

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут"

## **Проточний кавітатор з високою інтенсивністю ультразвуку для обробки рідких середовищ**

1. ГРИШКО Ігор Анатолійович – асистент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

2. НОВОСАД Андрій Анатолійович – асистент кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

**реферат**

**Київ – 2014**

**Мета роботи:** підвищення ефективності кавітаційної обробки рідких середовищ шляхом створення обладнання, яке забезпечує введення в рідину ультразвукових коливань високої інтенсивності.

**Наукова новизна.** Обґрунтована можливість досягнення високої інтенсивності ультразвукових коливань в рідині за рахунок концентрації ультразвукової енергії шляхом використання фокусуючих властивостей випромінюючої та відбиваючої поверхонь вібраторів. Доведена доцільність застосування в проточному кавітаційному технологічному обладнанні трубчатої форми випромінюючої поверхні з концентрацією ультразвукової енергії в області осьової лінії. Вперше за результатами теоретичного дослідження розроблена математична модель, за допомогою якої з'ясовані умови досягнення максимальної ефективності роботи складної гідромеханічної коливальної системи, що збуджується в резонансному режимі на нульовій моді коливань та отримано аналітичну залежність, яка визначає цю резонансну частоту з урахуванням геометричних параметрів коливальної системи та реологічних властивостей рідини, що обробляється. Вперше встановлені закономірності виникнення та розвитку кавітаційних областей в ультразвуковому кавітаторі на базі кільцевого вібратора, який збуджується на нульовій моді коливань. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень встановлені доцільні межі підвищення інтенсивності ультразвуку в трубчатому проточному вібраторі за умови досягнення високої ефективності кавітаційної обробки рідини та довговічності випромінюючої поверхні.

**Практична значимість.** За результатами проведених досліджень сформульовані основні вимоги до ультразвукового технологічного кавітаційного обладнання для обробки рідких середовищ та запропоновані конструктивні схеми, що їх реалізують. Розроблені методики інженерного розрахунку резонансних кавітаторів з ультразвуковими трансформаторами коливальної швидкості та трубчатих резонансних проточних кавітаторів, в яких забезпечується висока ефективність та довговічність за рахунок створення зони з мінімальною інтенсивністю кавітації на випромінюючій поверхні трубчатого кавітатора і зони з максимальною інтенсивністю кавітації в фокальній області кавітатора. На основі експериментальних досліджень надані рекомендації щодо розробки та застосуванню ультразвукового технологічного обладнання на базі проточних трубчатих резонансних кавітаторів. Експериментально з'ясовано механізм інактивуєючої дії ультразвукової кавітації на мікроорганізми різного розміру, конфігурації і структури, а також запропоновані шляхи підвищення продуктивності технологічного процесу кавітаційного знезараження рідини. Практичне застосування розробленого і дослідженого кавітаційного обладнання забезпечило підвищення ефективності технологічних процесів знезараження води у відкритих водоймах, дезінтеграції мікроорганізмів, підвищення довговічності та безпеки змащувально-охолоджуючих рідин, що підтверджено відповідними актами впровадження, наданими Інститутом біоорганічної хімії та нафтохімії НАНУ, Інститутом мікробіології і вірусології НАНУ та ОАО «Редуктор-ПМ». Теоретичні та експериментальні результати роботи впроваджені також у навчальному процесі кафедри Прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки НТУУ «КПІ».

**У вступі** обґрунтовується актуальність теми наукової роботи.

**У першому розділі** шляхом аналізу відомих кавітаційних технологічних процесів обґрунтована можливість та доцільність підвищення їх ефективності за рахунок застосування ультразвукового обладнання з високою інтенсивністю коливань. Особливої уваги приділено важливій для життєдіяльності людини технології – ультразвукового кавітаційного знезараження питної води та технологічних рідинних середовищ, з якими людина безпосередньо контактує в процесі виробництва. Обґрунтована доцільність застосування для інактивації мікроорганізмів явища ультразвукової кавітації, яке забезпечує комплексну знезаражуючу дію на широке коло різновидів мікроорганізмів. Сформульовані вимоги до ультразвукового технологічного обладнання, яке, на відміну від існуючого, здатне забезпечити підвищення ефективності багатьох технологічних процесів. Запропоновано схему ультразвукового кавітатора проточного типу

**У другому розділі** представлені та проаналізовані схеми ультразвукових кавітаторів, в яких підвищення інтенсивності ультразвукових коливань досягається за рахунок ефекту концентрації ультразвуку в фокальній області циліндричного трубчатого вібратора, який збуджується на нульовій моді радіальних коливань. Проаналізовані потенційні можливості запропонованих схемних рішень та показані сфери їх доцільного застосування. У названому розділі викладена інженерна методика розрахунку акустичної схеми ультразвукового трубчатого кавітатора яка дозволяє розрахувати акустичні розміри всіх елементів коливальної системи з врахуванням параметрів застосованих матеріалів та обраного типу п'єзокераміки.

