

Н. Л. Максимів, О.З. Кондратович, Л.П. Олійник  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра загальної хімії

## КІНЕТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ АКУСТИЧНОЇ КАВІТАЦІЇ НА ПРОЦЕС РОЗПАДУ КЛІТИННИХ АГЛОМЕРАТІВ МІКРООРГАНІЗМІВ

© Максимів Н.Л., Кондратович О.З., Олійник Л.П., 2012

Досліджено вплив ультразвуку на дисперсії мікроорганізмів. Отримані результати показують, що ультразвукова технологія є ефективним методом покращення руйнування клітинних агломератів. Результати показують, що зменшення числа клітинних агломератів пов'язане з механічним руйнуванням клітинних кластерів і перетворенням енергії акустичної кавітації в агломератах.

**Ключові слова:** ультразвук, мікроорганізми, акустична кавітація, агломерати.

The aim of these studies was to investigate the effect of ultrasound on bacterial suspension. Our results shown that ultrasonic technology is an effective method to enhance bacterial clusters decomposition. The radius of bacterial agglomerates decreases during sonication and the concentration of individual bacteria in a suspension increases proportional to the sonication time. Results display that the reduction of number of bacterial agglomerates is compared with the mechanical destruction of bacterial clusters and the transformation of energy of acoustic cavitations in agglomerates.

**Keywords:** ultrasound, microorganisms, acoustic cavitation, agglomerates.

### Постановка проблеми і її зв'язок з важливими науковими завданнями

Незадовільний стан якості води є серйозною проблемою для навколишнього середовища і здоров'я людини, тому актуальним є пошук нових технологій, здатних покращити показники якості води [1].

Альтернативою існуючим методам водоочищення може стати використання ультразвуку (УЗ) для очищення води від хімічних і бактеріальних забруднень води [2], оскільки система очищення проста і відсутні побічні токсичні продукти, як, наприклад, при хлоруванні води [3].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Оброблення води ультразвуком з метою видалення або значного зниження хімічного і, особливо, біологічного забруднення води є одним з перспективних методів водоочищення, особливо для віддалених районів, в яких використовуються невеликі кількості очищеної води. Сьогодні існують портативні ультразвукові установки для очищення води спеціального призначення [4]. Під дією акустичної кавітації, з одного боку, відбувається руйнування клітин мікроорганізмів у воді [5, 6], а з іншого – повне або часткове окиснення органічних сполук, розчинених у воді [6, 7]. Проте вплив акустичної кавітації на швидкість руйнування клітин і кінетику окиснення органічних сполук у воді вимагає подальшого вивчення та уточнення.

**Метою роботи** було дослідження впливу акустичної кавітації на дисперсії мікроорганізмів. Об'єктом досліджень було вибрано дисперсії сушених хлібопекарських дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* різних концентрацій. Дисперсії готували шляхом розчинення наважки дріжджів в 1 дм<sup>3</sup> дистильованої води протягом двох годин до повного диспергування і набухання дріжджових клітин. Для акустичної обробки використовували магнітострикційний випромінювач, хвилевід

котрого опускався в експериментальну суміш і було приєднано до УЗ генератора УЗДН-2Т. У роботі було використано скляний реактор, об'єм дисперсії становив 80 мл. Реактор безперервно охолоджувався проточною водою. Частота УЗ – 22кГц, температура 36° С підтримувалась з точністю  $\pm 3^\circ$  С. Радіус колоній клітин вимірювали седиментаційним методом за методикою [8]. Як видно з рис. 1, радіус колоній мікроорганізмів зменшується за дії ультразвуку протягом 30 хвилин.

