

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ДАНИЛЮК ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ



УДК 66.061.1

**МАСООБМІН У ПРОЦЕСАХ РОЗЧИНЕННЯ У ШАРІ ДИСПЕРСНОГО
МАТЕРІАЛУ**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2019

Дисертацією є рукопис. Робота виконана у Національному університеті “Львівська політехніка”
Міністерства освіти і науки України, м. Львів.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Агаманюк Володимир Михайлович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
завідувач кафедри хімічної інженерії, м. Львів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Ведь Валерій Євгенович,
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут” МОН України,
завідувач кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, м. Харків;

кандидат технічних наук, доцент
Артюхов Артем Євгенович,
Сумський державний університет МОН України,
доцент кафедри процесів та обладнання хімічних та нафтопереробних виробництв, м. Суми.

Захист відбудеться “16” грудня 2019 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.09 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, пл. Св. Юра 9, корпус ІХ, ауд. 214).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “15” листопада 2019 р.

*Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.09,
доктор технічних наук, професор*



Я.М. Гумницький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Розчинення твердих дисперсних матеріалів – це складний масообмінний процес, який широко застосовується у технологічних процесах хімічної, харчової, фармацевтичної та інших галузях промисловості як основний етап технологічних процесів або їх заключна стадія. Зокрема, розчинення поширене у галургії під час перероблення руди з метою отримання цільових компонентів. Розчинником може бути вода або водні розчини кислот, лугів та солей. Це енергоємний та складний, в технологічному плані, процес міжфазної дифузійної взаємодії речовин в системі тверда фаза – рідина, від ефективності та інтенсивності якого, в значній мірі залежить собівартість та якість готової продукції. Обладнання для розчинення є, в основному, великогабаритним, а процес вимагає як енергетичних, так і значних капітальних затрат. Початкові стадії розчинення відбуваються в умовах нестационарності.

В сучасних умовах розвитку промисловості України існує потреба інтенсифікації процесів розчинення, створенні та розробленні високоефективних та екологічно безпечних технологій та обладнання. Вибір оптимального режиму розчинення, способу і конструкції апаратів, пов'язані із особливостями технологічних процесів, а також із властивостями розчинюваних матеріалів.

Перспективним методом інтенсифікації розчинення твердої полідисперсної фази є проведення процесу в умовах перемішування системи стиснутим повітрям. Інтенсифікація відбувається завдяки прискореному переміщенню бульбашок по об'єму апарату, їх руйнуванню та постійному омиванню твердих частинок рідиною. Розчинник із низькою концентрацією компоненту безперервно підводиться до поверхні твердої частинки та створює високий градієнт концентрацій на поверхні. Завдяки високому градієнту концентрації утворюються нестационарні умови інтенсивного масообміну, за яких коефіцієнти масопередачі досягають високих значень. Використовуючи стиснене повітря для перемішування розчину, можна усунути недоліки, пов'язані зі застосуванням механічних мішалок. Барботування системи дає змогу забезпечити стабільну в часі температуру розчину, оскільки тепло, що виділяється в системі, виводиться із бульбашками за межі зони розчинення.

Тому, теоретичне і експериментальне дослідження процесів розчинення твердих полідисперсних матеріалів, їх характеристик, практичного застосування отриманих результатів та особливостей роботи обладнання, яке реалізує ці процеси, є актуальним завданням, що вирішує науково-прикладну задачу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напряму кафедри хімічної інженерії згідно з пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки в Україні на період до 2020 р. (Закон України “Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки”, ст. 3, п.3), а саме: Масообмін у системах з твердим тілом. Дисертаційна робота виконана в межах науково-дослідної роботи кафедри хімічної інженерії згідно зі зареєстрованою тематикою: “Гідродинаміка і тепломасообмін в системі тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина” (номер державної реєстрації 0117U004122).

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є дослідження гідродинаміки, кінетики та тепломасообміну розчинення твердих матеріалів у воді під час пневматичного перемішування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- розробити експериментальну установку та методики експериментальних досліджень розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти та неорганічних солей у водному розчині під час їх пневматичного перемішування;
- дослідити гідродинаміку руху бульбашок стисненого повітря крізь шар рідини;
- встановити вплив дисипації енергії стисненого повітря на інтенсивність розчинення твердих полідисперсних частинок до досягнення концентрації насичення;
- дослідити кінетику розчинення полідисперсної твердої фази у газорідинному потоці;
- розробити методи боротьби з піноутворенням;
- дослідити тепломасообмін під час взаємодії твердого тіла з рідким реагентом;
- встановити залежність коефіцієнта масовіддачі від концентрації розчину, витрат газової фази, дисипації енергії стиснутого повітря з врахуванням зміни сумарної поверхні всіх фракцій твердої полідисперсної суміші під час розчинення;
- розробити принципову технологічну схему установки і методику розрахунку процесу розчинення твердих полідисперсних матеріалів у водному розчині під час пневматичного перемішування.

Об'єкт дослідження – розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти та неорганічних солей у водному розчині під час пневматичного перемішування середовища.

Предмет дослідження – вплив параметрів пневматичного перемішування на інтенсивність розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти та неорганічних солей у водному розчині, встановлення кінетичних закономірностей розчинення; чисельне моделювання розчинення.

Методи дослідження. У роботі використовували методи фізичного й математичного моделювання процесу розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти та неорганічних солей у водному розчині під час пневматичного перемішування. Для дослідження гранулометричного складу полідисперсної суміші використовували ситовий аналіз, будови і форми частинок – мікроскопічний метод. Для дослідження зміни концентрації розчину цільового компоненту використовували спектрофотометр Specord m40. Чисельне моделювання процесу розчинення виконували за допомогою комп'ютерних прикладних програм SolidWorks та Ansys Fluent. Експериментальні дані опрацьовували за допомогою прикладних програм (Excel, MathCAD, AutoCAD, Grapher).

Наукова новизна. В роботі експериментально і теоретично досліджено кінетику розчинення полідисперсних сумішей бензойної кислоти та неорганічних солей у водному розчині під час його барботування і встановлено такі результати:

- експериментально досліджено процес розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти, калію хлориду та калію сульфату під час пневматичного перемішування розчину, що дає змогу прогнозувати кінетику її розчинення;
- експериментально визначено інтенсивність розчинення окремих фракцій твердих частинок залежно від їх розміру, що дає змогу прогнозувати час повного розчинення дрібних фракцій;
- експериментально визначено коефіцієнт масовіддачі під час пневматичного барботування розчину залежно від концентрації розчину та дисипації енергії;

- запропоновано розрахункову залежність у безрозмірних комплексах, яка дає змогу теоретично визначати коефіцієнт масовіддачі, залежно від необхідної концентрації розчину та інтенсивності його барботування;

- набуло подальшого розвитку дослідження дифузійно-контрольованих процесів розчинення з високим тепловим ефектом та створення математичної моделі процесу.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність роботи полягає в розвитку теоретичних уявлень щодо розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти, калію хлориду та калію сульфату шляхом барботування розчину. Представлення результатів експериментальних досліджень у вигляді безрозмірних комплексів дає змогу використовувати їх на практиці для визначення основних технологічних параметрів процесу і забезпечення необхідної ефективності та продуктивності, визначати енергетичні затрати на процес розчинення. Розроблена методика і практичні рекомендації щодо розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти в апараті з пневматичним перемішуванням розчину дає змогу прогнозувати економічну доцільність створюваного нового обладнання для її розчинення.

Основні результати дисертаційної роботи передано на ПАТ “Галичфарм”, підприємство “Аргентум” ГО «НДО» та впроваджено у навчальний процес кафедри хімічної інженерії під час викладання курсу “Процеси та апарати хімічних виробництв”, а також при виконанні курсових проектів і магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні огляду джерел інформації щодо теоретичних засад і практичних методів розчинення солей, розробленні та виготовленні експериментальної установки, обґрунтуванні методик експериментальних досліджень, проведенні експериментальних досліджень, фізичному та математичному моделюванні кінетики розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти у воді, підготовці результатів експериментальних і теоретичних досліджень до публікації у фахових виданнях. Внесок дисертанта в опублікованих роботах є основним. Формулювання мети і завдання дисертаційної роботи, аналіз та узагальнення результатів теоретичних та експериментальних досліджень виконано разом із науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались, обговорювались та одержали позитивні відгуки на: 6-th International youth science forum “litteris et artibus” 2016 Lviv, Ukraine; International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering», Ukraine, Lviv, 2017; Семінарі “Сталий розвиток – погляд у майбутнє”, Львів, 2017; 7-th international youth science forum “litteris et artibus” 2017, Lviv; Шостій міжнародній науково-практичній конференції «Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ-2018» м. Київ, 2018; V Міжнародному конгресі “Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування” (м. Львів, 2018).

Публікації. Основні положення та результати роботи відображені у 13 наукових працях: 7 публікацій у фахових виданнях України, зокрема 2 статті у виданнях, які входять до науково метричної бази даних Index Copernicus, Google Scholarships, а також 6 тез доповідей на міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 161 сторінок машинописного тексту, ілюстровано 40 рисунками, текст містить 16 таблиць, у бібліографії наведено 170 літературних джерел, наведено 5 додатків на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета і завдання досліджень, наукова новизна та практичне значення, наведені відомості про особистий внесок автора і апробацію отриманих результатів.

У першому розділі дисертаційної роботи наведено критичний аналіз джерел літератури щодо основних методів розчинення твердих частинок, гідродинаміки псевдозрідженого шару полідисперсного матеріалу, проведено аналіз кінетики процесів розчинення та розглянуто апаратне оформлення установок для розчинення твердих полідисперсних матеріалів.