В основі запропонованої методики лежить розв'язок рівняння повздовжніх коливань, що встановилися по довжині п'єзоелектричного перетворювача. Розв'язок цього рівняння для випадку гармонічних коливань та застосування відповідних граничних умов дозволяє отримати аналітичні залежності для розрахунку повздовжніх розмірів п'єзоелектричних перетворювачів різних акустичних систем. Так, для розрахунку товщини частотопонижаючих накладок складеного симетричного перетворювача отримано вираз

$$a_1 = \frac{c_1}{\omega} \arctg \left[ \left( E_2 S_2 c_1 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 + E_1 S_1 c_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} a_2 \right) / \left( E_1 S_1 c_2 - E_2 S_2 c_1 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} a_2 \right) \right] - a_2,$$

де:  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  – частота резонансних коливань;  $c_1$  та  $c_2$  – швидкості звуку в матеріалі накладки та п'єзокерамічної шайби;  $a_1$ ,  $E_1$ ,  $S_1$  и  $a_2$ ,  $E_2$ ,  $S_2$  – товщина, модуль пружності при розтягу та площа торцевої поверхні накладки і п'єзокерамічної шайби відповідно.

Для розрахунку акустичних розмірів елементів коливальної системи проточного кавітатора з трубчатим вібратором, в якій ступені трансформаторів коливальної швидкості малої площі виконані ножевидними та розміщені на зовнішній твірній поверхні вібратора, використано розрахункову схему (рис. 1).

У разі збудження гармонічних коливань, вирішення загального рівняння поздовжніх коливань

$$S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial \xi}{\partial x} \right),$$

можна записати як:

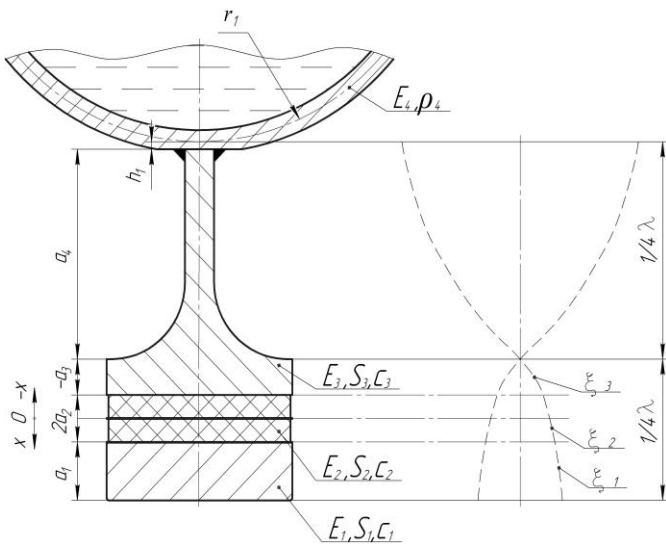


Рис. 1. Розрахункова схема коливальної системи проточного кавітатора з трубчатим вібратором

$$\xi_1(x, t) = \left( A \cos \frac{\omega}{c_1} x + B \sin \frac{\omega}{c_1} x \right) \sin(\omega t + \varphi); \quad (1)$$

$$\xi_2(x, t) = \left( C \cos \frac{\omega}{c_2} x + D \sin \frac{\omega}{c_2} x \right) \sin(\omega t + \varphi); \quad (2)$$

$$\xi_3(x, t) = \left( Q \cos \frac{\omega}{c_3} x + G \sin \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

де:  $A, B, C, D, Q, G$  – константи;  $\xi$  – поздовжнє переміщення;  $S$  – площа поперечного перерізу;  $x$  – напрямок розповсюдження хвиль.

Граничні умови для розрахункової схемою (рис. 1) представлені у вигляді:

$$\xi_3 = 0 \text{ при } x = -a_3; \quad (4)$$

$$\xi_2 = \xi_3; \quad E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} = E_3 S_1 \frac{\partial \xi_3}{\partial x} \text{ при } x = 0; \quad (5)$$

$$\xi_2 = \xi_1; \quad E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} = E_1 S_1 \frac{\partial \xi_1}{\partial x} \text{ при } x = 2a_2; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial x} = 0 \text{ при } x = a_1 + 2a_2. \quad (7)$$

Послідовний розв'язок рівнянь (1) – (3) з урахуванням граничних умов (4) – (7) дозволив отримати наступні аналітичні залежності акустичних розмірів:

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \left[ \left( E_3 S_1 c_2 \left( N \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) \right) / \left( E_2 S_2 c_3 \left( N \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) \right) \right], \quad (8)$$

$$\text{де } N = \left( E_2 S_2 c_1 \left[ \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right] \right) / \left( E_1 S_1 c_2 \left[ \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right] \right).$$

Для визначення поздовжнього розміру  $a_3$  за допомогою формули (8) необхідно задатися бажаними величинами товщини частотопонижуючої накладки і матеріалом, а також вибрати параметри п'єзокераміки.

