

УДК 621.647.23

А.В. Мовчанюк, канд. техн. наук, доц.,**А.Ф. Луговской**, д-р техн. наук, проф.,**И.А. Гришко**, асп.,

НТУ Украины «Киевский политехнический институт»

ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КАВИТАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБЪЕМЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТРУБЧАТОГО КАВИТАТОРА С РАДИАЛЬНОЙ ФОРМОЙ КОЛЕБАНИЙ

Рассмотрены особенности возбуждения ультразвуковой кавитации в цилиндрическом технологическом объеме, который образован трубчатым вибратором, что осуществляет радиальные колебания. Представлены результаты аналитического и экспериментального исследования интенсивности кавитации, а также особенности ее распространения в трубчатом вибраторе, который возбуждается четырьмя ультразвуковыми пьезоэлектрическими приводами на наружной образующей поверхности. Исследования кавитации проводились при использовании алюминиевой фольги.

математическая модель, ультразвуковая кавитация, кольцевой вибратор, радиальная мода колебаний, кавитационная область, ультразвуковая эрозия

Анализ исследований и публикаций. Эффективность многих технологических процессов, использующих эффекты, сопровождающие ультразвуковую кавитацию, зависит от достигаемого уровня интенсивности звука в зоне обработки. Высокие уровни интенсивности звуковых колебаний необходимы, например, при борьбе с микроорганизмами при обеззараживании воды [1-3], при диспергировании твердых материалов, например, в процессе получения нанопорошков, при кавитационной обработке нефти в процессе добычи, транспортировки и переработки [4, 5] и т.д.

Известен ряд способов достижения высокой интенсивности колебаний в жидкости, одним из которых является использование цилиндрических фокусирующих систем, позволяющих производить интенсивную кавитационную обработку жидкости в потоке [6].

Для достижения высокой эффективности технологического оборудования, реализующего ультразвуковую кавитационную обработку с помощью цилиндрического вибратора, совершающего радиальные колебания, необходимо знание особенностей образования звукового

поля в технологическом объеме при различных условиях возбуждения колебаний.

Постановка задачи. Целью предложенной статьи является анализ результатов аналитического и экспериментального исследований особенностей возникновения и развития кавитационных областей в объеме трубчатого проточного вибратора, совершающего радиальные колебания.

Изложение материала и результаты. Исследуемая кавитационная камера представляет собой отрезок трубы, длина которого меньше половины длины волны возбуждаемых в трубе резонансных радиальных колебаний (рис.1). На наружной поверхности трубы установлены полуволновые ультразвуковые вибрационные приводы, выходные ступени трансформаторы скорости которых имеют ножевидную форму и размещены вдоль образующих цилиндрической поверхности камеры. Вибрационные приводы возбуждают в трубчатом вибраторе резонансные колебания радиальной формы. Подобное выполнение трансформаторов скорости обеспечивает эффективную передачу ультразвуковых колебаний в трубчатый при наименьшем негативном влиянии на форму возбуждаемых в вибраторе колебаний.

В заполненной жидкостью технологическом объеме кавитационной камеры конфигурация кавитационной области повторяет конфигурацию поля звукового давления. При этом интенсивность кавитационных явлений будет пропорциональна величине звукового давления.



Рисунок 1 - Ультразвуковая кавитационная проточная камера в виде трубчатого вибратора (1 - трубчатый вибратор; 2 – ультразвуковой вибрационный привод с ножевидным трансформатором скорости)

Решение задачи о конфигурации поля в цилиндрической кавитационной камере целесообразно проводить в цилиндрической системе координат. В соответствии с расчетной схемой (рис.2) ось z направлена вдоль оси цилиндра, а начало координат совпадает с осью цилиндра. Пусть высота цилиндра равна h , а радиус a .

