

УДК 532.528

В.В. Анісімов, аспірант**П.П. Єрмаков**, д-р техн. наук

ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет”, м. Дніпропетровськ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КАВІТАЦІЇ В ЗАНУРЕНОМУ СОПЛІ**В.В. Анисимов**, аспирант**П.П. Ермаков**, д-р техн. наук

ГБУЗ “Украинский государственный химико-технологический университет”, г. Днепропетровск, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ В ПОГРУЖЕННОМ СОПЛЕ**V.V. Anisimov**, post-graduate student**P.P. Yermakov**, Doctor of Technical Sciences

SHED USUCT, Dnipropetrovsk, Ukraine

INVESTIGATION OF CAVITATION PROCESS IN SUBMERGED NOZZLE

Розглянуто вплив геометричних параметрів кавітаційного сопла зануреного типу на інтенсивність кавітації в ньому. Представлено результати експериментальних досліджень взаємозв'язку між довжиною, діаметром вузької частини сопла та інтенсивністю кавітації. Результати досліджень підтверджено за допомогою аналізу дисперсності емульсії, отриманої з використанням досліджуваних сопел.

Ключові слова: кавітація, кавітаційне сопло, геометричні параметри, інтенсивність кавітації, емульгування.

Рассмотрено влияние геометрических параметров кавитационного сопла погруженного типа на интенсивность кавитации в нем. Представлены результаты экспериментальных исследований взаимосвязи между длиной, диаметром узкой части сопла и интенсивностью кавитации. Результаты исследований подтверждены путем анализа дисперсности эмульсии, полученной с использованием исследуемых сопел.

Ключевые слова: кавитация, кавитационное сопло, геометрические параметры, интенсивность кавитации, эмульгирование.

The influence of the geometric parameters of the submerged cavitation nozzle on cavitation intensity in it is considered. Results of experimental studies of the relationship between the length, diameter of the nozzle narrow part and the cavitation intensity are presented. Studies are confirmed by analyzing the dispersion of the emulsion prepared using the investigated nozzles.

Key words: cavitation, cavitation nozzle, the geometrical parameters, the intensity of cavitation, emulsification.

Постановка проблеми. Кавітація – явище виникнення в рідині парових, газових або парогазових бульбашок із зародків під дією локальних низьких тисків з можливим наступним їх схлопуванням.

Вперше явище кавітації було теоретично передбачене Рейнольдсом. На практиці ж людство вперше зіткнулося з кавітацією в кінці XIX століття при випробуваннях швидкісних морських судів [1; 2] як з суто негативним явищем, яке призводило до ерозійного руйнування деталей машин, виникнення шумів та вібрацій.

Починаючи з середини XX століття, отримав розвиток напрямок використання кавітації для інтенсифікації процесів хімічної технології.

На сьогодні кавітаційні технології знайшли широке застосування в багатьох галузях хімічної промисловості, зокрема в загальній хімічній, харчовій, нафтохімічній промисловостях. Найбільш поширеним застосуванням кавітації є інтенсифікація процесів тонкого перемішування, диспергування, емульгування, абсорбції [2; 3]. Також за допомогою кавітації інтенсифікують або навіть ініціюють протікання хімічних реакцій [4].

Широке застосування кавітації в промисловості обумовлює необхідність у подальших наукових дослідженнях цього явища як з фундаментальної, так і з прикладної сторони.

Нині існує значний теоретичний та практичний дослідницький матеріал, що стосується кавітації в рідині. Зокрема, в теоретичній сфері існує велика кількість математичних моделей руху кавітаційної бульбашки. Загальноприйнятим рівнянням, що застосовується для описання руху кавітаційної бульбашки, є рівняння Релея-Плесета [5]. Проте на сьогодні немає жодної математичної моделі, яка б одночасно враховувала всі фактори, що впливають на кавітацію і давала б абсолютно точне описання процесу.

