

УДК 66.063

## DISTRIBUTION OF EMULSION IN MULTISTAGE CAVITATION APPARATUS

**A. Litvinenko, S. Kadomsky, B. Pashchenko***National University of Food Technology*

---

**Key words:**

cavitation,  
cavitation treatment,  
emulsions,  
the multiplicity of  
processing,  
hydrodynamic cavitation  
apparatus

---

**Article history:**

Received 10.10.2018

Received in revised  
form 16.11.2018

Accepted 20.11.2018

---

**Corresponding author:**

hoykke@gmail.com

---

**ABSTRACT**

The article presents the experimental results of the processing of emulsions in hydrodynamic cavitation apparatus. It has been established that the use of multistage apparatus contributes to the simplification of the technological scheme and ensures the required quality of the finished product. The authors have designed and manufactured an experimental setup for research. The results obtained give grounds to conclude that the choice of multi-stage processing is due to the need to abandon the circulation scheme. The implementation of the circulation treatment leads to a deterioration in the quality of the final product. It is established that the using of single-stage cavitation apparatus for processing emulsions is inefficient, because the resulting product does not match the required characteristics. When the collapse of cavitation bubbles is accompanied "hard" shock-wave action on the components of the environment than the operating modes correspond to bubble form of cavitation. Comparative analysis of the results allows arguing that emulsion does not achieve high dispersion when processing in a single stage apparatus. The content of coarse disperse particles is significantly reduced at the two-stage processing, which indicates about the intensification of shock-wave action on the emulsified component of collapsing cavitation bubbles. This indicates a significant increase the content in the emulsion of the small disperse component. The using of devices with successive zones of cavitation treatment allows to obtaining an emulsion with the necessary dispersion parameters. The use of two-stage apparatus improves the quality of emulsions. However, a three-stage treatment in HDC with a value of  $Re$  11.6—8.2 allows to obtaining a finely dispersed emulsion with an oil phase size of 3.5—4.6  $\mu m$ . It was found that with increasing  $Re$  dispersion decreases, and the emulsion acquires an increased delamination resistance. On the basis of the conducted research, the authors proposed a design of a hydrodynamic cavitation apparatus, where each subsequent cavitator along the flow has a smaller size than the previous one. In this case, the hydrodynamic treatment mode should ensure the stage of cavitation behind the last cavitator in the range of 2.5—2.6.

---

DOI: 10.24263/2225-2916-2018-24-14

---

## ДИСПЕРГУВАННЯ ЕМУЛЬСІЙ У БАГАТОСТУПЕНЕВИХ КАВІТАЦІЙНИХ АПАРАТАХ

О.А. Литвиненко, д-р техн. наук  
С.В. Кадомський, канд. техн. наук  
Б.С. Пашенко

*Національний університет харчових технологій*

*У статті представлено експериментальні результати обробки емульсій у гідродинамічних кавітаційних апаратах. Встановлено, що використання багатоступеневих апаратів сприяє спрощенню технологічної схеми і забезпечує необхідну якість готового продукту. Отримані результати дають підставу зробити висновки, що вибір багатоступінчастої обробки обумовлений необхідністю відмови від циркуляційної схеми. Реалізація циркуляційної обробки призводить до погіршення якості кінцевого продукту. З'ясовано, що використання одноступінчатих кавітаційних апаратів для обробки емульсій неефективне, оскільки отриманий продукт не відповідає необхідним параметрам. Робочі режими відповідають бульбашковій формі кавітації, коли колапс кавітаційних бульбашок супроводжується «жорсткою» ударно-хвильовою дією на компоненти середовища. Порівняльний аналіз одержаних результатів дає підстави стверджувати, що при обробленні в одноступеневому апараті емульсія не досягає високих показників дисперсності. Використання апаратів з послідовними зонами кавітаційної обробки дає змогу одержувати емульсію з потрібними дисперсійними характеристиками.*

