

І.А. Гришко, канд. техн. наук,
А.А. Новосад,

О.Ф. Луговський, д-р техн. наук
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОЇ ОБЛАСТІ ПРОТОЧНОГО ТРУБЧАСТОГО КАВІТАТОРА З ВИСОКОЮ ІНТЕНСИВНІСТЮ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ

THE RESEARCH ISSUES OF ULTRASONIC OSCILLATIONS OF HIGH INTENSITY VIBRATOR INSIDE THE TUBULAR WALLS

Розглянуто питання дослідження розповсюдження ультразвукових коливань високої інтенсивності всередині трубчастого вібратора, стінки якого здійснюють чисто радіальні коливання. Оцінка інтенсивності ультразвукових коливань базувалась на застосуванні метода ерозійних тестів. У якості індикатора у тестах було використано алюмінієву фольгу. По формі та інтенсивності роз'їдання індикаторної фольги, яку розміщено у кавітаційній камері, за різних значень підведеної потужності надаємо якісну оцінку роботи трубчастого кавітатора, яка дозволила обрати раціональні режими роботи для ефективної обробки рідини. Уточнення отриманих результатів проводилось із застосуванням акустичного метода.

Ключові слова: ультразвукові коливання високої інтенсивності, трубчастий вібратор, ерозійні тести, акустичний метод.

Вступ

Ультразвукове кавітаційне обладнання широко застосовується у різних галузях промисловості у кавітаційних технологічних процесах, які пов'язано з диспергуванням рідких і твердих речовин [1], інтенсивним перемішуванням складових компонентів на молекулярному рівні, фільтрацією у ультразвуковому полі, знезараженням рідких середовищ. Кавітаційний вплив дозволяє змінювати швидкість перебігу процесів дифузії, окислення, кристалізації і розчинення речовин, дозволяє активізувати хімічні реакції і багато інших фізико-хімічних процесів, завдяки чому досягається інтенсифікація технологічних процесів.

Ефективність перерахованих і багатьох інших технологічних процесів, які використовують явище ультразвукової кавітації, значною мірою залежить від досягнутого рівня інтенсивності введених ультразвукових коливань, від просторового розташування виробу, що очищається, у технологічному об'ємі кавітаційної камери, від організації руху оброблюваного потоку рідини через зони з максимальною інтенсивністю кавітації, а також від раціональної організації звукового поля у технологічному об'ємі кавітаційної камери. Врахування зазначених факторів дозволяє досягти високої ефективності кавітаційних технологічних процесів і забезпечити довговічність обладнання в умовах інтенсивної кавітаційної ерозії твердих поверхонь.

Метою роботи є експериментальне дослідження робочої області проточної трубчастої ультразвукової кавітаційної камери з високою інтенсивністю ультразвуку, що дозволить виявити оптимальні режими обробки рідких середовищ шляхом застосуванням акустичного методу та методу ерозійних тестів.

Основний матеріал

Для кавітаційних технологічних процесів, які передбачають кавітаційну обробку рідини у потоці за рахунок введення до рідини ультразвукових коливань високої інтенсивності, запропоновано обладнання, яке забезпечує виконання наступних вимог [2]:

- підтримка режиму розвиненої кавітації в усьому об'ємі технологічної камери;
- забезпечення високої ефективності введення в рідину ультразвукової енергії;
- забезпечення концентрації ультразвукової енергії в рідині до необхідного рівня інтенсивності;
- забезпечення довговічності роботи технологічної кавітаційної камери і резонансних приводів-випромінювачів;
- можливість застосування додаткових шляхів підвищення інтенсивності кавітації, що полягають у підвищенні статичного тиску, штучному насиченні води зародками кавітації, регулюванні температури рідини, а також імпульсній низькочастотній модуляції ультразвукового сигналу.

