

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ ТВЕРДИХ РЕЧОВИН В УМОВАХ ДІЇ УЛЬТРАЗВУКУ

Мельник В. М., Ружинська Л. І., Форостянко В. С.

1. Вступ

Процеси розчинення твердих речовин в рідких розчинниках широко використовуються в біотехнологічних і фармацевтичних виробництвах для приготування компонентів живильного середовища, напівпродуктів і допоміжних продуктів на різних технологічних стадіях виготовлення готових продуктів.

Розчинення розглядають як самочинний дифузійно-кінематичний процес, який протікає при зіткненні розчиненої речовини і розчинника [1]. Розчинення важкорозчинних речовин в рідинах процес досить тривалий і трудомісткий та відбувається повільно [2, 3].

Аналіз процесу розчинення твердих речовин в рідких розчинниках дозволяє виділити наступні стадії [4, 5]:

1. Контактуювання поверхні твердого тіла з розчинником, яке супроводжується змочуванням, адсорбцією і проникненням розчинника в мікропори частинок твердого тіла.

2. Молекули розчинника взаємодіють із шарами речовини на поверхні розділу фаз. При цьому відбувається сольватація молекул або іонів і відрив їх від поверхні розділу фаз.

3. Сольватовані молекули і іони переходять в рідку фазу.

4. Вирівнювання концентрації розчиненої речовини у всіх шарах розчинника.

Тривалість процесу розчинення в цілому залежить від швидкості протікання окремих стадій. Друга і третя стадії визначається переважно хімічними процесами, а перша і четверта дифузійними, тобто процесами перенесення речовин. Як показує практика, швидкість розчинення залежить головним чином від швидкості протікання процесів масообміну при розчиненні.

Для інтенсифікації процесу розчинення використовують різноманітні способи:

1. Спосіб прямого обтікання.

2. Розчинення в умовах завислого стану частинок матеріалу.

3. Розчинення при обертальному русі рідини.

4. Розчинення в умовах зміни напрямку і швидкості обтікання рідини пов'язаних з інерцією частинок, а саме:

- розчинення з використанням механічних коливань;
- розчинення з використанням іскрових розрядів у рідині;
- розчинення потоків зі швидкістю, періодично змінюється.

Одним з перспективних напрямків інтенсифікації процесу розчинення твердих речовин в рідких розчинниках є використання акустичних коливань, або, як їх традиційно називають, ультразвукових коливань [6]. Ультразвукові коливання впливають на перетікання процесів розчинення за рахунок частоти, інтенсивності, швидкості акустичних коливань, а також сприяють процесу масопереносу внаслідок виникнення в рідині явищ кавітації та акустичних течій. Вибір акустичної апаратури для проведення процесів розчинення твердих речовин в рідких розчинниках та режимів її роботи зумовлює необхідність вивчення впливу факторів ультразвукового впливу шляхом розроблення математичної моделі процесу [7, 8].

2. Об'єкт досліджень та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження слугує вплив ультразвукового променя на процес розчинення твердих речовин в рідких розчинниках та масопереносу частоти, інтенсивності, швидкості акустичних коливань, а також явищ кавітації та акустичних течій.

Досліджується процес розчинення гранул важкорозчинних неорганічних сполук, наприклад, суперфосфату та карбонат кальцію, магнію, сульфат кальцію.

До недоліків можна віднести тривалий процес розчинення, який тільки частково інтенсифікується механічним перемішуванням. А на розчинення, в умовах дії ультразвуку, інтенсифікація досягається тільки за умови виникнення течій, кавітації, а і за рахунок зміни властивостей води як розчинника.

3. Мета і задачі досліджень

Мета даної роботи полягає в розробленні математичної моделі процесу розчинення твердих речовин в рідких розчинниках в умовах ультразвукових коливання. З'ясування впливу на процес масопереносу частоти, інтенсивності, швидкості акустичних коливань, а також явищ кавітації та акустичних течій. Це дасть змогу розробити методику розрахунку обладнання для проведення процесів розчинення твердих речовин в рідких розчинниках в умовах дії джерела ультразвукового випромінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Провести аналіз процесів розчинення твердих речовин в рідких розчинниках в умовах дії ультразвуку.
2. З'ясувати, від чого залежить швидкість розчинення гранули в умовах турбулентності акустичної течії.
3. З'ясувати, від чого залежить швидкість розчинення гранул в умовах кавітації.

