



Луговський О. Ф.

Мовчанюк А. В.

Гришко І. А.

Національний технічний
університет України
"Київський
політехнічний
інститут"

Lugovskoy O. F.

Movchanuk A. V.

Gryshko I. A.

National Technical
University of Ukraine
"Kyiv Polytechnic
Institute"

УДК 621.7.022.6

МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОТОЧНОГО ТРУБЧАТОГО КАВІТАТОРА З ВИСОКОЮ ІНТЕНСИВНІСТЮ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ ДЛЯ ОБРОБКИ РІДКИХ СЕРЕДОВИЩ

В роботі розглянуті питання можливості застосування, розробленого авторами, кавітатора з радіальної модою коливань стінок трубчастої кавітаційної камери для кавітаційної обробки рідких середовищ. Актуальність даної тематики зумовлена широким спектром технологічних рідин з різними реологічними властивостями, кавітаційна обробка яких може значно підвищити ефективність багатьох технологічних процесів. Експериментальні дослідження проводились із застосуванням в якості робочого середовища різних типів рідин, які піддавалися кавітаційній обробці в трубчастому кавітаторі, резонансні розміри якого були розраховані для обробки води. Як індикатор кавітації в експериментальних дослідженнях була використана алюмінієва фольга, за формою та інтенсивністю роз'їдання якої дана оцінка роботи трубчастого кавітатора при обробці різних типів рідин.

Ключові слова: кавітація, акустична релаксація, інтенсивність ультразвукових коливань, мода коливань, кавітаційна обробка рідин, ультразвуковий трубчастий кавітатор.

Постановка проблеми дослідження.

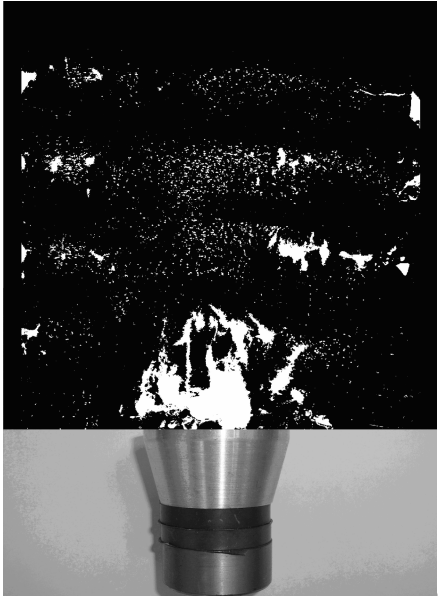
В більшості випадків технологічні процеси, які використовують явище ультразвукової кавітації, передбачають обробку рідини в потоці з введенням в неї ультразвукової хвилі високої інтенсивності. Чим більша інтенсивність введених в рідину ультразвукових коливань, тим менше необхідно затратити часу для її ефективної обробки. Досягнення інтенсивності ультразвукових коливань понад 20 Вт/см² є досить проблематичним, адже спроба підвищити інтенсивність за рахунок збільшення напруги збудження п'єзоелектричного перетворювача призводить до виникнення на випромінюючій поверхні кавітаційного прошарку, який перешкоджає проходженню ультразвукової хвилі в товщу рідини, що піддається обробці (рис.1). При цьому різко знижується ККД введення ультразвукової енергії в рідину.

Істотного локального підвищення інтенсивності ультразвуку можливо досягти за рахунок фокусування коливань вздовж осі труби або у фокусі збираючої акустичної лінзи [1].

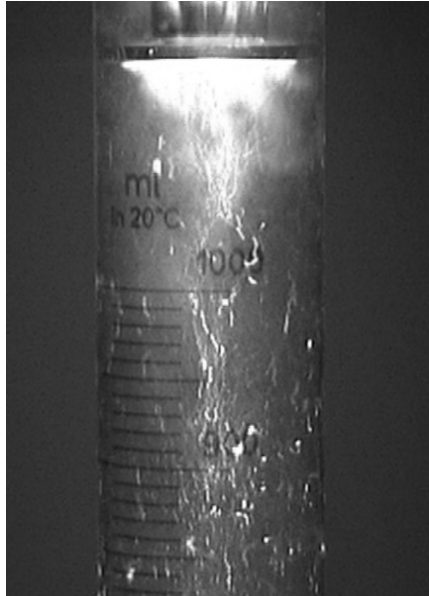
Апарати з напівсферичною (рис. 2а) або сферичною (рис. 2б) [2, 3] акустичною лінзою, зважаючи на низьку технологічність, малу продуктивність та складність реалізації обробки рідини в потоці, застосовуються тільки в дослідницьких цілях.