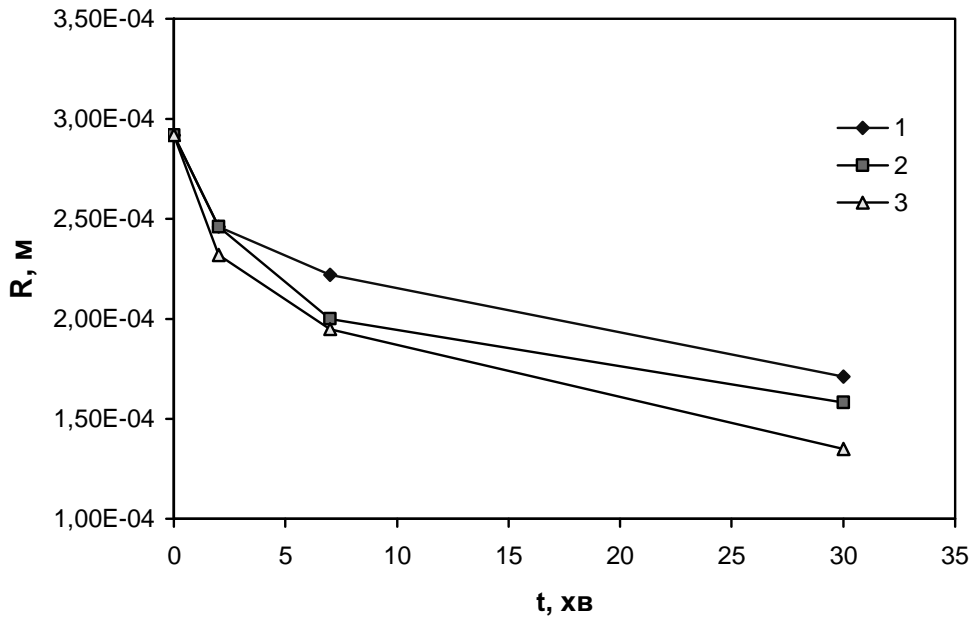


Рис. 1. Залежність радіуса колоній від часу опромінення ультразвуком для дисперсій мікроорганізмів з початковими концентраціями 8 (1), 4 (2) і 1,6 (3)

Кількість агрегатів в системі розраховували за формулою:

$$N = \frac{c}{\frac{4}{3} r^3}, \quad (1)$$

де  $c$  – початкова концентрація дріжджів;  $r$  – радіус колоній мікроорганізмів;  $\rho$  – щільність культури мікроорганізмів.

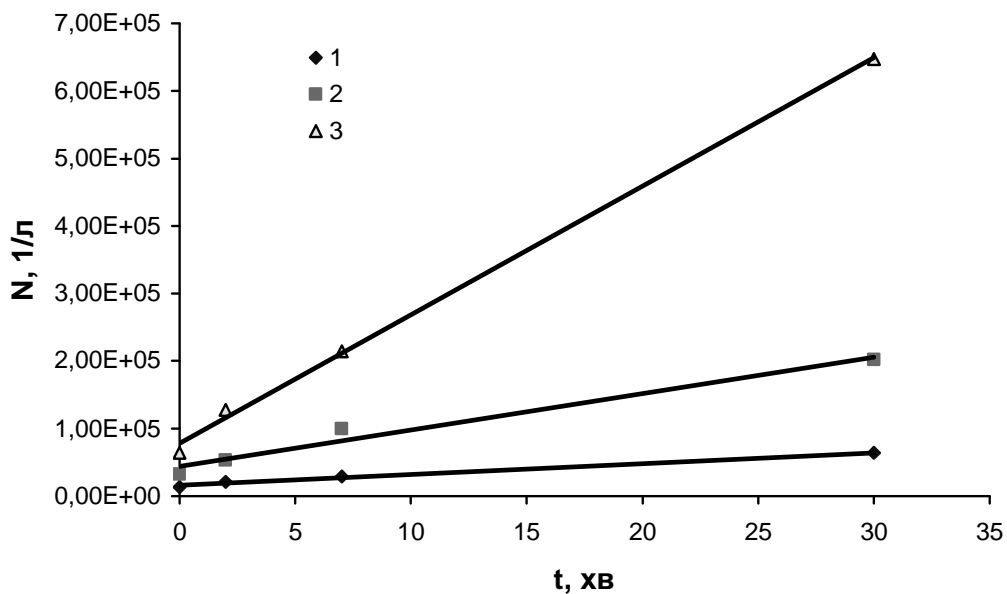


Рис. 2. Залежність кількості колоній бактерій від часу опромінення ультразвуком за початкової концентрації бактерій 8 (1), 4 (2) і 1,6 (3)

З рис. 2 видно, що концентрація колоній мікроорганізмів лінійно зростає в часі, що дає змогу розрахувати швидкість розпаду колоній.