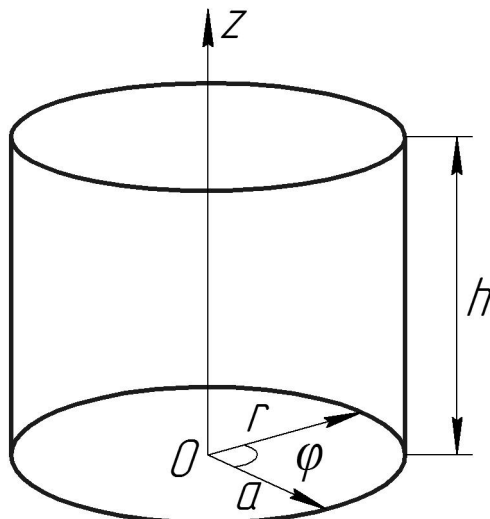


Рисунок 2 - Расчетная схема кавитационной проточной камеры в виде трубчатого вибратора, совершающего радиальные колебания

Волновое уравнение в цилиндрических координатах для потенциала скорости Φ имеет вид [7]

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}$$

где r – радиус-вектор, φ - полярный угол, c - скорость звука.

В случае, если в цилиндре отсутствуют изгибные колебания, потенциал скорости Φ не будет зависеть от φ и уравнение несколько упроститься:

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

Решение уравнения (1) удобно искать методом разделения переменных Фурье. Пусть потенциал скорости является произведением трех функций

$$\Phi(r, z, t) = R(r) \cdot Z(z) \cdot T(t), \quad (2)$$

где функция $R(r)$ зависит только от r , $Z(z)$ зависит только от z и $T(t)$ зависит только от t .

Подставив (2) в (1) и разделив результат на $R(r) \cdot Z(z) \cdot T(t)$, получим

$$\left(\frac{1}{R(r)} \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r R(r)} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{1}{T(t)} \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Выражение в первых скобках зависит только от r , во вторых скобках - только от z , а правая часть зависит только от t . Выражение (3) тождественно только тогда, когда выражения в скобках равны постоянным величинам. Следовательно, выражение (3) распадается на систему уравнений:

$$\frac{1}{c^2} \frac{1}{T(t)} \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} = -k^2, \quad (4)$$

$$\left(\frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} \right) = -k_z^2, \quad (5)$$

$$\left(\frac{1}{R(r)} \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r R(r)} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) = -k_r^2. \quad (6)$$

При этом, исходя из (3) выполняется условие

$$k_z^2 + k_r^2 = k^2 \quad (7)$$

Приведем уравнение (6) к виду

$$\frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} + k_r^2 R(r) = 0,$$

получаем уравнение, решением которого является цилиндрическая функция Бесселя нулевого порядка [8]

$$R(r) = J_0(k_r r). \quad (8)$$

Решением уравнения (5) является комбинация гармонических функций:

$$Z(z) = A \sin(k_z z) + B \cos(k_z z), \quad (9)$$

где A и B константы, определяемые из граничных условий.

Решением уравнения (4) является гармоническая функция

$$T(t) = \sin(\omega \cdot t), \quad (10)$$

где ω - круговая частота.

При этом $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$, где f частота.

В результате подстановки (8)-(10) в (1), получаем

$$\Phi(r, z, t) = J_0(k_r r) \cdot (A \cdot \sin(k_z z) + B \cdot \cos(k_z z)) \cdot \sin(\omega t). \quad (11)$$

Соотношения между волновыми числами будут определяться из граничных условий. Так для абсолютно жесткой стенки, например, стенка поверхности кавитационной камеры, колебательная скорость частиц равна нулю.

$$V_r = -\frac{\partial\Phi}{\partial r} = 0. \quad (12)$$

В случае абсолютно мягкой стенки (например, граница жидкость-воздух), должно выполняться условие равенства нулю величины звукового давления, а значит и потенциала скорости

$$\Phi = 0. \quad (13)$$

Рассмотрим случай кавитационной резонансной камеры, закрытой по торцам абсолютно мягкими стенками. В таком случае граничные условия примут вид:

$$\left. \frac{\partial\Phi(r)}{\partial r} \right|_{r=a} = 0, \quad (14)$$

$$\Phi(z)|_{z=0} = \Phi(z)|_{z=h} = 0. \quad (15)$$

После подстановки (14) в (11) и с учетом того, что $\frac{\partial J_0(x)}{\partial x} = -J_1(x)$, получаем

$$J_1(k_r r) = 0. \quad (16)$$

Значения первых десяти корней, удовлетворяющих выражению (16), приведены в табл. 1

Таблица 1. Корни уравнения (16)

	Номер корня, i				
	1	2	3	4	5
$n_i = k_r a$	0	3,832	7,016	10,174	13,324
	Номер корня, i				
	6	7	8	9	10
$n_i = k_r a$	16,471	19,616	22,76	25,904	29,047

Первый корень можно отбросить, так как он отвечает нулевой частоте, в связи с чем $J_0(0) = 0$.