Тому актуальними є експериментальні дослідження процесу кавітації. Зокрема, актуальним є визначення таких умов проходження процесу кавітації, при яких би цей процес відбувався з найбільшою інтенсивністю при найменших енерговитратах.

Об'єкти та методики досліджень. Дослідження проводились на експериментальній струменевій кавітаційній установці (рис. 1).

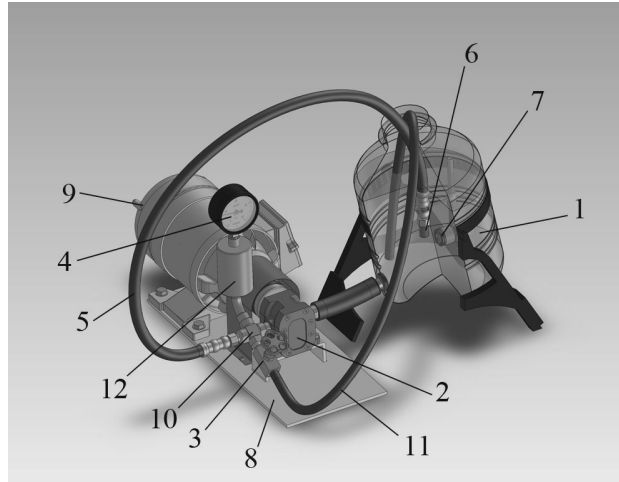


Рис. 1. Загальний вигляд кавітаційної установки:

1 – буферна ємність; 2 – насос шестеренний; 3 – вентиль; 4 – манометр; 5 – напірний трубопровід; 6 – кавітаційне сопло; 7 – датчик; 8 – плита; 9 – двигун; 10 – розподільчий вузол; 11 – трубопровід скидання; 12 – компенсатор тиску

Установка працює таким чином. Рідина з буферної ємності 1 всмоктується шестеренним насосом 2, з якого під тиском, що задається вентилем 3 та вимірюється манометром 4, подається через напірний трубопровід 5 до кавітаційного сопла 6. У кавітаційному соплі 6 рідина значно прискорюється і в ній починають зростати кавітаційні бульбашки. Після виходу з сопла кавітаційні бульбашки схлопуються, а імпульси тиску, що при цьому виникають, фіксуються датчиком 7 на базі п'єзоелектричного елемента та передаються на комп'ютер у вигляді осцилограм. Такі акустичні дослідження дозволяють проводити порівняно велику кількість дослідів і, таким чином, отримати повну інформацію про досліджуваний процес.

За амплітудою коливань в осцилограмі оцінюється інтенсивність кавітації в соплі.

Після виходу з сопла рідина певний проміжок часу знаходиться в буферній ємності 1, при цьому перемішуючись, після чого знову потрапляє до шестеренного насоса 2 через всмоктувальний патрубок. Таким чином здійснюється багатократне оброблення рідини.

Як основний об'єкт дослідження обрано кавітаційне сопло зануреного типу, ескіз якого наведений на рис. 2.

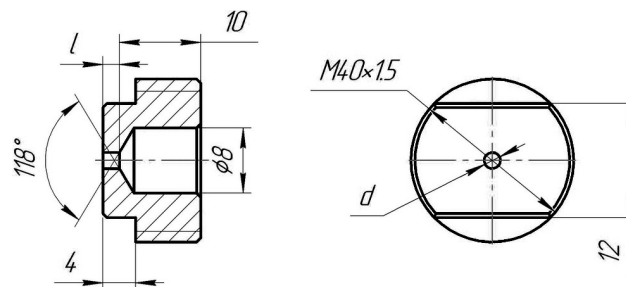


Рис. 2. Ескіз кавітаційного сопла

Слід зазначити, що у вищенаведеному соплі відсутній вихідний дифузор, що є характерним для типових кавітаційних сопел. Усунення вихідного дифузора виконано з по-

зиці відкидання впливу зайвих факторів, зокрема довжини та кута розкриття дифузора, на інтенсивність кавітації в соплі.