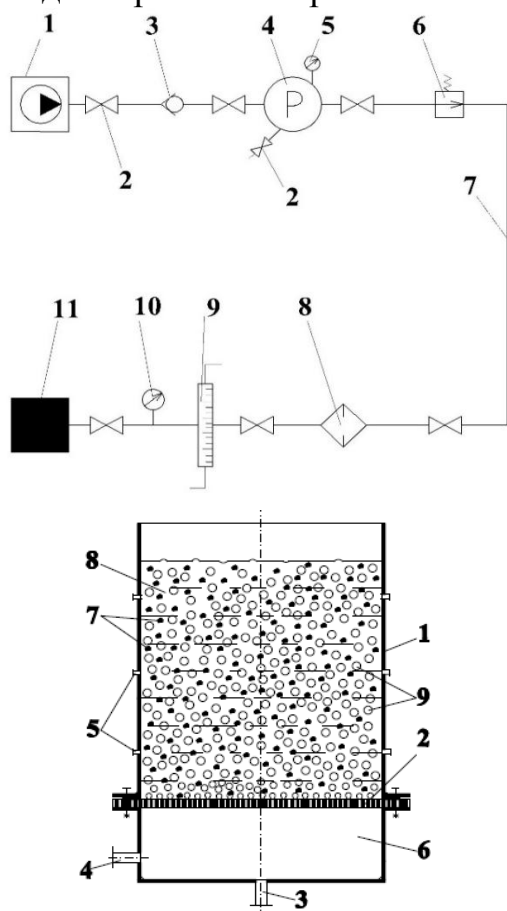


Рис. 1. Схема експериментальної установки для досліджень пневматичного перемішування системи тверде тіло-рідина:

1 – компресор; 2 – кран; 3 – зворотний клапан; 4 – повітряний збірник; 5, 10 – манометри; 6 – регулятор тиску; 7 – повітряний трубопровід; 8 – масляний фільтр; 9 – ротаметр; 11 – апарат для розчинення

Рис. 2. Експериментальна ємність для розчинення твердої полідисперсної суміші під час пневматичного перемішування:

1 – корпус; 2 – перфорована перегородка; 3 – зливний патрубок конденсату; 4 – патрубок входу стисненого повітря; 5 – пробовідбірники; 6 – повітряна камера; 7 – тверда фаза; 8 – рідка фаза; 9 – бульбашки повітря

У другому розділі наведено основні фізико-хімічні властивості об'єктів досліджень, а саме бензойної кислоти, неорганічних солей калію сульфату та калію хлориду. Визначено основні фізико-механічні характеристики досліджуваних матеріалів та гранулометричний склад полідисперсних сумішей досліджуваних матеріалів. Представлено методики проведення експериментів та наведено схеми експериментальних установок. Схема експериментальної установки та апарат, у якому проводили

розчинення і досліджували закономірності руху бульбашок стисненого повітря у рідині, зображено на рис. 1 та 2, а на рис. 3 – установку для дослідження розчинення полідисперсної твердої фази у газорідинному потоці.

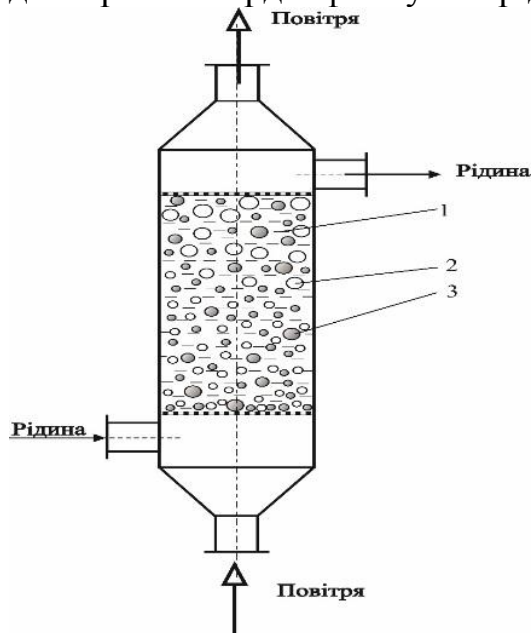


Рис. 3. Схема експериментальної установки для дослідження розчинення полідисперсної суміші у газорідинному потоці:

- 1 – рідина; 2 – бульбашки повітря;
3 – тверді частинки

Визначено частоту утворення та виходу бульбашок з отворів барботеру. Знайдено середню швидкість спливання бульбашки на основі залежності Хармонті та критерію Бонда.

На рис. 4 наведено результати розрахунків дисипації енергії, яку вводили в апарат із газовим потоком під час розчинення бензойної кислоти в умовах пневматичного перемішування за квазістаціонарного руху бульбашок. Також із графічної залежності введеної енергії в апарат від витрати стиснутого повітря і тривалості процесу розчинення визначили оптимальне значення витрати повітря, за якої доцільно здійснювати процес розчинення під час пневматичного перемішування.

Кінетику розчинення полідисперсної твердої фази у газорідинному потоці, в якому інертна газова фаза виконує роль інтенсифікатора масообмінного процесу дослідили на прикладі розчинення калію сульфату.

Для аналізу процесу розчинення використовували два рівняння: матеріального балансу (1) та кінетики (2):

$$M_0 - M = V \cdot \bar{C}_l \cdot \tau; \quad (1)$$

$$-\frac{dM}{d\tau} = \beta \cdot F \cdot (C_s - \bar{C}_l), \quad (2)$$

Рівняння (1) використовували під час визначення концентрації солі у розчині, проби якого відбиралися через кожні 100 с. Для кожної проби знаходили своє значення \bar{C}_l , яке представлено на рис. 6. Ці значення можна використовувати для розрахунку концентрації солі у розчині теоретично на основі кінетичного рівняння (2).

У третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень розчинення досліджуваних матеріалів у рідині, яка перемішується газом. Встановлено, що частота утворення бульбашок зростає зі збільшенням витрати стиснутого повітря, однак, їх об'єм у момент відриву від перфорованої перегородки залишається сталим. Для квазістаціонарного процесу умови відриву бульбашки можна представити як рівновагу сил поверхневого натягу, що утримують бульбашку по периметру отвору, і рівнодійної сил ваги повітря та сили Архімеда, що відривають бульбашку. Встановлено, що відривний розмір бульбашок повітря з отвору із гострими кромками за невеликих швидкостей руху становитиме $\delta = 3,4 \cdot 10^{-3}$ м.

Рівняння (2) представили у вигляді:

$$-\frac{d(d)}{d\tau} = \frac{2\beta}{\rho_s} \cdot C_s, \quad (3)$$

Приймали, що частинки мають кулясту форму, концентрація розчиненої речовини є значно меншою за концентрацію насичення C_s і коефіцієнт масовіддачі β не залежить від гідродинаміки у зваженому стані. Концентрація насичення за температури 16°C становила 117 кг/м^3 , а $\rho_s = 2660 \text{ кг/м}^3$

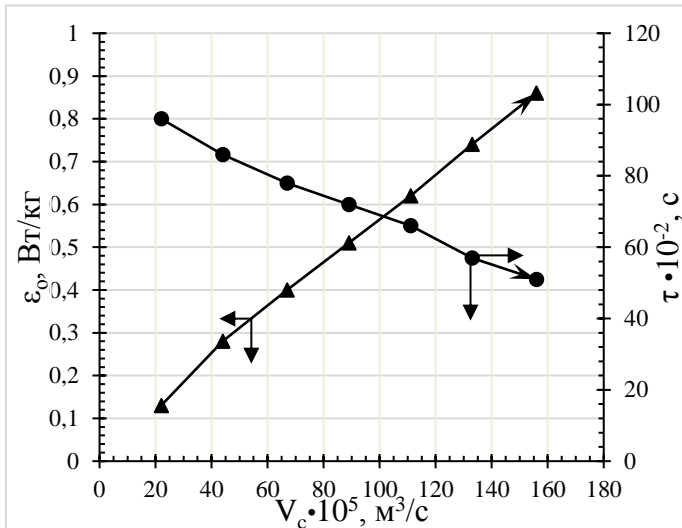


Рис. 4. Залежність розподілу енергії в апараті від витрати стиснутого повітря і тривалості процесу до досягнення концентрації насичення:

▲ – тривалість процесу, с;

● – зміна енергії в апараті, Вт/кг

Аналіз графічної залежності, наведеної на рис. 4, дає змогу встановити оптимальну витрату стиснутого повітря для проведення процесу розчинення – $101,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, що відповідає введений енергії у кількості $0,57 \text{ Вт/кг}$.

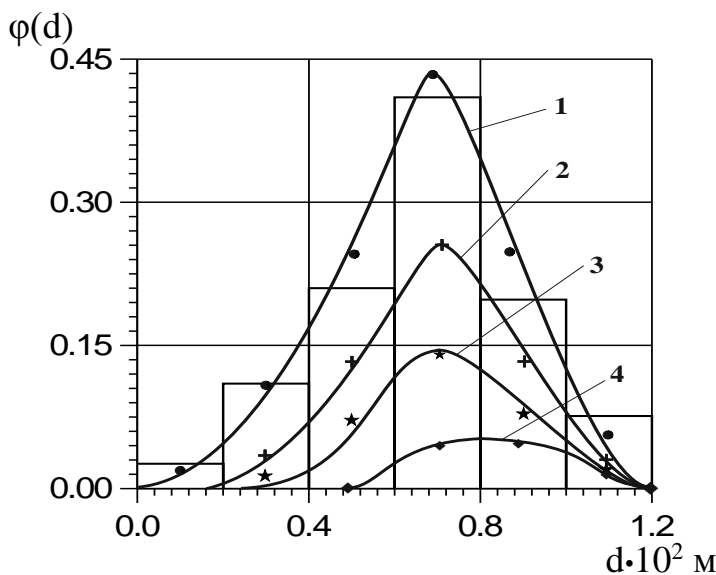


Рис. 5. Функція розподілу частинок за їх діаметром:

- 1 – початковий розмір ($\Delta = 0$);
 2 – $\Delta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; 3 – $\Delta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
 4 – $\Delta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Інтегрування рівняння (3) у межах від d_0 до d , дає результат:

$$d_0 - d = \frac{2\beta}{\rho_s} \cdot C_s \cdot \Delta\tau, \quad (4)$$

причому розчинення відбувається однаково для частинок різних фракцій.

Із критеріальної залежності, яка наведена у технічній літературі для розчинення полідисперсних сумішей у зваженому стані, визначали коефіцієнт масовіддачі β , який

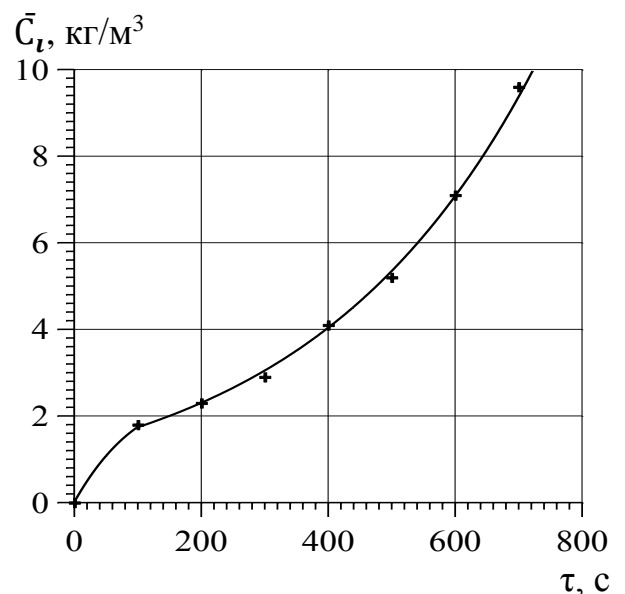


Рис. 6. Залежність концентрації солі \bar{C}_t у розчині від часу τ

для умов проведення експерименту (розчинення одинарних частинок K_2SO_4) становив $\beta=0,77 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Функція $\varphi(d) = f(d)$ (рис. 5) дає змогу отримати масовий розподіл частинок за фракціями відносно їх діаметра. Враховуючи, що маса частинки пропорційна кубу її діаметра $M \sim d^3$, то діаметр частинок у певний момент часу зменшиться на величину $\Delta = d_0 - d$, а відносна маса частинок зменшиться на величину $\lambda = ((d_0 - d)/d_0)^3$. Нами виконано розрахунок для $\Delta = 1, 2, 4$ мм і наведено у вигляді функції розподілу для частинок, що відповідають новим діаметрам, отриманим після розчинення.