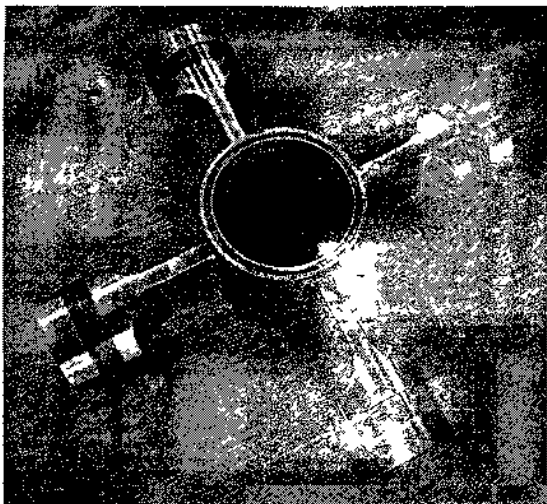


Рисунок 1 — Ультразвуковий трубчастий кавітатор з нульовою модою коливань

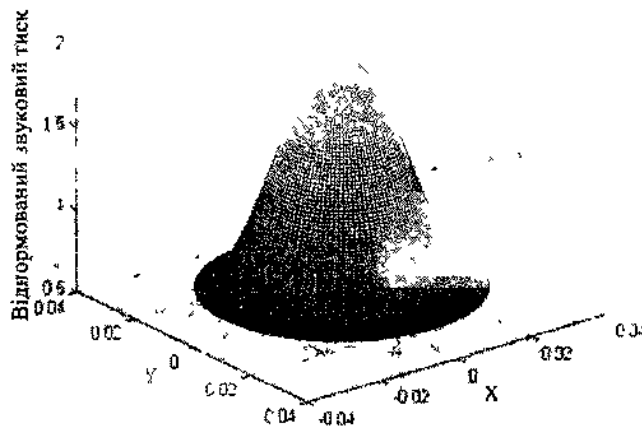


Рисунок 2 — Конфігурація звукового поля при збудженні нульової моди у проточній камері з циліндричним вібратором

Розроблене технологічне обладнання дозволяє створювати у рідині високий рівень інтенсивності ультразвуку шляхом ефективного введення до рідини ультразвуку малої інтенсивності з подальшим фокусуванням ультразвукових хвиль. При цьому кавітаційні явища виникають тільки у фокальній області, а підведення ультразвукової енергії до цієї області здійснюється у докавітаційному режимі з високим ККД (рисунок 1)

У конструкції, що розглядалася, ультразвуковий трубчастий кавітатор збуджувався на нульовій моді коливань, тобто його твірна поверхня здійснювала чисто радіальні коливання за допомогою встановлених на його зовнішній поверхні чотирьох п'єзоелектричних приводів осьових переміщень, виготовлених зі ступінчастими трансформаторами коливальної швидкості. Для зменшення спотворень форми коливань вібратора при зовнішньому підведенні ультразвукової енергії секції меншої площі трансформаторів коливальної швидкості виконано невидними і розташовано поздовж зовнішньої твірної циліндричної поверхні вібратора [3].

Вібратор, що здійснює подібні коливання, забезпечує фокусування ультразвукових коливань в області поздовжньої осі трубчастого профілю (рисунок 2). Для виключення радіально-згинних хвиль поздовж поверхні трубчастого профілю його довжину було обрано меншою половиною довжини хвилі цих коливань.

Живлення п'єзоелектричних приводів здійснювалося від потужного електричного генератора змінної напруги. Цей генератор разом з п'єзоелектричними приводами трубчастого вібратора складає мехатронну систему (рисунок 3).

Електричні коливання формуються задаючим генератором, підсилюються підсилювачем потужності, що містить також ланцюги узгодження для передачі енергії до п'єзоелектричних приводів з мінімальними втратами. Оскільки п'єзоелектричні приводи-випромінювачі є резонансними системами, то для підтримання заданого рівня споживаної потужності і постійного значення ре-