4. Аналіз літературних даних

Відомі дослідження ефективності впливу ультразвукового випромінювання частотою 20 кГц на підвищення коефіцієнта масопередачі та розчинення бензойної кислоти в воді або в 24 % водному розчині гліцерину [9]. У [10] досліджено вплив ультразвукового випромінювання з частотою 19 кГц та

потужністю 475 Вт на тверді дисперсії, а також підвищення розчинності важкорозчинних лікарських препаратів у воді. За допомогою ультразвуку здійснюється зниження вмісту тривалентного заліза (Fe^{3+}) до двовалентного заліза (Fe^{2+}) в виробництві цинку. Доведено, що під дією ультразвуку в будь-яких умовах значно підвищується коефіцієнт масопередачі [11]. В роботі [12] досліджується виділення солей з будівельних матеріалів під дією ультразвукового випромінювання. Порівнюється метод з використанням вібростенду для екстракції солей в воді, який займає 72 години та запропонований метод з використанням ультразвуку, який скорочує цей період часу до менш ніж 1 години. У [13] проводилось дослідження розчинення компонентів целюлози в іонній рідині під дією ультразвуку. Ультразвук з потужністю 30 Вт зменшив час розчинення з 60 хвилин до 20 хвилин. У [14] розглядається інтенсифікація процесу екстракції олії з олійних культур під дією ультразвуку. За допомогою ультразвуку підвищується розчинність олії в розчиннику. У [15] досліджено обробку целюлози та крохмалю ультразвуком, що порушує їх структуру для покращення ферментаційного гідролізу. По отриманим у дані роботі результатам видно, що бродіння відбувається краще, а кінцевий вихід продукту значно зростає.

Аналіз літературних джерел показує, що узагальнене рівняння, яке описує процес розчинення за умови, що швидкість між фазного переходу досить велика, має вигляд [16]:

$$-\frac{dm}{d\tau} = \beta F \cdot (c^* - c), \quad (1)$$

де m – маса гранули, що розчиняється;

F – поверхня гранули;

β – коефіцієнт масовіддачі;

c^* та c – концентрації розчиненої речовини в стані насичення і в розчині відповідно.

Коефіцієнт масовіддачі β залежить від товщини дифузійного примежового шару, який в свою чергу залежить від гідродинамічного примежового шару і від швидкості руху рідини біля поверхні гранули, що розчиняється.

В загальному вигляді коефіцієнт масовіддачі визначається за рівнянням:

$$\beta = \frac{D}{\delta}.$$

Для визначення коефіцієнта масовіддачі використовують критеріальні рівняння, які враховують властивості розчинника, гідродинамічну обстановку при проведенні процесу.

Для процесів розчинення сферичний в умовах вільної конвекції в літературі пропонується рівняння виду [9]:

$$Nu^* = 0,6(Gr \cdot Pr^*)^{0,25}, \quad (2)$$

де:

- критерій Грасгофа:

$$Gr = \frac{gd^3}{\nu^2} \frac{\Delta\rho}{\rho};$$

- дифузійний критерій Прандтля:

$$Pr^* = \frac{\nu}{D};$$

- дифузійний критерій Нуссельта:

$$Nu^* = \frac{\beta d}{D}.$$

Ультразвукові коливання дозволяють інтенсифікувати процеси масопереносу за рахунок виникнення течії в нерухомій рідині та руйнування прилежого шару біля поверхні гранули, що розчиняється.

Аналіз впливу ультразвуку на рідини показує, що в акустичному полі спостерігаються періодичне зміщення частинок, виникають постійні течії, які мають різний характер і походження.

