

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ПЕРІОДИЧНОГО РОЗЧИНЕННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ ЧАСТИНОК БЕНЗОЙНОЇ КИСЛОТИ ПІД ЧАС ПНЕВМАТИЧНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ

Вступ, аналіз публікацій та актуальність проблеми. Розчинення належить до одного із найпоширеніших масообмінних процесів, які широко застосовуються у різних галузях промисловості. Відомо, що дослідження процесу розчинення ґрунтовно досліджено, в основному, для одинарних частинок кулястої форми [1]. Розчинення є дифузійним процесом, для якого є характерною залежність коефіцієнта масовіддачі від інтенсивності перемішування. Нестационарні процеси, які відбуваються під час розчинення одинарних частинок та їх вплив на визначення коефіцієнта масовіддачі подано у [2]. Розчинення твердих речовин у промисловості реалізується різними методами: в апараті з механічним чи пневматичним перемішуванням, в апаратах із псевдозрідженим шаром зернистого матеріалу, у шнекових апаратах та апаратах з рухомих та нерухомих шаром твердої фази [2]. Основна увага під час дослідження розчинення одинарних частинок приділялася визначенню коефіцієнта масовіддачі експериментально та узагальнення дослідних даних у вигляді безрозмірних комплексів. Зокрема, розчинення одинарних частинок бензойної кислоти кулястої форми описано також у праці Гарнера та Гофмана [3]. Відомий спосіб інтенсифікації реакційних та масообмінних процесів у гетерогенних системах, реалізований в апараті для розчинення твердих частинок у рідині, в якому рідина, що несе тверді частинки, рухається по трубі, що має змінний переріз по всій довжині. При русі у такій трубі рідина постійно змінює швидкість – то прискорюючись, то сповільнюючись, завдяки чому збільшується коефіцієнт масовіддачі через створення додаткової швидкості відносного руху фаз [4]. Проте, недоліком такого способу є великі габарити установки, втрата напору у змінних перерізах, а також можлива ерозія стінок труби та забруднення розчину матеріалом з якого виготовлений апарат. У цих роботах обґрунтовуються різні механізми розчинення, зокрема: дифузійний, кінетичний, перехідний [5]. Відомо, що розчинення бензойної кислоти відбувається, в основному, у дифузійній області. У роботі [6] дослідні дані щодо коефіцієнта масовіддачі порівняно з теоретичним коефіцієнтом, визначеним на основі теорії ізотропної турбулентності, та показано змогу застосування даного методу для теоретичного визначення коефіцієнта масовіддачі. Дослідженню розчинення одинарних частинок та розчинення у стаціонарного шарі приділено чимало уваги різними дослідниками у в роботах [7–8].

Основним недоліком процесу розчинення при пневматичному перемішуванні є утворення піни, що супроводжується винесенням твердих частинок матеріалу за межі зони інтенсивного масообміну і, тим самим, збільшуючи тривалість процесу розчинення. Експериментально встановлено, що зі збільшенням витрати повітря скорочується тривалість процесу розчинення. Проте, із підвищенням витрати повітря вище 4,5 м³/год суттєво зростає висота піни, у якій залежить приблизно 80% твердих частинок, що негативно впливає на інтенсивність розчинення.

Проблема винесення твердих частинок за межі зони інтенсивного масообміну в промисловості вирішується різнорізними засобами, наприклад, використанням ультразвуку, брандспойтів для розбивання піни, додавання різного роду поверхнево активних речовин, які зменшують поверхневий натяг рідини. Будь які піногасники, що вводяться у розчин, погіршують якість розчинюваної бензойної кислоти. Вибір процесу розчинення при пневматичному перемішуванні зумовлений рядом переваг, порівняно з іншими методами. У апаратах з пневматичним перемішуванням спрощена внутрішня конструкція, оскільки у них відсутні перемішувачі пристрої, які піддаються впливу механічної та хімічної ерозій. Разом з тим, продукти ерозії та корозії перемішувачів додатково забруднюють цільовий продукт розчинення. До переваг використання пневматичного перемішування відноситься рівномірний та інтенсивний масообмін між твердою фазою та рідиною. Тому, вивчення і встановлення закономірностей процесу розчинення полідисперсних сумішей під час пневматичного перемішування є актуальним завданням.