Залежність (4) дає змогу визначити час розчинення τ_i зі зменшенням розмірів частинок на величину Δ_i .

Концентрація солі у розчині для трьох значень Δ визначалась із залежності:

$$C_i = \frac{m_i}{V_c \cdot \tau} \quad (5)$$

Визначені за теоретичними розрахунками значення C_i для трьох величин Δ , що відповідають часу розчинення 148, 296, 592 с наведено на рис. 6 у вигляді окремих точок. Отримані розрахункові та експериментальні значення дають змогу теоретично розрахувати розчинення полідисперсних систем за умови постійного коефіцієнта масовіддачі.

У четвертому розділі представлено результати досліджень масообміну та кінетики розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти. Для дослідження кінетики розчинення бензойної кислоти через рівні проміжки часу і до завершення процесу розчинення, відбирали проби розчину. Середня тривалість розчинення до концентрації насичення, за даних умов, становила $\tau = 12000$ с. Вміст розчиненої кислоти C_m визначали згідно зі стандартними методиками, а на основі обчислених даних будували залежність зміни концентрації бензойної кислоти у розчині в часі $C = f(\tau)$, яка представлена на рис. 7.

Апроксимувавши експериментальні дані степеневою функцією, отримали розрахункову залежність (6), яка дає змогу теоретично розрахувати концентрацію розчину залежно від часу розчинення. Абсолютне значення відносної похибки до концентрації насичення за температури $16^\circ C$ не перевищує 7%, що є цілком прийнятним для практичних розрахунків.

$$C = 0,12 \cdot \tau^{0,33} \quad (6)$$

Отримана розрахункова залежність (7) дає змогу теоретично розрахувати густину розчину бензойної кислоти до концентрації його насичення з достатньою для практичних розрахунків точністю, а максимальне значення відносної похибки не перевищує 5%.

$$\rho = 1000 + 0,99 \cdot C^3 \quad (7)$$

Досліджено процес розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти під час пневматичного перемішування розчину та методи руйнування піни, яка під час цього утворюється.

Для зниження впливу піноутворення на процес розчинення використовували інертні перемішуючі добавки – кульки однакового розміру, виготовлені з матеріалів, густини яких приблизно рівні густині перемішувачого середовища.

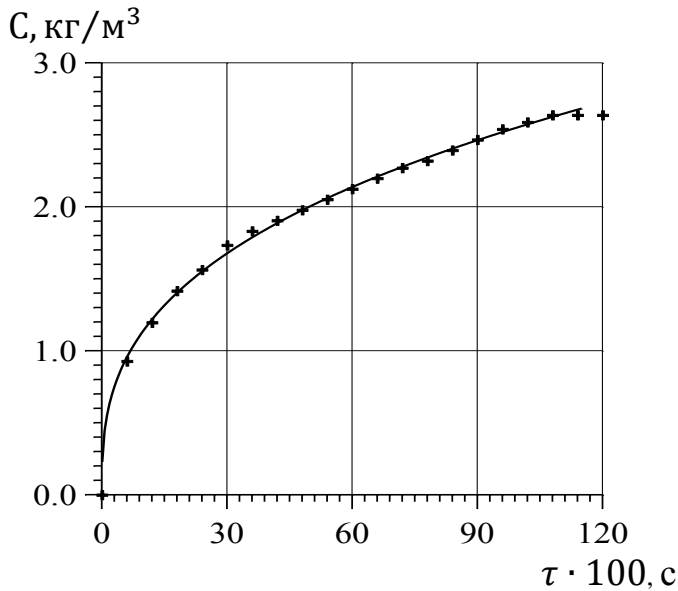


Рис. 7. Залежність зміни концентрації бензойної кислоти від тривалості процесу розчинення

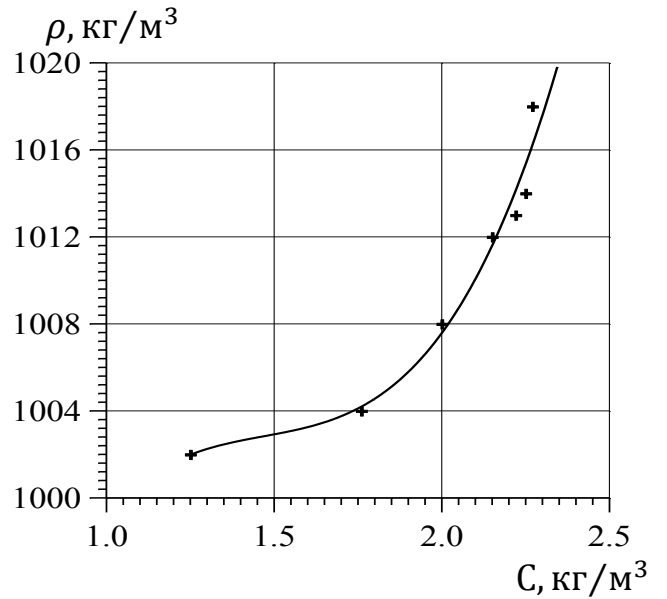


Рис. 8. Залежність густини розчину бензойної кислоти від концентрації

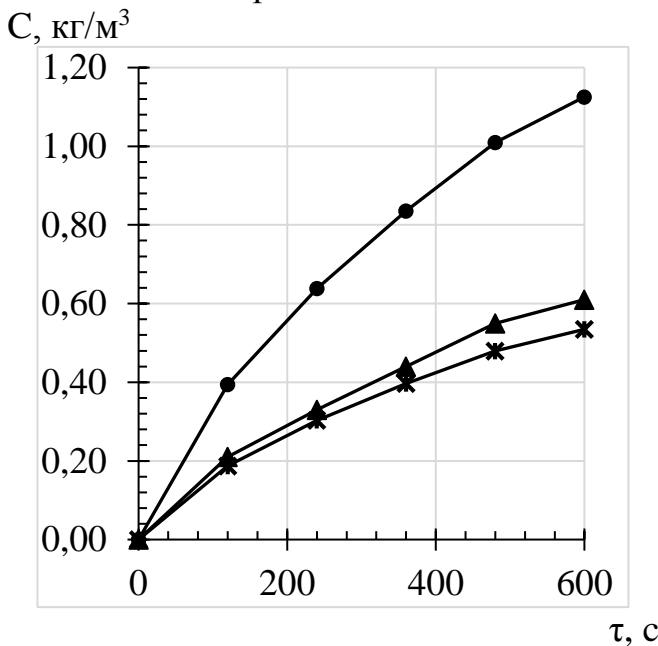


Рис. 9. Кінетика розчинення бензойної кислоти за умов використання перемішувачів з різними механічними характеристиками:

● – поліметилметакрилат; ▲ – гума;
× – скло

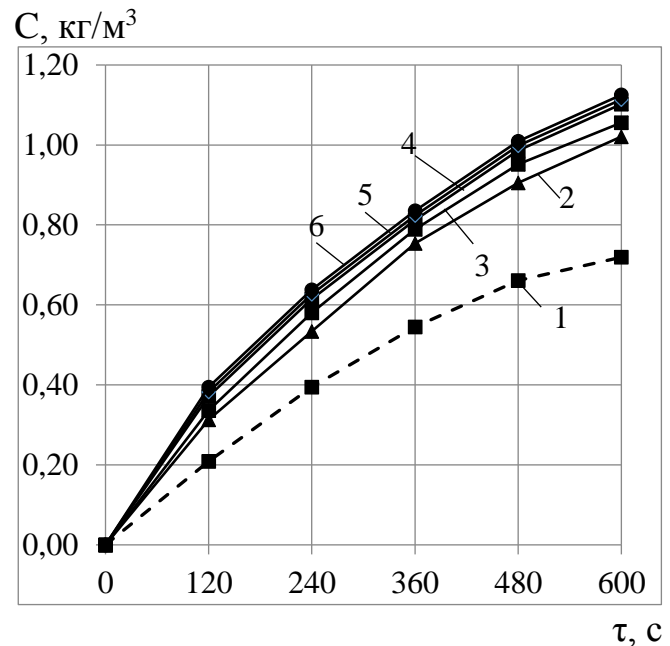


Рис. 10. Вплив кількості перемішувачів на кінетику процесу розчинення. 1 – 0% (інертні додатки відсутні); 2 – 0,9% ($M_k = 12,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$); 3 – 2,0% ($M_k = 29,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$); 4 – 2,5% ($M_k = 37,38 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$); 5 – 4,7% ($M_k = 70 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$); 6 – 6,7% ($M_k = 100 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$).

На рис. 9 зображено вплив матеріалу досліджуваних перемішувачів на кінетику розчинення бензойної кислоти у воді під час пневматичного перемішування розчину. Процес проводили за сталих параметрів: температура рідини $t=16^\circ \text{C}$, надлишковий тиск $P = 49050 \text{ Па}$, маса бензойної кислоти $m = 7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ та об'єм розчину $V = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Витрату повітря змінювали у межах $V_c = 0,8 - 5,6 \text{ м}^3/\text{год}$.

Результати досліджень впливу кількості перемішувачих додатків наведені на рис. 10. На основі результатів експериментальних досліджень визначено, що використання хімічно інертних перемішувачих додатків із поліметилметакрилату діаметром $7 \cdot 10^{-3}$ м, та питомою густиною 1280 кг/м^3 дає змогу зменшити вплив піноутворення на процес розчинення бензойної кислоти у воді. Встановлено, що додавання інертних перемішувачих додатків інтенсифікує процес розчинення. Однак, їх зростання понад 2% від об'єму розчину не приводить до суттєвої інтенсифікації перемішування у той час, як енергетичні затрати під час проведення процесу зростають. Тому, на основі міркувань енергозбереження прийняли, що оптимальною кількістю перемішувачих додатків є 2 – 2,5% від об'єму розчину. Цього необхідно і достатньо, щоб запобігти винесенню твердої фази у шар піни, інтенсифікувати розчинення та знизити тривалість процесу.