Поздовжній розмір  $a_4$ , ступеню малої площі трансформатора коливальної швидкості визначається залежністю

$$a_4 = \frac{c_3}{4f}.$$

При розрахунку акустичних розмірів трубчатого вібратора визначальним параметром є резонансна частота коливаний вібратора. У разі збудження радіальних коливаний трубчатого вібратора на нульовій моді резонансна частота визначається як

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_4}{\rho_4 r_1^2}},$$

де:  $\rho_4$  – щільність матеріалу вібратора,  $E_4$  – модуль пружності матеріалу кільцевого вібратора при розтягу,  $r_1$  – середній радіус вібратора.

Застосування  $\frac{1}{2}$  – хвильової акустичної схеми приводу лінійних переміщень дозволяє забезпечити істотне зменшення габаритів та ваги технологічного обладнання. В цьому випадку поздовжній розмір  $a_4$ , ступеню малої площі трансформатора коливальної швидкості, за умови виготовлення його і трубчатого вібратора з однакового матеріалу, визначають із залежності

$$a_4 = \frac{c_3}{4f} - h_1,$$

де  $h_1$  – відстань від вихідного торця трансформатора коливальної швидкості до середнього радіусу трубчатого вібратора.

З метою ліквідації можливості збудження в трубчатому вібраторі поздовжніх радіально-згинних коливань, що знижують ефективність і збільшують габарити трубчатої кавітаційної камери, поздовжній розмір вібратора вибирають із умови

$$L_{\text{вібр.}} \ll \frac{1}{2} \lambda_{\text{рад.-згин.}}$$

**Третій розділ** наукової роботи присвячений аналітичному дослідженню трубчатого кавітатора. Для цього була розроблена математична модель, в основі якої лежить рівняння для потенціалу швидкості

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \quad (9)$$

рішення якого, при застосуванні методу розділення змінних, можна представити у вигляді

$$\Phi(r, z, t) = R(r) \cdot Z(z) \cdot T(t).$$

Для наведених змінних були отримані вирази:  $Z(z) = A \sin(k_z z) + B \cos(k_z z)$ ;  $R(r) = J_0(k_r r)$ ;  $T(t) = \sin(\omega \cdot t)$ ;  $k_r^2 + k_z^2 = k^2$ , що дозволяє рівняння (9) записати як

$$\Phi(r, z, t) = J_0(k_r r) \cdot (A \cdot \sin(k_z z) + B \cdot \cos(k_z z)) \cdot \sin(\omega t).$$

Шляхом обрання різних граничних умов були розглянуті випадки: відсутність торцевих кришок (проточний режим); наявність двох торцевих кришок; наявність однієї торцевої кришки.

Наприклад, для випадку кавітаційної камери з однією жорсткою кришкою граничні умови були представлені у вигляді

$$\left. \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r} \right|_{r=a} = 0; \quad \Phi(z)|_{z=0} = 0; \quad \Phi(z)|_{z=h} = 0.$$

де:  $a$  – радіус циліндричної камери;  $h$  – висота циліндричної камери.

В науковій роботі було отримано аналітичний вираз для розрахунку набору власних частот рідини, яка заповнює об'єм кавітаційної камери. Вибір бажаної власної частоти і її узгодження з вимушеною частотою радіальних коливань вібратора дозволяє забезпечити високу ефективність кавітаційної обробки.

Для камери з однією жорсткою кришкою вказаний вираз має вигляд

$$f = \frac{c}{2 \cdot \pi} \sqrt{\left(\frac{n_i}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot m}{h}\right)^2},$$

де:  $m, n$  – натуральне число.

Математична модель дозволила візуалізувати картину утворення і розвитку

кавітаційних областей в об'ємі трубчатого вібратора. Для випадку кавітаційної камери з двома абсолютно м'якими кришками, тобто проточної камери, отримана конфігурація звукового поля представлена на рис. 2 та рис. 3.