Основною метою цього дослідження є вивчення впливу довжини вузької частини l кавітаційного сопла на інтенсивність кавітації при різних діаметрах d сопла (рис. 2).

Для підтвердження отриманих експериментальних даних акустичних досліджень та як приклад практичного застосування отриманих результатів використовували оптичні дослідження отриманої емульсії. Інтенсивність процесу емульгування оцінювалась, виходячи з розмірів часток мастила у воді в отриманій емульсії. Оптичні дослідження проводились на оптичному мікроскопі Eriquant.

Як робоча рідина під час проведення акустичних досліджень використовувалась суміш води та 0,7 об'ємн. % змащувально-охолоджувальної рідини СОЖ-Р (ТУ У 24.6-32038150-001-2003). Така робоча рідина за властивостями максимально наближена до води, але не викликає корозії.

Як робоча рідина під час проведення оптичних досліджень використовувалась суміш води з 2,5 об'ємн. % індустриального мастила I-40 (ГОСТ 20799-88).

Викладення основного матеріалу. Проведено акустичні дослідження впливу довжини вузької частини сопла l на інтенсивність кавітації. Дослідження проводились з використанням ряду сопел з різними довжинами їх вузької частини (1, 2, 5, 7 та 10 мм) (рис. 2). Крім довжини сопла, як аргумент взято швидкість рідини у вузькій частині сопла, яка змінювалась у межах від 24 до 50 м/с. Введення швидкості рідини як другого аргументу викликано необхідністю визначення, як буде змінюватись оптимальна довжина вузької частини сопла (тобто така, при якій кавітація найбільш інтенсивна) при зміні швидкості руху рідини в соплі. На цьому етапі діаметр сопла обраний сталим і дорівнює 2 мм. Кількість паралельних дослідів становить 5.

За результатами проведених досліджень отримано графічну залежність між довжиною вузької частини сопла, швидкістю рідини та інтенсивністю кавітації в цьому соплі (рис. 3).

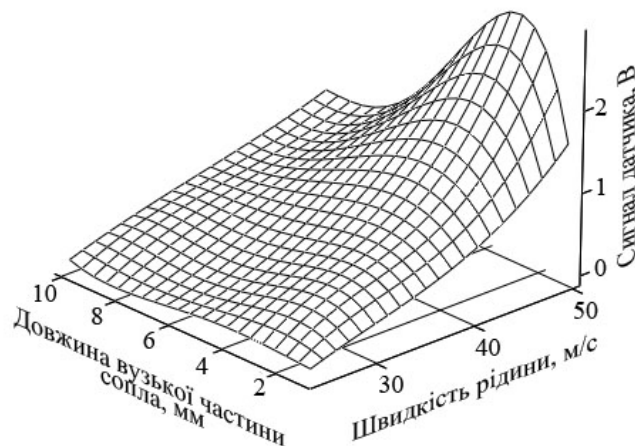


Рис. 3. Графік залежності сигналу датчика від довжини вузької частини сопла та швидкості рідини

Також отримано математичну залежність, що апроксимує цю поверхню відклику (рис. 3), у вигляді такого полінома:

$$\begin{aligned}
 U(v, l) = & a_1 \cdot l + a_2 \cdot v + a_3 \cdot l \cdot v^2 + a_4 \cdot l^2 \cdot v + a_5 \cdot l \cdot v^3 + a_6 \cdot l^3 \cdot v + \\
 & + a_7 \cdot l^4 \cdot v + a_8 \cdot l^2 + a_9 \cdot l^3 + a_{10} \cdot l^4 + a_{11} \cdot v^2 + a_{12} \cdot v^3 + a_{13} \cdot l^2 \cdot v^2 + \\
 & + a_{14} \cdot l^2 \cdot v^3 + a_{15} \cdot l^3 \cdot v^2 + a_{16} \cdot l^3 \cdot v^3 + a_{17} \cdot l^4 \cdot v^2 + a_{18} \cdot l^4 \cdot v^3 + \\
 & + a_{19} \cdot l \cdot v + a_{20},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де U – величина сигналу датчика, В; v – швидкість рідини у вузькій частині сопла, м/с; l – довжина вузької частини сопла, мм; $a_{1..20}$ – коефіцієнти рівняння регресії.