На рис. 11 зображено кінетику процесу розчинення бензойної кислоти за різних витрат повітря для пневматичного перемішування до концентрації насичення із використанням перемішувачих додатків у кількості 2% від об'єму розчину.

Встановлено, що додавання хімічно інертних перемішувачих додатків позитивно впливає на кінетику процесу розчинення, знижуючи його тривалість і, відповідно, енергозатрати, за рахунок запобігання винесенню твердої фази у шар піни. Аналіз графічної залежності (рис. 11) показує, що додавання перемішувачих кульок та зростання витрати повітря до $1,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ призводить до зменшення середньої тривалості процесу розчинення від $12 \cdot 10^3 \text{ с}$ до $7,8 \cdot 10^3 \text{ с}$. Разом з тим, дана витрата повітря є граничною у наших дослідженнях, оскільки її збільшення понад $1,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ($5,6 \text{ м}^3/\text{год}$) призводить до переходу близько 80% розчину у стан піни.

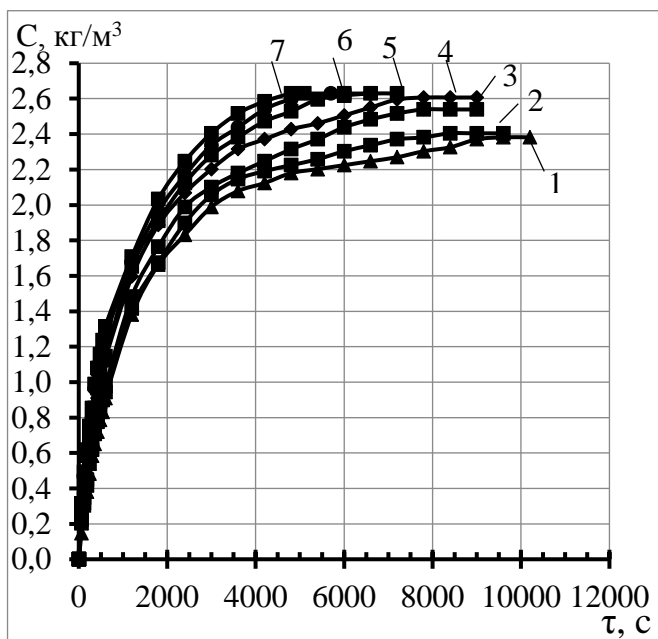


Рис. 11. Залежність зміни концентрації бензойної кислоти у часі зі зміною витрати повітря

1 – $V_c=22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $V_c=44 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – $V_c=67 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 4 – $V_c=89 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 5 – $V_c=111 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 6 – $V_c=133 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 7 – $V_c=156 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$

Кінетичні закономірності розчинення частинок калію хлориду досліджували в апараті з мішалкою. Розчинення проводили за температури $16 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Аналіз проводили визначенням концентрації іонів хлору.

На основі експериментальних та розрахованих даних побудували залежності зміни концентрації калію хлориду у розчині з часом $C=f(\tau)$ за різних чисел обертів механічної мішалки та зміни густини розчину зі зміною концентрації. Отримані дані представлені на рис. 12 і 13.

Для температури дослідів 16°C концентрацію насичення визначали із розрахункової залежності:

$$C_s = 256,0 + 2,28355t - 4,8538 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 = 291,3 \text{ кг/м}^3 \quad (8)$$

Отримано рівняння (9), яке дає змогу встановити залежність між нерозчинною часткою твердої фази y та концентрацією компонента у рідині C .

$$C_{\max}(1 - y) = C. \quad (9)$$

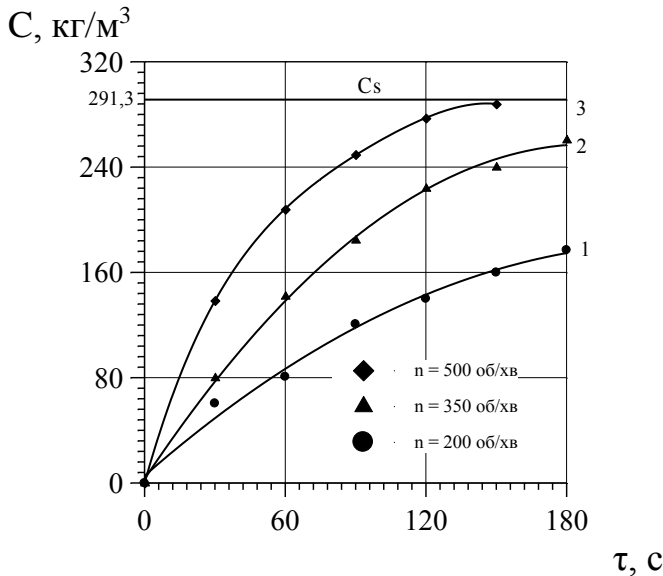


Рис. 12. Залежність зміни концентрації калію хлориду C від часу розчинення τ , с за чисел обертів n (об/хв): 1 – 200; 2 – 350; 3 – 500

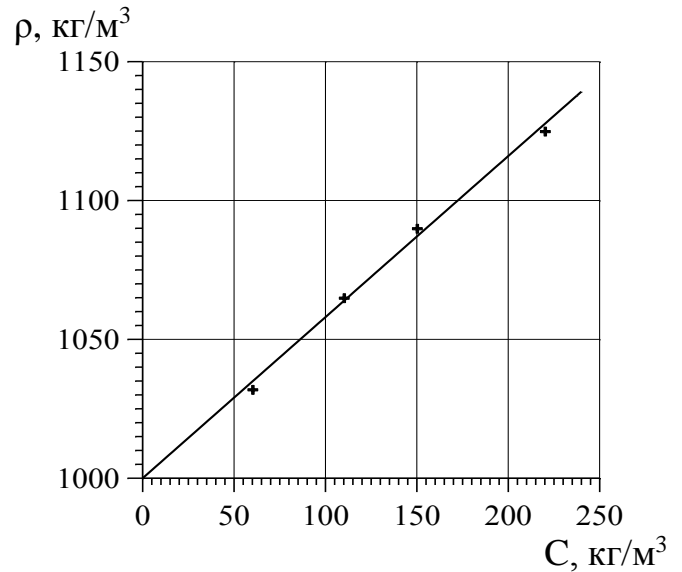


Рис. 13. Залежність зміни густини розчину калію хлориду ρ зі зміною концентрації C

Графічна залежність (рис.13) є прямолінійною, що характерно і для інших систем, які відповідають рівнянню:

$$\rho = \rho_0 + \alpha \cdot C, \quad (10)$$

де: ρ_0 – густина чистого розчинника за даної температури; α – коефіцієнт пропорційності.

$$\rho = 1000 + 0,58 \cdot C, \quad (11)$$

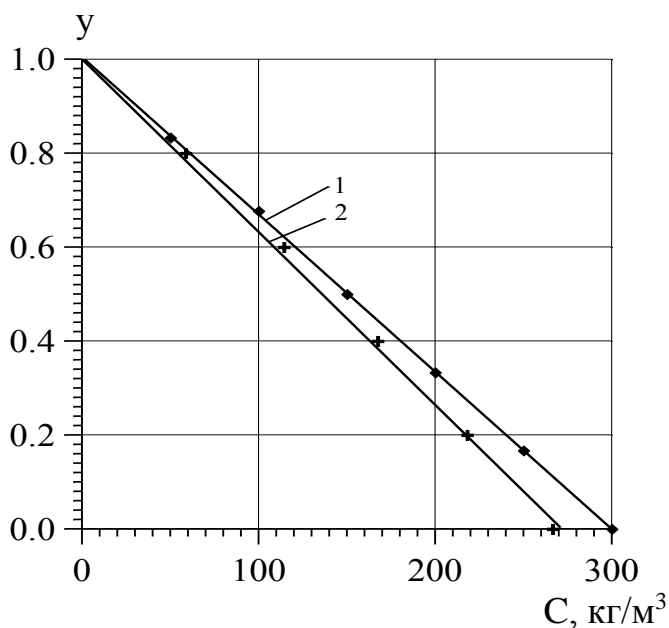


Рис. 14. Залежність між ступенем розчинення твердої фази y та концентрацією у розчині калію хлориду C під час періодичного розчинення
1 – розрахунок згідно із лінійним балансовим рівнянням (9);
2 – розрахунок згідно із нелінійним балансовим рівнянням (13).

Аналіз графічної залежності показує розбіжність результатів розрахунків за лінійним рівнянням (9), згідно з яким густина рідинного середовища та його об'єм приймаються постійними, та нелінійним (13).

Значення максимальної концентрації C_{\max} для умов дослідження складало 300 кг/м^3 . Отримані та розраховані дані представлено на рис.14, крива 1.

Рівняння (9) не враховує зміну об'єму рідкої фази під час розчинення твердої речовини через збільшення густини рідини (рис. 13). Рівняння матеріального балансу зі змінним об'ємом визначали із залежності:

$$\begin{aligned} V \cdot \rho - V_0 \cdot \rho_0 &= M_0 - M \\ V \cdot C &= M_0 - M \end{aligned} \quad (12)$$

Сумісний розв'язок рівнянь (10) та (12) дає змогу визначити величини V та C залежно від відносної частки твердої фази, яка не розчинилась:

$$\begin{aligned} V &= V_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_0 - C \cdot (1-a)} \\ C &= C_{\max} \cdot \frac{1-y}{1+(1-a) \cdot \frac{C_{\max}}{\rho_0} \cdot (1-y)} \end{aligned} \quad (13)$$

Теоретичний розрахунок концентрації калію хлориду згідно із залежністю (13) і результати розрахунку наведено на рис. 14, крива 2.

Залежність між ступенем розчинення твердої фази y та концентрацією у розчині калію хлориду C під час періодичного розчинення зображено на рис. 14.

Найбільше відхилення спостерігається в області високих концентрацій. Наприклад, для ступеня розчинення 0,9 (значення y дорівнює 0,1) концентрація згідно з нелінійним рівнянням складає 240 кг/м³, а за лінійним рівнянням 270 кг/м³. Похибка при цьому становить 12,5%.

Дослідження тепломасообміну під час взаємодії твердого тіла з рідким реагентом проводили на кулястій частинці магнію, який розчиняли в нітратній кислоті. Дана реакція належить до дифузійно контрольованих і не лімітується хімічною кінетикою. Тепловий ефект цієї взаємодії складає 19385 кДж/кг Mg, або 3740 кДж/кг HNO₃. Визначили значення коефіцієнта масовіддачі β для різних значень концентрацій в області значень концентрації нітратної кислоти 5 – 60 кг/м³.

