

УДК 532.528; 532.695; 544.77

## PECULIARITIES OF THE INFLUENCE OF THE CONSTRUCTION OF CAVITATIONAL MIXTURES ON THE PROPERTIES OF OBTAINED DISPERSE SYSTEMS

A. Dolinsky, L. Avdeeva, E. Zhukotsky, A. Makarenko

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Hydrodynamic cavitation  
Emulsion  
Dispersion systems  
Cavitation mixer  
Aperture  
Phospholipids*

**Article history:**

Received 12.05.2017  
Received in revised form  
04.06.2017  
Accepted 25.06.2017

**Corresponding author:**

A. Dolinsky

**E-mail:**

[npnuht@ukr.net](mailto:npnuht@ukr.net)

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2017-23-4-15

---

**ABSTRACT**

The results of experimental studies on determining the effect of hydrodynamic cavitation process on the dispersion of complex multicomponent systems are presented in the article. The advantages of static mixers for the emergence and intensification of hydrodynamic cavitation energy intensive mass transfer processes are analyzed. The influence of construction of the cavitation mixer and geometry of the nozzle device in the processing of liquid complex heterogeneous systems with desired properties is considered. Empirical dependence of the average particle diameter of conventional systems from geometric characteristics of cavitation reactor unit and the presence of the diaphragm is found. Rational conditions of the dispersion process are established.

## ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ КАВІТАЦІЙНИХ ЗМІШУВАЧІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ОТРИМАНИХ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

А.А. Долінський, Л.Ю. Авдєєва, Л.Ю. Жукотський, А.А. Макаренко

*Національний університет харчових технологій*

*У статті наведено результати експериментальних досліджень з визначення впливу гідродинамічної кавітації на процес диспергування складних багатокомпонентних систем. Проаналізовано переваги використання змішувачів статичного типу для виникнення гідродинамічної кавітації та інтенсифікації енергоємних масообмінних процесів. Розглянуто вплив конструкції кавітаційних змішувачів і геометрії соплового пристрою при обробці рідких складних гетерогенних систем на отримання наносистем із заданими властивостями. Виявлено емпіричні залежності середнього умовного діаметра частинок системи від геометричних характеристик кавітаційного реактора пристрою і наявності діафрагми. Встановлено раціональні умови проведення процесу диспергування.*

**Ключові слова:** *гідродинамічна кавітація, емульсії, дисперсні системи, кавітаційний змішувач, діафрагма, фосфоліпіди.*

**Постановка проблеми.** Кавітація — явище розриву рідини під впливом розтягуючих напружень і утворення заповнених парою та газом порожнин або бульбашок при створенні розрідження в обмеженій області при тиску рідини нижчому за критичне значення.

Кавітація може бути створена різними методами. Використання кожного з них визначаються метою і техніко-економічними показниками конкретної технології. У промисловості найбільш часто використовуються гідродинамічна й акустична кавітація. Ультразвукова кавітація виникає в результаті коливань ультразвукової частоти при проходженні акустичної хвилі великої інтенсивності. Гідродинамічна кавітація виникає в системах з місцевим звуженням з подальшим розширенням каналу (в запірних і регулюючих органах, колінах та ін.) при течії всіх крапельних рідин, в т. ч. рідких металів [1—3].

На сьогодні одним із ефективних методів інтенсифікації масообмінних і гідромеханічних процесів у різних галузях промисловості є використання кавітаційного впливу при обробці складних дисперсних систем. Кавітаційні явища відносяться до жорстких способів обробки гетерогенних середовищ, пов'язаних з руйнуванням твердих або рідких дисперсних частинок і використовуються для енергоємних технологічних процесів: змішування рідин речовин, що важко змішуються, розчинення твердих речовин, отримання високодисперсних емульсій без застосування стабілізаторів, диспергування суспензій тощо. Використання кавітаційного впливу дає змогу отримувати високоякісні біологічно активні розчини, екстракти, емульсії і суспензії для харчової, медичної, нафтопереробної промисловості, паливної енергетики і інших галузей [5—7].