У реальних в'язких середовищах такі течії виникають як у вільному полі, так і поблизу перешкод. Особливий інтерес, з точки зору процесів розчинення, викликає характер взаємодії в'язкої рідини з твердими стінками перешкод, внаслідок якої швидкість тангенціального зміщення частинок середовища (шарів рідини) прилеглих до стінки (поверхні перешкоди) повинна перетворюється в нуль. Передбачається, що товщина шару, в якому спостерігається ця взаємодія, має величину порядку глибини проникнення зсувної хвилі в рідині, коефіцієнт поглинання зсувної хвилі в рідині α_c визначається рівнянням [17]:

$$\alpha_c = \left[\frac{W \rho_o}{2\eta_c} \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Відстань, на якій хвиля затухає, тобто глибина її проникнення, оцінюється співвідношенням [17]:

$$\Delta \approx \left[\frac{12\eta_c}{W\rho_0} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Вихрові течії, які виникають в шарі товщини Δ , спостерігаються переважно на низьких звукових частотах.

Для ультразвукового поля характерними є течії, які виникають у вільному ультразвуковому пучку при високій інтенсивності, що реалізуються в ультразвуковому діапазоні частот.

Течія викликана дією уздовж ультразвукового пучка радіаційного тиску, пов'язаного з поглинанням середовищем енергії ультразвукової хвилі.

Радіаційна сила, яка діє на одиницю об'єму рідини (середовища що поглинає), вздовж напрямку поширення ультразвукових хвиль визначається за формулою [17]:

$$F = \frac{d\omega}{dx}. \quad (5)$$

Ця сила викликає стаціонарну течію, швидкість якої можна розрахувати на підставі гідродинамічного рівняння руху для ідеальної рідини. Позначимо V_0 швидкість стаціонарного акустичного потоку. Тоді рівняння руху для ідеальної рідини [17]:

$$-\frac{d\omega}{dx} = \rho \frac{dV_0}{dt} + \rho V_0 \frac{dV_0}{dx}. \quad (6)$$

Для рідини, що не стискується за умови:

$$\rho = \rho_0 = \text{const}, \quad \frac{dV_0}{dt} = 0. \quad (7)$$

Рівняння руху приймає вид:

$$-\frac{d\bar{\omega}}{dx} = \rho_0 V_0 \frac{dV_0}{dx}. \quad (8)$$

Інтегруємо рівняння в межах:

$x = 0$ – розташування випромінювача;

x – поточна координата.

Враховуючи, що при $x = 0$ – швидкість ультразвукового вітру дорівнює 0 запишемо рівняння збереження енергії [2]:

$$\frac{\rho_0 V_0^2(x)}{2} = \bar{\omega}(0) - \bar{\omega}(x). \quad (9)$$

Виходячи з отриманого рівняння можна записати швидкість стаціонарного акустичного потоку [17]:

$$V_0 = \Delta P R_{mp}^2 (4\eta \cdot x), \quad (10)$$

де R_{mp} – радіус трубки пучка;

ΔP – різниця тиску в точках віддалених на відстані x , що визначається з рівняння:

$$\Delta P = \bar{\omega}(0) - \omega(x) = \bar{\omega}(0) [1 - \omega(0) \cdot e^{-2\alpha_0 x}]. \quad (11)$$

З огляду на зв'язок щільності енергії з інтенсивністю ультразвуку знаходимо [17]:

$$V_0 = I_0 R_{mp}^2 \alpha_0 (2\eta_c C_0), \quad (12)$$

де I_0 – інтенсивність ультразвукового пучка або інтенсивність джерела ультразвуку;

α_0 – амплітудний коефіцієнт поглинання ультразвуку;

C_0 – швидкість звуку у середовищі.

При низьких частотах ультразвуковий вплив має інтенсифікувати процеси масопереносу в прилеглому шарі гранул, при високих – сприяти перемішуванню і усередненню концентрації розчиненої речовини в рідині.

5. Матеріали та методи досліджень

Основою випробувального стенду являється погрузний блок ультразвукових випромінювачів марки УЗП-6-1 (Україна), який формує ультразвуковий промінь частотою 42 кГц з плоским фронтом.

Усередину заповненого водою корпуса випробувального стенду, розміщується циліндрична посудина з рідиною.

Дослідження процесу розчинення проводиться для органічних солей у полі дії ультразвукової кавітації на експериментальній установці (рис. 1, 2).