Гранична умова визначається розподілом тепла, що виділяється на поверхні, і яке розподіляється між розчином та твердою частинкою представляли залежністю:

$$\beta_0 \cdot (1 + \sigma \cdot T_n) C_R \cdot Q_R = \lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_n + \alpha \cdot (T_n - T_1), \quad (14)$$

Початкові умови для даного випадку взаємодії будуть рівні:

$$T(r, \tau = 0) = T_0; T_1(\tau) = T_0. \quad (15)$$

Диференціальне рівняння з граничними та початковими умовами, записане у безрозмірній формі представимо у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{\varphi} \cdot \frac{\partial T}{\partial \varphi}, \\ Bi \cdot (T_n - T_0) + \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=1} = T^* \cdot (1 + \sigma \cdot T_n), \\ T(\varphi, 0) = T_0; T_1(Fo) = 0, \\ \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=0} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Систему (16) вирішували на основі перетворення Лапласа. У випадку, коли коефіцієнт масовіддачі β змінюється незначно, розв'язок можна записати у вигляді:

$$\frac{T - T_0}{T^*} = \frac{1}{Bi} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (Bi - 1)}{[\mu_n^2 + Bi \cdot (Bi - 1)] \cdot \cos \mu_n} \cdot \frac{\sin \mu_n \cdot \varphi}{\mu_n \cdot \varphi} \cdot e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (17)$$

Розв'язок (17) дає змогу теоретично визначити температуру у центрі кулястої частинки, що дозволяє експериментально перевірити теоретичний розв'язок та допущення незначної зміни коефіцієнта масовіддачі у рідинній фазі. У центрі кулі значення $\varphi = 0$, тоді:

$$\frac{T_u - T_0}{T^*} = \frac{1}{Bi} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (Bi - 1)}{[\mu_n^2 + Bi \cdot (Bi - 1)] \cdot \cos \mu_n} e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (18)$$

Дослідження проводили на експериментальній установці в ємності, у яку заливали розчин нітратної кислоти заданої концентрації. Температуру в системі підтримували постійною. Експериментально встановлено взаємозв'язок між кінетичними коефіцієнтами масовіддачі β та тепловіддачі α (у межах $1 \cdot 10^{-4} \leq \beta \leq 4 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$), у вигляді розрахункової залежності:

$$\alpha = 750 + 1,7 \cdot 10^7 \cdot \beta \quad (19)$$

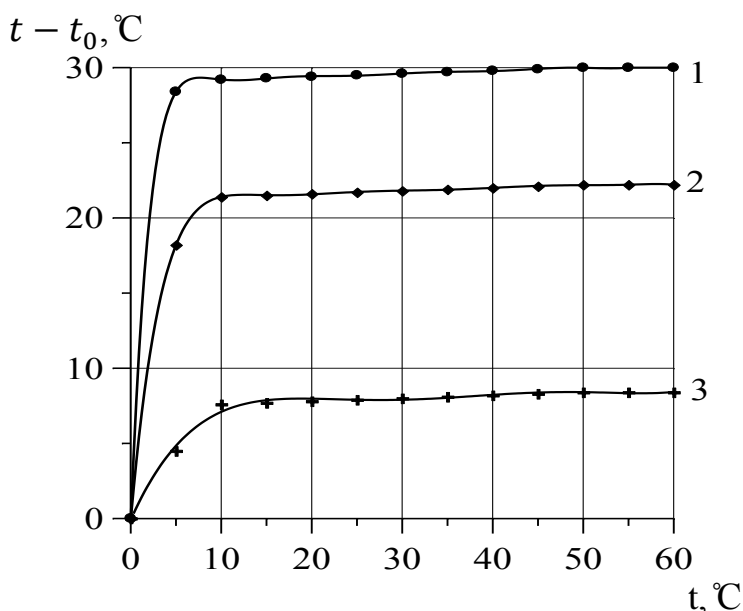


Рис. 15. Порівняння розрахункових (суцільні лінії) та експериментальних (точки) значень температур центра кулі за різних концентрацій кислоти: 1 – 141 кг/м³; 2 – 113,3 кг/м³; 3 – 55 кг/м³

Визначили коефіцієнти масовіддачі для полідисперсної бензойної кислоти та залежність коефіцієнта масовіддачі від концентрації розчину, а також зміни поверхні масообміну внаслідок зміни діаметра частинок полідисперсної твердої фази зі зміною концентрації.

Кількість частинок $N_{\text{ч}}$ у наважці полідисперсної суміші бензойної кислоти, що подаються на розчинення визначали за залежністю:

$$N_{\text{ч}} = \sum_{j=1}^5 \frac{6 \cdot m_j}{\rho \cdot \pi \cdot d_{\text{чj}}^3}, \quad (20)$$

Масу твердої бензойної кислоти, яка перейшла у розчин за певний проміжок часу, розраховували за залежністю:

Аналіз рис. 15, на якому наведено розрахункові (суцільна лінія) та експериментальні заміри температури (точки), вказує на те, що співпадіння розрахункових та експериментальних значень температур дає змогу використання теоретичного розрахунку температури та їх застосування для визначення фізичних параметрів розчинення, які супроводжується значними тепловими ефектами.

Розроблено математичну модель нестационарного процесу теплообміну з поверхневим джерелом тепла, що дозволяє визначити температури у твердому тілі та рідинному середовищі.

$$m_{pi} = V \cdot (C_i - C_{i-1}), \quad (21)$$

Масу твердої бензойної кислоти, яка залишилася нерозчиненою у розчині, розраховували за залежністю:

$$m_{\tau i} = m_{i-1} - m_{pi} \quad (22)$$

У зв'язку з тим, що експериментально визначити зміну розмірів частинок кожної фракції неможливо, припускали, що діаметри всіх частинок зменшуються на однакову величину Δ . Дане припущення обґрунтовано тим, що частинки всіх фракцій рівномірно омиваються рідиною і їх розчинність також буде рівномірною. Кількість нерозчиненої бензойної кислоти після кожного експерименту представляли у наступному вигляді:

$$m_{\tau i} = \frac{\pi}{6} \cdot \rho \cdot \sum_{j=1}^n N_{i,j} \cdot (d_{i,j} - \Delta_i)^3 \quad (23)$$

На рис. 16. наведено теоретично розраховані значення зміни в часі діаметрів частинок бензойної кислоти для кожної із фракцій.

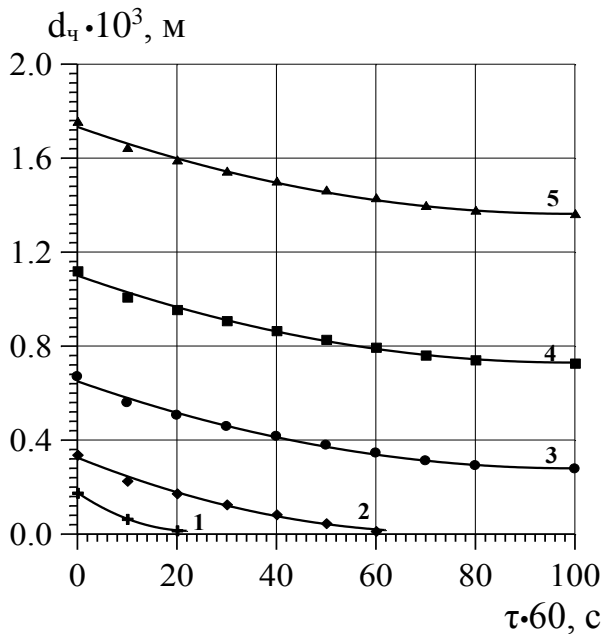


Рис. 16. Залежність зміни діаметра дисперсних частинок бензойної кислоти у часі для фракцій: 1 – $(0,16 \div 0,315) \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $(0,315 \div 0,63) \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $(0,63 \div 1,25) \cdot 10^{-3}$ м; 4 – $(1,25 \div 2,5) \cdot 10^{-3}$ м; 5 – $(2,5 \div 5,0) \cdot 10^{-3}$ м

В результаті експериментальних досліджень та розрахунків спостерігаємо зникнення найменшої фракції $(0,16 \div 0,315) \cdot 10^{-3}$ м через 20 хвилин, а через 60 хвилин – фракції $(0,63 \div 1,25) \cdot 10^{-3}$ м.

Поряд із розчиненням окремих фракцій суміші бензойної кислоти встановили особливості масообміну для всієї полідисперсної суміші.

Зміна коефіцієнта масовіддачі полідисперсної бензойної кислоти зі зміною концентрації розчину за сталої витрати повітря зображена на рис. 17.

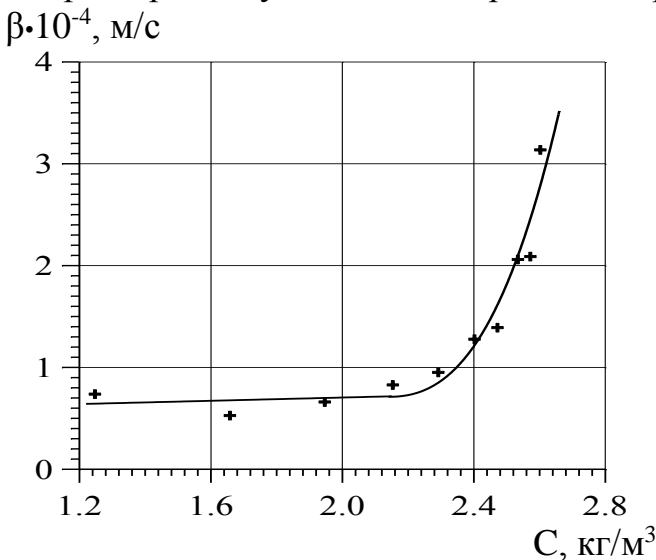


Рис. 17. Залежність зміни коефіцієнта масовіддачі полідисперсної бензойної кислоти зі зміною концентрації розчину за сталої витрати повітря

Зміну сумарної поверхні всіх частинок під час експерименту визначили зі залежності:

$$F_i = \sum_{j=1}^n (N_{\tau i,j} \cdot \pi \cdot d_{\tau i,j}^2) \quad (24)$$

Коефіцієнт масовіддачі від твердих частинок бензойної кислоти у розчин знаходили зі залежності:

$$\beta_i = \frac{m_{P_i}}{F_i \cdot \left(C_s - \frac{C_i + C_{i-1}}{2} \right) \cdot \tau_i}, \quad (25)$$

Поверхня частинок всіх фракцій на початку дослідів становила:

$$F_0 = \sum_{j=1}^5 (N_{q_{0,j}} \cdot \pi \cdot d_{q_{0,j}}^2) \quad (26)$$

Поверхня масообміну під час розчинення зменшується в часі, а концентрація розчину зростає.