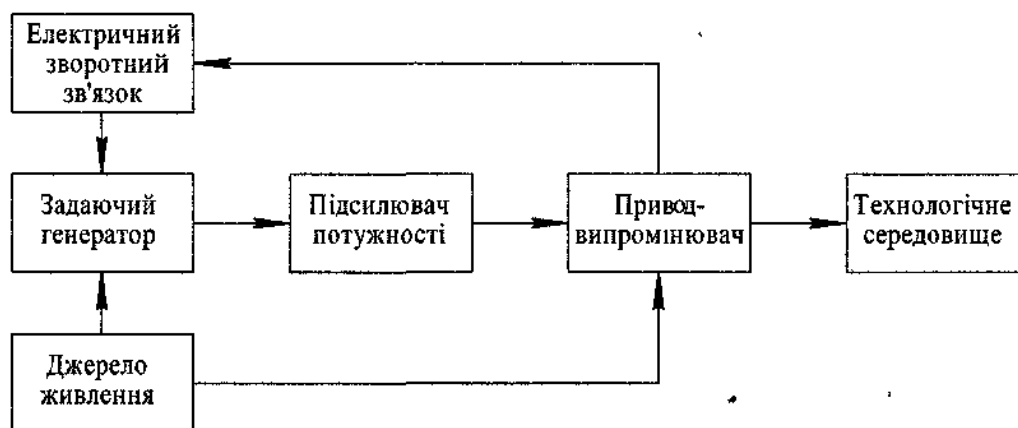


Рисунок 3 — Структурна схема ультразвукового кавітаційного обладнання

зонансної частоти в електричних генераторах вводяться зворотні зв'язки за підведеними до привода струмом та напругою. Сигнали зворотного зв'язку обробляються схемами автопідстроювання частоти, стабілізації потужності та електричного захисту, що є складовими частинами задаючого генератора. Джерело живлення створює необхідні для функціонування системи значення напруг.

Для ефективного використання запропонованого обладнання в кавітаційних технологічних процесах важливою є інформація щодо форми інтенсивної кавітаційної області всередині трубчастого вібратора. Оцінка інтенсивності кавітаційних явищ всередині кавітатора базувалась на застосуванні методу ерозійних тестів [4].

Це дослідження дозволило на якісному рівні наглядно показати форму кавітаційної області всередині кавітатора та продемонструвати рівень отриманої інтенсивності по площі ерозійного руйнування алюмінієвої фольги за фіксований час. Згідно метода ерозійних тестів у якості індикатора використовувалась алюмінієва фольга, яку розташовано поздовж осі вібратора (рисунок 4).

За малої амплітуди радіальних коливань вібратора, тобто малої інтенсивності ультразвуку, в центральній частині циліндричної кавітаційної камери утворюється невелика кавітаційна область, що виникає за рахунок фокусуючих властивостей внутрішньої циліндричної поверхні (рисунок 5, а). При підвищенні інтенсивності коливань за рахунок підвищення напруги збудження резонансних п'єзоелектричних приводів кавітаційна область поступово розширюється. Ерозійна активність у кавітаційній області суттєво зростає (рисунок 5, б). Інтенсивність звуку в області осової лінії при цьому досягає 100 Вт/см^2 . Подальше підвищення амплітуди коливань призводить до того, що кавітаційна область розширюється до внутрішньої поверхні камери (рисунок 5, в).

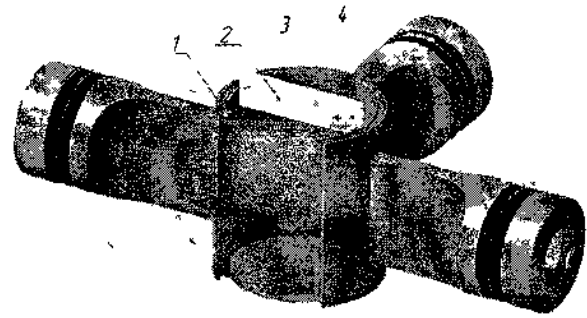


Рисунок 4 — Схема розміщення контрольних зразків фольги у кавітаційній камері (1 — вода, 2 — фольга, 3 — трубчастий вібратор, 4 — випромінювач)

При цьому через двофазне середовище, що наблизилося до випромінюючої поверхні, суттєво погіршуються умови введення ультразвуку до рідини і ефективність кавітатора різко падає [4].