Подібні кавітаційні апарати дозволяють у фокальній області досягти інтенсивності ультразвукових коливань 200 Вт/см² і більше. Проте застосування таких конструктивних рішень в багатьох технологічних процесах для обробки рідини досить проблематично.

Метою даного дослідження є аналіз діапазону припустимої зміни рідин, що кавітаційно обробляється в резонансному трубчастому кавітаторі.

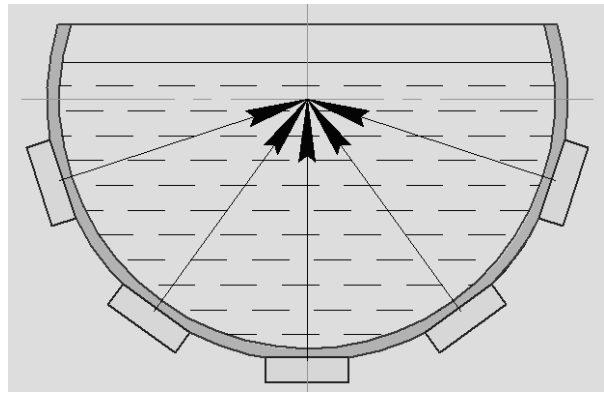


а)

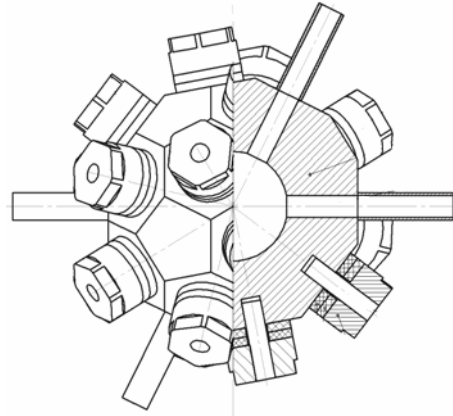


б)

Рис. 1. Утворення кавітаційних зон поблизу випромінюючої поверхні малоамплітудного (а) та високоамплітудного (б) резонансних п'єзоелектричних приводів-випромінювачів при інтенсивності порядку 20 Вт/см^2



а)



б)

Рис. 2. Напівсферичний (а) та сферичний (б) ультразвуковий кавітаційний апарат з фокусуванням ультразвукових коливань в точці

Викладення основного матеріалу. Для забезпечення можливості створення в рідині ультразвукової хвилі високої інтенсивності авторами запропонований трубчастий проточний кавітатор (рис. 3), який завдяки можливості збудження на нульовій моді коливань, дозволяє ввести в рідину ультразвукові коливання з невисокою інтенсивністю, а потім сконцентрувати їх вздовж осьової області цієї кавітаційної камери [4]. При цьому кавітаційна область утворюється тільки в центральній частині трубчастого кавітатора, сягаючи інтенсивності ультразвуку до 100 Вт/см^2 . При цьому на внутрішній випромінюючій поверхні має місце мінімальне значення інтенсивності, що дозволяє якісно

обробити рідину, забезпечивши високий ККД установки та довговічність випромінюючої поверхні. Форма розподілення інтенсивності ультразвукових коливань в робочому середовищі запропонованого трубчастого кавітатора в разі збудження нульової моди резонансних коливань представлена на рис. 4.

В технологічних кавітаційних процесах в якості робочого середовища можуть застосовуватися рідини з різними реологічними властивостями, що необхідно враховувати при створенні ультразвукових кавітаторів, оскільки їх робота пов'язана з особливостями поширення ультразвукових коливань в цих середовищах.

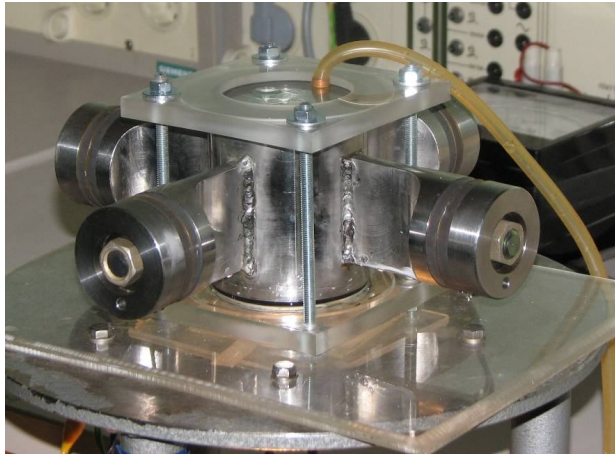
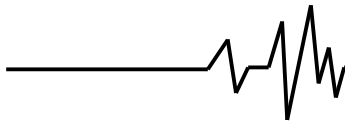