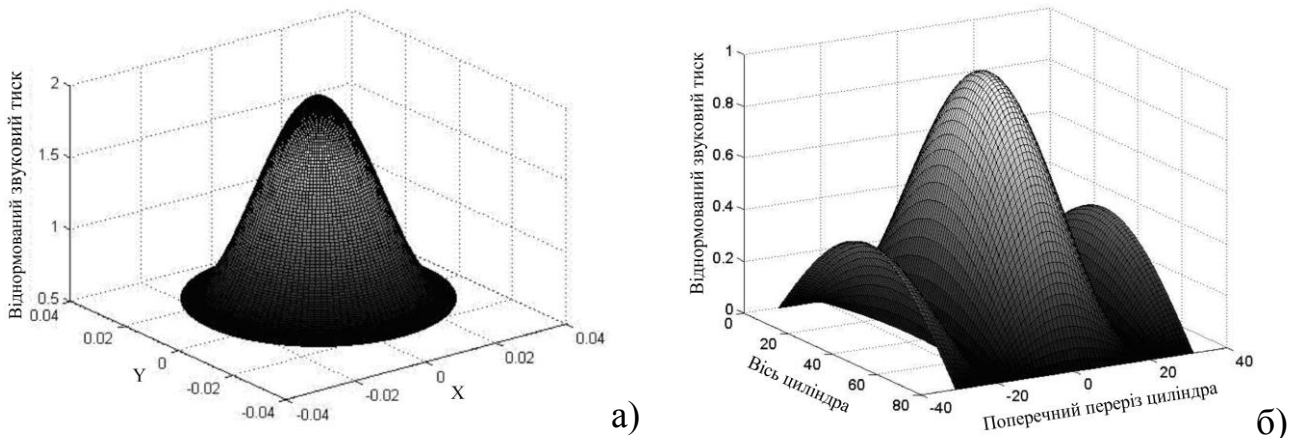


Рис. 2. Конфігурація звукового поля моди (2.1) в проточній камері (а – в площині, що є нормальною до осі; б – в площині, що є паралельною осі.)

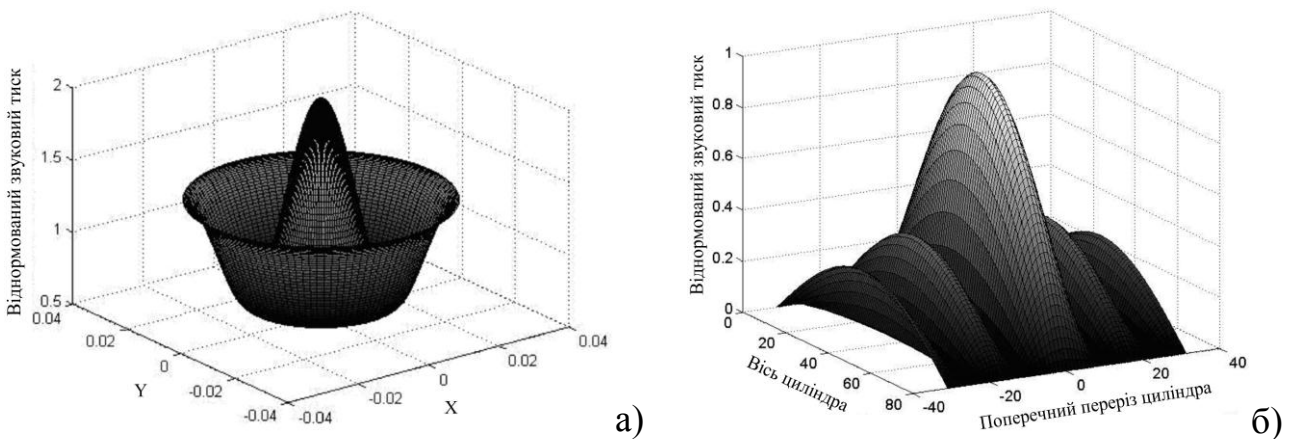


Рис. 3. Конфігурація звукового поля моди (3.1) в проточній камері (а – в площині, що є нормальною до осі; б – в площині, що є паралельною осі.)

Конфігурацію кавітаційної області або звукового тиску зручно розділити на моди. При цьому номер моди ( $i, m$ ) буде складатися з двох чисел. Для випадку, коли резонансна кавітаційна камера закрита по торцях абсолютно м'якими стінками,  $i$  – це номер рішення рівняння  $J_i(k_r r) = 0$ , а  $m = 0, 1, 2, \dots$  – натуральне число.

Для аналізу інтенсивності кавітаційних явищ в кавітаційній камері були застосовані січні площини. На рис. 4 представлений випадок застосування подібного аналізу для звукового поля в середині проточного трубчатого вібратора.

Дослідження розповсюдження звукових коливань вздовж осі камери, а також підведеного і відведеного трубопроводів проведено за допомогою рівняння  $\Phi(r, z, t) = J_0(k_r r) \cdot (A \cdot \sin(k_z z) + B \cdot \cos(k_z z)) \cdot e^{-\delta \cdot z} \cdot \sin(\omega t)$ , де  $\delta$  – декремент затухання.