Результати дослідження методом ерозійних тестів підтверджують ефект концентрації звукової енергії в області осі трубчастого вібратора при збудженні в ній радіальних коливань. На стінках кавітатора при цьому кавітаційних явищ не спостерігається, що підтверджує аналітичні дослідження [5].

Кількісно ступінь руйнування фольги оцінювався коефіцієнтом ерозійної активності

$$K_{ep} = \frac{S_p}{S} \cdot 100\%,$$

де S_p — площа руйнувань фольги під дією кавітації, S — початкова площа зразка фольги

Усереднені значення коефіцієнта ерозійної активності для чотирьох рівнів, підведених до кавітатора, елек-

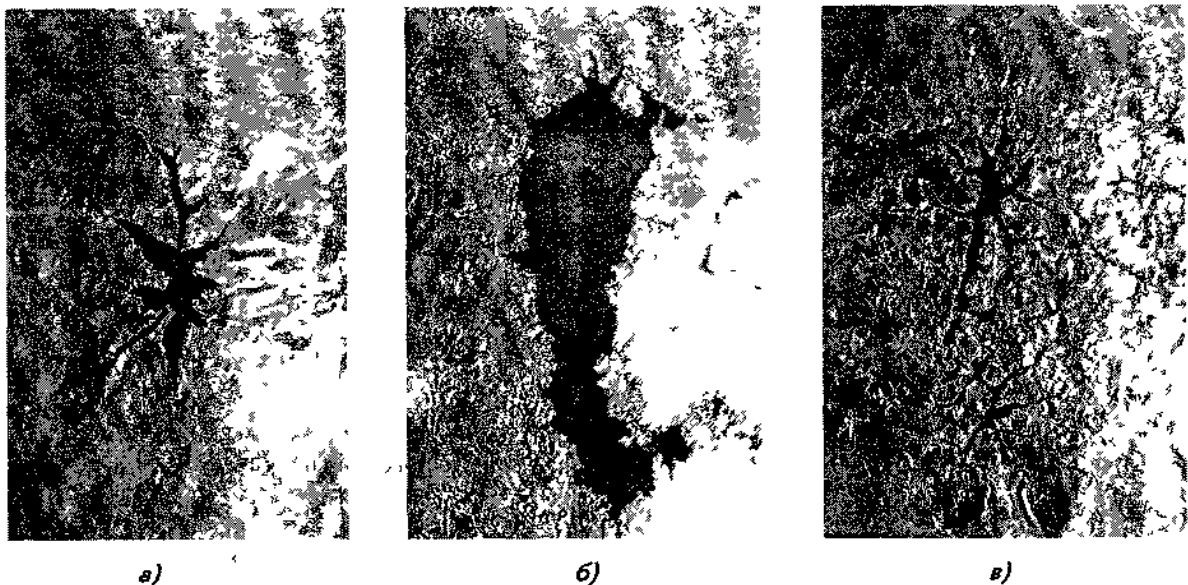


Рисунок 5 — Результати руйнування тестових зразків тестової фольги в трубчастому вібраторі при різних рівнях звукового тиску (а — малий рівень, б — середній рівень, в — високий рівень)