Експериментальна установка на рис. 1 складається з ультразвукового генератора 1 та ультразвукового перетворювача 2. Ультразвуковий перетворювач являє собою погрузний блок, який встановлюється в ємність 3 з робочою рідиною. На штативі 4 встановлена колба 5 об'ємом $V = 120$ мл. Вимірювання температури здійснюється терморпарою 6.

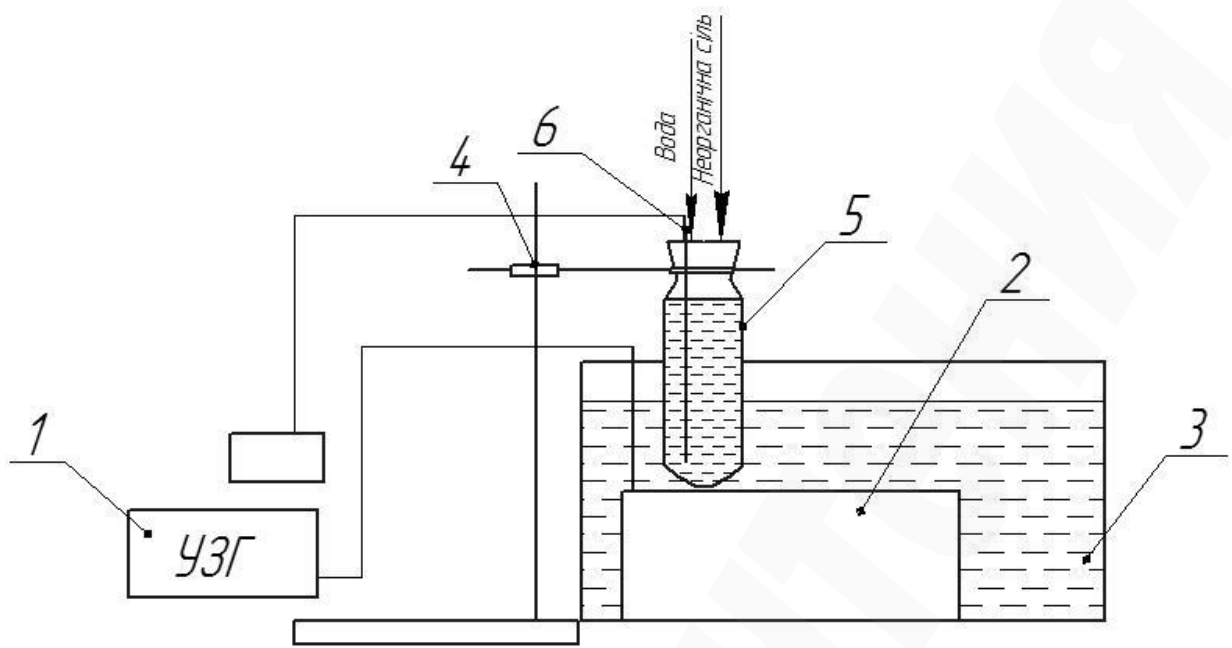


Рис 1. Принципова схема експериментальної установки:
 1 – ультразвуковий генератор; 2 – ультразвуковий перетворювач;
 3 – ємність; 4 – штатив; 5 – колба; 6 – термометр



Рис. 2. Світлина ультразвукової установки: а – ультразвуковий генератор;
 б – ультразвуковий перетворювач 2 (погружний блок)

Джерелом ультразвукових коливань служить низькочастотний ультразвуковий генератор 1 (рис. 2, а) із частотою випромінювання ультразвукових коливань 36 кГц, потужністю 300 Вт та інтенсивністю ультразвукових коливань $1,65 \text{ Вт/см}^3$.

Ультразвуковий перетворювач 2 (погружний блок) (рис. 2, б) виготовлений з нержавіючої сталі, та складається з 6 ультразвукових випромінювачів, які перетворюють електричну енергію в ультразвукові коливання. Погружний блок з'єднаний з ультразвуковим генератором 1 та встановлюється в ємність 3 таким чином, щоб був повністю покритий робочою рідиною. Це пов'язано з тим, що УЗ коливання використовуються в процесах, пов'язаних з рідкими станами

реагентів, оскільки тільки в них виникає специфічний процес – УЗ кавітація, що забезпечує максимальні енергетичні впливи на різні речовини.

