ed.). Lviv: Lvivska politekhnika. 348 p.
- Gumnytsky, Y., Atamanyuk, V., Simak, D., & Danilyuk, O. (2017). Teplomassoobmin pid chas vzaemodiyi tverdogo tila z ridkim reagentom. *Naukovi Pratsi*, 81(1), 50–54.
- Gumnytsky, Y., Symak, D., & Nahursky, O. (2017). Rozchynennya tverdyykh til u tryfaznykh systemi, utvoreniy vakuumovannyam. *Naukovi Pratsi*, 47(1), 132–132.
- Lyikov, A. (1967). *Teoriya teploprovodnosti*. Moscow: Vysshaya shkola. 600 p.
- Mallik, S., & Gumnytsky, Y. (1986). Teplotdacha pri himicheskoy kipenii v usloviyah svobodnoy konveksii. *Inzhenerno-Fizicheskyy Zhurnal*, 50(4), 645–650.
- Natareev, S., Kokina, N., Natareev, O., & Dubkova, E. (2015). Masoprenos v sisteme s tverdym telom. *TOHT*, 49(1), 34–38.
- Voskoboynikov, V., Kudryn, V., & Yakushev, A. (2002). *Obshchaya metalurhiya*. Moscow: Metallurhiya. 768 p.

ТЕПЛОМАСООБМЕН В СИСТЕМЕ ТВЕРДОЕ ТЕЛО – ЖИДКОСТЬ С ПОВЕРХНОСНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОТЫ

Теоретически и экспериментально исследовано взаимодействие между твердым телом (цинком) и жидким реагентом (раствор соляной кислоты). Такие процессы используются в размерной обработке металлов с целью придания им соответствующих форм. Данная реакция протекает с выделением газообразной фазы, которая в процессе зарождения, роста и отрыва от твердой поверхности, на которой она зарождается, интенсивно перемешивает жидкость и турбулизирует пограничный диффузионный слой. Данный процесс контролируется диффузией и его интенсивность определяется коэффициентом массоотдачи, значения которого наведены в работе. Исследуемое взаимодействие сопровождается значительными тепловыми эффектами. Источник теплоты находится на поверхности взаимодействия и распространяется конвекцией в жидком реагенте и теплопроводностью в твердом теле. Важно знать температуру на поверхности взаимодействия, потому что она определяет значения физических величин, которые используются при расчетах массообменного процесса. Рассмотрен процесс теплопроводности в полуограниченном теле с непрерывно действующим поверхностным источником тепла при условии постоянства конвективного теплового потока в жидкую среду. Определена температура поверхности взаимодействия как функция времени и установлено, что максимальные поверхностные градиенты температур наблюдаются в начальные моменты времени. Теоретически и экспериментально определено температурное поле в металлической заготовке стержневого типа и подтверждена их адекватность.

Ключевые слова: химическое кипение; температурное поле; теплопроводность; полуограниченное тело.

D. M. Simak, Ya. M. Gumnytsky, V. M. Atamanyuk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

HEAT AND MASS TRANSFER IN SOLID – LIQUID SYSTEM WITH SUPERFICIAL HEAT SOURCE

The interaction between a solid (zinc) and a liquid reagent (a solution of hydrochloric acid) was studied theoretically and experimentally. These processes are used in the dimensional processing of metals in order to give those appropriate shapes. A cylindrical zinc billet was used as the object of the study. The billet lateral surface is protected by an acid-resistant coating and the dissolution process occurred only along the plane of the work piece section. The experimental installation scheme with the description of experimental researches technique is resulted too. The zinc billet dissolution proceeds with the release of the gaseous phase during the nucleation of the bubbles, growth and separation from the solid surface where they nucleate. It promotes intensive mixing of the liquid and turbulizes the boundary diffuse layer. As a result, the process of mass-visualization is intensified. This process is controlled by diffusion and its intensity is determined by the mass-transfer coefficient. The value of the mass-transfer coefficient is presented in this work. The interaction is accompanied by significant thermal effects. This enhances the process of dissolving zinc with hydrochloric acid. The heat source is located on the interaction surface and spreads by convection in a liquid reagent and thermal conductivity in a solid, respectively. The temperature at the interaction surface is important to know, since it determines the values of the physical quantities that are used to mass-exchange processes calculation. The process of thermal conductivity in a semi-bounded body with a continuously operating surface heat source is considered in the condition of constant convective heat flow into liquid medium. A differential heat equation with a constantly acting heat source on the solid surface with the corresponding initial and boundary conditions is used to describe the dissolution process. The results of experiments are shown in the graphs form. The temperature of the interaction surface is determined as a function of time. It is also found that the largest surface temperature gradients are observed at the initial periods. The temperature field in a bar-shaped metal blank was determined theoretically and experimentally and its adequacy has been confirmed.

Keywords: heat and mass transfer; chemical boiling; temperature field; thermal conductivity; semi-endless body.