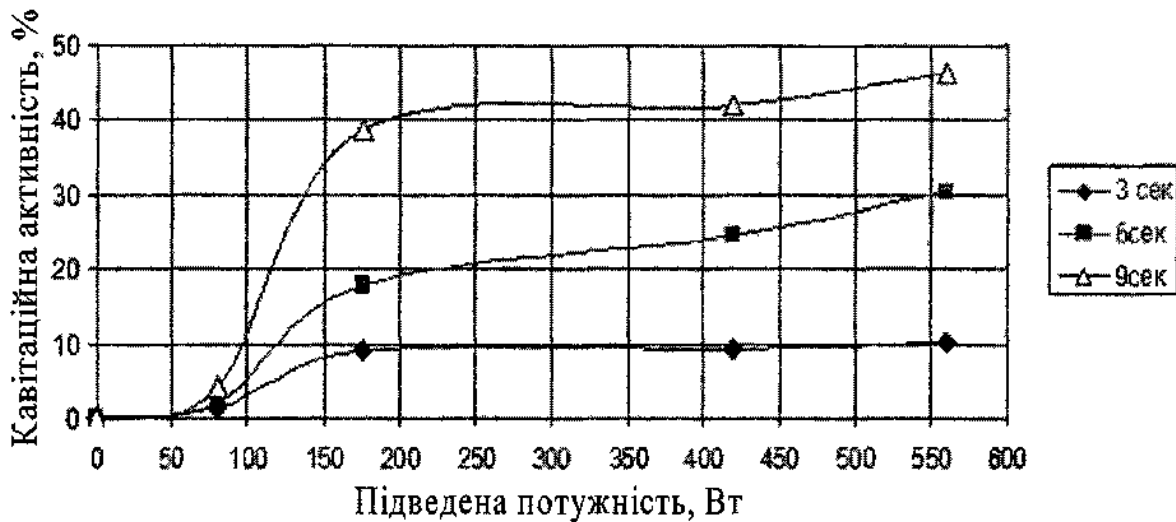


Рисунок 6 — Залежність кавітаційної активності від величини підведеної потужності

тричної потужності показано на рисунку 6. Час обробки зразків складав 3 с, 6 с та 9 с.

З рисунка видно, що площа руйнування фольги збільшувалась при збільшенні підведеної потужності, але ця залежність нелінійна і прямує до насичення.

Метод ерозійних тестів має низку недоліків. Зокрема, фіксується витрата енергії тільки в тих місцях зразків, у яких утворилися наскрізні отвори, спотворюється конфігурація ультразвукового поля у кавітаційній камері. Тому для підвищення надійності отриманих експериментальних результатів було досліджено роботу ультразвукового трубчастого вібратора за допомогою акустичного методу, який базується на реєстрації за допомогою датчика акустичного тиску акустичного сигналу, що утворюється звуковою хвилею і ударними хвилями від захоплення кавітаційних бульбашок. За допомогою акустичного методу, зокрема, може бути визначено коефіцієнт використання акустичної енергії в певній точці технологічного об'єму. Цей коефіцієнт, запропонований у роботі [6], дозволяє оцінити інтенсивність кавітаційних процесів

$$\chi = \frac{E_k}{E}$$

де χ — коефіцієнт використання акустичної енергії, E — щільність підведеної первинної енергії, E_k — щільність енергії, витраченої на утворення кавітації.

Як відомо, на утворення і зростання кавітаційних бульбашок витрачається частина енергії звукового поля, яка потім вивільняється при захопленні кавітаційних бульбашок. Частота коливань звукового поля, яке є причиною виникнення кавітації, відповідає частоті першої гармоніки спектру акустичного сигналу, прийнятого гідрофоном. Ударні хвилі сприймаються як імпульси і в спектрі представлені частково першою та вищими гармоніками. Таким чином, є можливість за допомогою коефіцієнту використання акустичної енергії визначити частину енергії, яка пішла на утворення кавітації.

У такому випадку коефіцієнт використання акустичної енергії доцільно представити як відношення потужності гармонік (крім першої) до сумарної потужності всіх складових спектру [7]

$$\chi = \frac{N_k}{N} = \frac{N_\Sigma - N_1}{N_\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i^2 - U_1^2}{\sum_{i=1}^n U_i^2}$$

де N_k — потужність, витрачена на кавітацію, N_Σ — сумарна потужність всіх спектральних складових, N_1 — потужність першої гармоніки, U_i, U_1 — амплітуди, відповідно, i -тої та першої гармонік.

Для проведення вимірювань експериментальну установку (рисунок 1) доповнено датчиком акустичного тиску з механізмом його позиціонування. Принцип його роботи базується на прямому п'єзоєфекті. Основу конструкції складає п'єзокерамічний елемент з двома металевими обкладинками. Під дією тиску на обкладинках з'являється різниця потенціалів, пропорційна прикладеному тиску. Сигнал з датчика акустичного тиску підсилювався диференційним підсилювачем та передавався на плату збору даних L-CARD L-783M, встановлену на персональний комп'ютер.

