

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_a}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 C_a}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{\varphi} \frac{\partial C_a}{\partial \varphi} \\ \bar{C}_a = 3 \int_0^1 \varphi^2 C_a d\varphi \\ \alpha \left(1 - \frac{C_1}{C_{10}} \right) = \frac{\bar{C}_a}{C_{a\infty}} \\ \left(\frac{\partial C_a}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=0} = 0 \\ C_a(\varphi, Fo=0) = 0; C_1(Fo=0) = C_{10} \\ C_1(\varphi \geq 1, \tau) = C_1 \end{array} \right. \quad (3)$$

Рішення системи проводили операційним методом оснований на перетворенні Лапласа. У зображеннях система має нульовий корінь та множину коренів, що визначаються з характеристичного рівняння: $tg \mu = \frac{3\mu}{3 + \alpha\mu^2}$.

З врахуванням нульового та множини коренів загальне рішення системи, представлене через зміни концентрації C_x у рідкій фазі її зміни в умовах періодичного процесу йонообмінної сорбції. При великих значеннях кореня та великому часі t значення експоненти прямує до нуля, тому можна обмежитись першим коренем характеристичного рівняння (область регулярного режиму), а рівняння може бути приведене до виду:

$$\frac{\frac{c_1}{c_{10}} + \frac{\alpha}{\alpha + 1}}{\frac{1}{\alpha + 1}} = A_1 e^{-\mu_1^2 Fo} \quad (4)$$

яке в напівлогарифмічній системі координат $\ln \frac{\frac{c_1}{c_{10}} + \frac{\alpha}{\alpha + 1}}{\frac{1}{\alpha + 1}} = f(t)$ дає пряму лінію.

Для умов досліду (початкова концентрація для йонів амонію $39,5 \text{ мг/дм}^3$, рівноважна об'ємна ємність цеоліту $=10,7 \text{ мг/г}_{\text{ад}}$, густина цеоліту $\rho_{\text{ад}} = 2150 \text{ г/дм}^3$, пористість зерна $p=0,3$, діаметр фракції цеоліту $d=3,0 \text{ мм.}$) коефіцієнт дифузії (D^*) рівний $1,904 \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с.}$, що й підтверджує внутрішньо дифузійні процеси сорбції йонів амонію на цеоліті.

Кінцеве значення концентрації C_1 для даних умов періодичного перемішування, що відповідатиме числу $Fo = \infty$, а умови – рівноважним, із рівняння (4) буде рівним:

$$\frac{c_{1\text{ривн}}}{c_{10}} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} = 0,269 = 0,269; c_{1\text{ривн}} = 10,645 \text{ мг/дм}^3.$$

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З РАДИКАЛАМИ ГІДРОКСИЛУ У ВОДІ ЗА КАВІТАЦІЙНИХ УМОВ

Т. Вітенько, Я. Гумницький, Р. Петрус

ТНТУ ім. І. Пулюя, НУ “Львівська політехніка”, Politechnika Rzeszowska

Експериментальні дослідження, присвячені вивченню механізму й енергетики процесів під впливом ультразвукової кавітації на воду, засвідчили, що фізичні процеси, зумовлені динамікою кавітаційних порожнин, призводять до ініціювання значної кількості хімічних реакцій у парогазовій і рідкій фазах. Роботи, присвячені гідродинамічній кавітації,

також обґрунтовують можливість її використання для оброблення водних систем з метою зміни їх властивостей. У цих процесах важливу роль відіграють реакції з радикальними продуктами розпаду молекул води. У даній роботі запропонована модель процесів з гідроксильними радикалами, що дає змогу прогнозувати їх концентрації з часом.

В основу моделі було покладено припущення, що концентрація молекул активованої води $C_{H_2O^*}$ є пропорційною введеній питомій ефективній кавітаційній енергії [1]

$$C_{H_2O^*} = a \cdot \varepsilon_{акт}. \quad (1)$$

Оскільки кількість утворених радикалів, зокрема гідроксильних, пропорційна концентрації збуджених молекул води, то кінетичне рівняння, що описує процес надходження радикалів OH^\bullet у воду, може бути записане у вигляді

$$\frac{dC_{OH^\bullet}}{d\tau} = k_1 \cdot \varepsilon_{акт}, \quad (2)$$

де $\frac{dC_{OH^\bullet}}{d\tau}$ – швидкість надходження гідроксильних радикалів у воду, моль/(дм³·с);

k_1 – константа швидкості реакції утворення радикалів гідроксилу у парогазовій фазі, моль/(Вт·с). Постійна величина a входить у константу k_1 .

