

Ю. В. Сухацький, З. О. Знак

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімії і технології неорганічних речовин,
sukhatsky@i.ua

ФЛОТАЦІЯ ЯК СТАДІЯ КАВІТАЦІЙНО-ФЛОТАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ВОДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ ВІД ДИСПЕРСНИХ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК ТА ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК

<https://doi.org/10.23939/ctas2019.01.053>

Наведено результати досліджень стадії флоатації комбінованої кавітаційно-флоатаційної технології очищення водних гетерогенних середовищ від дисперсних твердих частинок та органічних сполук. Синтез процесів кавітації та флоатації запропоновано здійснювати у суміщеному апараті колонного типу. Виявлено раціональні межі зміни тиску на вході у кавітатор (0,3–0,4 МПа) для забезпечення ефективної флоатації. Встановлено, що за таких значень тиску утворюється плівково-структурна піна з усередненим радіусом флоатаційної бульбашки 1,8 мм, а середня газонаповненість флоатаційного шару становить $0,05 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Зазначено, що максимальній швидкості флоатації кальцію оксалату ($13,2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$) відповідає діапазон тривалості кавітаційного оброблення 600–900 с.

Ключові слова: кавітація, флоатація, бульбашка, гідродинамічний струменевий кавітатор, флоатоконцентрат.

Yu. V. Sukhatskyi, Z. O. Znak

Lviv Polytechnic National University,
Department of Chemistry and Technology of Inorganic Substances

FLOTATION AS A STAGE OF CAVITATION-FLOTATION TECHNOLOGY FOR THE TREATMENT OF AQUEOUS HETEROGENEOUS MEDIA FROM DISPERSIVE SOLIDS AND ORGANIC COMPOUNDS

The article presents the results of studies of the flotation stage of the combined cavitation-flotation technology for the treatment of aqueous heterogeneous media from dispersed solid particles and organic compounds. The synthesis of processes of cavitation and flotation is proposed to be implemented in a combined apparatus of a column type. The rational limits of pressure change at the entrance to the cavitator (0.3–0.4 MPa) were found to provide effective flotation. It was established that at such pressure values a film-structural foam with averaged radius of a flotation bubble of 1.8 mm is formed and the average gas flotation layer of $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ is formed. It is noted that the maximum velocity of flotation of calcium oxalate ($13.2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{sec})$) corresponds to the range of the duration of cavitation treatment 600–900 sec.

Key words: cavitation, flotation, bubble, hydrodynamic jet cavitator, flotation concentrate.

Вступ

Інтеграція фізичних та фізико-хімічних процесів є принципом, що нерозривно пов'язаний із розвитком сучасних технологій. Тенденції до об'єднання технологічних процесів

характерні і для галузей водоочищення та водопідготовки. Комбінація процесів дає змогу значно підвищити ступінь очищення стічних вод, зменшити тривалість та енергоємність процесу очищення, витрати для підтримання

оптимальних реагентного, температурного, гідродинамічного режимів тощо. Сьогодні особливо актуальним є пошук перспективних комбінацій загальновідомих фізичних та фізико-хімічних процесів для вилучення гідрофобних дисперсних частинок зі стічних вод підприємств харчової (м'ясо-, молокопереробних, олійних), легкої промисловості (текстильні, шкіряні, хутряні фабрики), гірничодобувної галузі.

Комплексні енергетичні впливи, зокрема кавітаційні, інтенсифікують гідромеханічні, теплові та масообмінні процеси. Так, для очищення стічних вод нафтопереробних підприємств [1–3] та м'ясокомбінатів [4] застосовують комбінації електрокоагуляції з кавітацією, флоатації з кавітацією тощо.

Запропоновано двостадійну технологічну схему [1], що передбачає попереднє очищення відстояної стічної води в електрокоагуляторі продуктивністю $5,6 \cdot 10^4$ м³/с і глибоке очищення у роторному кавітаційному апараті. Зменшення концентрації нафтопродуктів у воді від 4 кг/м³ до гранично допустимої (10^{-4} кг/м³) досягали за кратності кавітаційного оброблення, яка дорівнювала 4.