В колбу 5 заливаємо 100 мл води. Засипаємо 1, 3, 5, 10, 15 мг неорганічної солі, наприклад суперфосфату. Вмикаємо ультразвуковий генератор 1. Під впливом ультразвукових коливань в рідині відбувається процес кавітації, і як наслідок, відбувається прискорення розчинення солей та інтенсифікація процесу тепло-масообміну. В процесі експериментальних досліджень визначаємо час, протягом якого відбувається розчинення солей та зміну температури розчину в досліджуваному об'ємі.

6. Результати досліджень

Розглянемо процес конвективної дифузії в умовах акустичного впливу і виникнення акустичних течій і мікропотоків при розчиненні твердих частинок у воді. Тверді частинки мають форму сферичних гранул. Встановлено, що в акустичному полі, акустичні течії, звані стаціонарними вихровими потоками рідини, виникають як у вільному просторі (при неоднорідному акустичному полі), так і поблизу різного роду перешкод.

Аналіз процесів масопереносу в умовах ультразвукового впливу показує, що вирівнювання концентрації розчиненої речовини в рідині інтенсифікується під впливом акустичних течій і мікротечій. У прилеглому шарі, поблизу гранул, зменшення опору процесу масопереносу відбувається за рахунок виникнення кавітаційних бульбашок.

Як показано в [18], при розвиненій акустичній кавітації у воді утворюється $10^2 \dots 10^3 \text{ шт/см}^3$ кавітаційних бульбашок, а середня відстань між бульбашками визначається співвідношенням:

$$r_0 = \frac{1}{n^{1/3}} = 10^{-3} \dots 10^{-1}. \quad (13)$$

Критерій Рейнольдса лежить в межах $Re = 0,1 \dots 1$. Отже при виникненні кавітації, збільшення швидкості розчинення дрібних частинок пояснюється періодичною змінною, по величині і напрямку потоків навколо кавітаційного пухирця.

Швидкість розчинення твердих гранул у воді в умовах існування акустичних течій залежить від співвідношення розмірів гранул і максимального масштабу турбулентності λ_0 , що визначається за формулою [18]:

$$\lambda_0 = \frac{b^{3/4}}{\rho^{3/4} \varepsilon^{1/4}}, \quad (14)$$

де b – акустична в'язкість враховує крім в'язких втрат енергії, втрати властиві для середовищ, що коливаються.

Акустичну в'язкість обчислюють за формулою [3]:

$$b = \frac{3}{4}\eta + \frac{\gamma-1}{C_p}\chi + \eta', \quad (15)$$

де η, η' – зсувна і об'ємна в'язкість;

$$\gamma = \frac{K}{P} + \frac{1}{R/P} - \text{модуль об'ємної пружності рідини при атмосферному тиску}$$

віднесений до її внутрішнього тиску;

C_p – теплоємність при постійному тиску;

χ – коефіцієнт теплопровідності.

ε – дисипація енергії в середовищі визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{V^3}{\lambda_n}, \quad (16)$$

де V – швидкість рідини в акустичному потоці, яку можна визначити за формулою (12);

λ_n – масштаб потоку;

ρ – густина рідини.

Швидкість розчинення гранули в умовах турбулентності акустичного течії для розмірів $d_{zp} \gg \lambda_0$ та $d_{zp} \ll \lambda_0$ без врахування кавітації визначається за формулами [18]:

$$d_{zp} \gg \lambda_0 \quad \frac{dm}{d\tau} = \frac{\sqrt{r} S \cdot U_{max} \Delta C}{Pr^{*3/2}}, \quad (17)$$

$$d_{zp} \ll \lambda_0 \quad \frac{dm}{d\tau} = 8 \Delta C \sqrt[3]{D^2 d_{zp}^4 U}, \quad (18)$$

де m – маса гранули;

r – коефіцієнт опору;