Чисельні значення коефіцієнтів рівняння регресії наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Чисельні значення коефіцієнтів рівняння регресії

Коефіцієнт	Значення	Розмірність	Коефіцієнт	Значення	Розмірність
a_1	-31,5	В/мм	a_{11}	0,0494	$V \cdot (c/m)^2$
a_2	-1,69	$V \cdot (c/m)$	a_{12}	$-4,67 \cdot 10^{-4}$	$V \cdot (c/m)^3$
a_3	-0,0824	$V \cdot (c/m)^2 / \text{мм}$	a_{13}	0,0292	$V \cdot (c/m)^2 / \text{мм}^2$
a_4	-1,01	$V \cdot (c/m) / \text{мм}^2$	a_{14}	$-2,76 \cdot 10^{-4}$	$V \cdot (c/m)^3 / \text{мм}^2$
a_5	$7,91 \cdot 10^{-4}$	$V \cdot (c/m)^3 / \text{мм}$	a_{15}	$-3,72 \cdot 10^{-3}$	$V \cdot (c/m)^2 / \text{мм}^3$
a_6	0,13	$V \cdot (c/m) / \text{мм}^3$	a_{16}	$-3,48 \cdot 10^{-5}$	$V \cdot (c/m)^3 / \text{мм}^3$
a_7	$5,55 \cdot 10^{-4}$	$V \cdot (c/m) / \text{мм}^4$	a_{17}	$1,58 \cdot 10^{-4}$	$V \cdot (c/m)^2 / \text{мм}^4$
a_8	11,3	$V / \text{мм}^2$	a_{18}	$1,46 \cdot 10^{-6}$	$V \cdot (c/m)^3 / \text{мм}^4$
a_9	-1,46	$V / \text{мм}^3$	a_{19}	2,83	$V \cdot (c/m) / \text{мм}$
a_{10}	0,0628	$V / \text{мм}^4$	a_{20}	18,5	V

З графіка (рис. 3) можна зробити такі висновки:

– інтенсивність кавітації, що оцінена через величину сигналу датчика, монотонно збільшується при збільшенні швидкості рідини у всіх досліджуваних соплах;

– залежність інтенсивності кавітації від довжини вузької частини сопла має екстремальний характер;

– найбільша інтенсивність кавітації спостерігається в діапазоні довжин вузької частини сопла від 2 до 5 мм і, за даними апроксимації, досягає екстремуму при довжині 3 мм. Таку довжину можна вважати оптимальною;

– оптимальна довжина вузької частини сопла не змінюється при зміні швидкості рідини в соплі принаймні в досліджуваному діапазоні швидкостей.

На думку авторів, екстремальний характер залежності інтенсивності кавітації від довжини вузької частини сопла пояснюється таким чином. При малій довжині вузької частини сопла зона зниженого тиску в ній відповідно має малі розміри. Кавітаційна бульбашка, що потрапляє в таку зону зниженого тиску, просто не встигає вирости до розміру, який забезпечує інтенсивне її схлопування. У разі збільшення довжини сопла все більшого значення набувають ефекти від тертя рідини об стінки каналу. При цьому вакуум, що є рушійною силою росту кавітаційних бульбашок, зменшується і ріст бульбашок уповільнюється.