Через низький коефіцієнт корисної дії флоатаційних насосів, нестабільність їх роботи, високу ймовірність ерозії робочих елементів застосування флоатаційно-кавітаційного процесу доцільне лише на стадії глибокого очищення стічних вод [3].

Складовими установки для очищення стічних вод м'ясокомбінатів були насос, всмоктувальний і напірний трубопроводи, засувки, а також шість модулів кавітаційного насичення води повітрям, розміщені у флоатаційній камері. За тиску 1,2–1,7 МПа витрата рідини через один модуль становила $(2,8–4,2) \cdot 10^{-3}$ м³/с, що забезпечувало продуктивність на рівні $(1,7–2,5) \cdot 10^{-2}$ м³/с. Діапазон зміни ступеня газонасичення води – від 0,03 до 1,2 м³ повітря/м³ води. Основні вузли кавітаційних модулів виготовлені з нержавіючих матеріалів. Ступінь очищення стічних вод від забруднювачів становив, %: жирів – 80–90, завислих речовин – 80–90. Величини ХСК і БСК₅ зменшувались на 40–50 % [4]. Серед недоліків установки – висока ймовірність ерозії стінок флоатаційної камери і кавітаційних модулів; складність забезпечення необхідного

ступеня газонасичення води, а отже, й ефективності очищення.

Істотним недоліком вищезазначених технологій є застосування флоатаційних насосів для генерування кавітаційних полів (послідовність процесів – “флоатація–кавітація”), що унеможливує керування процесом газонасичення, від якого безпосередньо залежить ступінь розвитку кавітаційних явищ і, відповідно, деструкції забруднювачів. Тому для реалізації двостадійної технології очищення води від дисперсних частинок принципово важлива зміна послідовності здійснення процесів на “кавітація–флоатація”. Синтез процесів кавітації і флоатації [5] забезпечує можливість використання кавітаційних бульбашок та їх похідних [6], генерованих у кавітаційних апаратах, на стадії флоатації дисперсних твердих частинок. Факторами, що визначають ефективність флоатації, є геометричні розміри бульбашок повітря, їх кількість і стабільність, а також рівномірність розподілу в об'ємі водного середовища [7–9].

Здійснено оцінку ступеня розвитку кавітаційних полів за величинами теплової енергії [10], що виділяється внаслідок кавітації, та акустичного сигналу [11]. Встановлено вплив технологічних (тиску на вході у кавітатор) умов оброблення і конструктивних (діаметра сопел, їх кількості та просторового розміщення) параметрів гідродинамічного струменевого кавітатора на величину теплової енергії [10]. Виявлено залежність кавітаційного насичення води киснем від тривалості оброблення [12]. Тому доцільне дослідження особливостей стадії флоатації дисперсних твердих частинок.

Мета роботи – встановлення основних характеристик стадії флоатації дисперсних твердих частинок (розміру флоатаційних бульбашок, інтенсивності їх утворення, швидкості флоатації), визначення структури флоатаційної піни.

Матеріали і методи досліджень

Генерування кавітаційних полів і флоатацію дисперсних твердих частинок здійснювали у суміщеному кавітаційно-флоатаційному апараті, який складався з двох частин: нижньої (гідродинамічного струменевого кавітатора) та

верхньої – сепараційної. Корпус кавітатора (діаметр корпусу – 0,11 м; висота – 1 м) закріплений у вузлі герметизації, який одночасно є і колектором, що забезпечує розподіл рідинного потоку між кавітувальними елементами – профільованими соплами змінного діаметра, розміщеними під певним кутом. Він виконаний із прозорого оргскла, що давало змогу проводити візуальні спостереження, а також здійснювати фото- і відеозйомку процесів кавітації та флотації. Тиск на вході у кавітатор (у межах 0,3–0,6 МПа) регулювали байпасом. Об'єм рідкофазного середовища у циркуляційному контурі суміщеного кавітаційно-флотаційного апарата – 25 дм³. Тривалість кавітаційно-флотаційного процесу – 30 хв.