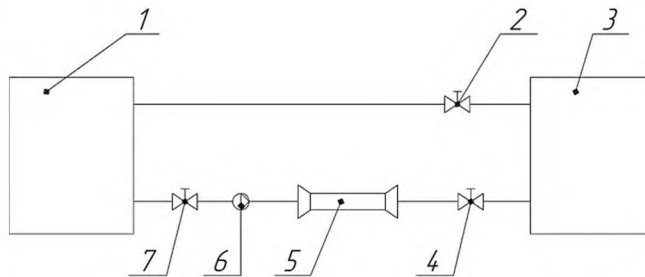
**Ключові слова:** кавітація, кавітаційна обробка, емульсії, кратність обробки, гідродинамічний кавітаційний апарат.

**Постановка проблеми.** Реалізація більшості технологічних процесів у різних галузях промисловості — харчовій, хімічній, мікробіологічній, потребує застосування відповідного обладнання для інтенсифікації масообмінних процесів. Одним із перспективних напрямків їх реалізації є використання сучасних технологій для підвищення ефективності дії на середовища. Фізико-механічні явища, що супроводжують кавітацію, відповідають цим вимогам. Незалежно від способу її збудження виникає «розрив» суцільності локального об'єму або течії технологічного потоку. Утворювані при цьому кавітаційні бульбашки спричинюють інтенсивну ударно-хвильову дію на середовище [1; 2], внаслідок чого досягається необхідна якість кінцевого продукту при відносно невисоких питомих енерговитратах. Саме такі умови ефективно реалізуються в гідродинамічних кавітаційних апаратах (ГКА) проточного типу, які використовуються в типових технологічних схемах або у складі обладнання різного призначення.

Відомо [2], що диспергування емульсій у ГКА забезпечує їх належні технологічні показники — дисперсність, стійкість до розшарування тощо. Однак для одержання емульсій необхідної якості є обмежувальний фактор — кратність оброблення, тобто кількість «проходів» технологічного потоку через зону кавітаційної дії. Для продуктів з різними властивостями необхідна відповідна інтенсивність оброблення. Встановлено, що надмірна кратність оброблення в режимі рециркуляції приводить до агломерації жирових кульок емульсії [1], що нераціонально внаслідок втрати кінцевим продуктом своїх споживних властивостей. З цією метою можна розглянути як перспективний спосіб послідовне оброблення, яке реалізується в одному технологічному апараті, щоб уникнути перекачування продуктів насосом по циркуляційному контуру.

**Мета досліджень.** Вивчення особливостей диспергування емульсій і раціоналізація відповідних технологічних процесів з використанням багатоступених кавітаційних апаратів, що мають послідовні зони оброблення по довжині апарата, для забезпечення сприятливих умов підвищення якості кінцевого продукту без застосування циркуляційної схеми. Як свідчать результати [3], одержані в двохступених ГКА, така обробка емульсій є перспективним напрямом досліджень.

**Матеріали і методи.** Для уточнення одержаних показників авторами використана експериментальна кавітаційна установка, схема якої наведена на рис. 1. Вона має вигляд циркуляційного контуру з робочими ємкостями 1, 3, відповідно для вихідного та оброблюваного продукту, ГКА 5, запірно-регулювальною арматурою 2, 4, 7, насоса 6 та засобами контролю (на рисунку не показано). В дослідженнях використовували ГКА з можливістю реалізації багатоступеневого оброблення модельної речовини у вигляді водо-масляної емульсії з вмістом 5% масляної фази.



**Рис. 1. Схема експериментальної кавітаційної установки:**

1, 3 — робочі ємкості; 2, 4, 7 — запірно-регулювальна арматура; 5 — ГКА; 6 — насос

Одними з показників, що характеризують ерозійну активність кавітаційної зони та її структуру, є характерний розмір бульбашок, які утворюються при розпаді каверни. Встановлено, що найбільш ефективне оброблення забезпечується при стадії кавітації 2,5 (стадія кавітації — відношення довжини кавітаційної зони, яку генерує розташований у проточній камері ГКА збудник кавітації — кавітатор, до його характерного діаметра) [1; 4]. Такі режими відповідають бульбашковій формі кавітації, коли колапс кавітаційних бульбашок супроводжується «жорсткою» ударно-хвильовою дією на компоненти середовища.