$S = \pi R^2$ – площа перерізу гранули;

$Pr^* = \frac{\nu}{D}$ – дифузійний критерій Прандтля;

D – коефіцієнт дифузії;

$d_{zp} = 2R$ – діаметр гранули;

$\Delta C = (c - c^*)$ – різниця концентрацій;

U_{max} и U – швидкість та відносна швидкість рідини відносно гранули:

$$U_{max} = \left(\frac{\rho_{me} - \rho}{\rho} \right)^{2/3} \left(\frac{\varepsilon d_{zp}}{\rho_{me} r} \right)^{1/3}, \quad (19)$$

$$U = 2/3 \sqrt{3} [(\rho_{me} - \rho) / \rho] d_{zp}^2 \left(\frac{\varepsilon_0^3}{\nu^5} \right)^{1/4}. \quad (20)$$

Швидкість розчинення гранул в умовах кавітації, що супроводжує ламінарне стаціонарне обтікання гранули визначається за формулою [11]:

$$\frac{dm}{dt} = 3,3\pi^{1/3} D^{2/3} \nu^{1/3} d_{zp} \Delta C. \quad (21)$$

Якщо врахувати, що об'єм, площа поперечного перерізу та маса гранули визначається за формулами:

$$V_{zp} = \frac{4\pi R^3}{3}, \quad (22)$$

$$S_{zp} = \pi R^2, \quad (23)$$

$$m = \frac{4\pi R^3}{3} \rho_{me}, \quad (24)$$

рівняння (19)-(21) запишуться у вигляді:

$$R \gg \left(\frac{\lambda_0}{2} \right) \quad \frac{dR}{d\tau} = \frac{\sqrt{r} \cdot U_{\max} \Delta C}{4\rho_{me} Pr^{*3/2}}, \quad (25)$$

$$R \ll \left(\frac{\lambda_0}{2} \right) \quad \frac{dR}{d\tau} = \frac{4\Delta C}{\pi R \rho_{me}} \sqrt[3]{2D^2 R U}, \quad (26)$$

$$\frac{dR}{d\tau} = 1,65 \left(\frac{D}{\pi} \right)^{2/3} \frac{\nu^{1/3}}{R \rho_{me}} \Delta C. \quad (27)$$

Запропоновані рівняння можна використовувати для теоретичних досліджень процесів розчинення твердих речовин в рідких розчинниках в умовах дії ультразвуку та при проектуванні нового обладнання для приготування розчинів.

Рівняннях (25)-(27) встановлюють зміну радіусу гранули в процесі розчинення від часу і умов проведення процесу. Оскільки радіус величина змінна, вибір рівняння для розрахунку буде визначатись співвідношенням радіусу і максимального масштабу турбулентності λ_0 . Це дозволить отримати більш точні результати, а також вибрати початковий розмір гранул для суттєвого зменшення часу розчинення, отже підвищення продуктивності обладнання.

Результати експериментальних досліджень, методика їх обробки, порівняння результатів досліджень з розрахованими по рівняннях (25)-(27), будуть представлені у наступних роботах авторів.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Аналіз результатів досліджень процесів масопереносу в умовах ультразвукового впливу розкриває зміст природи явища, що вивчається, та доводить, що вирівнювання концентрації розчиненої речовини в рідині інтенсифікується під впливом акустичних течій і мікротечій. У примежовому шарі, поблизу гранул, зменшення опору процесу масопереносу відбувається за рахунок виникнення кавітаційних бульбашок.

Явище, яке вивчається, дозволяє інтенсифікувати процес розчинення твердих речовин в рідких розчинниках. Зменшити термін розчинення твердих речовин в рідких розчинниках при дії ультразвукового випромінювання.

Weaknesses. Поліагрегатна механічна система під дією ультразвукового випромінювання породжує складне і неоднозначне уявлення про процеси розчинення твердих речовин в рідких розчинниках та одночасно з цим, відбувається постійне зростання температури.

Opportunities. Запропонована математична модель надасть можливість використання при проведенні чисельних досліджень та як основа методики розрахунку обладнання для процесів розчинення гранульованого матеріалу.