Проведені дослідження дещо висвітлюють процеси, що мають місце у вузькій частині кавітаційного сопла та дозволяють вибрати таку довжину вузької частини кавітаційного сопла, при якій інтенсивність кавітації є найбільшою. Проте отримані дані, по-перше, є досить неточними, оскільки отримані завдяки апроксимації на досить великому проміжку між найближчими експериментально дослідженими довжинами вузьких частин, рівними 2 та 5 мм. По-друге, отримані результати дійсні тільки для сопла з діаметром вузької частини 2 мм, які використовувались під час проведення експериментів. Тому, базуючись на отриманих результатах, проведено дослідження в більш вузькому діапазоні довжин вузької частини сопла, метою яких є більш точно визначити її оптимальне значення та для сопел з різними діаметрами вузької частини з метою розширити можливості екстраполяції та практичного використання результатів досліджень.

Враховуючи раніше отриманий висновок про те, що швидкість рідини не впливає на оптимальність сопла, наступні дослідження проводились при постійній швидкості рідини $v=32$ м/с. Досліджувались кавітаційні сопла з діаметром вузької частини, що дорівнює 1; 1,5; 2; 2,5 та 3 мм. Відношення довжини вузької частини до її діаметра (в подальшому

відносна довжина) обрано відповідно 0,75; 1; 1,25; 1,5 та 1,75. Винятком є сопла з діаметром вузької частини 3 мм, де додатково досліджено 2 насадки з відносною довжиною 2 та 2,25. Інші умови аналогічні.

За результатами проведених досліджень отримано графічну залежність між довжиною вузької частини сопла та інтенсивністю кавітації при різних діаметрах вузької частини (рис. 4).

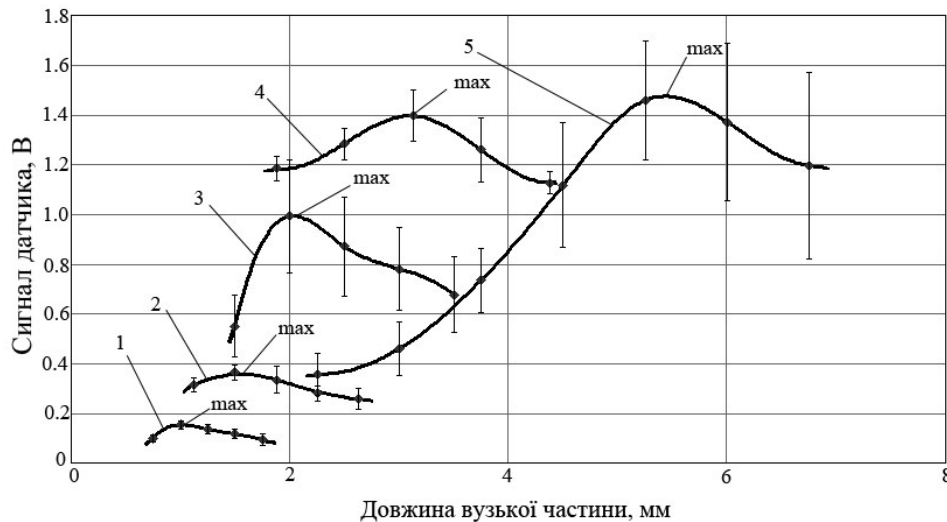


Рис. 4. Залежність сигналу датчика від довжини вузької частини кавітаційного сопла для різних діаметрів сопла:

1 – діаметр 1,0 мм; 2 – діаметр 1,5 мм; 3 – діаметр 2,0 мм; 4 – діаметр 2,5 мм; 5 – діаметр 3,0 мм

З рис. 4 видно, що для будь-якого досліджуваного діаметра вузької частини сопла спостерігається максимум інтенсивності кавітації при певній оптимальній довжині сопла. Причому цей максимум зі збільшенням діаметра вузької частини сопла зміщується в бік більшої її довжини.

Математична залежність, що апроксимує криві на рис. 4, має такий вигляд:

$$U(l) = a_5 \cdot l^5 + a_4 \cdot l^4 + a_3 \cdot l^3 + a_2 \cdot l^2 + a_1 \cdot l + a_0, \quad (2)$$

де U – величина сигналу датчика, В; l – довжина вузької частини сопла, мм; $a_{1..5}$ – коефіцієнти рівняння регресії.