З метою інтенсифікації кавітаційних явищ та супутнього їм ефекту флотації дисперсних твердих частинок у водне середовище перед кавітатором компресором Sonic Silent Powerful 9908 вводили незначні кількості повітря (об'ємна витрата повітря – (1,5–9) · 10⁻⁶ м³/с). Кількість введеного повітря контролювали реометром.

Розмір флотаційних бульбашок ($R_{\text{фл. б}}$, м) визначали на основі результатів акустичного аналізу (спектрів частот), представлених у програмі для запису та редагування аудіо-файлів Adobe Audition 1.5, і обчислювали за формулою [13]

$$R_{\text{фл. б}} = \frac{3,3}{\omega_{\text{рез}}}, \quad (1)$$

де $\omega_{\text{рез}}$ – резонансна частота звукової хвилі, Гц.

Інтенсивність утворення бульбашок в одиниці об'єму рідини (I_6 , од./($\text{с} \cdot \text{м}^3$))

$$I_6 = \frac{\Sigma V}{V_{\text{фл. б}} \tau V_{\text{фл. з}}} = \frac{3 \Sigma V}{4 \pi^2 R_{\text{фл. б}}^3 R_{\text{фл. з}}^2 H_{\text{фл. з}} \tau}, \quad (2)$$

де ΣV – об'єм виділених внаслідок кавітації газів, м³; $V_{\text{фл. б}}$, $V_{\text{фл. з}}$ – об'єм флотаційної бульбашки та флотаційної зони відповідно, м³; τ – тривалість кавітаційного оброблення, с; $R_{\text{фл. б}}$, $R_{\text{фл. з}}$ – радіус флотаційної бульбашки та флотаційної зони відповідно, м; $H_{\text{фл. з}}$ – висота флотаційної зони, м.

Вихід флотоконцентрату, який відділяли від рідини у сепараторі твердої фази, визначали гравіметрично: флотоконцентрат сушили до постійної маси за температури 373–378 К у сушильній шафі СНОЛ і зважували на електронній вазі “Axis AD-500”.

Результати досліджень та їх обговорення

Підприємства легкої промисловості (текстильні, шкіряні заводи, хутряні фабрики тощо) є джерелами утворення величезних обсягів висококонцентрованих рідкофазних відходів. Ці відходи містять емульговані частинки жирів, синтетичні ПАР, а також високомолекулярні неорганічні (поліфосфати) й органічні (білки, вуглеводи, природні та синтетичні барвники, дубильні речовини) речовини, здатні утворювати стійкі колоїдні системи. Вищезазначені сполуки важко розкладаються мікроорганізмами, а тому основним недоліком біологічних методів вилучення колоїдно-розчинених речовин із рідких відходів є велика тривалість процесу (для рідких відходів шкіряних заводів показник ХСК у 3,6 рази вищий, ніж БСК) [14]. Тому актуальність застосування фізико-хімічних процесів, зокрема реагентного кавітаційно-флотаційного процесу, для відділення дрібнодисперсних твердих частинок тільки зростає.

Вміст завислих частинок у рідких відходах підприємств легкої промисловості коливається в дуже широких межах (див. таблицю).

Вміст завислих речовин у рідких відходах підприємств легкої промисловості

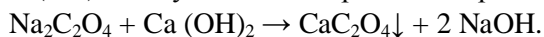
Підприємства	Вміст завислих речовин, кг/м ³
Суконні фабрики [15]	0,085–0,225
Шкіряні заводи [14]	2–12
Хутряні фабрики [14]	0,5–2,5

Полікомпонентність дисперсної фази рідких відходів підприємств легкої промисловості значно ускладнює дослідження процесів їх розділення. Зважаючи на це, здійснювали дослідження процесів розділення рідких відходів із монокомпонентною дисперсною фазою.