Threats. Властивостями впливу ультразвукового випромінювання на рідину плідно займаються ще з 90-х років минулого століття фахівці Німеччини (Hielscher – Ultraschall-Technologie) [19], а саме питаннями очистки, наприклад, від нафтопродуктів. Спеціалісти ТОВ «Александра-Плюс» (Росія) вивчають можливості використання ультразвукового обладнання для широкого спектру застосування у харчовій промисловості та медицині, у машинобудуванні та атомній енергетиці, металургії та комунальному господарстві. Компанія U-sonic (Росія) з 2002 р. поставляє на російський ринок ультразвукове обладнання для потреб фармацевтичної та харчової промисловості.

У зв'язку з тим, що напрямок, в якому проводяться дослідження, достатньо вузький, то представлені вище іноземні компанії роблять українські підприємства неконкурентноспроможними.

8. Висновки

1. Проведено аналіз процесів розчинення твердих речовин в рідких розчинниках в умовах дії ультразвуку. Аналіз показав, що інтенсифікація відбувається під впливом акустичних течій, мікротечій та за рахунок виникнення кавітаційних бульбашок. Встановлено, що особливо інтенсивно відбувається процес розчинення під дією кавітації при зменшенні діаметру часток.

2. Встановлено, що швидкість розчинення гранули в умовах турбулентності акустичного течії визначається в залежності від співвідношення розмірів гранул і максимального масштабу турбулентності.

3. Встановлено, що швидкість розчинення гранул в умовах кавітації, що супроводжує ламінарне стаціонарне обтікання гранули, залежить від коефіцієнта дифузії та в'язкості рідини.

Результати дослідження будуть корисні для розрахунків обладнання для проведення технологічних операцій, пов'язаних з приготування розчинів в біотехнологічних та фармацевтичних виробництвах.

Література

1. Berezin, B. D. Osnovnye zakony himii [Text]: Textbook / B. D. Berezin, G. A. Krestov. – Moscow: Nauka, 1999. – 95 p.
2. Zdanovskii, A. B. Kinetika rastvoreniiia prirodnyh solei v usloviiah vynuzhdennoi konveksii [Text] / A. B. Zdanovskii; by ed. V. V. Viazov // Trudy Vsesoiuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta galurgii. – Leningrad: Goshimizdat, 1956. – Vol. 33. – 219 p.
3. Nikiforov, M. Yu. Rastvory neelektrolitov v zhidkostiah [Text]: Monograph / M. Yu. Nikiforov, G. A. Alper, V. A. Durov, V. P. Korolev, A. I. Viugin, G. A. Krestov, V. V. Miasoedova, A. G. Krestov. – Moscow: Nauka, 1989. – 263 p.
4. Lebedev, N. M. Issledovanie sovместnogo vliianiia ul'trafiioletovogo oblucheniia (UFO) i ul'trazvukovoi obrabotki (UZO) na dinamiku okislitel'no-vosstanovitel'nyh protsessov v vodnoi srede [Text] / N. M. Lebedev, M. A. Tihonov, O. V. Kazukov, O. Yu. Lebedev, Z. V. Kireeva, O. B. Kuznetsova // Materialy VI Kongressa obogatitelei stran SNG, 28–30 marta 2007 g. – LLC «Aleksandra-Plius», 2007. – Vol. II. – P. 234–237.
5. Mel'nick, V. M. Masoobmin i aeratsiia v bioreaktorakh [Text]: Monograph / V. M. Mel'nick, M. S. Trivailo, V. V. Karachun. – Kyiv: Korniiichuk, 2009. – 96 p.
6. Kudriashov, V. L. Effektivnost' i problemy primeneniia ul'trazvuka v tehnologicheskikh liniiah pishchevoi promyshlennosti [Text] / V. L. Kudriashov, A. N. Siverskaia, N. M. Lebedev, K. V. Naumov, V. E. Lyzhin, E. S. Pavlova, N. S. Pogorzhevskaia, N. V. Malikova // Trudy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tehnologicheskie aspekty kompleksnoi pererabotki sel'skohoziastvennogo syr'ia pri proizvodstve ekologicheskii bezopasnyh pishchevyh produktov obshchego i spetsial'nogo naznacheniiia», 11–14 sentiabria 2002 g. – Uglich: Rossel'hozakademiia, 2002. – P. 249–252.
7. Ponomarev, V. D. Ekstragirovanie lekarstvennogo syr'ia [Text] / V. D. Ponomarev. – Moscow: Meditsina, 1976. – 202 p.
8. Complex module for treating liquid medium in stream [Electronic resource]: Patent RU 2403209 C2 / Lebedev N. M., Kazukov O. V., Koniahin A. V.; assignee: LLC «Aleksandra-Plius». – № 2008115030; filed 16.04.2008; published 10.11.2010. – Available at: <https://www.URL:https://patents.google.com/patent/RU2403209C2/ru>
9. Durbha, K. S. Quantification of surface area and intrinsic mass transfer coefficient for ultrasound-assisted dissolution process of a sparingly soluble solid dispersed in aqueous solutions [Text] / K. S. Durbha, K. Aravamudan // Ultrasonics Sonochemistry. – 2012. – Vol. 19, № 3. – P. 509–521. doi:[10.1016/j.ultsonch.2011.09.008](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.09.008)
10. Pereira, S. V. Ultrasound influence on the solubility of solid dispersions prepared for a poorly soluble drug [Text] / S. V. Pereira, F. B. Colombo,