Вимірювання проводилися у шести точках поздовж діаметра, що проходить через центр кавітаційної камери у площині розміщення зразків фольги. Відстань між точками 10 мм.

Було визначено коефіцієнт використання акустичної енергії, приблизний діаметр кавітаційної області. Результати для чотирьох рівнів підведеної до кавітатора електричної потужності зображено на рисунку 7.

На рисунку суцільною лінією показано апроксимацію експериментальних даних поліномом третього ступеня за методом найменших квадратів. У центрі кавітаційної камери максимальна інтенсивність кавітаційних

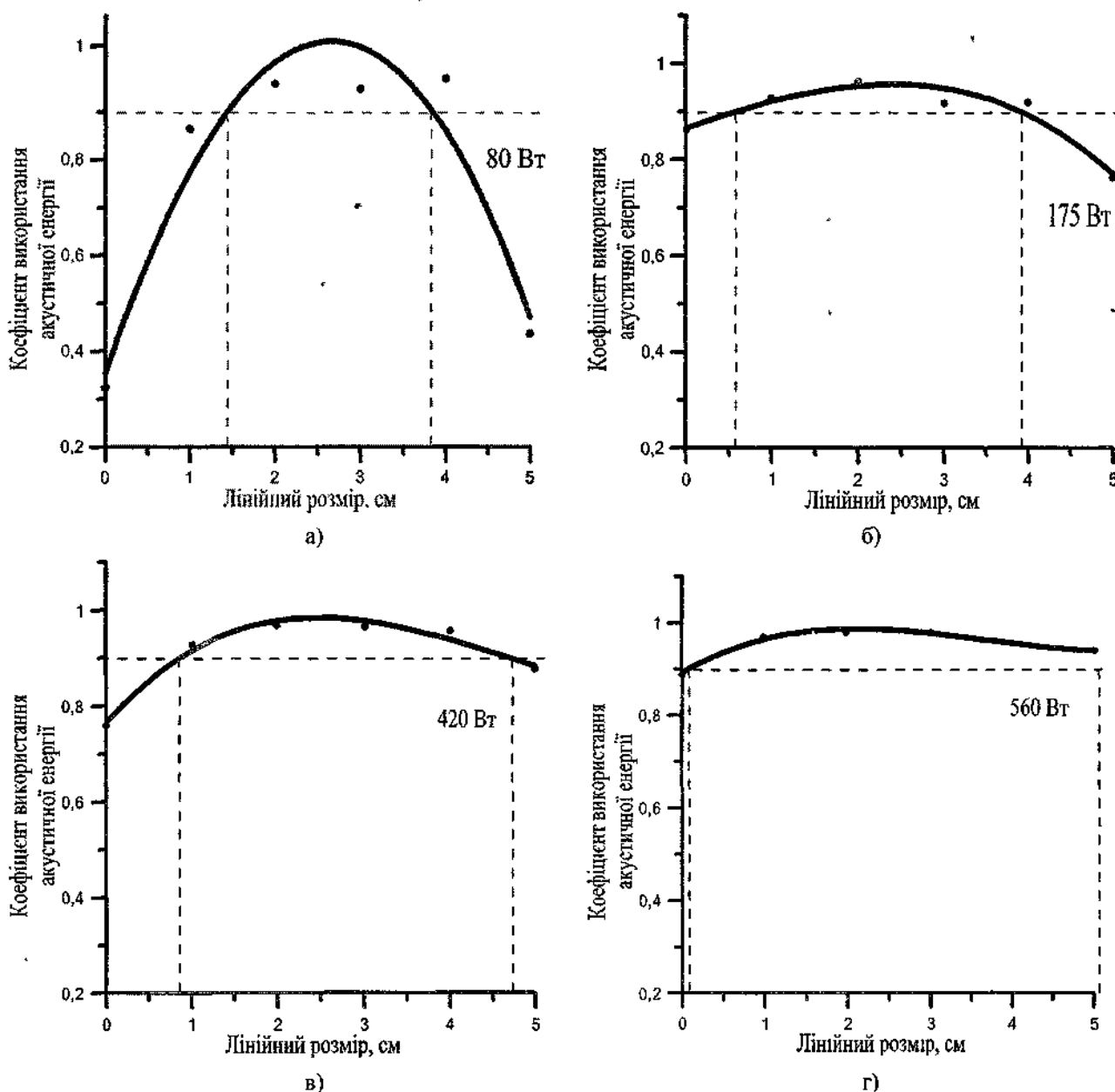


Рисунок 7 — Залежності коефіцієнта ерозійної активності від координати, вздовж діаметра в центрі кавітаційної камери для різних потужностей (а — 80 Вт; б — 175 Вт; в — 420 Вт; г — 560 Вт)

процесів. Визначення діаметру кавітаційної області проведено за апроксимаційною кривою, задаючись умовою, що границя цієї області проходить там, де коефіцієнт використання акустичної енергії дорівнює 0,9. Обробка отриманих даних наведеного експериментального дослідження дозволила зробити висновок, що кавітаційна область розширюється при збільшенні підведеної електричної потужності і на рівні 560 Вт вона заповнює майже весь об'єм камери. Дані експерименту зведено до таблиці 1.

Дані результати узгоджуються з результатами, які були отримані при застосуванні методу ерозійних тестів та підтверджують результати аналітичного дослідження проточної резонансної трубчастої кавітаційної камери [5].

Таблиця 1
Оцінка діаметру кавітаційної області

Підведена потужність	Діаметр кавітаційної області
80 Вт	24 мм
175 Вт	33 мм
420 Вт	38 мм
560 Вт	49 мм

Висновки

Отримані результати підтверджують доцільність застосування фокусуєчих властивостей кавітаційної резонансної камери з метою підвищення інтенсивності ульт-