Для абсолютно мягких стенок условие (15) дает систему двух уравнений:

$$\begin{cases} A \sin(k_z 0) + B \cos(k_z 0) = 0, \\ A \sin(k_z h) + B \cos(k_z h) = 0. \end{cases}$$

В результате решения системы, получаем

$$\begin{aligned} B &= 0, \\ k_z \cdot h &= \pi \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (17)$$

В результате для собственных частот должны выполняться условия

$$\begin{cases} k_r = \frac{n_i}{a}, \\ k_z = \frac{\pi \cdot m}{h}, \\ k_r^2 + k_z^2 = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \right)^2. \end{cases} \quad (18)$$

Из выражения (18) можно найти набор собственных частот для жидкости в резонансной цилиндрической кавитационной камере для заданных геометрических размеров

$$f = \frac{c}{2 \cdot \pi} \sqrt{\left(\frac{n_i}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot m}{h} \right)^2} \quad (19)$$

Результаты расчета набора собственных частот для камеры радиусом 31мм, высотой 80 мм, наполненной водой (скорость звука 1500 м/с) приведены в таблице 2.

Таблица 2. Набор собственных частот резонансной камеры

	f , кГц			
	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
$i = 2$	30,9	34,7	40,3	47
$i = 3$	54,8	57	60,6	65,3
$i = 4$	78,9	80,5	83	86,5

Как видим, наибольший интерес представляет частота 30,9 кГц, как наиболее близкая к рабочей частоте резонансной кавитационной камеры 22,4 кГц. Следует отметить, что при уменьшении скорости звука (что наблюдается в квитирующей жидкости) резонансная частота понижается и для режима развитой кавитации (уменьшение скорости звука порядка 30%) составляет 19,6 кГц. Возникающую конфигурацию кавитационной области или звукового давления удобно разделить на моды, при этом номер моды (i, m) будет состоять из двух чисел - i номер решения уравнения (16), m - номер решения уравнения (17). На рис. 3 и рис. 4 представлены конфигурации звукового поля для различных мод колебаний.

В связи с тем, что интенсивность кавитационных явлений зависит от величины звукового давления, определять конфигурацию кавитационной области удобно методом секущих, проиллюстрированом на рис.5. Метод секущих заключается в построении секущей плоскости с заданным уровнем звукового давления. Пересечение секущей

области и трехмерного графика звукового давления даст интенсивность кавитационных явлений в интересующей нас плоскости.

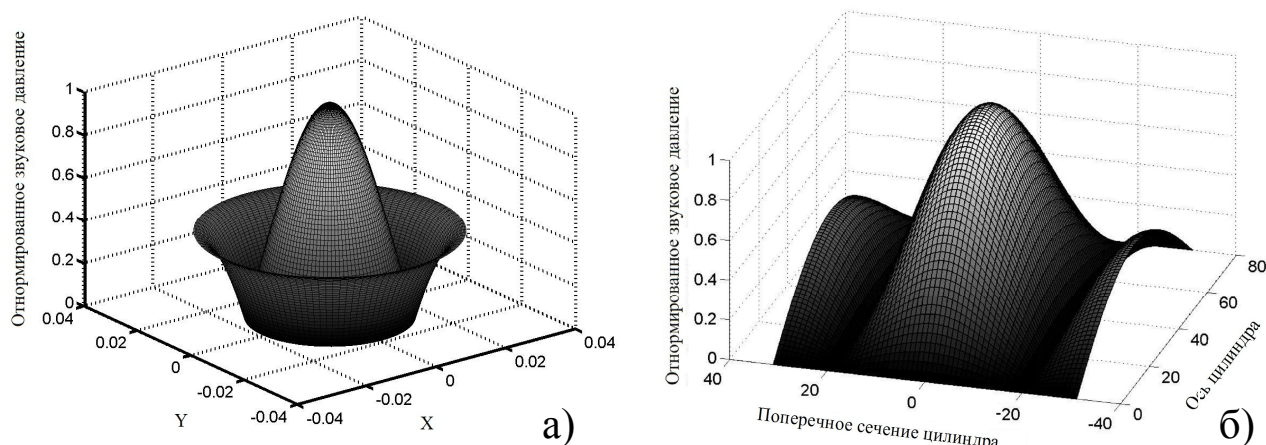


Рисунок 3 - Конфигурация поля моды (2,1) в проточной камере с цилиндрическим вибратором а) – в плоскости перпендикулярной оси камеры, б) в плоскости параллельной оси камеры