Чисельні значення коефіцієнтів при членах поліному регресії для кожного діаметра вузької частини сопла наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Чисельні значення коефіцієнтів рівнянь регресії

Коефіцієнт	Числове значення для різних діаметрів вузької частини, мм					Розмірність
	1	1,5	2	2,5	3	
a_0	-2,361	-0,591	-19,677	11,423	-13,105	В
a_1	7,826	1,533	32,344	15,104	18,73	В/мм
a_2	-8,923	-0,787	-18,554	7,981	-10,055	В/мм ²
a_3	4,423	0,124	4,627	-1,78	2,581	В/мм ³
a_4	-0,8125	0	-0,4261	0,1421	-0,312	В/мм ⁴
a_5	0	0	0	0	0,01427	В/мм ⁵

При більш глибокому аналізі поведінки максимумів величини сигналу датчика видно, що для діаметрів від 1 до 2 мм (криві 1-3 на рис. 4) спостерігається близька до лінійної залежність оптимальної довжини вузької частини сопла від його діаметра. Відповідно, при переході до відносної довжини оптимальна довжина сопла при цих діаме-

трах є константою і дорівнює одному діаметру сопла. Під час збільшення ж діаметра кавітаційного сопла ця величина нелінійно збільшується. Це добре видно з графіка оптимальних довжин сопла (рис. 5).

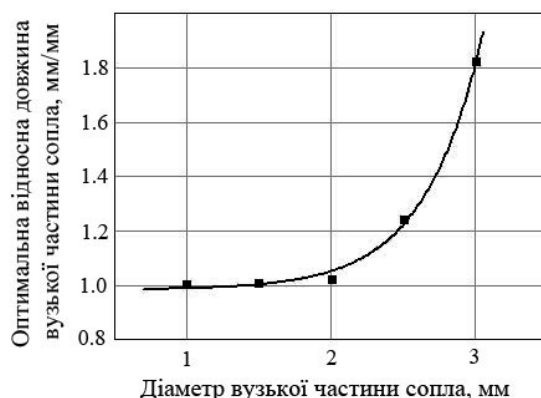
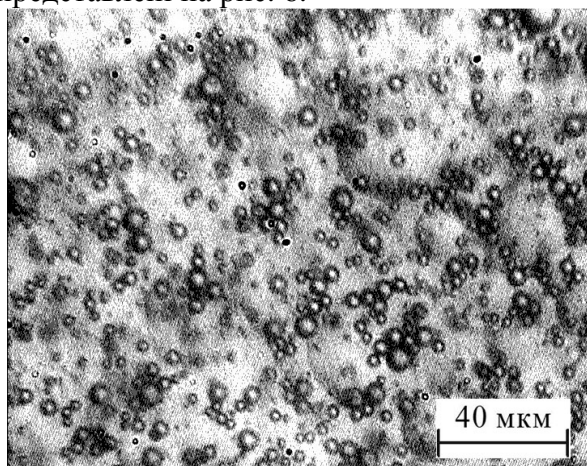


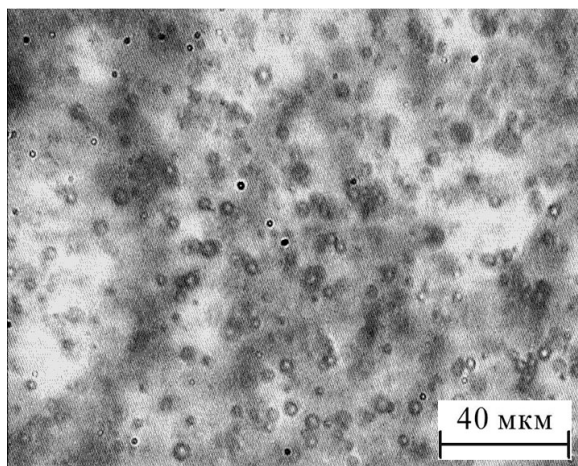
Рис. 5. Графік оптимальних відносних довжин вузької частини кавітаційного сопла

Таким чином, з рис. 5 видно, що при будь-якому діаметрі вузької частини сопла однозначно існує певна оптимальна його довжина, при якій інтенсивність кавітації в соплі є максимальною.