**Результати досліджень.** Мікроскопічний аналіз зразків емульсій, одержаних в одноступеневому апараті, показав, що при  $Re\ 13,7 \cdot 10^4$  кількість жирових кульок з розмірами в діапазоні до 4 мкм становить понад 30% і співставна із загальною кількістю кульок з розмірами 4...6 мкм. У зразках наявні кульки і понад 10 мкм, але їх кількість відносно невелика і не перевищує 6% від загальної кількості.

Дисперсність емульсій, одержаних при  $Re\ 9,8 \cdot 10^4$ , показує, що кількість жирових кульок з розмірами до 2 мкм практично не збільшилась, а розміри кульок в діапазоні 4...8 мкм дещо підвищились і в загальній кількості їх сумарна частка становить понад 50%. Водночас відбулось перегрупування кульок з розмірами понад 8...10 мкм, а їх відносний вміст зменшився в загальній кількості обчислених зразків. Концентрація кульок з розмірами понад 10 мкм дещо збільшилась, що можна пояснити менш сприятливими гідродинамічними умовами.

При  $Re\ 8,3 \cdot 10^4$  характер течії близький до турбулентного, чим можна пояснити відсутність дрібнодисперсних кульок, а їх більшість групується в діапазоні понад 4 до 6 мкм. Причому кількість жирових кульок з розмірами 6...8 мкм становить понад 30%. Середня кількість кульок з розмірами понад 8...10 мкм практично не змінилась порівняно з попереднім дослідом і становить близько 18%.

Такий повторювальний результат можна пояснити коагуляцією (агрегуванням) жирових кульок внаслідок їх недостатнього подрібнення.

Порівняльний аналіз одержаних результатів дає підстави стверджувати, що при обробленні в одноступеневому апараті емульсія не досягає високих показників дисперсності, а ефективність емульгування визначається переважно величиною критерію  $Re$  і, зі зменшенням швидкості оброблюваного потоку, ефективність оброблення знижується, про що свідчить збільшення розміру  $d_{оп}$  жирових кульок від 5,3 до 6,1 мкм.

На другому етапі досліджень використовували апарат з двома послідовними ділянками, що моделюють двоступінчатий ГКА, забезпечуючи обране раціональне співвідношення розмірів кавітаторів і стадію кавітації 2,5...2,6. При регулюванні швидкості потоку рідини в ГКА підтримували величини  $Re$  близькими до попередніх значень. Такий підхід дає можливість зіставляти одержані результати. Аналіз дисперсних характеристик одержаної емульсії показує, що при  $Re\ 12,0 \cdot 10^4$  суттєво збільшується кількість жирових кульок в діапазоні до 6 мкм і сумарно складає понад 70 % від загальної кількості обрахованих. Понад 38% кульок знаходиться в розмірному діапазоні 2...4 мкм. Порівняно з одноступеневим обробленням вміст кульок понад 8 мкм зменшився 10%, що свідчить про інтенсифікацію ударно-хвильової дії на емульсований компонент колапсуючих кавітаційних бульбашок.

При зменшенні величини  $Re$  до  $9,5 \cdot 10^4$  встановлена закономірність розподілу дисперсії в цілому зберігається — понад 60% жирових кульок мають розміри 2...6 мкм. Вміст емульсованого компонента з розмірами понад 8 мкм практично не змінився і становить близько 10%. Порівняно з попередніми дослідом перерозподіл характерних розмірів кульок емульсії пов'язаний зі зменшенням швидкості технологічного потоку і, відповідно, критерію  $Re$ .