развукових коливань. Можливість досягнення високої інтенсивності ультразвукових коливань у рідині забезпечить підвищення ефективності багатьох кавітаційних технологій і, зокрема, пов'язаних з інактивациєю шкідливих для людини та навколишнього середовища мікроорганізмів.

Література

1. Новицкий, Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Б.Г. Новицкий — М.: Химия, 1983. — 192 с. — (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии).
2. Луговской, А.Ф. Проблемы создания технологического оборудования для ультразвукового кавитационного обеззараживания воды / А.Ф. Луговской, И.А. Гришко // Промислова гідравліка і пневматика. — Вінниця, 2009. — № 4 (26). — С. 3—6.
3. Пат. 92987 Україна, МПК (2009): C02F 1/36 (2006.01), C02F 1/48, B01D 19/00, A61L 2/02. Пристрій для кавітаційної обробки рідини / О.Ф. Луговський, І.А. Гришко, А.В. Мовчанюк; заявник і патентовласник Луговський О.Ф., Гришко І.А., Мовчанюк А.В. — №а200909283; заявл. 09.09.2009, опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24.
4. Луговской, А.Ф. Исследование работы ультразвукового трубчатого кавитатора в режиме радиальных колебаний / А.Ф. Луговской, А.В. Мовчанюк, И.А. Гришко // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія машинобудування. — К., 2010. — Вип. 59. — С. 285—287.
5. Гришко, І.А. Аналітичне дослідження роботи ультразвукового трубчатого кавитатора з радіальною формою коливань / І.А. Гришко // Вібрації в техніці та технологіях. — Вінниця, 2012. — № 2 (66). — С. 26—34.
6. Розенберг, Л.Д. Кавитационная область // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. — М.: Наука, 1968. — Ч. 6. — С. 221—266.
7. Новосад, А.А. Особливості застосування ультразвукових резонансних п'єзоелектричних приводів-випромінювачів в системах мехатроніки / А.А. Новосад // Вісник НТУУ "КПІ" Серія — Радіотехніка. Радіоапаратування. — Київ, 2012 — Вип. 49. — С. 231.