Для підтвердження отриманих результатів проведено дослідження впливу довжини вузької частини кавітаційного сопла на процес емульгування. Для проведення оптичних досліджень обрано набір кавітаційних сопел з діаметром 2 мм та довжинами 1, 2, 5, 7 і 10 мм, що використовувався під час випробувань, представлених на рис. 3. Експерименти проводились при швидкості рідини у вузькій частині сопла, рівній 32 м/с. Тривалість одного дослідження становила 1 хв. Такий проміжок часу обумовлений тим, що після цього періоду часу досягається основний ефект від емульгування і розміри часток мастила більше суттєво не змінюються. Мікрофотографії, отримані за допомогою різних кавітаційних сопел емульсії, представлені на рис. 6.



а



б

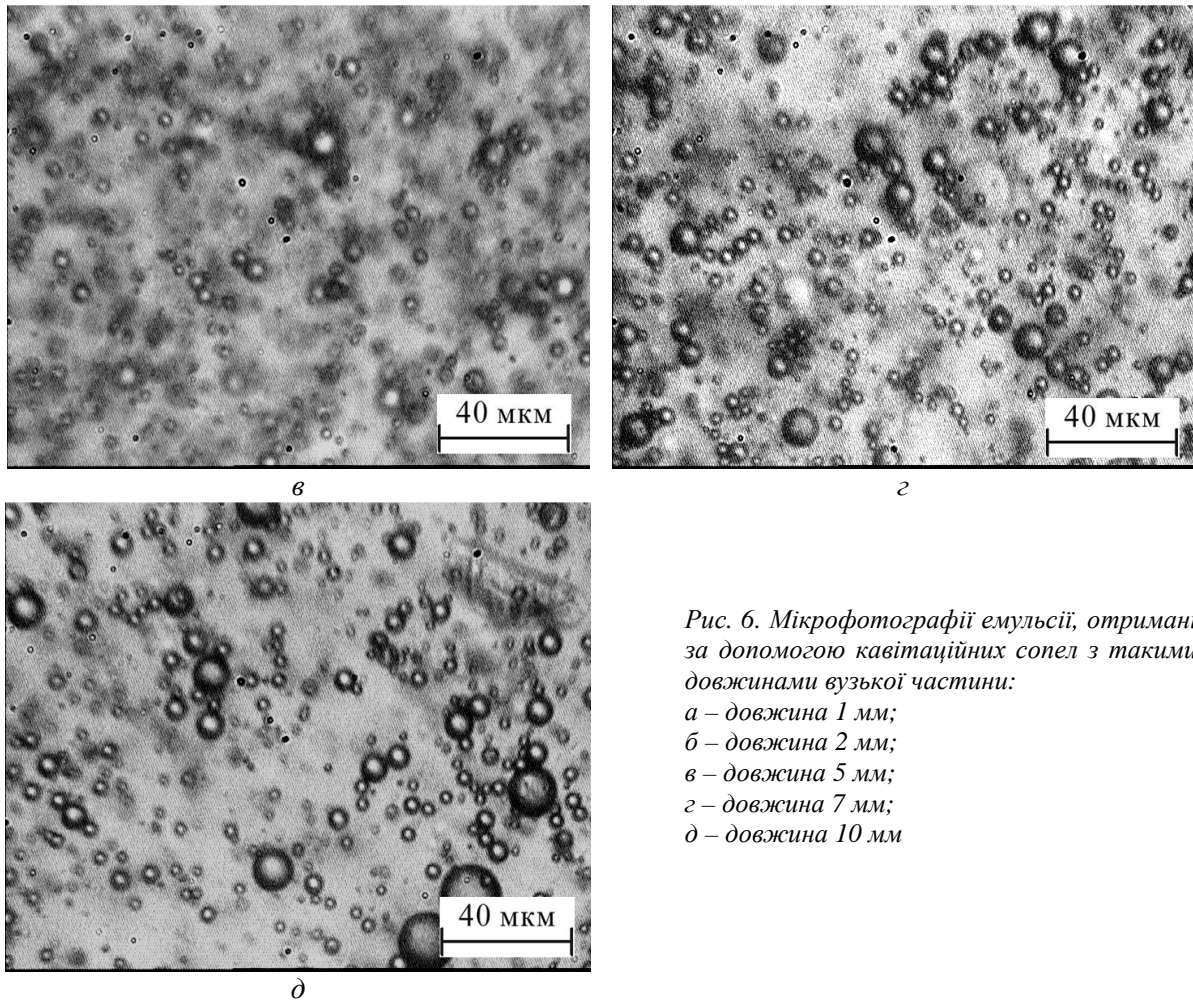


Рис. 6. Мікрофотографії емульсії, отримані за допомогою кавітаційних сопел з такими довжинами вузької частини:

- а – довжина 1 мм;*
- б – довжина 2 мм;*
- в – довжина 5 мм;*
- г – довжина 7 мм;*
- д – довжина 10 мм*

Як видно з рис. 6, найменші розміри часток мастила (середній діаметр частинки менше 5 мкм) спостерігаються на рис. 6, б, що свідчить про найбільшу якість отриманої емульсії і, відповідно, найбільшу інтенсивність кавітації при цій довжині вузької частини сопла. Ці дані добре корелюються з рис. 3, де під час використання цієї довжини кавітаційного сопла спостерігаються принаймні близькі до максимальних значення величини сигналу датчика. Під час відхилення довжини сопла від оптимальної спостерігається збільшення розмірів часток мастила (рис. 6, а, в, г, д) і, відповідно, погіршення якості емульсії.