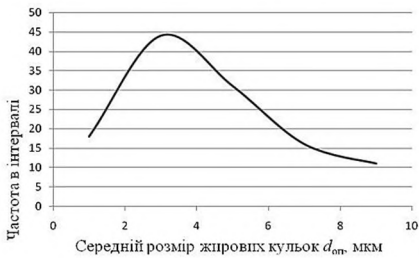
Зменшення величини  $Re$  до  $8,4 \cdot 10^4$  також забезпечує утворення емульсії з вмістом емульсованого компонента з розмірами до 4 мкм майже 40%, а в розмірному діапазоні 6...8 мкм — понад 47%. Вміст жирових кульок понад 8 мкм порівняно з попереднім дослідом практично не змінився.

При приготуванні емульсій у тріступеневому апараті гідродинамічний режим підбирали таким чином, щоб забезпечувати стадію кавітації за останнім по ходу потоку кавітатором 2,5...2,6. Встановлено, що при забезпеченні  $Re\ 11,6 \cdot 10^4$  в зразках обробленої емульсії переважає кількість дисперсної фази з розмірами до 4 мкм і становить майже 60% від загальної кількості. Це свідчить про суттєве збільшення вмісту в емульсії дрібнодисперсного компонента. Решта кульок знаходиться в розмірному діапазоні 4...8 мкм. Часточок диспергованого компонента понад 10 мкм не виявлено.

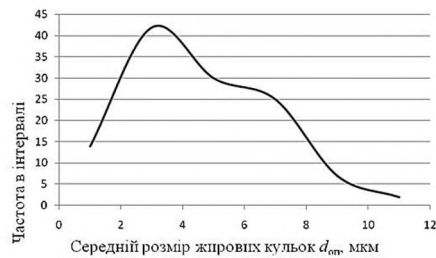
Відповідний графік залежності розподілу середніх розмірів жирових кульок в емульсії при досліджених умовах наведено на рис. 2.

Визначення дисперсності емульсій, одержаних при  $Re\ 9,1 \cdot 10^4$  підтверджує закономірності розподілу розмірів кульок, який аналогічний попереднім дослідом. Спостерігається незначне зниження дрібнодисперсної фази до 30 мкм

майже до 51%, а решта групується в діапазоні понад 30 мкм до 75 мкм. Причому розмірний діапазон від 30 мкм до 45 мкм становить понад 25% від загальної кількості часточок диспергованого компонента.

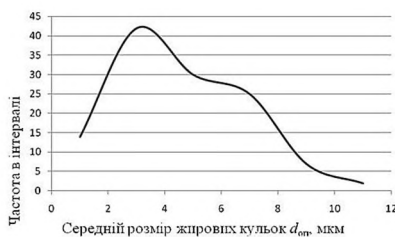


**Рис. 2.** Залежність вмісту жирових кульок у зразках від їх середніх розмірів при  $Re\ 11,6 \cdot 10^4$

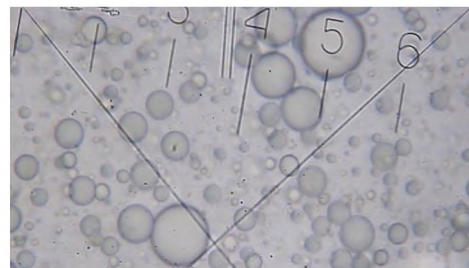


**Рис. 3.** Залежність вмісту жирових кульок у зразках від їх середніх розмірів при  $Re\ 9,1 \cdot 10^4$

Зменшення величини  $Re$  до  $8,2 \cdot 10^4$  обумовлює зниження до 11 % вмісту дрібнодисперсного компонента емульсії з розмірами до 2 мкм. Переважна частина жирових кульок знаходиться в діапазоні від 4 до 6 мкм (близько 60%). Зовсім незначна кількість кульок перевищує розмір 8...10 мкм. Це можна пояснити агрегуванням більш дрібнодисперсних часточок. Графік, наведений на рис. 4, ілюструє розподіл емульсованого компонента в досліджуваних зразках. Одержані результати показують, що зі збільшенням кількості ділянок ГКА і підвищенням величини критерія Рейнольдса одержана емульсія стає більш дрібнодисперсною. Крім того, потрібно врахувати, що кожний наступний за ходом потоку кавітатор створює гідравлічний опір (тобто «підпір» тиску) і не дає можливості приєднаній кавітаційній камері розвинути до кінцевих розмірів (суперкавітації) та забезпечує стадію кавітації 2,5...2,8.