Для випадку граничних умов:

$$B = 0; \quad k_z \cdot h = \pi \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots; \quad k_r = \frac{n_i}{a}; \quad k_z = \frac{\pi \cdot m}{h}; \quad k_r^2 + k_z^2 = \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \right)^2,$$

які відповідають проточній камері і моді (2.1), отримана форма затухаючого вздовж трубопроводу звукового поля, що представлена на рис. 5.

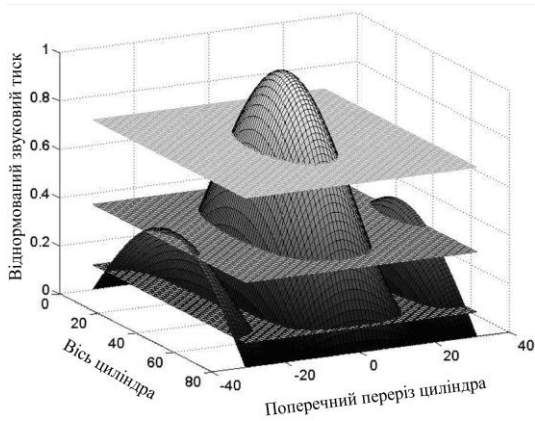


Рис. 4. Аналіз інтенсивності кавітації січними площинами для моди (2.1)

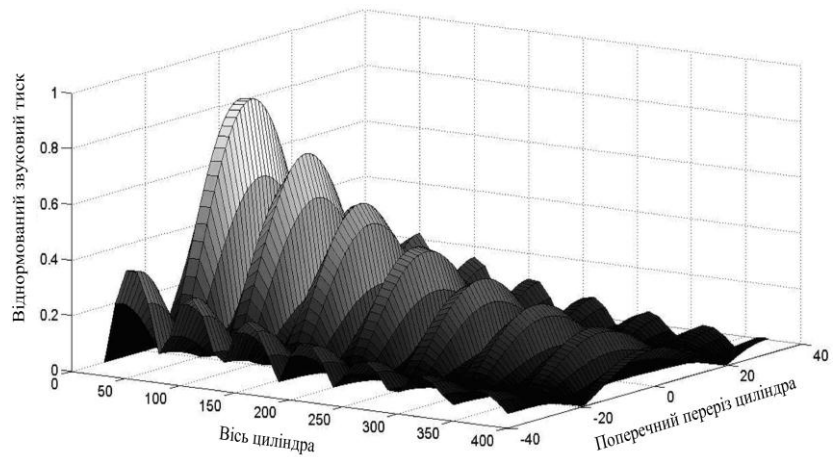


Рис. 5. Конфігурація звукового поля в проточній камері з циліндричним вібратором, мода (2.1)

Подібні дослідження проведені для різних граничних умов.

У четвертому розділі наведені результати експериментального дослідження трубчатого кавітатора з високою інтенсивністю ультразвуку, проводилося на спеціальному стенді, який забезпечував реалізацію граничних умов аналітичного дослідження, а також візуальне та фізичне дослідження інтенсивності звукового поля як в кавітаційній камері, так і в скляних трубопроводах для підведення та відведення рідини. Дослідження підтвердило фокусуючі властивості внутрішньої поверхні трубчатого кавітатора в разі збудження (2.1) моди коливань (рис. 6).

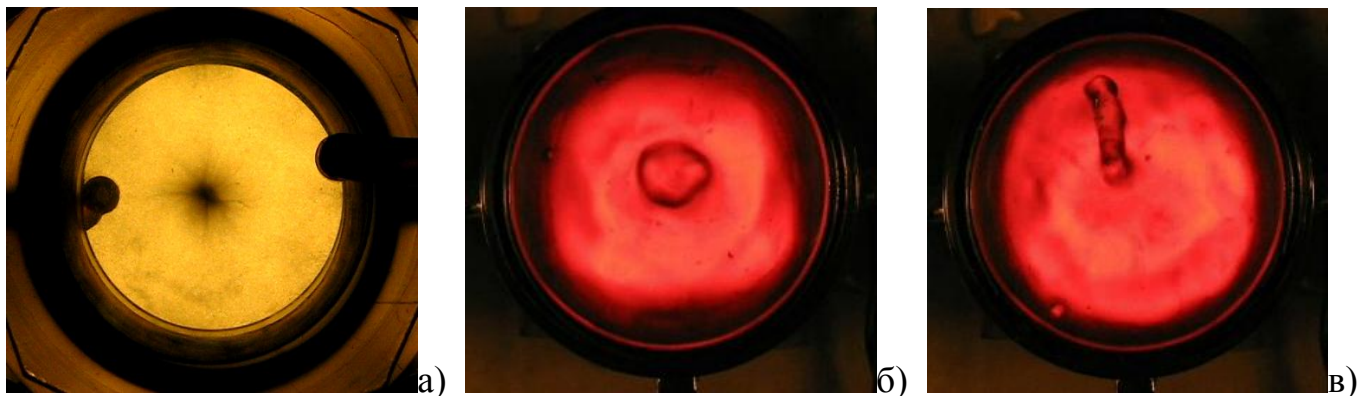


Рис. 6. Візуалізація ефекту концентрації ультразвукової енергії в трубчатому кавітаторі, що збуджується на (2.1) моді коливань (а – малий рівень; б – середній рівень; в – високий рівень.)