Гідродинамічна кавітація може здійснюватися в апаратах різної конструкції і різними методами. Розрізняють такі її різновиди: статична, динамічна, переміжна, відцентрова, соплова, щілинна, струменева, примусова, термічна, парова, газова тощо [3]. Для промислового використання придатні всі способи створення гідродинамічної кавітації, що дають змогу проводити обробку великих обсягів рідинних середовищ у потоці. Акустична кавітація енергетично менш вигідна, проте частково цю проблему можна вирішити при використанні апаратів проточного типу [4].

Принцип роботи проточних кавітаційних змішувачів заснований на нестаціонарності потоків рідини, а також на активних гідродинамічних ефектах впливу на оброблювані речовини. Даний тип апаратів призначений для структурних перетворень рідини на мікро- і нанорівні з метою зміни її фізико-хімічних властивостей, інтенсифікації масообмінних і гідромеханічних процесів. Обробка рідини в кавітаційному апараті здійснюється за рахунок імпульсного багатofакторного впливу: вихроутворення, мікромасштабних пульсацій тиску, інтенсивної кавітації, ударних хвиль і нелінійних гідроакустичних ефектів. Кавітатор здійснює перетворення енергії низької концентрації в енергію високої локальної концентрації в нестійких точках структури речовини. Просторова і тимчасова концентрація енергії дає змогу отримати велику потужність імпульсного енергетичного впливу, вивільнити внутрішню енергію речовини, ініціювати численні квантові, каталітичні та інші енергонасичені процеси [3].

Конструкції динамічних кавітаційних реакторів забезпечують багаторазову перебудову поля швидкостей і зміну напрямку ліній струму потоку рідини за рахунок обертових елементів (крильчаток, лопатей) різних конфігурацій, що сприяють утворенню каверн на поверхні робочих органів або за ними. Кавітаційні апарати статичного типу мають ряд переваг з точки зору конструктивного, технологічного та економічного рішення. Статичні кавітаційні апарати забезпечені нерухомими кавітаційними реакторами, що являють собою перешкоду на шляху проточної рідини, в яких каверни утворюються за межами робочих органів. Апарати цього типу мають невеликі габарити при високій продуктивності. Відмінні риси даного типу обладнання — простота і надійність апаратурного оформлення, забезпечення безперервності хіміко-технологічного процесу, інтенсивний гідродинамічний і кавітаційний вплив, що обумовлює значну інтенсифікацію масообмінних процесів і високу якість змішування компонентів [4].

Конструкція кавітаційного змішувача і форма виконання реактора впливає на виникнення і розвиток ефектів кавітації і, таким чином, на ефективність обробки дисперсних систем у бульбашковій камері. Проточні кавітаційні змішувачі з соплами типу Вентурі або сопла Лавалю характеризуються значною продуктивністю, високою якістю обробки матеріалу і низькими питомими витратами електроенергії на одиницю продукції. Їх робота, за певних умов, відбувається в нестационарному режимі, що забезпечує високу ефективність обробки матеріалу при диспергуванні, емульгуванні і гомогенізації. При ламінарному русі рідини в каналі, в якому площа поперечного перерізу періодично змінюється і втрати енергії на тертя незначні, в конфузійній частині каналу відбувається перетворення потенційної енергії в кінетичну, а в дифузійній — навпаки. За відсутності втрат напором на тертя перетворення енергії обернені і сумарна механічна енергія залишається незмінною. Якщо в рідині наявна дисперсна фаза, то відносна швидкість буде періодично змінюватися за величиною і напрямком. Динамічний вплив на частинку можливий за умови прискореного руху потоку рідини. Силова дія на дисперсію з боку рідини можлива як завдяки прискоренню або гальмуванню потоку внаслідок змінення з часом об'ємної витрати рідини через канал, так і при різкій зміні площі поперечного перерізу каналу. Під впливом сили гідродинамічної взаємодії частинок дисперсної фази з рідиною відбувається корисна робота, пов'язана з деформуванням або руйнуванням дисперсних часток. Унаслідок того, що в дискретних зонах навкруги кожної частинки відбувається корисна робота, процес трансформації механічної енергії вже не можна вважати оберненим. Чим швидше відбувається перетворення кінетичної енергії в потенційну, тобто чим вище значення прискорення, тим більша частина енергії потоку спрямовується на виконання корисної роботи для деформації і руйнування частинок [1; 2].