**Рис. 4.** Залежність вмісту жирових кульок у зразках від їх середніх розмірів при  $Re\ 8,2 \cdot 10^4$



**Рис. 5.** Мікрофотографія (х600) жирових кульок емульсії

За таких умов змінюється структура кавітаційного поля, в якому переважають бульбашки відносно дрібних розмірів, які мають найбільшу ерозійну активність і є джерелом інтенсивної ударно-хвильової дії на частинки дисперсійного компоненту. Крім того, у триступеневому, як і в двоступеневому обробленні, в ГКА відбувається перегрупування розмірів жирових кульок емульсії в бік їх зменшення навіть при співставних величинах критерія  $Re$ , що можна пояснити збільшенням гідростатичного тиску в зоні захоплення кавітаційних бульбашок. Це приводить до узгодженого колапсу кластерів з приблизно однаковими

розмірами [4; 5], причому сумарний тиск захопування підвищується майже на порядок порівняно із захопуванням поодинокі бульбашки [5].

Величину граничних швидкостей поширення ударної хвилі і тисків можна приблизно оцінити, аналізуючи дані, наведені в [6]. На рис. 5 наведена мікрофотографія характерних розмірів жирових кульок емульсії, одержаної при приготуванні в триступеневому апараті.

При дослідженні динаміки захопування кавітаційної бульбашки за допомогою швидкісного фотореєстратора встановлено, що при колапсі бульбашки утворюється ударна хвиля зі швидкістю до  $1,81 \cdot 10^3$  м/с, а граничний тиск досягає  $7 \cdot 10^4$  МПа. Причому за основною хвилею поширюється вторинна, що генерується в зоні стиснення першої, досягає первинної і частково її підсилює [7]. Таким чином створюються сприятливі умови для інтенсифікації подрібнення дисперсного компонента, внаслідок чого якість одержаної емульсії підвищується.

Показником, що дає можливість кількісно порівняти ефективність кавітаційної дії на одержані емульсії, є розрахований показник об'ємно-поверхневий діаметр  $d_{\text{оп}}$  [1] для всіх досліджених умов, наведений у таблиці.

Таблиця. Порівняльні характеристики зразків одержаних емульсій

Характеристика апарата	$Re \cdot 10^4$	$d_{\text{оп}}, \text{мкм}$
Одноступеневий	13,7	5,2
	12,8	5,4
	8,3	6,1
Двоступеневий	12,0	4,5
	9,5	4,7
	8,4	5,0
Триступеневий	11,6	3,5
	9,1	4,3
	8,2	4,6

Аналіз одержаних результатів показує, що найбільш дрібнодисперсна емульсія одержується в триступневих апаратах, дещо менша — в двоступневих відповідно при  $Re \ 11,6 \cdot 10^4$  та  $Re \ 12,0 \cdot 10^4$ . Аналогічний розподіл спостерігається відповідно і при  $Re \ 9,1 \cdot 10^4$  та  $Re \ 9,5 \cdot 10^4$ , причому найкращі показники дисперсності практично збігаються. При зменшенні величини  $Re$  середній розмір часточок дисперсної фази практично однаковий для всіх типів кавітаційних апаратів.

Варто відзначити, що досліджені показники дисперсності одержані для емульсій, при приготуванні яких не використовували емульгатор, а процес проводили при температурі  $21 \dots 22^\circ\text{C}$ . Очевидно, що при зміні технологічних умов характеристики емульсії можуть бути іншими.

На підставі проведених досліджень запропоновано гідродинамічний кавітаційний реактор, який містить проточну камеру, де на повздовжньо розміщеному стрижні встановлені кавітатори на відстані один від одного. Максимальний розмір у поперечному перетині першого за потоком кавітатора становить не менше  $0,9d$ , де  $d$  — внутрішній діаметр проточної камери. Розмір кожного наступного кавітатора зменшується на  $0,1d$ , їх кількість становить не більше трьох, а відстань між ними не менше  $(7 \dots 10)d$  [8].