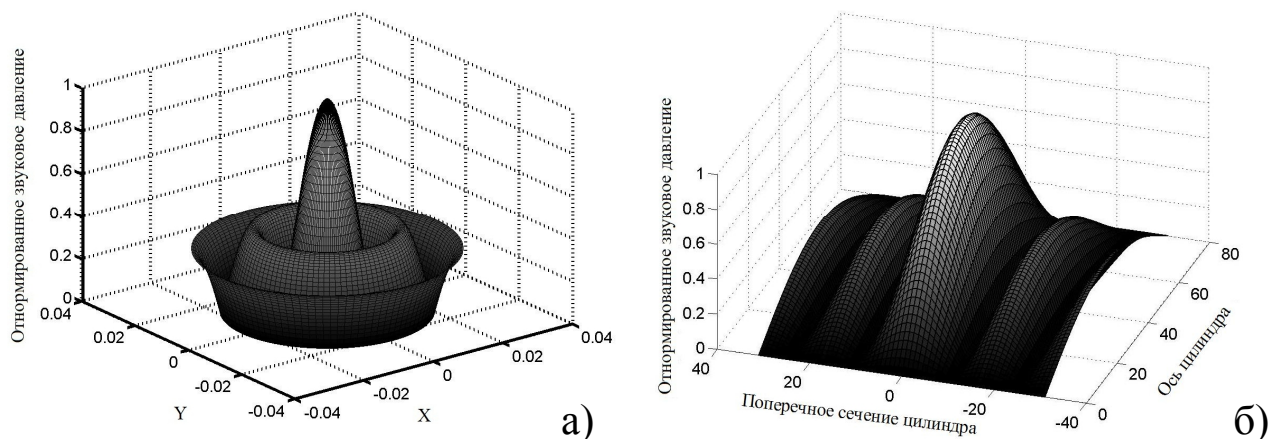


Рисунок 4 - Конфигурация поля моды (3,1) в проточной камере с цилиндрическим вибратором а) – в плоскости перпендикулярной оси камеры, б) в плоскости параллельной оси камеры

Экспериментальная часть. С целью проверки полученных расчетных данных, было проведено снятие конфигурации кавитационной области методом эрозионных тестов. При этом тестовые образцы фольги размещались параллельно образующей оси цилиндра (рис.6).

Сравнивая экспериментальные данные (рис.7) и расчетные, полученные методом секущих для моды (2,1) видим достаточно хорошее согласование полученных данных.

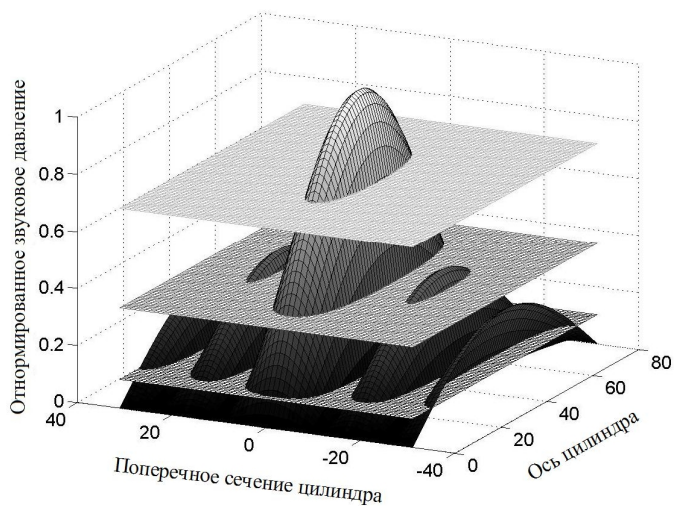


Рисунок 5 - Секущие для моды (3,1) имитирующие интенсивность кавитационных явлений