Рис. 3. Ультразвуковий трубчастий кавітатор

Найбільш поширеним критерієм для прогнозування поведінки ультразвукової хвилі в товщі рідини є час релаксації рідини. Акустична релаксація характеризує процес відновлення балансу енергії середовища, який був порушений при проходженні звукової хвилі. Час акустичної релаксації характеризує тривалість процесу відновлення параметра, що відхилився від рівноважного стану. Для малов'язких рідин, наприклад, води час акустичної релаксації досить малий. Для більшості рідин частота акустичної релаксації знаходиться в діапазоні гіперзвуку.

При проектуванні подібних трубчастих кавітаторів параметри акустичної релаксації рідини можуть враховуватись при розрахунку резонансних розмірів вібратора і розмірів підводячого та відводячого трубопроводів, по яким можуть поширюватись, генеровані в кавітаційній камері, ультразвукові коливання.

Досліджувана резонансна калібрувальна система забезпечує концентрацію ультразвукової енергії вздовж осі кавітаційної камери за рахунок збудження в трубчастому вібраторі коливань нульової моди. При цьому в поперечному перерізі кавітаційної камери укладається тільки половина хвилі ультразвукових коливань, а резонансні розміри кавітаційної камери визначають частоту збудження вібратора в діапазоні десятків кГц. У той же час, для більшості рідких середовищ, що транспортуються через досліджуваний трубчастий кавітатор, частота акустичної релаксації знаходиться в гіперзвуковому діапазоні, що дозволяє, в даному випадку, нехтувати впливом явища акустичної релаксації на розповсюдження хвиль в кавітаційній камері.

Для прогнозування роботи камери з різними рідинами можна скористатися аналітичною залежністю [5]

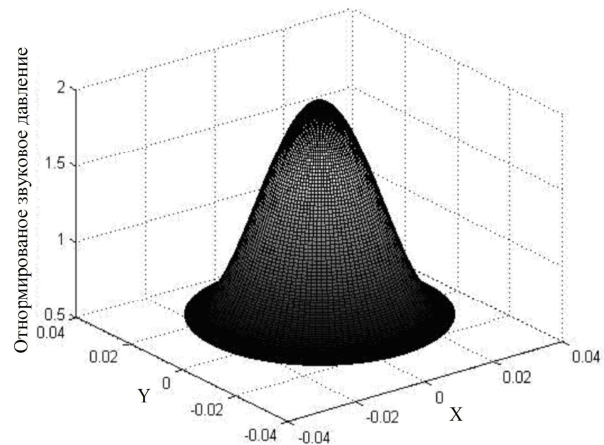


Рис. 4. Форма розподілення інтенсивності ультразвукових коливань в трубчастому кавітаторі

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

де: f - власна частота коливань об'єму рідини; c - швидкість звуку в рідині; n_i - значення функції Бесселя першого порядку, що задовольняють вираз $J_1(k_r r) = 0$; h - висота кавітаційної камери; $m = 0, 1, 2, \dots$ - натуральне число; a - радіус кавітаційної камери.

З врахуванням вимушеної частоти трубчастого вібратора були побудовані графіки залежності швидкості поширення звукової хвилі в цих рідинах від власної частоти і середнього діаметру трубчастого вібратора (рис. 5).

Приведені графічні залежності дають можливість підібрати діаметр кавітаційної камери та вимушену частоту коливань ножевидних трансформаторів калібрувальної швидкості, що встановлені на зовнішній поверхні камери, в залежності від типу рідини, яка піддається обробці, забезпечивши при цьому максимальну ефективність кавітаційної обробки за рахунок того, що частота резонансних коливань кавітаційної камери співпадатиме з частотою власних коливань рідини.

Виготовлене експериментальне обладнання на базі трубчастого ультразвукового кавітатора з високою інтенсивністю ультразвуку розраховане для кавітаційної обробки води. Проте часто доводиться піддавати кавітаційній обробці і інші рідини. Для отримання максимального ефекту для кожної рідини необхідно виготовляти свою конструкцію кавітатора зі своїми резонансними розмірами.