Залежність коефіцієнта масовіддачі зі зміною концентрації розчину у часі та за змінної витрати стиснутого повітря і дисипації енергії показано на рис. 18 та 19.

Аналіз рис. 19 показує, що коефіцієнт масовіддачі $\beta_{\text{сеп}}$ зі зростанням витрати повітря і дисипації енергії в апараті зростає. Це пояснюється зростанням швидкості омивання твердих частинок розчином та зменшенням товщини пограничного шару навколо твердої частинки.

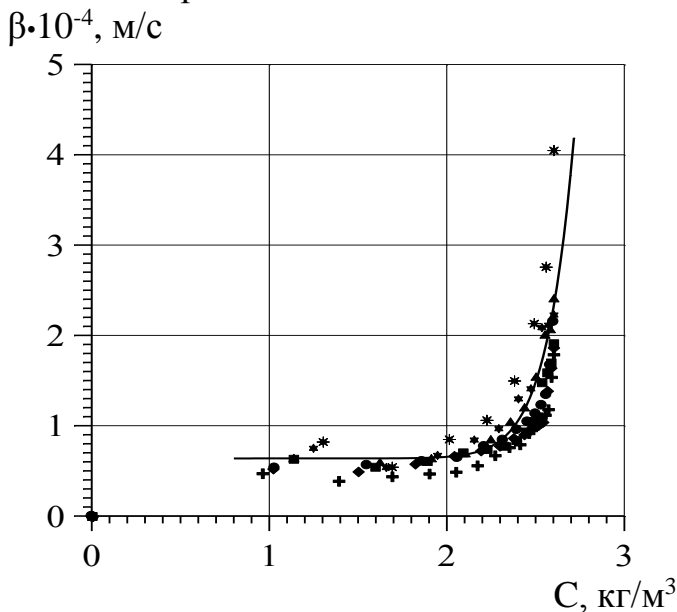


Рис. 18. Зміна коефіцієнта масовіддачі від концентрації розчину зі зміною витрати стиснутого повітря під час розчинення полідисперсної бензойної кислоти у воді: $+$ $0,22 \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{с}$; \blacklozenge $0,44 \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{с}$; \blacksquare $0,67 \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{с}$; \bullet $0,89 \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{с}$; \blacktriangle $1,11 \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{с}$; \star $1,33 \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{с}$; $*$ $1,56 \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{с}$

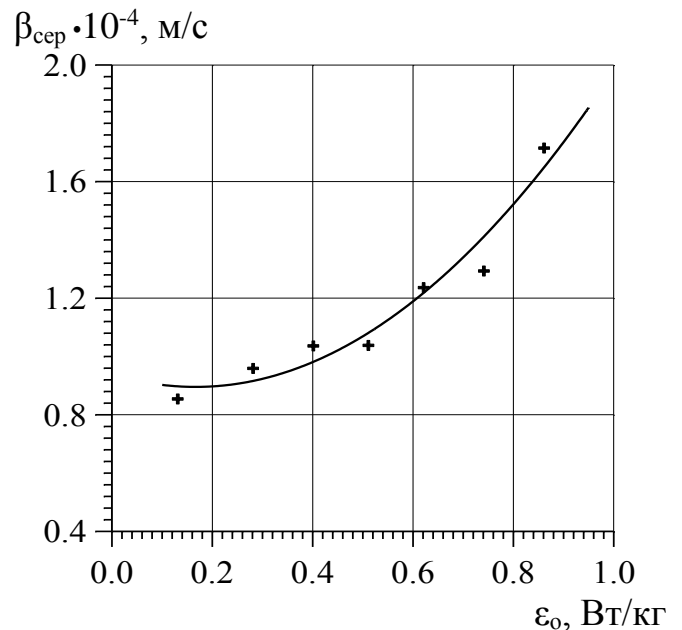


Рис. 19. Залежність зміни коефіцієнта масовіддачі зі зміною дисипації енергії в апараті під час розчинення бензойної кислоти за різних витрат стиснутого повітря

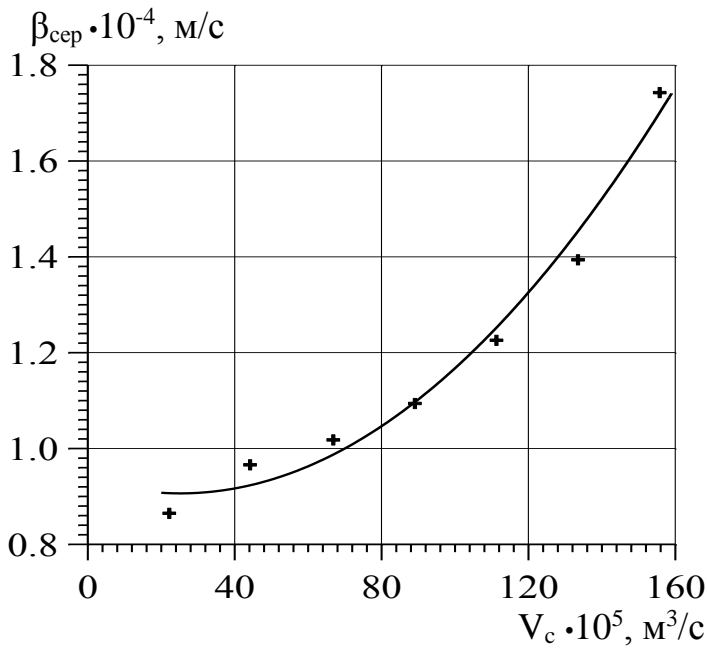


Рис. 20. Залежність зміни коефіцієнта масовіддачі зі зміною витрати стиснутого апараті під час розчинення

Гідродинамічний режим, за якого здійснюється процес, впливає на коефіцієнт масовіддачі від поверхні твердої частинки у розчин. Концентрація бензойної кислоти під час проведення дослідів була незначною ($C_s = 2,63 \text{ кг/м}^3$), тому розрахунок числа Шмідта визначали як для чистої дистильованої води.

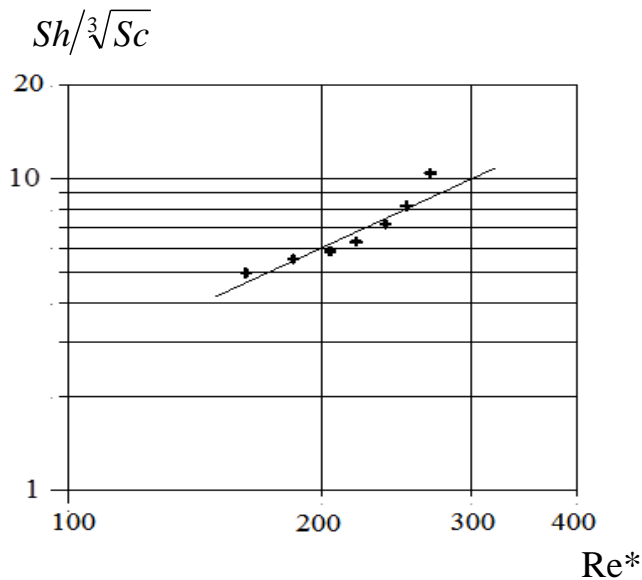


Рис. 21. Узагальнення результатів експериментального визначення коефіцієнта масовіддачі бензойної кислоти під час пневматичного перемішування

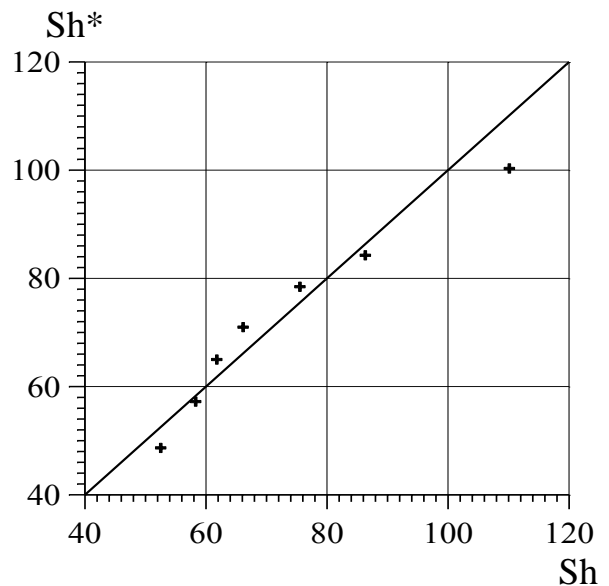


Рис. 22. Кореляційна залежність між розрахованими Sh і експериментальними Sh^* значеннями чисел Шервуда

Графічна залежність коефіцієнта масовіддачі від об'ємної витрати стиснутого повітря наведена на рис. 20.

Для визначення коефіцієнтів A і m експериментальні дані представляли у вигляді графічної залежності $Sh / \sqrt[3]{Sc} = f(Re^*)$ у логарифмічних координатах (рис. 21). Порівняння розрахункових чисел Шервуда з експериментальними значеннями зображено на рис. 22.

Результати експериментальних досліджень апроксимували степеневу функцією і отримали розрахункову залежність для визначення числа Шервуда у вигляді:

$$Sh^* = 8 \cdot 10^{-3} \cdot Re^{1.25} \cdot \sqrt[3]{Sc}, \quad (27)$$

Отримана розрахункова залежність (27) дає змогу з достатньою для практичних розрахунків точністю визначити значення числа Шервуда і, відповідно, коефіцієнта масовіддачі в межах зміни числа Рейнольдса $100 \leq Re \leq 300$.

У п'ятому розділі, представлено розроблену принципову технологічну схему розчинення полідисперсних твердих матеріалів під час пневматичного перемішування (рис. 23).