Метою роботи було дослідження особливостей процесу розчинення полідисперсних частинок бензойної кислоти у воді під час пневматичного перемішування та визначення залежності зміни густини розчину від концентрації бензойної кислоти.

Матеріали та методики проведення експериментальних досліджень. Об'єктом досліджень була полідисперсна бензойна кислота С₆Н₅СООН (ГОСТ 10521-78), яка широко використовується у різних галузях промисловості, зокрема фармацевтиці, харчовій та хімічній промисловостях.

Для математичного опису процесу розчинення полідисперсної бензойної кислоти необхідно визначити її основні фізико-механічні характеристики (гранулометричний склад та усереднений діаметр частинок). Усереднений розмір частинок визначали послідовно методами ситового та мікроскопічного аналізів. Полідисперсна бензойна кислота масою 6 кг просіювалась крізь стандартний набір сит, згідно із методикою, наведеною у [9]. Внаслідок цього, отримали 5 фракцій. Результат ситового аналізу наведено у таблиці 1 та на гістограмі (рис. 1).

Із кожної фракції відбирали 60 частинок, які розділили на три проби. Далі, мікроскопічним аналізом, згідно із методикою, наведеною у [10], визначали три розміри у взаємно перпендикулярних напрямках і розраховували усереднений діаметр частинок для кожної проби, згідно залежності (1). Усереднений діаметр кожної фракції розраховували, як середнє арифметичне з трьох проб, а усереднений діаметр полідисперсної суміші (всіх фракцій) визначали із залежності (2). Дані мікроскопічного аналізу подані у таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати мікроскопічного аналізу частинок Бензойної кислоти

| Розмір фракції, $d \cdot 10^{-3}$ м | $d_{fp} \cdot 10^{-3}$ м | $a \cdot 10^{-3}$ м | $b \cdot 10^{-3}$ м | $h \cdot 10^{-3}$ м | Відсотковий вміст, x_i , % | Усереднений діаметр, $\bar{d}_c \cdot 10^{-3}$ м |
|--|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|---|
| 0,16–0,315 | 0,176 | 0,29 | 0,21 | 0,09 | 1,67 | 0,776 |
| 0,315–0,63 | 0,338 | 0,64 | 0,49 | 0,13 | 13,45 | |
| 0,63–1,25 | 0,666 | 1,24 | 1,01 | 0,24 | 53,94 | |
| 1,25–2,5 | 1,116 | 2,39 | 2,03 | 0,29 | 25,22 | |
| 2,5–5 | 1,753 | 4,46 | 3,83 | 0,32 | 4,35 | |

Усереднений \bar{d}_{fp} діаметр визначали для кожної із фракцій, а також загальний усереднений \bar{d}_c діаметр, для усього дисперсного матеріалу із залежностей [1–2]:

$$\bar{d}_{fp} = \sum_{i=1}^3 \frac{\sqrt[3]{a_i \cdot b_i \cdot h_i}}{N}, \quad (1)$$

де a_i, b_i, h_i – розміри частинок, $\cdot 10^{-3}$ м; N – кількість частинок фракцій у пробі; i – кількість проб ($i = 3$).

$$\bar{d}_{fp} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i \cdot x_i}{x_i}, \quad (2)$$

де x_i – відсотковий вміст кожної фракції, %; d_i – усереднений діаметр кожної із фракцій, $\cdot 10^{-3}$ м; n – кількість фракцій ($n = 5$).

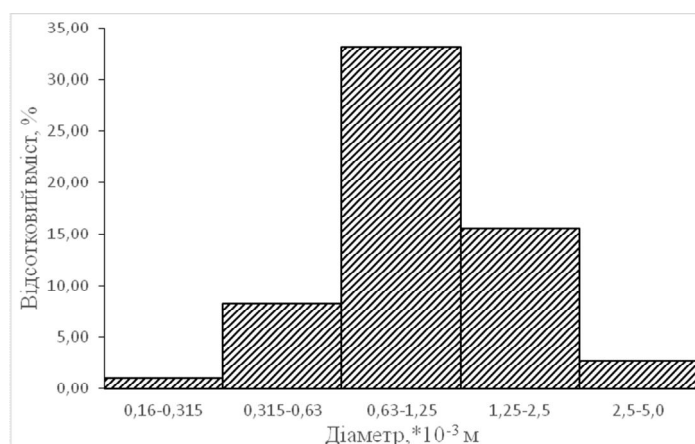


Рисунок 1 – Результати ситового аналізу бензойної кислоти

Експерименти щодо встановлення закономірностей розчинення полідисперсних частинок бензойної кислоти проводили в апараті з пневматичним перемішуванням (рис. 2). Для здійснення процесу апарат

для пневматичного перемішування заповнювали дистильованою водою. Вмикали компресор і, виставивши регулятором необхідне значення витрати повітря, засипали наважку бензойної кислоти, одночасно із увімкненням секундоміру.