**Висновки.** Підтверджено та експериментально доведено доцільність використання оброблення емульсій у багатоступневому кавітаційному апараті для досягнення високого технологічного результату без використання циркуляційної схеми оброблення.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Федоткин И. М. Кавитационная техника и технология: их использование в промышленности / И. М. Федоткин, И. С. Гулый. — К. : Полиграфкнига, 1997. — 839 с.
2. Кавітаційні пристрої в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості / О.А. Литвиненко, О.І. Некоз, П.М. Немирович, З. Кондрат. — К. : РВЦ УДУХТ, 1999. — 87 с.
3. Некоз О.І. Інтенсифікація технологічних процесів у гідродинамічних кавітаційних апаратах / О.І. Некоз, О.А. Литвиненко, З. Кондрат // Вібрації в техніці і технологіях. — 2009. — № 3(55). — С. 114—116.
4. Мачинский А.С. Кавитационные аппараты : обзорная информация / А.С. Мачинский, О.В. Козюк, Д.Н. Шишлов. — М., ЦНИИТЭИНефтехим. — 1990. — Вып. 1. — 52 с.
5. Кувшинов Г.И. Акустическая кавитация у твердых поверхностей / Г. И. Кувшинов, П. П. Прохоренко. — Минск, Наука і тэхніка, 1990. — 112 с.
6. Эрозия / А. Эванс, А. Рафф А., С. Видерхорн [и др.], под ред. К. Прис, пер. с англ. В.В. Альтова [и др.]. — М. : Мир, 1982. — 464 с.
7. Теляшов Л.Л. Экспериментальное исследование стадии схлопывания парогазовой полости в воде / Л.А. Теляшов, В.А. Охотин, А.Г. Полевых // Симпоз. по физике акустогидродинамических явлений: материалы симпоз. : 17-21 ноября 1975 г. — М. : Наука, 1975. — С. 118—125.
8. Патент 99234 UA, МПК B01J 19/24 (2006.01) Гідродинамічний кавітаційний реактор / Литвиненко О.А., Некоз О.І., Дзюб О.Г., Матяш О.В. ; заявник : Національний університет харчових технологій — № u 2014 13227 ; заявл. 11.12.2014 ; опубл. 25. 05. 2015, Бюл. № 10, 2015 р.

## **ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЭМУЛЬСИЙ В МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ КАВИТАЦИОННЫХ АППАРАТАХ**

**О.А. Литвиненко, С.В. Кадомский, Б.С. Пашенко**  
*Национальный университет пищевых технологий*

В статье представлены экспериментальные результаты обработки эмульсий в гидродинамических кавитационных аппаратах. Установлено, что использование многоступенчатых аппаратов способствует упрощению технологической схемы и обеспечивает необходимое качество готового продукта. Полученные результаты дают основание сделать вывод, что выбор многоступенчатой обработки обусловлен необходимостью отказа от циркуляционной схемы. Реализация циркуляционной обработки приводит к ухудшению качества конечного продукта. Определено, что использование одноступенчатых кавитационных аппаратов для обработки эмульсий неэффективно, поскольку полученный продукт не соответствует необходимым параметрам. Рабочие режимы соответствуют пузырьковой форме кавитации, когда коллапс кавитационных пузырьков сопровождается «жестким» ударно-волновым действием на компоненты среды. Сравнительный анализ полученных результатов позволяет утверждать, что при обработке в одноступенчатом аппарате эмульсия не достигает высоких показателей дисперсности. Использование аппаратов с последовательными зонами кавитационной обработки позволяет получать эмульсию с необходимыми дисперсионными показателями.

**Ключевые слова:** кавитация, кавитационная обработка, эмульсии, кратность обработки, гидродинамический кавитационный аппарат.