Лінійну залежність збільшення кількості агломератів в часі також розраховано на основі експериментальних даних з диспергування активного мулу під дією ультразвуку [9]. Слід зазначити, що розподіл концентрації колоній від  $\kappa$  в них добре описується розподілом Пуассона [10]:

$$P(\kappa, \lambda) = \frac{\exp(-\lambda)\lambda^\kappa}{\kappa!}, \quad (i = 0, 1, 2, \dots), \quad (2)$$

де  $\kappa = i-1$ ,  $i$  – число клітин мікроорганізмів в окремій колонії;  $\lambda = n-1$ ;  $n$  – середнє число клітин у колонії.

З рис. 3 видно, що за дії ультразвуку максимум розподілу зміщується в бік зменшення кількості бактерій в колонії, а сам розподіл помітно звужується.

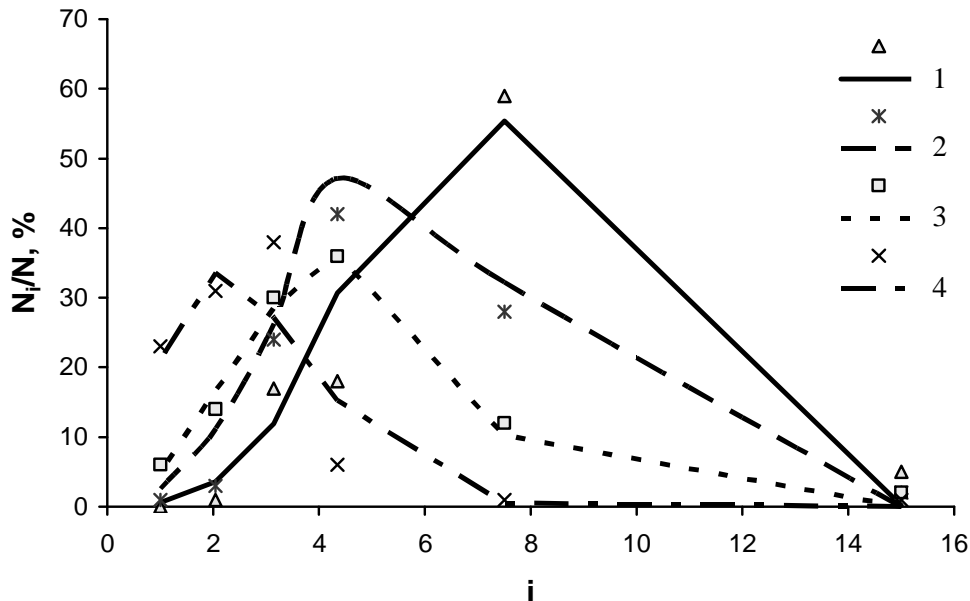


Рис. 3. Розподіл кількості колоній від кількості клітин в них. Точками позначені експериментальні дані після озвучування активного мулу ультразвуком протягом 0,5 (1), 1 (2), 3 (3) і 10 хв. (4), взяті з роботи [11]. Криві розраховані за розподілом Пуассона відповідно до рівняння (2)

Енергія кавітації витрачається на руйнування зв'язків між клітинами в агломераті, яка, очевидно, пропорційна площі сегментів поверхні окремих клітин, що зв'язують їх з сусідніми в колонії. Тому в першому наближенні можна вважати, що збільшення загальної поверхні в умовах кавітації буде пропорційне часу дії ультразвуку, оскільки кількість енергії, що передається системі, збільшується практично пропорційно часу озвучування:

$$\frac{dS_{\text{заг.зв.}}}{dt} = -K \cdot S_{\text{заг.зв.}}, \quad (3)$$

де  $S_{\text{заг.зв.}}$  – загальна поверхня сегментів клітин мікроорганізмів, які беруть участь у зв'язках між ними в колоніях.

Загальна поверхня пропорційна концентрації клітин у системі ( $N$ ) і поверхні, що бере участь в зв'язках між клітинами в одному агломераті ( $S_{\text{заг.зв.}}$ ):

$$S_{\text{заг.зв.}} = N \cdot S_{\text{сег.зв.}} \quad (4)$$

Поверхню, що бере участь в зв'язках між клітинами в одному агломераті, можна описати рівнянням:

$$S_{\text{заг.зв.}} = (N - 1) \cdot S_{\text{сег.зв.}}, \quad (5)$$

де  $n$  – кількість окремих клітин в колонії;  $S_{сер}$  – площа сегмента, що бере участь в зв'язках між клітинами в колонії. Середнє число клітин в одному агрегаті дорівнює:

$$n = \frac{N_1}{N}, \quad (6)$$

де  $N_1$  – концентрація поодиноких клітин в системі, яка містить їх кількість як у водному середовищі, так і в колоніях.