Для приготування рідких відходів шкіряних виробництв використовували натрію оксалат ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$), що утворює з водою стійку колоїдну систему. Концентрація $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ у воді – 1 кг/м³. Натрію оксалат виконує функцію протрави у процесах дублення шкіри.

Відділення дисперсних частинок $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ від рідкої фази здійснювали методом реагентного осадження. При цьому до рідких відходів додавали стехіометричну кількість освітленої частини вапняного молока. Низька розчинність

кальцію гідроксиду у воді (лише 1,5 кг/м³) обумовлювала невисокий вміст натрію оксалату у рідких відходах. Взаємодія Na₂C₂O₄ з Ca(OH)₂ описується таким рівнянням реакції



Флотацію малорозчинного продукту (кальцію оксалату) здійснювали у суміщеному апараті колонного типу, який складався з двох частин: кавітаційної (нижня) та флотаційної (верхня).

Встановлено діапазон значень тиску на вході у кавітатор (0,3–0,4 МПа) під час флотації кальцію оксалату, якому відповідала максимальна ефективність процесу флотації. За більших тисків відбувалось руйнування флотокомплексу “дисперсна частинка–поверхня бульбашки” внаслідок різкого зростання швидкості потоку.

На ефективність флотації впливає структура флотаційної піни [16]. У діапазоні значень тиску на вході у кавітатор (0,3–0,4 МПа) утворювалась плівково-структурна піна. Для цієї піни характерна низка особливостей: поперше, розмір бульбашок повітря у верхніх шарах піни значно більший, ніж у нижніх; по-друге, шар піни має невелику висоту (5...20 см; у нашому випадку – 5 см), а великі бульбашки сильно деформовані (рис. 1).

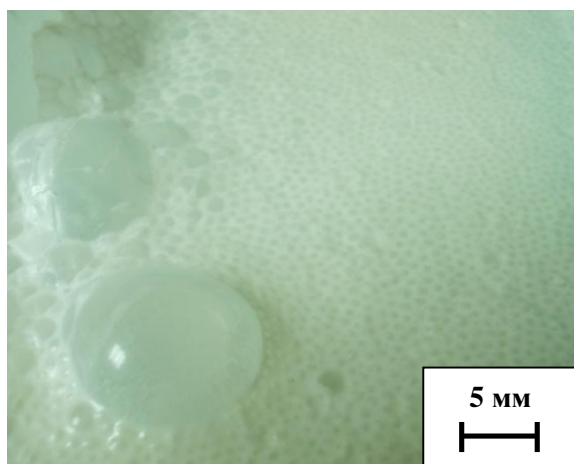


Рис. 1. Світлина плівково-структурної піни

Вологість плівково-структурної піни перевищувала 95 % мас. Про ефективність флотації свідчила наявність на поверхні піни бульбашок із розміром 1–3 см. Частково їх поверхня була вкритою плівкою з мінеральних частинок, частково на ній залишались вільні ділянки (рис. 1).

За значень тиску на вході у кавітатор у діапазоні 0,4–0,6 МПа формувалась піна агрегатної структури, що містила незначну кількість рідкої фази і легко руйнувалась. При цьому ефективність флотації значно знижувалась. Накопичення дрібнодисперсних бульбашок повітря у флотаційній зоні зумовлювало інтенсивне молочне забарвлення реакційного середовища.

На рис. 2 наведено спектр частот акустичного сигналу кавітаційного поля за тиску на вході у кавітатор 0,35 МПа.