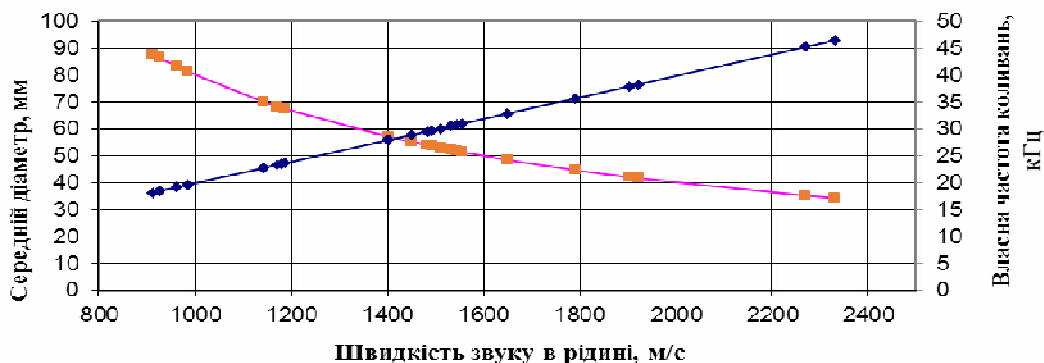
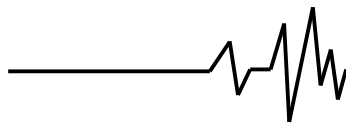


Рис. 5. Залежність швидкості поширення звукової хвилі в різних рідинах від власної частоти і середнього діаметру трубчастого вібратора

Провівши ряд експериментів на вже виготовленому кавітаційному обладнанні з різними типами рідин, які мають різні реологічні властивості, було встановлено, що застосувати це обладнання для кавітаційної обробки різних

рідин можливо, але ефективність обробки, звичайно, буде меншою (рис. 6). На графіку ми спостерігаємо зміну ефективності кавітаційних процесів в трубчастій камері в залежності від типу рідини.

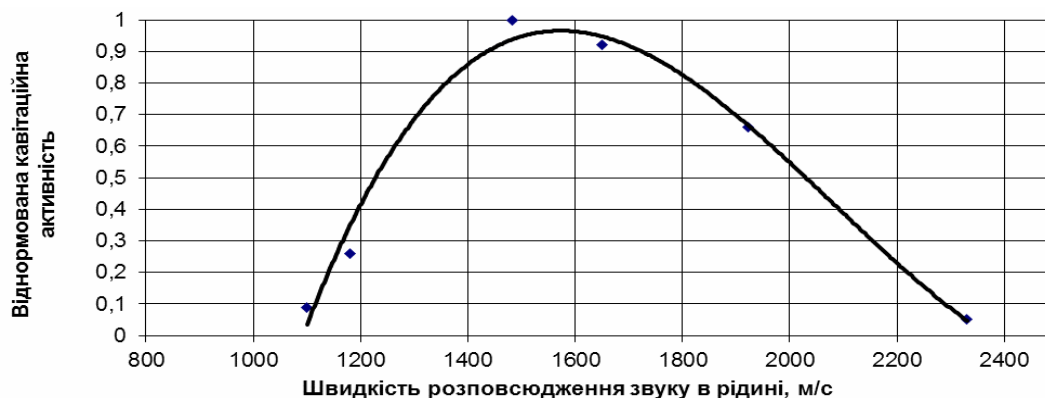


Рис. 6. Прогнозування роботи ультразвукового трубчастого кавітатора з різними типами рідин

Оцінка ефективності кавітаційних процесів всередині трубчастого кавітатора базувалась на застосуванні методу ерозійних тестів [6], який дає можливість оцінити форму кавітаційної області всередині кавітатора та продемонструвати рівень досягнутої інтенсивності по площі ерозійного руйнування алюмінієвої фольги за фіксований час. Згідно методу ерозійних тестів в якості індикатора

використовувалась алюмінієва фольга, яка розташовувалась вздовж осі розробленого трубчастого вібратора (рис. 7). На рис. 8 наведені приклади ерозійного руйнування фольги, які підтверджують названі особливості розповсюдження звукового поля в трубчастому вібраторі в разі його збудження на нульовій моді коливань.