Таким чином, отримані результати акустичних досліджень підтверджуються експериментально під час дослідження процесу емульгування індустріального мастила у воді. Крім того, виявлено, що за допомогою лише кавітаційного оброблення, при правильно підібраних її умовах, можна швидко отримувати дрібнодисперсну емульсію без застосування жодних емульгаторів. Під час їх використання, вірогідно, буде можливість отримати ще більш якісну емульсію. Проте це є окремою темою для досліджень.

Висновки і пропозиції. Геометричні параметри кавітаційного сопла суттєво впливають на процес кавітації в ньому. Виявлено, що існують певні оптимальні параметри сопла, при яких інтенсивність кавітації буде найбільша. Досліджено вплив довжини вузької частини сопла на інтенсивність кавітації в ньому і виявлено оптимальні її значення для різних діаметрів вузької частини сопла. Отримані результати підтверджено під час аналізу процесу емульгування. Також намічено можливі способи практичного використання результатів проведених досліджень.

Список використаних джерел

1. Пирсол И. Кавитация / И. Пирсол. – М. : Мир, 1975. – 95 с.

2. *Reynolds O.* The causes of racing of the engines of screw steamers, investigated theoretically and by the experiment / O. Reynolds. – Tr. Inst. Naval Arch. – 1873. – V14 Sc. Papers, 1, 56-57.
3. *Рождественский В. В.* Кавитация / В. В. Рождественский. – Л. : Судостроение, 1977. – 247 с.
4. *Смородов Е. А.* Физика и химия кавитации / Е. А. Смородов, Р. Н. Галиахметов, М. А. Ильгамов. – М. : Наука, 2008. – 228 с.
5. *Luca d'Agostino.* Fluid dynamics of cavitation and cavitating turbopumps / Luca d'Agostino, Maria Vittoria Salvetti. – SpringerWienNewYork. – 2007. – 351 p.