У реальних апаратах непродуктивні витрати енергії можна зменшити, якщо поверхні стінок каналу зробити більш гладкими, а профілі конфузійної і дифузійної частини — оптимальними з найменшими втратами напором потоку. Таким чином, велике значення для умов виникнення ефектів кавітації надається вибору геометричних параметрів конструкції змішувача [5; 6].

**Метою дослідження** є вивчення особливостей впливу конструкції гідродинамічних кавітаційних змішувачів на обробку водної суспензії фосфоліпідів, визначення оптимальних умов перебігу процесу й отримання емульсії із заданим розміром частинок.

**Матеріали і методи.** Для проведення досліджень використовувався кавітаційний апарат статичного типу. Як кавітаційний реактор для створення гідродинамічної кавітації використовувались два види сопел різних профілей. Сопло першого реактора — кут розкриття конфузора  $90^\circ$ , діаметр горловини сопла 10 мм, довжина горловини сопла 20 мм і кут розкриття дифузора  $120^\circ$  (рис. 1а); сопло другого реактора — кут розкриття конфузора  $90^\circ$ , діаметр горловини сопла 10 мм та 12 мм, довжина горловини сопла 20 мм і кут розкриття дифузора  $12^\circ$  (рис. 1б).

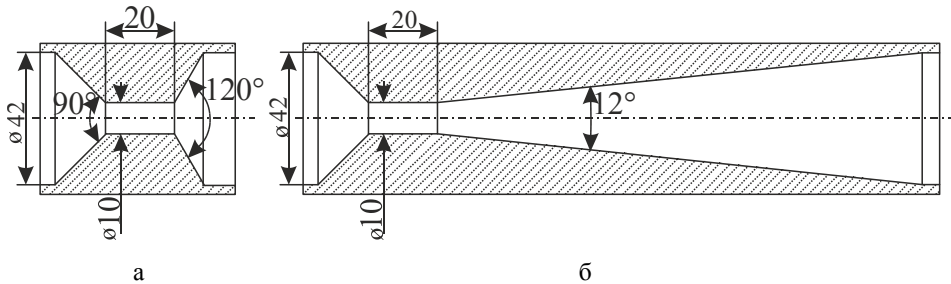


Рис. 1. Схема соплових пристроїв

Практично технологічну ефективність і інтенсивність перебігу кавітаційних процесів оцінювали за однорідністю складної гетерогенної системи, стійкістю емульсії і розподілом утворених частинок за розміром. Діаметр частинок вимірювався методом фотонної кореляційної спектроскопії на лазерному фотонно-кореляційному спектрометрі Zetasizer-3 (Malvern Instruments, Велика Британія) [7; 8].

**Результати і обговорення.** Результати дослідження впливу конструкції сопла кавітаційного реактора I і II типу (відповідно, рис. 1а і рис. 1б) з використанням діафрагми, що перекриває потік на 75% на умовний середній діаметр утворених частинок при поступовому посиленні кавітаційного впливу за рахунок збільшення циклічності обробки представлені на рис. 2. Діаметр горловини сопла становив 10 мм, початкова температура матеріалу  $40 \pm 2^\circ$ , концентрація фосфоліпідів 5%.

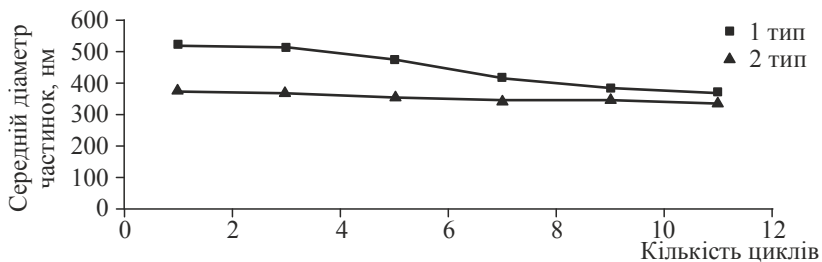


Рис. 2. Залежність впливу профілю сопла кавітаційних реакторів на середній діаметр утворених частинок

Аналіз отриманих результатів (рис. 2) показав, що в обох серіях експериментів кавітаційне диспергування відбувається поступово. В кожному наступному циклі обробки при проходженні дисперсної системи через зону кавітації під впливом кавітаційних бульбашок і утворених кумулятивних мікроструменів частинки зменшуються, що призводить до збільшення дисперсності всієї системи.