Згідно прийнятого механізму, у активованій воді відбуваються інші хімічні перетворення, кожне з яких описується своїм кінетичним рівнянням. До цих перетворень належать:

- реакції радикалів гідроксилу з іншими радикалами, молекулярними продуктами або з розчиненими речовинами. Необхідно зауважити, що регенерація молекулярних продуктів може проходити за різними механізмами. Тому було прийнято, що швидкість реакції за таких умов можна описати рівнянням першого порядку

$$-\frac{dC_{OH^\bullet}}{d\tau} = k_2 \cdot C_{OH^\bullet}, \quad (3)$$

де k_2 – константа швидкості реакції радикалів гідроксилу з іншими радикалами, молекулярними продуктами, розчиненими речовинами, с⁻¹.

- рекомбінація радикалів гідроксилу з утворенням пероксиду водню

$$\frac{dC}{d\tau} = k_3 \cdot C_{OH^\bullet}^2, \quad (4)$$

де $\frac{dC}{d\tau}$ – швидкість зміни концентрації пероксиду водню у воді, моль/(дм³·с);

k_3 – константа швидкості реакції рекомбінації радикалів гідроксилу, дм³/(моль·с).

З урахуванням наведених вище рівнянь швидкість зміни концентрації радикалів гідроксилу C^\bullet буде описуватись кінетичним рівнянням такого вигляду

$$\frac{dC_{OH^\bullet}}{d\tau} = k_1 \varepsilon_{акт} - k_2 C_{OH^\bullet} - \frac{1}{2} k_3 C_{OH^\bullet}^2. \quad (5)$$

Рівняння (5) після певних математичних перетворень можна записати

$$-\frac{2}{k_3} \cdot \frac{dC^\bullet}{d\tau} = C^{\bullet 2} + bC^\bullet - \bar{C}, \quad (6)$$

$$\text{де } b = \frac{2k_2}{k_3}, \bar{C} = \frac{2k_1}{k_3} \cdot \varepsilon_{\text{акт}}.$$

Це рівняння типу $\frac{dx}{dt} = ax^2 + bx + c$, можна розв'язати методом розділення змінних.

Якщо $\Delta = (4ac - b^2) < 0$, то розв'язок може бути записаний таким чином

$$\frac{1}{\sqrt{-\Delta}} \ln \left| \frac{2ax + b - \sqrt{-\Delta}}{2ax + b + \sqrt{-\Delta}} \right| = \tau, \quad (7)$$

$$\text{де } \Delta = 4\bar{C} - b^2.$$

Запишемо отримане диференціальне рівняння у вигляді

$$\int_0^{C^*} \frac{dC^*}{C^{*2} + bC^* - \bar{C}} = -\frac{k_3}{2} \int_0^{\tau} d\tau. \quad (8)$$

Його загальний розв'язок можна представити рівнянням

$$\frac{k_3 C^* + k_2 + \sqrt{M}}{k_3 C^* + k_2 - \sqrt{M}} = \frac{k_2 + \sqrt{M}}{k_2 - \sqrt{M}} e^{\sqrt{M} \cdot \tau}, \quad (9)$$

$$\text{де } M = 2 \cdot k_1 \cdot k_3 \cdot \varepsilon + k_2^2.$$

Розрахунок констант k_1 , k_2 , k_3 , виконували відносно C^* за допомогою пакета прикладних програм Mathcad. Результати розрахунку за рівнянням 9 засвідчили, що максимальні відхилення отриманих значень стаціонарних концентрацій від розрахованих за кінетичною моделлю [2] становить 20%. Таким чином, розглянута аналітична модель хімічних процесів, зокрема, утворення і рекомбінації гідроксильних радикалів, що відбуваються у воді під впливом гідродинамічної кавітації, достатньо точно описує їх кількісну зміну з часом.

1. Вітенько Т.М. Розподіл енергії при активації води в умовах кавітаційного перемішування / Т.М. Вітенько // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – т. 11. – № 4. – С. 214–219.
2. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія / Т.М. Вітенько. – Тернопіль, в-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. – 224с.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ КАПЛЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Атаманюк В.М., Мальований М.С., Люта О.В.
Національний університет “Львівська політехніка”

Постановка проблеми. Фільтраційне сушіння відноситься до високоінтенсивних методів, суть якого полягає в профільтровуванні теплового агента крізь пористу структуру стаціонарного шару в напрямку “шар дисперсного матеріалу – перфорована перегородка” за рахунок перепаду тисків. Кожна частинка шару при цьому омивається тепловим агентом, який фільтруючись крізь стаціонарний шар, віддає своє тепло і насичується вологою. Такий метод сушіння в стаціонарному шарі дає змогу забезпечити економічно доцільні швидкості фільтрування теплового агента крізь вологий шар і відповідно коефіцієнти тепло- і масовіддачі. Відомо, що фільтраційне сушіння носить зональний характер. Тобто, під час фільтраційного сушіння фронт тепло- і масообміну в стаціонарному шарі вологого матеріалу переміщається в напрямку до перфорованої перегородки. Коли в шарі дисперсного матеріалу вологовміст твердих частинок досягне критичного значення, то настає другий період