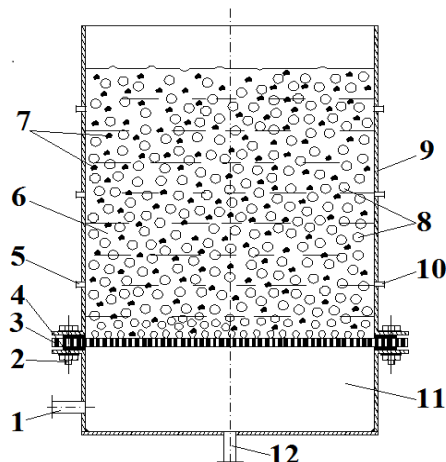


Рисунок 2 – Схема апарату для пневматичного перемішування
 1 – вхід (подача) повітря; 2 – болт кріплення; 3 – перфорована перегородка; 4 – отвір, $d=1 \cdot 10^{-3}$ м;
 5, 10 – пробовідбірники; 6 – рідка фаза; 7 – тверда фаза; 8 – бульбашки повітря; 9 – корпус апарату;
 11 – повітряна подушка (камера); 12 – зливний патрубок конденсату

Розчинення проводили до досягнення концентрації насичення, яка за даної температури ($t = 15,5 \text{ }^\circ\text{C}$) для $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ становила $C_{\text{нас}} = 2,63 \text{ кг/м}^3$ (г/л). Об'єм розчину становив $V = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ (л). Маса наважки бензойної кислоти (БК) у дослідах становила $m = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$. Експериментальним шляхом встановлено, що оптимальна витрата повітря лежить в межах $2,5\text{--}3,0 \text{ м}^3/\text{год}$.

Для визначення кінетики розчинення Бензойної кислоти через рівні проміжки часу ($\Delta\tau = 10 \text{ хв.}$ – до завершення процесу розчинення), відбирали по $V = 5 \text{ мл}$ розчину через пробовідбірники 5, 10 (рис. 2). Середня тривалість розчинення до концентрації насичення ($C_n^{16^\circ\text{C}} = 2,6 \text{ кг/м}^3$ (г/л)), за даних умов, становила $\tau = 200 \text{ хв}$ ($\tau \cdot 60 \text{ с}$).

Вміст розчиненої кислоти C_m визначали згідно стандартних методик за допомогою спектрофотометра Sperecord m40, а на основі обчислених даних будували залежність зміни концентрації бензойної кислоти у розчині від часу $C = f(\tau)$, яка представлена на рис. 3.

