

ВИЗНАЧЕННЯ РАДІУСУ ГРАНУЛИ В ПРОЦЕСІ РОЗЧИНЕННЯ В УМОВАХ ДІЇ УЛЬТРАЗВУКУ

Воробйова О.В., Асафтей О.А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вступ. Як відомо, розчинення – фізико-хімічний процес, що протікає між твердою і рідкою фазами і характеризується переходами твердої речовини в розчин. Розчиною речовиною вважається той з компонентів, який при звичайних умовах знаходиться в агрегатному стані, відмінному від агрегатного стану розчинника.

Ультразвук застосовують для прискорення розчинення речовин. При цьому спостерігається зниження частки осаду, йде процес розчинення важкорозчинних речовин. Ультразвук дозволяє не застосовувати спеціальні розчинники для отримання схожого результату.

Мета дослідження полягає, як в умовах дії ультразвуку змінюється розмір гранули твердих частинок.

За предмет дослідження обрано ультразвуковий реактор для розчинення твердих частинок у воді.

Методи дослідження. Було опрацьовано літературні матеріали, застосовувались рідкі розчинники та гранули для органічних солей у полі дії ультразвукової кавітації.

Основні результати. 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.

Як показано в [2], 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:

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

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 [2]:

$$\lambda_0 = \frac{b^{3/4}}{\rho^{3/4} \varepsilon^{1/4}}, \quad (2)$$

де b – акустична в'язкість враховує крім в'язких втрат енергії, втрати властиві для середовищ, що коливаються [1].

Акустичну в'язкість обчислюють за формулою:

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

де η, η' – зсувна і об'ємна в'язкість; $\gamma = \frac{K}{P} + \frac{1}{R/P}$ – 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:

$$\varepsilon = \frac{V^3}{\lambda_n}, \quad (4)$$

де V – швидкість рідини в акустичному потоці; 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:

$$d_{zp} \gg \lambda_0 \quad \frac{dm}{d\tau} = \frac{\sqrt{r} S \cdot U_{\max} \Delta C}{Pr^{*3/2}}, \quad (5)$$

$$d_{zp} \ll \lambda_0 \quad \frac{dm}{d\tau} = 8 \Delta C \sqrt[3]{D^2 d_{zp}^4 U}, \quad (6)$$

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:

$$U_{\max} = \left(\frac{\rho_{me} - \rho}{\rho} \right)^{2/3} \left(\frac{\varepsilon d_{zp}}{\rho_{me} r} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

$$U = 2/3 \sqrt{3} [(\rho_{me} - \rho) / \rho] d_{zp}^2 \left(\frac{\varepsilon_0^3}{\nu^5} \right)^{1/4}. \quad (8)$$

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

$$\frac{dm}{dt} = 3,3 \pi^{1/3} D^{2/3} \nu^{1/3} d_{zp} \Delta C. \quad (9)$$

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

$$V_{ep} = \frac{4\pi R^3}{3}, \quad (10)$$

$$S_{ep} = \pi R^2, \quad (11)$$

$$m = \frac{4\pi R^3}{3} \rho_{me}, \quad (12)$$

рівняння (10) - (12) запишуться у вигляді:

$$R \gg \left(\frac{\lambda_0}{2}\right) \frac{dR}{d\tau} = \frac{\sqrt{r} \cdot U_{\max} \Delta C}{4\rho_{me} Pr^{*3/2}}, \quad (13)$$

$$R \ll \left(\frac{\lambda_0}{2}\right) \frac{dR}{d\tau} = \frac{4\Delta C}{\pi R \rho_{me}} \sqrt[3]{2D^2 RU}, \quad (14)$$

$$\frac{dR}{d\tau} = 1,65 \left(\frac{D}{\pi}\right)^{2/3} \frac{\nu^{1/3}}{R \rho_{me}} \Delta C. \quad (15)$$

Рівняннях (13)–(15) 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 , що дозволяє отримати більш точні результати, а також вибрати початковий розмір гранул для суттєвого зменшення часу розчинення, отже підвищення продуктивності обладнання.

Висновки. 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.

Список літератури

1. Голых, Р.Н. Оптимизация методом математического моделирования режимов ультразвукового воздействия на различные технологические среды [Электронный ресурс] / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов // Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник». – 2012. – №2. –С. 20-24.

2. Накоряков, В.Е. Тепло- и массообмен в звуковом поле [Текст]/ В.Е. Накоряков, А.П. Бурдуков, А.М. Болдарев, П.Н. Терлеев // Акад. наук СССР, Сиб.отд-ние, Ин-т теплофизики; под ред. С.С.Кутателадзе. - Новосибирск, 1970. - 253 с.

References

1. Golyh, R.N. Optimizacija metodom matematicheskogo modelirovanija rezhimov ul'trazvukovogo vozdejstvija na razlichnye tehnologicheskie sredy [Jelektronnyj resurs] / R.N. Golyh, V.N. Hmel'jov, A.V. Shalunov // Jelektronnyj zhurnal «Juzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik». – 2012. – №2. –S. 20-24.

2. Nakorjakov, V.E. Teplo- i massoobmen v zvukovom pole [Tekst]/ V.E. Nakorjakov, A.P. Burdukov, A.M. Boldarev, P.N. Terleev // Akad. nauk SSSR, Sib.otd-nie, In-t teplofiziki; pod red. S.S.Kutateladze. - Novosibirsk, 1970. - 253 s.