L. A. P. de Freitas // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Vol. 29. – P. 461–469. doi:[10.1016/j.ultsonch.2015.10.022](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.022)

11. Grenman, H. Enhancement of solid dissolution by ultrasound [Text] / H. Grenman, E. Murzina, M. Ronnholm, K. Eranen, J.-P. Mikkola, M. Lahtinen, T. Salmi, D. Yu. Murzin // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2007. – Vol. 46, № 9. – P. 862–869. doi:[10.1016/j.cep.2007.05.013](https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.05.013)

12. Inigo, A. C. Dissolution of salts crystallised in building materials using ultrasound: an alternative to NORMAL (1983) standard methodology [Text] / A. C. Inigo, R. Alonso, S. Vicente-Tavera // Ultrasonics Sonochemistry. – 2001. – Vol. 8, № 2. – P. 127–130. doi:[10.1016/s1350-4177\(00\)00062-6](https://doi.org/10.1016/s1350-4177(00)00062-6)

13. Lan, W. Ultrasound-assisted dissolution of cellulose in ionic liquid [Text] / W. Lan, C.-F. Liu, F.-X. Yue, R.-C. Sun, J. F. Kennedy // Carbohydrate Polymers. – 2011. – Vol. 86, № 2. – P. 672–677. doi:[10.1016/j.carbpol.2011.05.013](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.05.013)

14. Sicaire, A.-G. Ultrasound induced green solvent extraction of oil from oleaginous seeds [Text] / A.-G. Sicaire, M. A. Vian, F. Fine, P. Carre, S. Tostain, F. Chemat // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Vol. 31. – P. 319–329. doi:[10.1016/j.ultsonch.2016.01.011](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.011)

15. Karimi, M. Ultrasound irradiation in the production of ethanol from biomass [Text] / M. Karimi, B. Jenkins, P. Stroeve // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 40. – P. 400–421. doi:[10.1016/j.rser.2014.07.151](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.151)

16. Akselrud, G. A. Massoobmen v sisteme tverdoe telo-zhidkost' [Text] / G. A. Akselrud. – Lviv: Lviv University Publishing, 1970. – 188 p.

17. Shutilov, V. A. Osnovy fiziki ul'trazvuka [Text]: Textbook / V. A. Shutilov. – Leningrad: Leningrad University Publishing, 1980. – 280 p.

18. Novitskii, B. G. Primenenie akusticheskikh kolebanii v himiko-tehnologicheskikh protsessah [Text] / B. G. Novitskii. – Moscow: Himiia, 1983. – 192 p.

19. Ultraschall für Öl, Gas und erneuerbare Kraftstoffe [Electronic resource] // Hielscher – Ultrasound Technology. – Available at: \www/URL: https://www.hielscher.com/de/oil_gas_01.htm