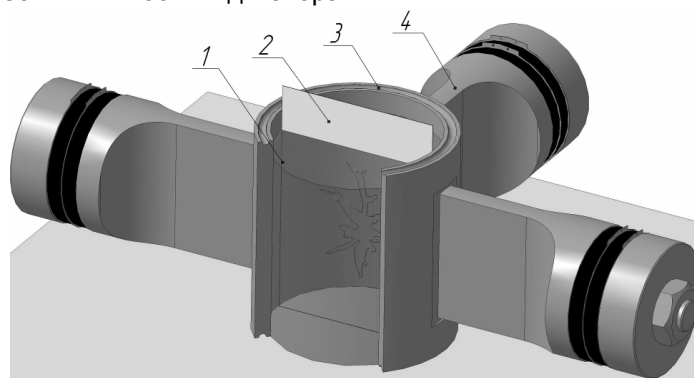


Рис. 7. Схема розміщення контрольних зразків фольги в кавітаційній камері 1 – рідина, 2 – фольга, 3 – трубчастий вібратор, 4 – випромінювач

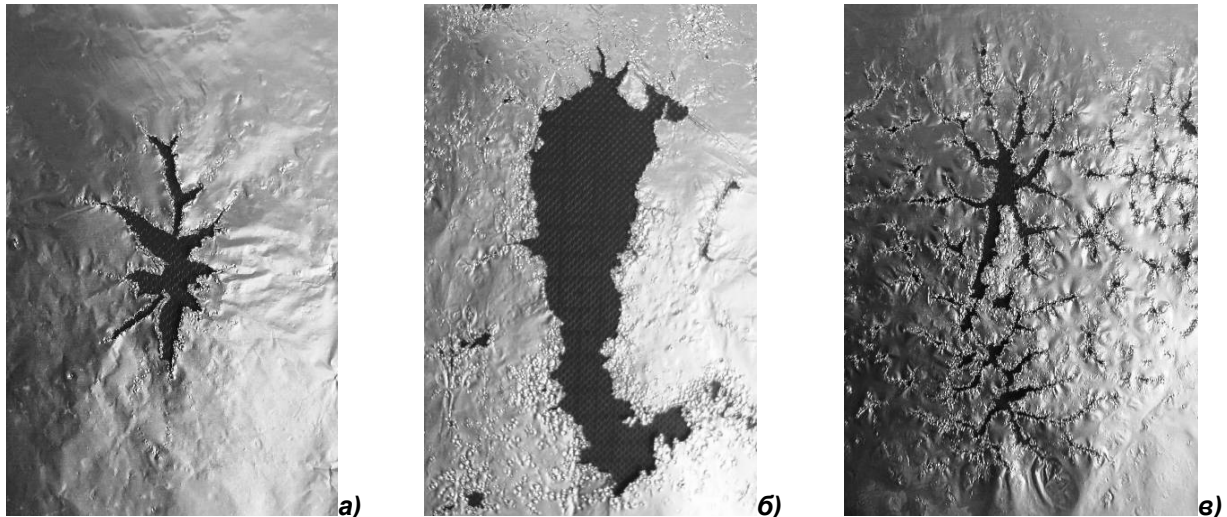
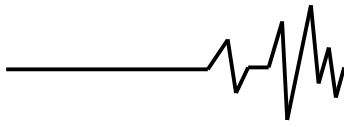


Рис. 8. Зразки ерозійного руйнування тестової фольги в разі збудження в кавітаторі нульової моди коливань при різних рівнях звукового тиску (а – малий рівень, б – середній рівень, в – високий рівень)

Кількісно руйнування фольги оцінювалося 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.

В якості параметра, що характеризує тип рідини, було обрано швидкість розповсюдження звуку в ній. Цей параметр зручно використовувати, оскільки в літературі наведено достатньо інформації стосовно швидкостей звуку в різних рідинах.

Отримані результати свідчать про можливість застосування розглянутого кавітатора для обробки досить широкого спектру рідин.

Висновки

Досліджена залежність ефективності кавітаційної обробки рідини в трубчатому резонансному кавітаторі від швидкості звуку в рідині.

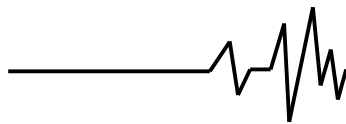
З'ясовано доцільність та можливість застосування, розрахованого для води трубчастого кавітатора, для кавітаційної обробки рідин з іншими швидкостями звуку.

Отримана графічна залежність демонструє зменшення ефективності кавітатора в разі відхилення швидкості звуку в оброблюваній рідині від розрахункової.

Для оцінки ефективності кавітаційної обробки рідини було застосовано метод ерозійних тестів.