Встановлено, що ультразвукова енергія концентрується вздовж осі трубчатого вібратора, що призводить до утворення інтенсивної кавітаційної області (рис. 6а). При цьому на внутрішній поверхні трубчатого вібратора кавітаційних явищ не спостерігається, що підтверджує висновки аналітичного дослідження. У разі наявності вільної поверхні рідини в трубчатому кавітаторі при збільшенні інтенсивності коливань спочатку спостерігається виникнення під дією радіаційного тиску невеликого пагорба (рис. 6б), який поступово підіймається і приймає вигляд стовпчика (рис. 6в).

Для експериментального дослідження інтенсивності, форми та розмірів кавіта-

ційної області в трубчатому кавітаторі використовувався акустичний та метод ерозійних тестів. При незначній інтенсивності ультразвуку в центральній частині трубчатої кавітаційної камери утворюється невелика кавітаційна область за рахунок фокусуєчих властивостей внутрішньої циліндричної поверхні камери (рис. 7а). При збільшенні інтенсивності коливань за рахунок збільшення амплітуди коливань п'єзоелектричних приводів поздовжніх переміщень кавітаційна область поступово розширюється. Ерозійна активність кавітаційної області суттєво зростає (рис. 7б). Інтенсивність звуку вздовж осьової лінії сягає  $80 \dots 100 \text{ Вт/см}^2$ . Подальше підвищення амплітуди коливань призводить до того, що кавітаційна область розширюється до внутрішньої поверхні кавітаційної камери. Наближення двохфазної кавітаційної області до випромінюючої поверхні трубчатого вібратора призводить до суттєвого погіршення умов введення ультразвукових коливань в рідину, що викликає різке падіння ефективності кавітатора (рис. 7в).

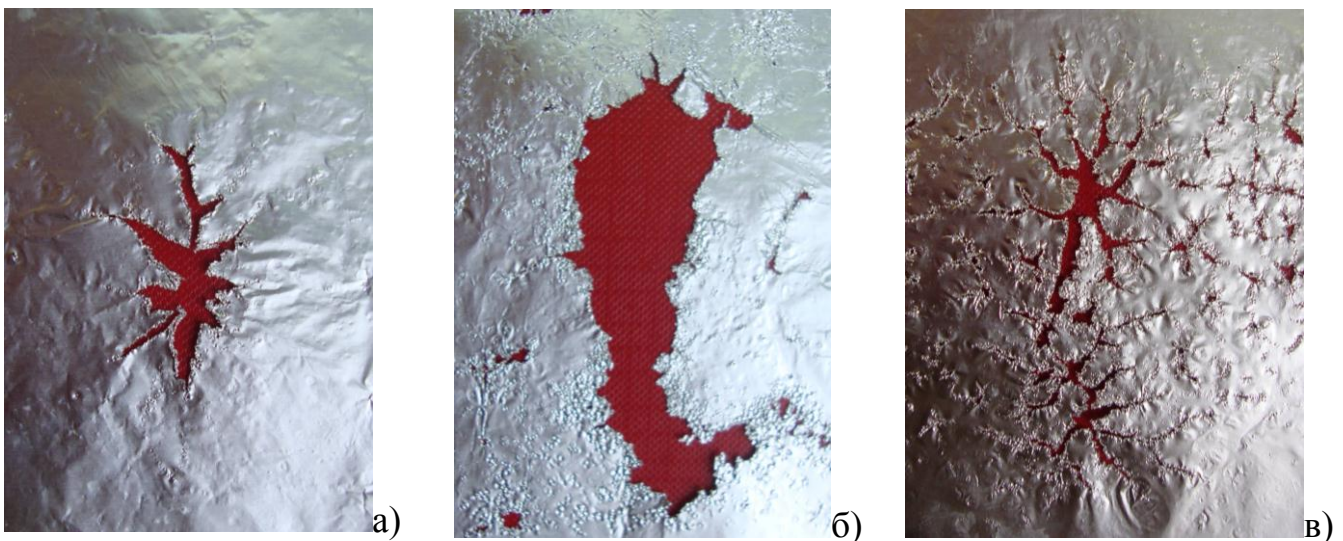


Рис. 7. Результати руйнування тестових зразків алюмінієвої фольги в циліндричній кавітаційній камері при різних рівнях інтенсивності коливань випромінюючої поверхні (а –  $20 \text{ Вт/см}^2$ ; б –  $100 \text{ Вт/см}^2$ ; в –  $150 \text{ Вт/см}^2$ .)