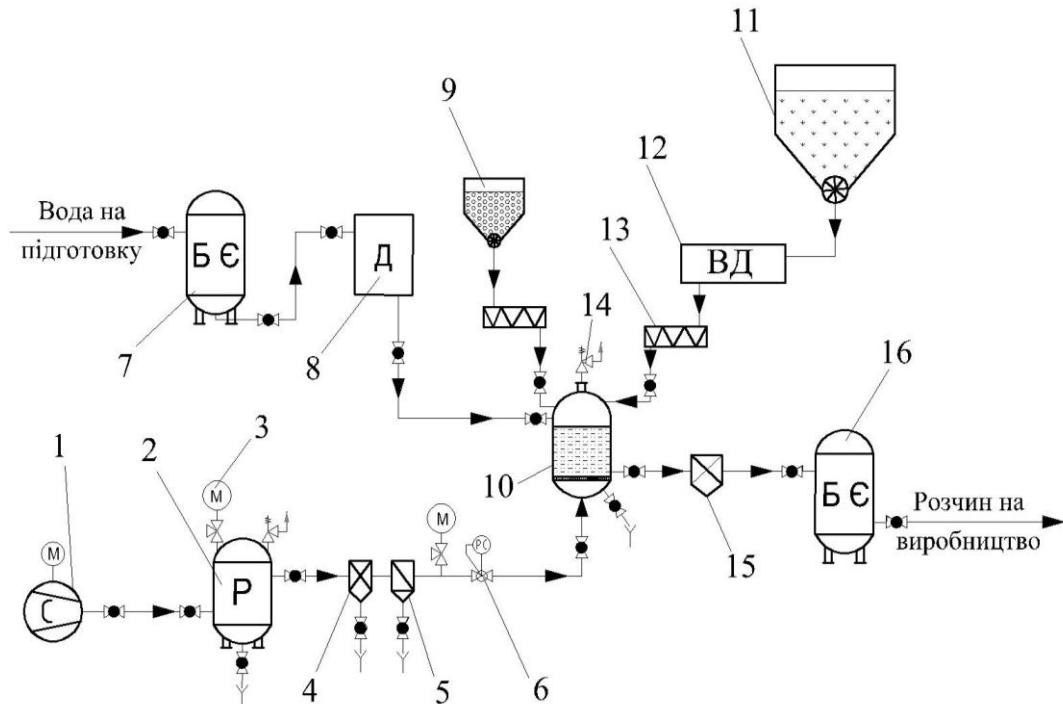


Рис. 23. Технологічна схема вузла для розчинення бензойної кислоти

1 – компресор; 2 – повітряний збірник (ресивер); 3 – манометр; 4 – магістральний фільтр грубої очистки; 5 – фільтр тонкої очистки для стисненого повітря; 6 – повітряний редуктор; 7 – буферна ємність (БЄ); 8 – дистильатор-стерилізатор (Д); 9 – бункер-дозатор для перемішуючих додатків; 10 – реактор для розчинення; 11 – бункер-дозатор для полідисперсної бензойної кислоти; 12 – ваговий дозатор (ВД); 13 – шнековий живильник; 14 – відведення повітря з реактора; 15 – фільтраційний стерилізатор; 16 – буферна ємність (БЄ) для готового розчину.

Наведена методика розрахунку обладнання для розчинення твердих полідисперсних матеріалів у рідині під час пневматичного перемішування розчину. Представлено результати експериментальних дослідження розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти у пілотній установці об'ємом $0,3 \text{ м}^3$, які підтверджують результати теоретичних і експериментальних досліджень наведених у дисертаційній роботі.

ВИСНОВКИ

1. Процеси розчинення твердих полідисперсних матеріалів під час пневматичного перемішування розчину недостатньо досліджені в аспекті гідродинаміки, тепло- і масообміну, відсутнє їх математичне моделювання, взаємозв'язок між тепловими і дифузійними явищами.

2. Обґрунтовано вибір об'єктів дослідження та визначено їх фізико-хімічні та фізико-механічні характеристики, розроблено принципові схеми експериментальних установок рис. 1 – рис. 3.
3. Експериментально досліджено гідродинаміку руху бульбашок стисненого повітря у водному розчині під час пневматичного перемішування. За умов квазістаціонарного режиму визначено відривний розмір бульбашок повітря ($\delta = 3,4 \cdot 10^{-3}$ м) з отворів барботеру та розраховано швидкість їх витікання ($\omega_c = 0,23$ м/с).
4. Визначено розподіл енергії в апараті для розчинення під час пневматичного перемішування розчину в межах квазістатичного режиму за різних витрат стиснутого повітря та визначено його оптимальну витрату (рис. 4). Наведено результати чисельного моделювання, які підтверджують справедливість прийнятих припущень теоретичних розрахунків процесу пневматичного перемішування розчину. Виконано теоретичний розрахунок розчинення полідисперсної фази на основі кінетичної моделі процесу та показано задовільне співпадіння теоретичних результатів з експериментальними даними (рис. 5).
5. Експериментально встановлено залежність зміни концентрації бензойної кислоти від тривалості процесу розчинення та густини розчину від концентрації. Запропоновано розрахункові залежності (6) і (7) для прогнозування цих змін. Встановлено, що додавання хімічно інертних перемішувачів додатків (кульок поліметилметакрилату діаметром $7 \cdot 10^{-3}$ м), у кількості 2 – 2,5% від об'єму розчину позитивно впливає на кінетику процесу розчинення, знижуючи його тривалість, внаслідок запобігання винесенню твердої фази у шар піни і на стінки експериментальної ємності (рис. 9 і рис. 10).
6. Розроблено математичну модель нестационарного процесу теплообміну з поверхневим джерелом теплоти (14) – (18), що дало змогу встановити взаємозв'язок між кінетичними коефіцієнтами масовіддачі β та тепловіддачі α у вигляді розрахункової залежності (19).
7. Експериментально визначено залежність коефіцієнта масовіддачі від концентрації розчину за різних витрат газової фази (рис. 18) та зі зміною дисипації енергії повітря (рис. 19) з врахуванням зміни сумарної поверхні всіх фракцій полідисперсної суміші бензойної кислоти під час пневматичного перемішування. Отримано розрахункову залежність числа Шервуда від числа Шмідта та Рейнольдса $Sh^* = 8 \cdot 10^{-3} \cdot Re^{1.25} \cdot \sqrt[3]{Sc}$, що дає змогу з достатньою для практичних розрахунків точністю розрахувати коефіцієнт масовіддачі в межах зміни числа Рейнольдса $100 \leq Re \leq 300$ (рис. 21, 22).
8. Розроблено принципову технологічну схему (рис. 23) і методику розрахунку процесу розчинення твердих полідисперсних матеріалів під час пневматичного перемішування розчину.

Основні умовні позначення

M_0 – початкова маса твердої фази, кг; M – біжуче значення маси, кг; \bar{C}_l – середня концентрація солі у відібраній пробі, кг/м³; τ – час, с; β – коефіцієнт масовіддачі під час розчинення, м/с; F – поверхня частинок, м²; C_s – концентрація насичення, кг/м³; d –

діаметр частинки, m ; K_2SO_4 – сульфат калію; KCl – калію хлорид; C_6H_5COOH – бензойна кислота; V – об'єм, m^3 ; t – температура, $^{\circ}C$; Δ – зміна діаметра твердої частинки, m ; M_0 , M – початкова та поточна маси твердої фази у будь-який заданий момент часу, kg ; j – кількість фракцій полідисперсної суміші бензойної кислоти; m_j – маса наважки бензойної кислоти j -тої фракції, kg ; ρ – густина бензойної кислоти, kg/m^3 ; \bar{d}_{qj} – усереднений початковий діаметр j -тої фракції, m ; $i = 1..m$, m – кількість точок експерименту; $C_i - C_{i-1}$ – зміна концентрації бензойної кислоти у розчині за певний проміжок часу, kg/m^3 ; V – об'єм розчину, m^3 ; V_c – об'ємна витрата повітря, m^3/c ; D^t – коефіцієнт молекулярної дифузії, m^2/c ; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості розчину, за температури експерименту, $Pa \cdot c$; ν – кінематична в'язкість розчину, m^2/c ; ω_0 – фіктивна швидкість газу з отвору барботера, m/c ; L – лінійний розмір (діаметр) апарату, m ; d_{qi} – середній діаметр частинок впродовж дослідів за даної витрати стиснутого повітря, m ; A , m – невідомі коефіцієнти, які визначали на основі експериментальних даних для знаходження числа Шервуда; δ – похибка між розрахунковими та експериментальними значеннями чисел Шервуда, %.

Безрозмірні комплекси: $Sc = \frac{\nu}{D^{16}}$ – число Шмідта; $Re^* = \frac{\sqrt[3]{\omega_0 \cdot g \cdot L \cdot d_{qi}}}{\nu}$ –

критерій Рейнольдса; $Sh = \frac{\beta \cdot d_{qi}}{D^{16}}$ – число Шервуда; $\varphi = \frac{r}{R}$ – безрозмірний радіус; $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$ – число Фур'є; $Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}$ – число Біо; $T^* = \frac{\beta_0 \cdot C_R \cdot Q_R \cdot R}{\lambda}$ – параметр, що має розмірність температури; $b = 0.2 \cdot \sqrt{\mu} \cdot \sqrt[3]{\rho}$ – допоміжний коефіцієнт для визначення коефіцієнта молекулярної дифузії.

Список опублікованих наукових праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз

1. Danyliuk O.M., Atamaniuk V. M., Hnativ Z. Ya. The influence of mixing solid particles on the kinetic of benzoic acid dissociation during the pneumatic mixing of solution // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України Серія: Технологія та устаткування. – Львів: 2018. – Т. 28 (7) – С. 92–96. (*Index Copernicus*). *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх обробка і узагальнення.*

2. Данилюк О. М., Атаманюк В. М., Гнатів З. Я., Гумницький Я. М., Дослідження масообміну під час пневматичного розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України Серія: Технологія та устаткування. – Львів : 2018. – Т. 28 (8) – С. 101–106. (*Index Copernicus*). *Особистий внесок дисертанта: критичний аналіз джерел літератури, проведення експериментальних досліджень, обробка результатів досліджень.*

Статті у наукових фахових виданнях України

3. Атаманюк В. М., Симак Д. М., Данилюк О. М. Розчинення полідисперсної твердої фази у газорідному потоці // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2016. – № 841. – С. 271–273. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, аналіз та узагальнення результатів, підготовка матеріалів до публікації.*

4. Данилюк О. М., Атаманюк В. М., Гумницький Я. М., Бачик М. Д. Дослідження закономірностей процесу періодичного розчинення полідисперсних частинок бензойної кислоти під час пневматичного перемішування // Інтегровані технології та енергозбереження, В.4. – 2017. – С. 36-40. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів, підготовка матеріалів до публікації.*

5. Атаманюк В. М., Симак Д. М., Данилюк О. М., Гумницький Я. М. Періодичне розчинення калій хлориду за зміни параметрів системи // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Хімія, технологія речовин та їх застосування. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. — № 868. — С. 100–105. *Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, критичний аналіз джерел літератури.*