Беручи до уваги рівняння (4)–(6), отримаємо вираз:

$$S_{заг.зв.} = N \left( \frac{N_1}{N} - 1 \right) \cdot S_{сер}. \quad (7)$$

Інтегруючи вираз (3) і підставляючи в нього вираз (7), отримаємо рівняння для зміни концентрації колоній в системі:

$$\ln \frac{N_1 - N}{N_1 - N_{ин}} = -Kt, \quad (8)$$

де  $N_{ин}$  – початкове число агрегатів в системі.

Як видно з рис. 4, експериментальні дані щодо розпаду колоній бактерій під дією ультразвуку добре описується рівнянням (8).

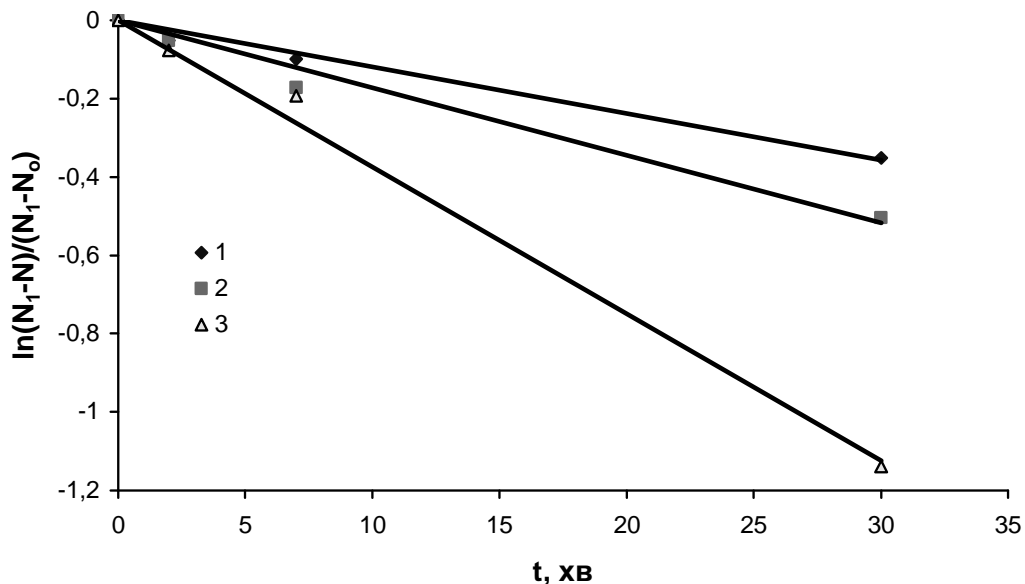


Рис. 4 Напівлогарифмічна анаморфозна залежність зміни концентрації колоній у системі від часу озвучування за початкової концентрації мікроорганізмів 8 (1), 4 (2) і 1,6 (3)

Залежність константи швидкості процесу від початкової концентрації агрегатів в системі свідчить про те, що порядок реакції за концентрацією агрегатів в системі відрізняється від першого. Тому для повного опису процесу ми припустили, що при кавітації бульбашок в рідині колонії розпадаються не тільки внаслідок їх розриву з утворенням двох колоній, а при зіткненні двох агрегатів з утворенням чотирьох нових агрегатів внаслідок перерозподілу енергії в них. Такий процес можна описати виразом:

$$W = \frac{dN}{dt} = Kd_1 + Kd_2 \cdot N_2 \quad (9)$$

Швидкість зміни кількості агрегатів в системі розраховували за залежністю кількості агрегатів в часі (рис. 2). Перетворенням рівняння (9) отримаємо вираз:

$$\frac{W}{N} = Kd_1 + Kd_2 \cdot N \quad (10)$$

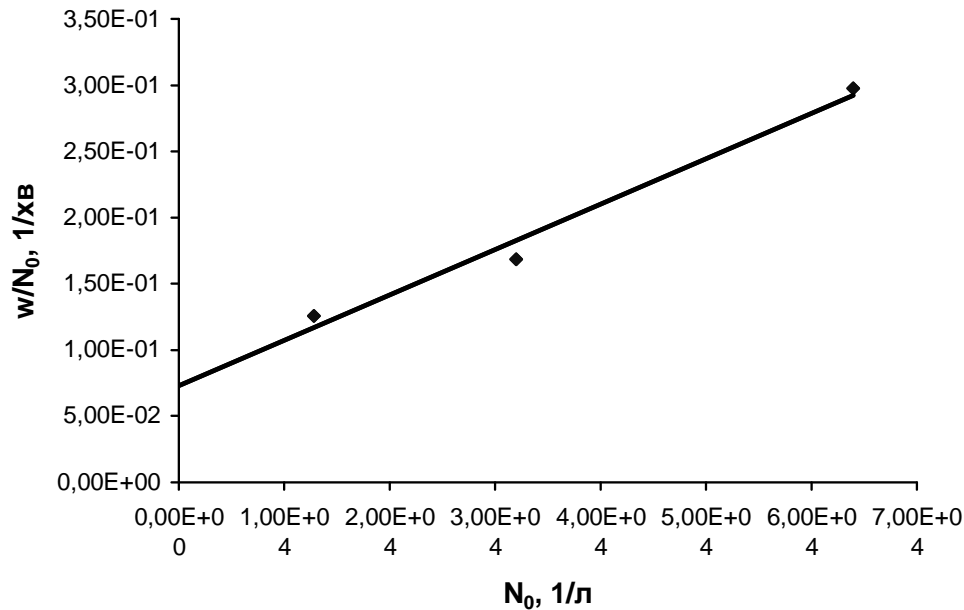


Рис. 5. Залежність швидкості зміни кількості колоній в системі від початкової концентрації мікроорганізмів в координатах рівняння (10)

Як видно з рис. 5, експериментальні дані добре описуються рівнянням (10). Коефіцієнт кореляції дорівнює 0,981, а константи  $Kd_1$  і  $Kd_2$  дорівнюють  $3,434 \cdot 10^{-6}$  і  $7,279 \cdot 10^{-2}$ , що підтверджує наше припущення.

### Висновки

Отримані нами результати показують, що за дії ультразвуку концентрація колоній мікроорганізмів зростає практично пропорційно в часі. Енергія кавітації витрачається на розрив зв'язків між клітинами в колонії, а швидкість розпаду колоній обумовлена як руйнуванням колоній за першим порядком, так і розпадом колоній на дрібніші в результаті зіткнення двох колоній.

1. Neis U., Blume T. *The effect of ultrasound of particulate matter, especially in complex water and wastewater media*. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics*. 19–23 august 2002. Moscow, Russia.
2. Баранов Г.А., Беляев А.А., Земляной А.В. Активация клеток в кавитационном потоке // *Журнал технической физики*. – 2007, Т. 77., Вып. 7. – С. 108–114.
3. Jess C. Brown and Andrew Salveson *Emerging Disinfection Technologies July 2006 • Florida Water Resources Journal*.
4. Iordache et al. *Sonochemical enhancement of cyanide ion degradation from wastewater in the presence of hydrogen peroxide*. // *Polish Journal of Environmental Studies*. Vol. 12, #6 (2003), 735-737.
5. Шевчук Л. И., Старчевський В. Л. // *Вопросы химии и химической технологи*. – 2005. – № 3. – С. 213–216.
6. Tsukamoto I. and al. *Inactivation of Saccharomyces cerevisiae by ultrasonic irradiation* // *Ultrasonics Sonochemistry*. 11. – 2004. – С. 61–65.
7. Кульский Л. А. *Основы химии и технологи воды*. – 1991. – С. 298–303.
8. Баранова В.И., Бибик Е.Е., Кожевникова Н.М., Лавров И.С., Малов В.А. *Практикум по коллоидной химии*. – М.: Высш. шк., 1983.– 216 с.
9. Mason T.J. and al. *Uses of ultrasound in the biological decontamination of water*. WCU 2003, Paris, September 7–10, 2003.
10. Cao X.Q. et al. (2006). *Experimental Study o Sludge Reduction by Ultrasound*. *Wat. Sci. Tech.* 54 (9), 87–93.
11. Кисленко В.М., Берлин Ад.А., Молдованов М.А. *Анализ математической модели кинетики флокуляции*. – М., 1991. – С. 499–502.
12. Chisti Y. *Sonobioreactors: using ultrasound for enhanced microbial productivity* // *Trends in Biotechnology*. – Vol. 21. – № 2. – 2003.