Із застосуванням методу ерозійних тестів та за допомогою п'єзоелектричного малогабаритного датчика тиску з механізмом переміщення датчика вздовж осі трубопроводів було досліджено ефект розповсюдження ультразвукових хвиль від пульсуючої кавітаційної області трубчатого вібратора вздовж трубопроводів. Встановлено, що з метою забезпечення довгострокової експлуатації кавітаційної камери необхідно усунути можливе кавітаційне руйнування трубопроводів. З цією метою підвідний та відвідний трубопроводи на довжині до 400 мм необхідно робити з кавітаційностійкого матеріалу, наприклад, нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т. Для підвищення продуктивності кавітаційної обробки рідини в розробленій циліндричній камері, експериментально підтверджена можливість послідовного встановлення акустично розв'язаних декількох трубчатих вібраторів (рис. 8).

**У п'ятому розділі** наведені експериментальні дослідження можливостей застосування ультразвукового кавітатора з високою інтенсивністю ультразвуку у технологічному процесі інактивації мікроорганізмів, які показали, що основним в процесі інактивації є механізм механічного руйнування (рис.9), (рис. 10).



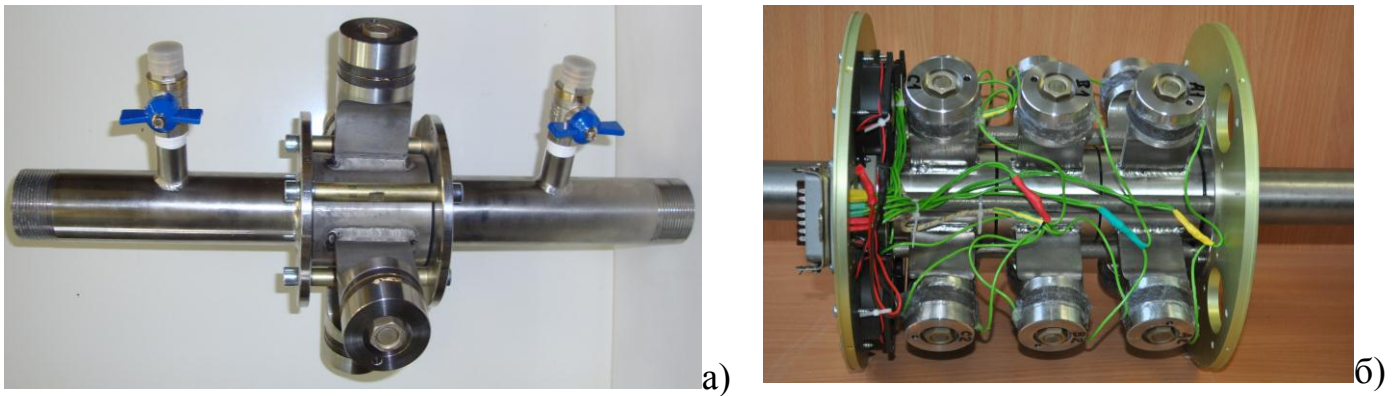


Рис. 8. Односекційна (а) та трьохсекційна (б) проточні кавітаційні камери потужністю 400 Вт та 1200 Вт

В зазначеному розділі наведені результати впровадження розроблених ультразвукових кавітаторів в конкретних технологічних процесах та дослідження ефективності їх застосування. Впровадження розробленого ультразвукового кавітатора було виконано в Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії НАНУ при виконанні роботи по знезараженню водойми, в яку скидаються технологічні стоки з прилеглого м'ясопереробного комплексу. Дані, отримані при реалізації даного впровадження, дозволяють стверджувати, що ультразвукова кавітація навіть при порівняно малих інтенсивностях ультразвуку є ефективним методом інактивації «найпростіших», що знаходяться в рідинах різного технологічного призначення.

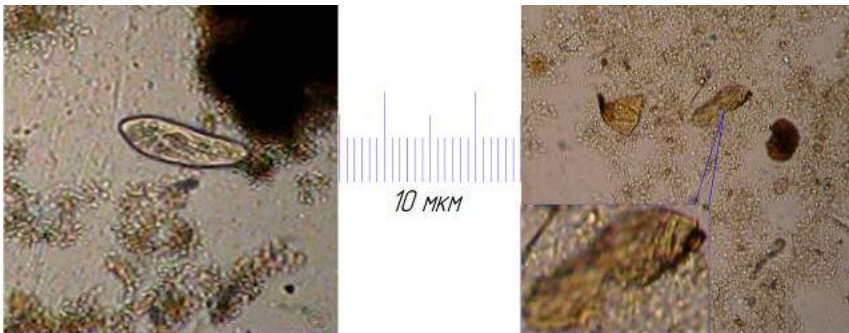


Рис. 9. Представник інфузорій до та після п'яти секундної обробки, мікрофотографія (МК)