Отримані результати свідчать, що використання сопла з меншим кутом розкриття дифузора (тип 2) і збільшенням кавітаційної зони призводить до поліпшення якості гомогенізації і зменшення середнього діаметра частинок. Уже після першого циклу диспергування гетерогенної системи з фосфоліпідами в кавітаційному реакторі II типу з горловиною сопла  $d_c = 0,010$  м середній діаметр частинок після 1 циклу диспергування становить 380 нм, що на 140 нм менше за частинки, утворені при відповідній обробці в апараті з соплом I типу. Після дев'ятого циклу обробки ця залежність дещо зменшується.

Середній діаметр частинок зразків, отриманих на установці із соплом I типу, послідовно зменшується з кожним новим проходженням емульсії через зону кавітації і досягає заданого значення після дев'ятого циклу обробки. Використання реактора II типу з меншим кутом розкриття дифузора дає змогу поліпшити умови диспергування і підвищити ефективність гомогенізації.

Посилення кавітаційного впливу за рахунок збільшення кількості циклів обробки суспензії фосфоліпідів в установці з соплом II типу не призводить до суттєвого зменшення середнього діаметра частинок (від 395 нм після першого циклу обробки до 340 нм після 11 циклів), що свідчить про те, що процес кавітаційного диспергування практично припинився вже після п'ятого циклу. Отриманий результат можна пояснити тим, що частинки емульсії досягли дуже малих розмірів в порівнянні з розмірами кавітаційних бульбашок і не руйнують їх, а відштовхуються. Тому подальша обробка емульсії в кавітаційному змішувачі не забезпечує підвищення дисперсності системи. Для отримання більш дрібнодисперсних емульсій необхідно генерувати більш високу інтенсивність кавітації режиму.

Було досліджено вплив діафрагм, що встановлювались у потоці після кавітаційного змішувача на інтенсивність впливу кавітаційних ефектів у складних гетерогенних системах із фосфоліпідами. Залежність середнього діаметра частинок системи з фосфоліпідами після обробки впродовж п'яти циклів у кавітаційних реакторах I і II типу з діаметром горловини сопла  $d_c = 0,010$  м без діафрагми і з діафрагмами різної площі перекриття потоку наведена на рис. 3.

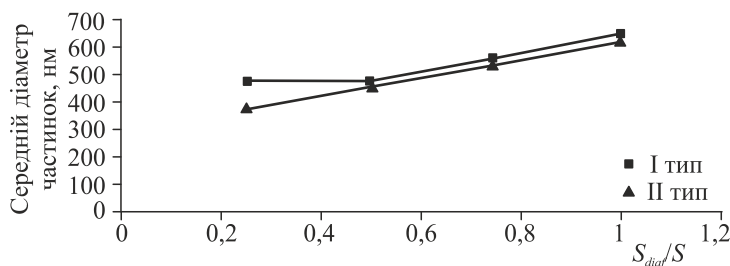


Рис. 3. Залежність середнього діаметра частинок від площі перекриття діафрагми

Як видно з рис. 3, використання діафрагм у потоці після соплового пристрою призводить до посилення кумулятивних впливів на середовище. Обробка дисперсної системи в змішувачі без діафрагми ( $S_{diag}/S = 1$ ) призводить до утворення частинок із середнім умовним діаметром 610 нм для сопла II типу і 650 нм для сопла I типу. В результаті перекривання потоку за допомогою діафрагми діаметр утворених частинок зменшується. Найменший середній умовний діаметр утворених частинок спостерігається при перекриванні потоку на 75% ( $S_{diag}/S = 0,25$ ) і становить 370 нм — для сопла II типу і 480 нм — для сопла I типу. Це свідчить про покращення умов диспергування і посилення кумулятивних ефектів.

Результати дослідження середнього діаметра частинок системи з фосфоліпідами після обробки в кавітаційному реакторі II типу при різних діаметрах горловини сопла: 0,01 м і 0,012 м при диспергуванні до 11 циклів обробки без використання діафрагми ( $S_{diag}/S = 1$ ) наведені на рис. 4.