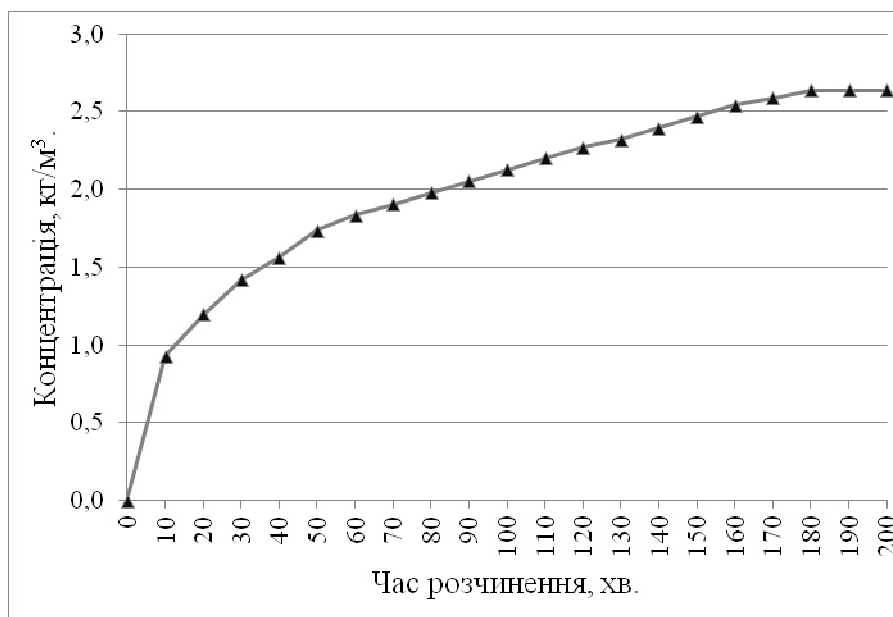


Рисунок 3 – Залежність зміни концентрації бензойної кислоти від тривалості процесу розчинення

Залежність зміни густини розчину від концентрації бензойної кислоти досліджували за стандартними методиками. За допомогою спектрофотометра знаходили його відповідну концентрацію. Отримані дані наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Залежність зміни густини розчину від концентрації $C_{20}H_{14}O_4$

| | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $m_1 \cdot 10^{-3}$, кг | 21,22 | 21,21 | 21,13 | 21,82 | 21,58 | 21,68 | 21,47 |
| $m_2 \cdot 10^{-3}$, кг | 26,23 | 26,23 | 26,17 | 26,87 | 26,64 | 26,75 | 26,56 |
| $\Delta m \cdot 10^{-3}$, кг | 5,01 | 5,02 | 5,04 | 5,05 | 5,06 | 5,07 | 5,09 |
| C , кг/м ³ | 1,588 | 1,978 | 2,125 | 2,174 | 2,247 | 2,296 | 2,394 |
| ρ , кг/м ³ | 1,002 | 1,004 | 1,008 | 1,010 | 1,012 | 1,014 | 1,018 |
| $\tau \cdot 60$, с | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 |

На основі даних таблиці побудували графік залежності зміни густини розчину від його концентрації (рис. 4).

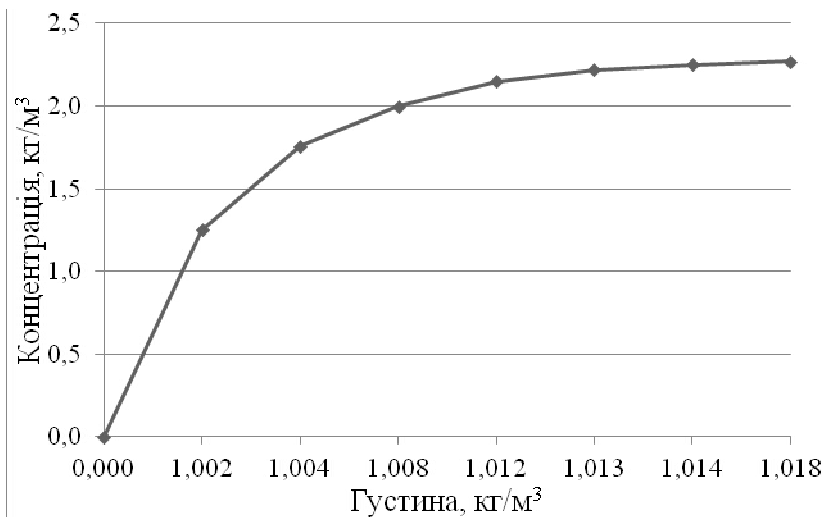


Рисунок 4 – Залежність зміни густини розчину від концентрації Бензойної кислоти

Висновки. Проаналізовано переваги процесу розчинення під час пневматичного перемішування розчину. Експериментально досліджено розчинення полідисперсних частинок Бензойної кислоти в апараті з пневматичним перемішуванням. Наведені дані ситового та мікроскопічного аналізів Бензойної кислоти у таблиці 1 та на гістограмі (рис. 1). Розраховано усереднений діаметр частинок полідисперсного матеріалу: $\bar{d}_v = 0,776 \cdot 10^{-3}$ м. На рис. 2 зображено схему апарату для пневматичного перемішування. Проаналізовано залежність масової концентрації розчиненої речовини від тривалості процесу і побудовано графічну залежність (рис. 3). Досліджено зміну густини розчину від зміни концентрації бензойної кислоти та побудовано графік цієї залежності (рис. 4), а дослідні дані наведено у таблиці 2. Визначено середню тривалість процесу за даних умов, яка становить $\tau = 200$ хв.