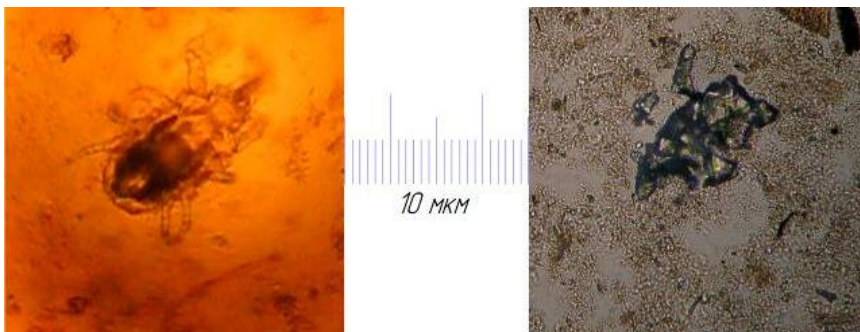


Рис. 10. Представник ракоподібних до та після після п'яти секундної обробки, (МК)

Руйнування структури мікроорганізмів з метою отримання внутріклітинних сполук з їх особливими властивостями за рахунок кавітації було виконано в Інституті мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАНУ.

Експериментальні дані показали, що найбільша ступінь дезінтеграції клітин мікроорганізмів була досягнута при порівняно малих інтенсивностях. При цьому вдалося отримати внутрішньоклітинну речовину при мінімальному засміченні її залишками зруйнованої оболонки.

У розділі розглянуті можливості підвищення продуктивності процесу інактивації мікроорганізмів за рахунок додавання механічних домішок в робочу зону кавітаційної камери.

Практичне застосування даного способу було апробовано на ОАО «Редуктор ПМ» в процесі підвищення довговічності та безпеки змащувально-охолоджувальної рідини.

### ВИСНОВКИ

1. Обґрунтована можливість підвищення ефективності кавітаційних технологічних процесів шляхом створення кавітаторів, висока інтенсивність ультразвуку в яких забезпечується за рахунок фокусуючих властивостей трубчатої резонансної кавітаційної камери.

2. Запропоновано математичну модель яка описує процес виникнення і розвиток кавітаційних зон у технологічному об'ємі трубчатої проточної кавітаційної камери, стінки якої здійснюють резонансні ультразвукові коливання нульової моди. Модель дозволяє визначити розташування та інтенсивність кавітаційних областей.

3. Чисельним моделюванням і експериментальним дослідженням підтверджена можливість отримання високої інтенсивності кавітації яка може досягати значення  $20 \dots 100 \text{ Вт/см}^2$  в фокальній області трубчатого вібратора.

4. Вперше отримано аналітичну залежність для визначення умови забезпечення максимальної ефективності роботи трубчатих ультразвукових кавітаторів з урахуванням акустичних параметрів коливальної системи та реологічних властивостей рідини.

5. Вперше запропонована методика розрахунку проточного кавітатора з високої інтенсивністю ультразвуку, яка дозволяє визначити розміри складових елементів акустичної коливальної системи з урахуванням реологічних властивостей оброблюваної рідини, застосованих матеріалів і типу п'єзоелектричної кераміки.

6. Експериментальні дослідження застосування ультразвукового кавітатора з високою інтенсивністю ультразвуку у технологічному процесі інактивації мікроорганізмів дозволили запропонувати новий спосіб 5...6 кратного підвищення продуктивності процесу за рахунок додавання абразивного матеріалу.

7. Практичне застосування розробленого і дослідженого кавітаційного обладнання забезпечило підвищення ефективності наступних технологічних процесів: знезараження води у відкритих водоймах; дезінтеграції мікроорганізмів; підвищення довговічності та безпеки змащувально-охолоджуючих рідин.

**Результати роботи впроваджені:** в Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії НАНУ; в Інституті мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАНУ; на ОАО «Редуктор ПМ»; в навчальний процес кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Механіко-машинобудівного інституту НТУУ «КПІ».

Результати роботи були презентовані в штаб-квартирі ООН та в штаб-квартирі міжнародної організації «Південь-Південь» (International Organization for South-South Cooperation (IOSSC)) в Нью-Йорку (США).

Результати досліджень за темою роботи викладено в 33 наукових працях, з яких 14 статті в фахових виданнях, 12 тез доповідей. Отримано 2 патенти України на винахід та 5 на корисну модель. Роботи авторів процитовано в 16 наукових журналах, h-індек = 3.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

/ І.А. Гришко/

/ А.А. Новосад/