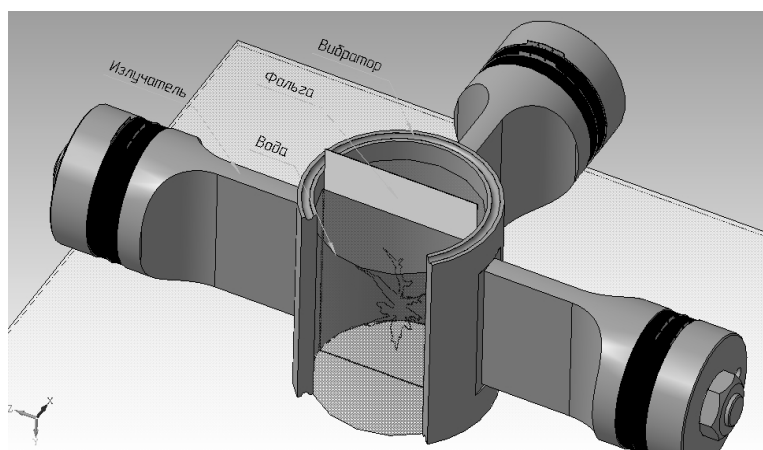


Рисунок 6 - Схема размещения контрольных образцов фольги в кавитационной камере

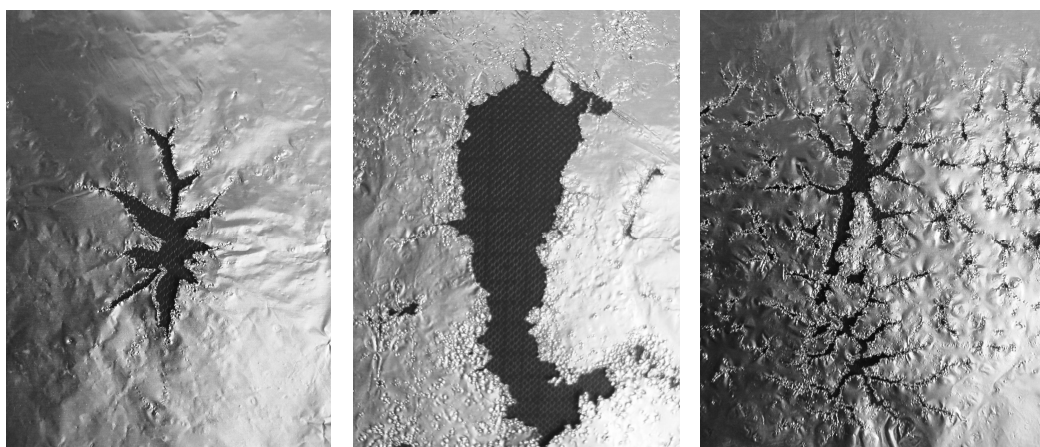


Рисунок 7 - Экспериментальные данные снятия конфигурации кавитационной области методом эрозионных тестов при различных уровнях звукового давления

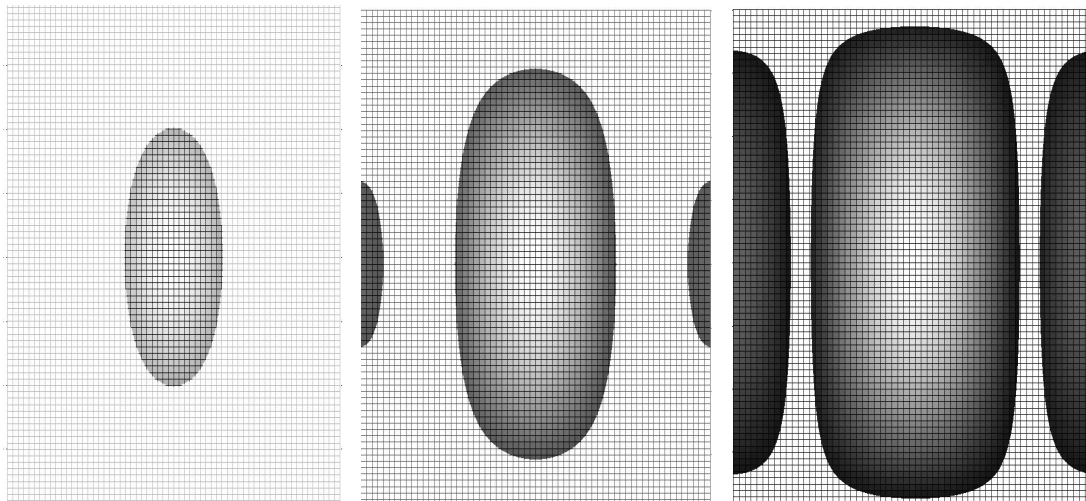


Рисунок 8 - Расчетные данные конфигурации кавитационной области методом секущих при различных уровнях звукового давления

Выводы и направления дальнейших исследований.