References

1. Novitskiy, B.G. Application of acoustic vibrations in chemical engineering processes/ B.G. Novitskiy — M.: Himiya, 1983. — 192 p. — (Protsessyi i apparaty himicheskoy i neftyanoy tehnologii)
2. Lugovskoy, A.F. Problems of development of technological equipment for ultrasonic cavitation decontaminating water / A.F. Lugovskoy, I.A. Gryshko // Promislova gidravlika i pnevmatika. — Vinnitsa, 2009. — № 4 (26). — p. 3—6.
3. Patent. 92987 Ukrayina, MPK (2009): C02F 1/36 (2006.01), C02F 1/48, B01D 19/00, A61L 2/02. An apparatus for processing fluid cavitation / A.F. Lugovskoy,

I.A. Gryshko, A.V. Movchanyuk.; patentee Lugovskoy O.F., Gryshko I.A., Movchanyuk A.V. — № a200909283; stated. 09.09.2009, posted. 27.12.2010, Bulletin. № 24.

4. Lugovskoy, A.F. Study of the ultrasonic tubular cavitator mode of radial oscillations / A.F. Lugovskoy, A.V. Movchanyuk, I.A. Gryshko // Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu Ukrayini "Kiyivskiy politehnicniy Institut". Edition mashinobuduvannya. — K., 2010. — №. 59. — p. 285—287.

5. Gryshko, I.A. Analytical study of the ultrasonic tubular cavitator radial waveform / I.A. Gryshko // Vibratsiyi v tehnitsi ta tehnologiyah. — Vinnitsa, 2012. — № 2 (66). — p. 26—34.

6. Rozenberg, L.D. Cavitation area // Moschnyie ultrazvukovyie polya / Edited by L.D. Rozenberga. — M.: Nauka, 1968. — №. 6. — p. 221—266.

7. Novosad A.A. Features of the application of ultrasonic resonant piezoelectric actuators emitters in mechatronics systems / A.A. Novosad // Visnik NTUU "KPI" Edition Radiotekhnika. Radioaparatabuduvannya. — Kiev, 2012 — №. 49. — p. 231.

Надійшла 21 03 2014

УДК 621.7.022.6

Исследование рабочей области проточного трубчатого кавитатора с высокой интенсивностью ультразвуковых колебаний

**И.А. Гришко, А.А. Новосад,
А.Ф. Луговской**

В работе рассмотрены вопросы исследования пространства ультразвуковых колебаний высокой интенсивности внутри трубчатого вибратора, стенки которого совершают чисто радиальные колебания. Оценка интенсивности ультразвуковых колебаний базировалась на применении метода эрозионных тестов. В качестве индикатора в тестах была использована алюминиевая фольга. По форме и интенсивности разрезания индикаторной фольги, размещенной в кавитационной камере, при различных значениях подведенной мощности дана качественная оценка работы трубчатого кавитатора, которая позволила выбрать рациональные режимы работы для эффективной обработки жидкости. Уточнение полученных результатов проводилось с использованием акустического метода.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания высокой интенсивности, трубчатый вибратор, эрозионные тесты, акустический метод.

UDC 621.7.022.6

The research issues of ultrasonic oscillations of high intensity vibrator inside the tubular walls

I.A. Grishko, A.A. Novosad,
A.F. Lugovskoy

The paper discusses the research issues of ultrasonic oscillations of high intensity vibrator inside the tubular walls which make purely radial oscillations. Assessment of the

intensity of ultrasonic vibrations based on the method of erosion tests. As an indicator used in the tests was aluminum foil. The shape and intensity of corrosion indicator foil placed in the cavitation chamber, for different values of power let down given a qualitative assessment of the tubular cavitator which allowed to choose rational modes for efficient processing of liquid. Refinement of the results was performed using the acoustic method.

Key words: ultrasonic oscillations of high intensity, tubular vibrator, acoustic method.