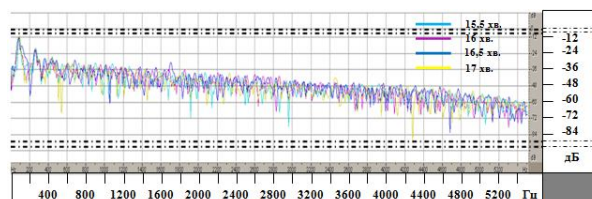


Рис. 2. Спектр частот акустичного сигналу кавітаційного поля (тиск на вході у кавітатор – 0,35 МПа)

Виявлено, що за тиску на вході у кавітатор 0,35 МПа (рис. 2) амплітудному значенню акустичного сигналу відповідала величина резонансної частоти коливань бульбашок 1760 Гц. Усереднене значення радіусу флотаційної бульбашки для цієї частоти – 1,8 мм, що добре узгоджується з літературними даними [16], які свідчать про високу ефективність флотації.

За тиску на вході у кавітатор, діаметра сопла, кількості сопел, кута атаки струменів, тривалості кавітаційного оброблення, усередненого радіуса флотаційної бульбашки, радіуса і висоти флотаційної зони, об’єму виділених газів відповідно 0,35 МПа; 1,6 мм; 5 сопел; 150 град; 1800 с; 1,8 мм; 5,5 см; 0,33 м; 0,89 дм³, інтенсивність утворення бульбашок у флотаційній зоні становила $\approx 6\,500$ од./с·м³. Це вказує на те, що в першому м³ флотаційної зони впродовж 1-ї с перебуває близько 6 500 флотаційних бульбашок із середнім радіусом $\approx 1,8$ мм, тобто сформований шар щільний і містить велику кількість дрібнодисперсних бульбашок. Середня газонаповненість цього шару – 0,05 м³/м³.

На основі гравіметричних досліджень розраховано швидкість флотації кальцію оксалату (рис. 3).

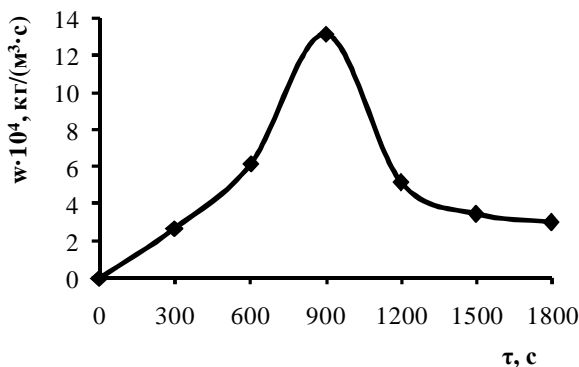


Рис. 3. Залежність швидкості флотації (w) від тривалості кавітаційного оброблення (τ)

Оптимальна тривалість кавітаційного оброблення, за якої швидкість флотації кальцію оксалату була максимальною ($13,2 \cdot 10^{-4}$ кг/(м³ · с)), знаходилась у діапазоні 600–900 с (рис. 3).

Подальше збільшення тривалості оброблення спричиняло зменшення швидкості флотації, оскільки зростала частка подрібнених частинок дисперсної фази (вторинних шламових частинок) [17] з розмірами, що неспівмірні з розмірами бульбашок газової фази.

Висновки

На основі аналізу джерел інформації встановлено, що величезні перспективи для очищення стічних вод підприємств харчової, легкої, хімічної та нафтохімічної промисловості, гірничодобувної галузі виявляють комбінації кавітації з іншими фізико-хімічними процесами, зокрема з флотацією.

Запропоновано використання кавітаційних бульбашок та їх похідних, генерованих у кавітаційних апаратах, для флотації дисперсних твердих частинок. Синтез процесів кавітації і флотації реалізовано у суміщеному апараті колонного типу.

Виявлено раціональні умови здійснення процесу реагентного кавітаційно-флотаційного відділення натрію оксалату (типового компонента рідких відходів шкіряних виробництв) від рідкої фази: діапазон значень тиску на вході у кавітатор – 0,3–0,4 МПа, тривалість оброблення в апараті – 600–900 с. При цьому утворюється плівково-структурна піна із усередненим радіусом флотаційної бульбашки 1,8 мм, а швидкість флотації є максимальною ($13,2 \cdot 10^{-4}$ кг/(м³ · с)).