Література

1. Гумницький Я.М. Розчинення твердих тіл у трифазній системі, утвореній вакуумуванням / Я.М. Гумницький, Д.М. Симақ, О.А. Нагурський // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2015, – № 47 (1). – с. 130–133.
2. 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.
3. Garner, F.H. The transition from free to forced convection in mass transfer from solid spheres / F.H. Garner, J.M. Hoffman // AIChE Journal –1960.– Volume 6, Issue 4., P. 579–584.

4. Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело – жидкость / Г.А. Аксельруд // Львов: “Изд-во Львовск. ун-та” – 1970. – С. 155.
5. Куликов Б.А. Кинетический анализ механизма растворения твердых веществ в жидкостях / Б.А. Куликов, Е.Б. Лось, Н.В. Куликова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2005.– Т. 13.– С. 15–17.
6. Symak D. Analysis of dissolution kinetics based on the lokal isotropic turbulence theory / D. Symak, V. Atamaniuk, Ya. Gumnitsky // Chemistry & Chemical Technology. – 2015.– Vol. 9, N4. – P. 493–497.
7. Мелихов И.В. Растворение полидисперсной твердой фазы в плотном слое / И.В. Мелихов, Б.М. Долгонос, Г.Г. Еленин, Н.В. Соснин // Теор. основы хим. Технологии – 1989.– Т. 23, №1.– С. 101–104.
8. Симак Д.М. Нестационарный процес розчинення шару зернистого матеріалу / Д.М. Симак, О.В. Люта // Хімія, технологія речовин та їх застосування – Л. : Вид-во Нац. ун-ту “Львів. Політехніка”, №812, 2015. – С. 308–312.
9. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пилей и измельченных материалов.– 3-ие изд. / П.А. Коузов.– Л.: Химия, 1987.– С. 264.
10. Градус Л.Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии / Л.Я. Градус. – М.: Химия, 1979.– с. 232.

УДК 66.061

Данилюк О.М., Атаманюк В.М., Гумницький Я.М., Бачик М.Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАСТВОРЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ БЕНЗОЙНОЙ КИСЛОТЫ ВО ВРЕМЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

В статье исследованы особенности процесса растворения полидисперсных частиц бензойной кислоты в условиях пневматического перемешивания. Описаны методики проведения экспериментов. Также приведены данные ситового и микроскопического анализов бензойной кислоты. Определены усредненный диаметр частицы. Приведена схема аппарата для пневматического перемешивания. Проанализирована зависимость массовой концентрации растворенного вещества от продолжительности процесса и построен график. Исследовано изменение плотности раствора, изменение концентрации в нем бензойной кислоты и построена графическую зависимость. Рассмотрено влияние побочных эффектов пенообразования на процесс растворения. Определена средняя продолжительность процесса при данных условиях. Экспериментально установлено, что с увеличением расхода воздуха сокращается продолжительность процесса растворения. Проанализированы преимущества процесса растворения при пневматическом перемешивании раствора.

Danyliuk O.M., Atamanyuk V.M., Gumnitsky Ya.M., Bachyk M.D.

INVESTIGATION OF THE REGULARITIES OF THE PROCESS OF PERIODIC DISSOLUTION OF THE POLYDISPERSE PARTICLES OF BENZOIC ACID DURING THE PNEUMATIC MIXING

This article investigates the features of the process of dissolution of polydispersed benzoic acid particles under conditions of pneumatic mixing. The technique of conducting experiments is described. The data of sieve and microscopic analyzes of benzoic acid are given. There is also determined the averaged particle diameter. There is given the scheme of the machine for pneumatic mixing. The dependence of the mass concentration of the dissolved substance on the duration of the process and the plot is constructed. The change in the density of the solution from the change in the concentration of benzoic acid in it and graphic dependence is constructed. The influence of the side effect of foam formation on the dissolution process is considered. The average duration of the process in the given conditions is determined. It has been experimentally established that with increasing air flow, the duration of the dissolution process is reduced. The advantages of the dissolution process during the pneumatic mixing of the solution are analyzed.