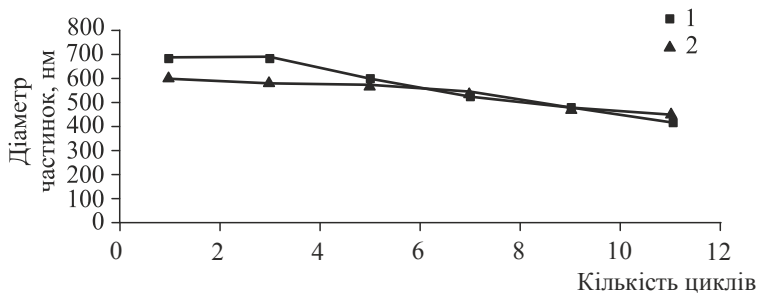


Рис. 4. Залежність середнього діаметра частинок системи з фосфоліпідами після обробки в кавітаційному реакторі II типу: 1 — з діаметром горловини сопла  $d_c = 0,012$  м; 2 — діаметром горловини сопла  $d_c = 0,010$  м

Отримані результати (рис. 4) свідчать, що при диспергуванні гетерогенної системи з фосфоліпідами в кавітаційному реакторі II типу з горловиною сопла  $d_c = 0,010$  м середній діаметр частинок після 1 циклу диспергування становить 600 нм, збільшення діаметра сопла до  $d_c = 0,012$  м з приводить до збільшення розміру утворених частинок, їх середній діаметр становить 682 нм. Це доводить більш високу інтенсивність кавітаційних ефектів при використанні сопла з діаметром  $d_c = 0,010$  мм. Після диспергування впродовж перших п'яти циклів середній діаметр обох зразків стає майже однаковим. Таким чином, у результаті 11 циклів кавітаційної обробки в реакторі II типу середній діаметр обох зразків дорівнює 420—440 нм.

### Висновки

Дослідження показали високу ефективність використання кавітаційних явищ при обробці складних гетерогенних систем для отримання нано- і мікроемульсій із заданими властивостями. Встановлено, що найбільш ефективним є використання кавітаційних змішувачів з кутом розкриття конфузора  $90^\circ$ , кутом розкриття дифузора  $12^\circ$  і внутрішнім діаметром горловини 10—12 мм та з діафрагмою, що перекриває потік на 75%. Вибрана конструкція кавітатора дає змогу отримати стійкі моношарові везикули з середнім умовним діаметром

370 нм і внутрішнім об'ємом 12 мг/г ліпиду. На основі аналізу результатів досліджень доведено, що використання додаткового місцевого опору у вигляді діафрагми забезпечує посилення кавітаційного впливу при диспергуванні дослідних зразків і покращення гідродинамічних умов проведення процесу.

### **Література**

1. Долинский А.А. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах/ А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий.— Киев : Наукова думка, 2008. — 382 с.
2. Долинский А.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях/ А.А. Долинский, Б.И. Басок, И.С. Гулый, А.И. Накорчевский, Ю.А. Шурчкова. — Киев : Наукова думка, 1996. — 208 с.
3. Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов). Ч. I / И.М. Федоткин, И.С. Гулый. — Киев : Полиграфкнига, 1997. — 838 с.
4. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах/ Т.М. Вітенько. — Тернопіль : ТДТУ ім. І.Пулюя, 2009. — 220 с.
5. Jitendra Carpenter Low pressure hydrodynamic cavitating device for producing highly stable oil in water emulsion: Effect of geometry and cavitation number/ Jitendra Carpenter, Suja George, Virendra Kumar Saharan — Chemical Engineering and Processing: Process Intensification — 2017. — Vol. 116. — P. 97—104.
6. Brinkhorsta S. Experimental and numerical investigation of the cavitation-induced choked flow in a herschel venturi-tube / S. Brinkhorsta, E. von Lavantea, G. Wendtb // Flow Measurement and Instrumentation. — 2017. — Vol. 54. — P. 56—67.
7. Yegin B. Lipid nanocapsule size analysis by hydrodynamic chromatography and photon correlation spectroscopy // B. Yegin, A. Lamprecht // International Journal of Pharmaceutics. — 2006. — № 320. — P. 165—170.
8. Henk G. Merkus. Particle Size Measurements. Fundamentals, Practice, Quality. — Springer, 2009. — 533 p.