Література

1. Демідова, Ю. Є. (2013). Теоретичні й експериментальні дослідження процесів електрокоагуляції та кавітації при переробці вуглеводневмісних стоків: автореф. дис. канд. техн. наук. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків.
2. Гришин, Б. М., Андреев, С. Ю., Бикунова, М. Х., Гришин, Л. Б., Савицкий, Е. А., Колдов, А. С. (2010). Новая технология очистки нефте-содержащих сточных вод машиностроительного производства, *Труды Международного симпозиума “Надежность и качество”*. Пенза: ПГУ.
3. Тарасенков, Н. В. (2006). Глубокая очистка сточных вод от органических загрязнителей флотационно-кавитационным методом: автореф. дис. канд. хим. наук. ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна”, Санкт-Петербург.
4. Болонов, Н. И., Барыбин, А. И. (2009). Установка для очистки сточных вод мясокомбинатов. *Вісник Донецького національного університету*, 2, 400–401.
5. Знак, З. О., Сухачкий, Ю. В., Мних, Р. В. (2014). Розроблення кавітаційно-флотаційного процесу очищення стічних вод в аспекті реалізації сучасних концепцій синтезу хіміко-технологічних систем. *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*, 787, 75–79.
6. Yavorskiy, V., Sukhatskiy, Yu., Znak, Z., Mnykh, R. (2016). Investigations of cavitation processes in different types of emitters using sonochemical analysis. *Chemistry & Chemical Technology*, 10 (4), 507–513.
7. Ralston, J. (2000). Flotation. *Bubble-particle capture*. In C. Poole & M. Cooke, *Encyclopedia of Separation Science* (pp. 1464–1471). San Diego: Elsevier Science Publishing Co Inc.
8. Colic, M., Morse, W., Miller, J. D. (2007). The development and application of centrifugal flotation systems in wastewater treatment. *Int. J. Environment and Pollution*, 30 (2), 296–312.
9. Матинин, А. С. (2013). Повышение селективности разделения слабоконтрастных руд на основе управления гидродинамическим режимом флотации: автореф. дис. канд. техн. наук. ФГАОУ ВПО “Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва.
10. Znak, Z., Sukhatskiy, Yu. (2016). The Brandon method in modelling the cavitation processing of aqueous media. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/8 (81), 37–42.
11. Яворський, В. Т., Знак, З. О., Сухачкий, Ю. В., Мних, Р. В. (2016). Енергетичні характеристики оброблення агресивних водних середовищ у гідродинамічних кавітаторах. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 52 (4), 132–136.
12. Znak, Z. O., Sukhatskiy, Yu. V., Mnykh, R. V., Tkach, Z. S. (2018). Thermochemical analysis of

energetic in the process of water sonolysis in cavitation fields. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 3 (118), 64–69.

13. Меттер, И. (1948). Физическая природа кавитации и механизм кавитационных повреждений. *Успехи физических наук*, 35 (1), 52–79.

14. Саблій, Л. А. (2013). *Фізико-хімічне та біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод*. Рівне: НУВГП.

15. Кононцев, С. В., Саблій, Л. А., Гроховська, Ю. Р. (2011). *Екологічна біотехнологія*

очищення стічних вод та культивування кормових організмів. Рівне: НУВГП.

16. Смирнов, В. О., Білецький, В. С. (2010). *Флотаційні методи збагачення корисних копалин*. Донецьк: Східний видавничий дім.

17. Матниязова, Г. К. (2012). Интенсификация процесса очистки мутных вод от взвешенных частиц. (Дис. док. философии (PhD)). Таразский государственный университет имени М. Х. Дулати, Тараз.