6. Гумницький Я. М., Атаманюк В. М., Симак Д. М., Данилюк О. М. Тепломасообмін під час взаємодії твердого тіла з рідким реагентом // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2017. – Т. 81(1). – С. 50–54. *Особистий внесок здобувача: аналіз джерел літератури, проведення експериментальних досліджень, математична обробка отриманих результатів.*

7. Данилюк О. М., Атаманюк В. М., Гумницький Я. М. Моделювання руху бульбашок стисненого повітря у апараті з пневматичним перемішуванням // Одеська національна академія харчових технологій. Моделювання комбінованих процесів переносу. Оптимізація обладнання і систем. Наукові праці, Т.82 (1). – 2018. – С.61–65. *Особистий внесок дисертанта: критичний аналіз джерел літератури, проведення експериментальних досліджень та їх математичне оброблення.*

Тези доповідей

8. O. Danyliuk, V. Atamanyuk, O. Halaniya “Dissolution polydisperse solid phase in the gas-liquid flow” 6-th international youth science forum “Litteris et artibus” November 24–26, 2016 Lviv, Ukraine P. 422-423. *Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень аналіз отриманих результатів, підготовка матеріалів до публікації.*

9. Данилюк О. М., Атаманюк В.М. Кінетика розчинення полідисперсних частинок бензойної кислоти International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering», Ukraine, Lviv, June 26-30th, 2017 С.126-127. *Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень аналіз отриманих результатів, підготовка матеріалів до публікації.*

10. Данилюк О. М. Атаманюк В.М. Процес розчинення твердих полідисперсних матеріалів при пневматичному перемішуванні на прикладі розчинення Бензойної кислоти Збірник матеріалів Семінар “Сталий розвиток- погляд у майбутнє”, Львів, 15

вересня, 2017, ст.20. *Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, їх обробка і підготовка до публікації.*

11. Danyliuk O., Atamanyuk V., Bachyk M., Romanov V. Dissolution of solid polydisperse materials during pneumatic mixing 7-th international youth science forum “Litteris et artibus” November 23–25, 2017 Lviv, P. 99-100. *Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень аналіз отриманих результатів, підготовка матеріалів до публікації.*

12. Данилюк О. М., Атаманюк В. М., Гумницький Я. М., Бачик М. Д. Моделювання руху бульбашок стисненого повітря у квазістатичному режимі під час пневматичного перемішування розчину. Шоста міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ-2018» Збірник наукових статей, С.107-109. *Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень аналіз отриманих результатів, підготовка матеріалів до публікації.*

13. Данилюк О. М., Атаманюк В.М., Бачик М.Д. Вплив гідродинамічних умов на процес розчинення бензойної кислоти та коефіцієнт масовіддачі під час пневматичного перемішування V Міжнародний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування 26-29 вересня 2018 року, С.120. *Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень аналіз отриманих результатів, підготовка матеріалів до публікації.*

АНОТАЦІЯ

Данилюк О.М. Масообмін у процесах розчинення у шарі дисперсного матеріалу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – «Процеси та обладнання хімічної технології» (16 – Хімічна та біоінженерія) – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2018.

Розчинення твердих полідисперсних матеріалів є складним технологічним, тепло- і масообмінним процесом. Апарати для розчинення є громіздкими, а сам процес вимагає, окрім енергетичних, значних капітальних затрат. Тому, на сучасному етапі розвитку багатьох галузей промисловості в Україні існує потреба інтенсифікації процесів розчинення, створенні, розробленні високоефективних та екологічно безпечних технологій і обладнання. Одним із перспективних методів інтенсифікації розчинення твердої полідисперсної фази є проведення процесу в умовах барботування системи стиснутим повітрям. Інтенсифікація процесу відбувається завдяки інтенсивному переміщенню бульбашок по об'єму апарату, їх розтріскуванню та постійному омиванні твердих частинок рідиною.

В роботі наведено теоретичні та експериментальні дослідження гідродинаміки, кінетики та тепломасообмінних процесів для використання науково обґрунтованих параметрів проведення процесу розчинення з використанням енергії стиснутого повітря. На основі аналізу джерел літератури сформовано мету і завдання досліджень. Представлено основні фізичні характеристики полідисперсної суміші бензойної кис-

лоти та неорганічних солей, опис експериментальної установки для дослідження гідродинаміки та тепломасообмінних процесів під час розчинення вказаних дисперсних матеріалів, методики визначення основних фізико-механічних характеристик досліджуваних матеріалів. Представлено результати експериментальних досліджень руху бульбашки стисненого повітря у водному розчині, в апараті для розчинення під час пневматичного перемішування. Встановлено, що додавання хімічно інертних перемішувачів додатків позитивно впливає на кінетику процесу розчинення полідисперсної суміші, знижуючи його тривалість і, відповідно, енергозатрати, за рахунок часткового запобігання винесенню твердої фази у шар піни. Також визначено гранично допустиму економічно обґрунтовану витрату, за якої зберігається інтенсивний масообмін твердої фази з рідкою.

На основі експериментальних досліджень та обчислених даних встановлено значення коефіцієнта масовіддачі під час розчинення полідисперсної суміші бензойної кислоти за різних витрат повітря і узагальнено залежність коефіцієнта масовіддачі від концентрації розчину з достатньою для практичних розрахунків точністю. Порівняння розрахованих значень коефіцієнтів масовіддачі з експериментально визначеними показало їх задовільне співпадіння для застосування отриманих розрахункових залежностей на практиці.

Визначено коефіцієнт молекулярної дифузії під час розчинення за умов пневматичного перемішування розчину. Основні результати роботи передані для впровадження у виробництво та в навчальний процес.

Ключові слова: полідисперсна суміш, бензойна кислота, пневматичне перемішування, барботер, газорідний потік, коефіцієнт молекулярної дифузії, коефіцієнт масовіддачі.

ANNOTATION

O.M. Danyliuk “Mass exchange in processes of dissolution in disperse material layer”. – Manuscript.

Dissertation for obtaining of scientific degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D.) on specialty 05.17.08 – “Processes and equipment for chemical industries” (16 – Chemical and biological engineering) – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Sciences of Ukraine, Lviv, 2018.

The dissolution of solid polydisperse materials is technologically complicated heat and mass exchange process. In major cases, it is related to the high energy consumption and complicated process of interphase diffusion interaction of substances in the liquid – solid phase system. Its efficiency highly influences the cost of products. From the other side, the solid body dissolution processes, which occur in the diffusion area, can be determined by laws of molecular and convective diffusion. Each interaction during dissolution is accompanied by the proper heat effect, which can't be neglected, as such mass exchange continuously connected with heat and mass exchange. Dissolution apparatuses have big sizes, and the process require big capital expenses additionally to energy. In the initial stages dissolution occurs in non-stationary conditions. Thus, on the modern stage of development of many industrial branches of Ukraine there exists the necessity of dissolution processes intensification, creation and development of highly effective and ecologically safe technologies and equipment for their realization. The selection of method, optimal mode, and dissolution ap-

paratus construction refers to specificities of technological processes and properties of dissolution materials, and should ensure the conservation of their qualitative features and minimal energy consumption.

Among the perspective methods of intensification of solid polydisperse phase dissolution is process fulfilment in conditions of bubbling of system by compressed air. Process intensification occurs due to intensive mixing of bubbles in the apparatus volume, their cracking and continuous washing of solid particles by liquid. The solvent with low concentration of component is constantly supplied into the surface of the diffusion area with the high solid phase concentration, with the formation of high concentration gradient. Thus, there creates non-stationary conditions of intensive mass exchange, which characterizes by high values of mass transfer coefficients.

Additionally, the application of compressed air for solution mixing allow excluding of shortcomings, which refers to application of mechanical mixing devices. System bubbling allow also maintaining of stable temperature of solution, as heat, which emits from the system, transfers out of the dissolution zone.

Based on the critical analysis of literature sources on the main methods of solid disperse materials dissolution, it was determined that dissolution during bubbling of solution by compressed air is insufficiently investigated. In the research it was proved that the present theoretical and experimental investigations of hydrodynamics, external and internal mass exchange is insufficient for wide industrial application of such method of benzoic acid dissolution and apparatus for such processes, namely for dissolution of solid polydisperse materials during pneumatic mixing. In the research there are presented theoretical and experimental investigations of hydrodynamics, kinetics, and heat and mass exchange processes for using of scientifically proved parameters of dissolution processes fulfilment with using of compressed air energy. Based on the analysis of literature sources there were formed goal and tasks of the investigation.

In the current research there presented characteristics of polydisperse mixture of benzoic acid, description of experimental laboratory stand for investigation of hydrodynamics, heat and mass transfer processes during dissolution of disperse materials, methods of determination of main physical and mechanical properties of investigated materials, namely porosity, specific surface, bulk density, fractional content, averaged diameter of polydisperse mixture. Additionally, there was performed measuring error estimate.

There were represented results of experimental investigations of compressed air bubble motion in water solution inside the apparatus of for dissolution during pneumatic mixing. There was determined the separation sizes of bubbles in conditions of quasi-static air flow from the bubbler and calculated their motion velocity during upward movement in solution. There was determined the energy distribution in apparatus for dissolution during pneumatic mixing of solution in the range of quasi-static mode of motion, and determined optimal and economically feasible compressed air consumption for process execution. In addition, considering the research results generalization it was proved the independency of coefficient of mass deduction from diameter of particles during the dissolution in the gas-liquid flow of solvent.

There was performed the theoretical calculation of dissolution of polydisperse phase based on the kinetic process regularities, and show satisfactory coincidence of theoretical results and experimental data. It was determined, that adding of chemically inertial mixing

additives positively influences on the polydisperse mixture dissolution process kinetics, reducing its duration and, correspondingly, energy consumption, by means of the partial avoiding of solid phase displacement into foam layer. Also, it was determined the maximum permissible economically feasible consumption, by which preserves intensive mass exchange between solid and liquid phase.

Based on the experimental investigations and calculated data it was determined the value of mass deduction coefficient during dissolution of polydisperse mixture of benzoic acid on various compressed air consumption, and generalized the dependency of mass deduction coefficient from the solution concentration with sufficient for practical calculations precision. There was received the calculated dependency for Sherwood criteria determination, which allow determination of coefficients of mass deduction depending on the hydrodynamic mode, during which the process is fulfilled. The comparison of calculated values of mass deduction coefficients with experimentally determined values reveal their satisfactory coincidence for application of practically received calculated dependencies.

There was determined coefficient of molecular diffusion during dissolution in conditions of pneumatic solution mixing.

Keywords: *polydisperse mixture, benzoic acid, pneumatic mixing, bubbler, gas-liquid flow, molecular diffusion coefficient, mass transfer coefficient.*