Представленная математическая модель позволяет оценить расположение и интенсивность кавитационных зон в объеме цилиндрической кавитационной кавмеры, совершающей радиальные резонансные колебания. Экспериментальными исследованиями подтверждена адекватность результатов аналитического исследования. Подтвержден эффект концентрирования ультразвуковой энергии вдоль оси в цилиндрическом вибраторе при совершении радиальных колебаний, возбужденных ультразвуковыми резонансными приводами, которые имеют ножевидную форму трансформатора колебательной скорости и установлены на наружной образующей поверхности вибратора. Подтверждена возможность достижения в области продольной оси исследуемого цилиндрического кавитатора интенсивности ультразвука порядка 50...60 Вт/см². Дальнейшее повышение интенсивности звука связано с непропорциональным ростом потерь в связи с образованием на внутренней поверхности вибратора двухфазной кавитационной прослойки. В данном случае целесообразным будет применение модуляции возбуждающего сигнала.

Список литературы

1. Эльпинер И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие / И.Е. Эльпинер. - М. : Физматиз, 1963. – 430 с.
2. Луговской А.Ф. Оценка методов обеззараживания воды / А. Ф. Луговской, А. В. Мовчанюк, И. А. Гришко // Вест. Нац. техн. ун-та Украины. Серия «Машиностроение». – 2008. - № 52. – С.103-111.
3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / глав. ред. И. П. Голямина. - М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

4. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев. - К. : ВПЦ «Київ. ун-т», 2007. - 244 с.
5. Падалка Е.С. Ультразвук в нефтяной промышленности / Е.С. Падалка. – К.: Гос. изд. техн. лит. 1962. - 67с.
6. Луговской А.Ф. Проблемы создания технологического оборудования для ультразвукового кавитационного обеззараживания воды / И. А. Гришко // – Промислова гідравліка і пневматика. – 2009. - № 4 (26). - С.3-6.
7. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики / Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1970. -710 с.
8. Смирнов В.И. Курс высшей математики. - М.: Наука, 1974. - Т. 2. – 655 с.

А.В. Мовчанюк, О.Ф. Луговський, І.А. Гришко. Виникнення кавітації в технологічному об'ємі ультразвукового трубчатого кавітатора з радіальною формою коливань. Розглянуті особливості збудження ультразвукової кавітації в циліндричному технологічному об'ємі, який утворено трубчатим вібратором що здійснює радіальні коливання. Представлені результати аналітичного та експериментального досліджень інтенсивності кавітації та особливостей її розповсюдження в трубчатому вібраторі, що збуджується чотирма ультразвуковими п'єзоелектричними приводами на зовнішній твірній поверхні. Дослідження кавітації проводилися із застосуванням алюмінієвої фольги.
математична модель, ультразвукова кавітація, кільцевий вібратор, радіальна мода коливань, кавітаційна область, ультразвукова ерозія

A.Movchanyuk, A.Lugovskuy, I.Gryshko. Origin of Cavitation in Ultrasonic Technological Volume of Tubular Cavitator with Radial Vibration Mode. The features of excitation of ultrasonic cavitation in a cylindrical technological volume formed by tubular vibrator that performs radial oscillations were examined. The results of analytical and experimental researches into cavitation intensity and the peculiarities of its distribution in the tubular transducer excited by four ultrasonic piezoelectric actuators on the outer forming surface are represented. Cavitation was studied using aluminium foil.
mathematical model, ultrasonic cavitation, ring oscillator, radial mode of vibration, cavitation region, ultrasonic erosion

Стаття надійшла до редколегії 25.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. каф. ЕМС ДонНТУ А.П.Кононенко

© Мовчанюк А.В., Луговской А.Ф., Гришко И.А., 2010