Список використаних джерел

1. 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.
2. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
3. Берник І.М. Ультразвукові кавітаційні апарати для реалізації екологічно безпечної технології вилучення пектину з вторинної рослинної сировини / І.М. Берник, А.Ф. Луговской // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – Київ, 2010. – Вип. 58. – С. 82–86.
4. Гришко І.А. Проблемы ультразвукового кавитационного обеззараживания технологических сред / И.А. Гришко, А.Ф. Луговской // Матеріали XIII Міжнародної наукової конференції "сучасні проблеми землеробської механіки". – Вінниця, 2012. – С. 84–85.
5. Гришко І.А. Аналитическое исследование работы ультразвукового трубчатого кавитатора с радиальной формой колебаний / И.А. Гришко // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2012. – № 2 (66). – С. 26–34.
6. 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. – Київ, 2010. – Вип. 59. – С. 285–287.

Список джерел в транслітерації

1. Lugovskoy A.F. Problems of development of technological equipment for ultrasonic cavitation decontaminated survival water / A.F. Lugovskoy, I.A. Gryshko // Promislova gidravlika i pnevmatika. – Vinnitsa, 2009. – № 4 (26). – p. 3–6.

2. Ultrasound. Malen'kaja jenciklopedija / Editor in chief. I.P. Goljamina. – M.: Sovetskaja jenciklopedija, 1979. – 400 p.

3. Bernik I.M Ultrasonic cavitation devices for implementation of environmentally sound technology extracting pectin from recycled plant material / I.M. Bernik, A.F. Lugovskoy // Visnik NTUU «KPI». Mashinobuduvannja. – Kiev, 2010. – № 58. – p. 82–86.

4. Gryshko I.A. Ultrasonic cavitation problems disinfection technology environments / I.A. Gryshko, A.F. Lugovskoy // Materiali XIII Mizhnarodnoi naukovoї konferenciji "suchasni problemi zemlerobskoї mehaniki". – Vinnitsa, 2012. – S. 84–85.

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

6. Lugovskoy A.F. Study of the ultrasonic tubular cavitator mode of radial oscillations / A.F. Lugovskoy, A.V. Movchanyuk, I.A. Gryshko // Visnik Natsionalnogo tehničnogo universitetu Ukraini «Kiyivskiy politehničnij Institut». Mashinobuduvannja. – Kiev, 2010. – № 59. – p. 285–287.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТОЧНОГО ТРУБЧАТОГО КАВИТАТОРА С ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЖИДКИХ СРЕД

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы возможности применения, разработанного авторами, кавитатора с радиальной модой колебаний стенок трубчатой кавитационной камеры для кавитационной обработки жидких сред. Актуальность данной тематики обусловлена

широким спектром технологических жидкостей с различными реологическими свойствами, кавитационная обработка которых может значительно повысить эффективность многих технологических процессов. Экспериментальные исследования проводились с применением в качестве рабочей среды различных жидкостей, которые поддавались кавитационной обработке в трубчатом вибраторе, резонансные размеры которого были рассчитаны для обработки воды. В качестве индикатора кавитации в экспериментальных исследованиях была использована алюминиевая фольга, по форме и интенсивности разъедания которой дана оценка работы трубчатого кавитатора с различными типами жидкостей.

Ключевые слова: кавитация, акустическая релаксация, интенсивность ультразвуковых колебаний, мода колебаний, кавитационная обработка жидкостей, ультразвуковой трубчатый кавитатор.

POSSIBILITY OF APPLICATION FLOWING TUBULAR KAVITATOR WITH HIGH ULTRASONIC INTENSITY OSCILLATIONS FOR PROCESSING OF THE LIQUID ENVIRONMENTS

Annotation. The research is consider questions of using cavitator with the radial degree of internal surface vibrations of the tubular cavitation chamber which used for liquid environments treatments. Actuality of this theme is due to a wide spectrum of technological liquids with the different rheological properties. Cavitation treatment of that can significantly improve the efficiency of many processes. An experimental research was conducted using differents liquids processing in tubular cavitator which resonans sizes were calculated to processing water. During experimental researches was using aluminum foil as an indicator of cavitation. An estimation of work tubular cavitator with the different types of liquids was given of form and intensity of foil destruction.

Key words: cavitation, acoustic relaxation, the intensity of ultrasonic vibrations, radial vibrations, cavitation processing of liquids, ultrasonic tube cavitator.