

УДК 66.084.8

Мовчанюк А.В., к.т.н., доц.

НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КАВИТАЦИОННЫХ КАМЕР С РАДИАЛЬНО-ИЗГИБНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ СТЕНОК

Movchanuk A.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([movchanuk@rtf.kpi.ua](mailto:movchanuk@rtf.kpi.ua))

### CALCULATION OF CYLINDER ULTRASONIC CAVITATION CELLS WITH RADIAL - BENDING FLUCTUATIONS OF THE WALLS

*В работе представлены методики расчета ультразвуковых кавитационных камер резонансного типа с радиально-изгибными колебаниями стенок. Путем анализа решений волнового уравнения в цилиндрических координатах показано, что минимальная интенсивность кавитации достигается на оси камеры. Показано, что количество узлов колебаний в жидкости зависят от выбранной моды работы стенок камеры и скорости звука в обрабатываемой жидкости. Показано, что существенное влияние на рабочую частоту камеры и распределение звукового давления во внутреннем объеме камеры оказывает толщина стенок камеры. Приведенные соотношения позволяют рассчитать геометрические размеры кавитационной камеры исходя из различных исходных данных.*

*Ключевые слова:* ультразвуковая кавитационная обработка; трубчатый кавитатор; ультразвуковая кавитации; ультразвуковое технологическое оборудование.

**Введение.** Ультразвуковые кавитационные технологии находят самое широкое применение в различных областях науки и техники [1-3]. При этом интенсивность технологического воздействия на жидкость во многом зависит от интенсивности ультразвуковых колебаний. Для увеличения интенсивности колебаний могут быть использованы фокусирующие системы. Фокусирующая система может быть конструктивно объединена с кавитационной камерой. В зависимости от конструкции, такие камеры могут вносить [4], либо не вносить [5, 6] дополнительное гидравлическое сопротивление.

К перспективным конструкциям, не вносящим дополнительного гидравлического сопротивления, следует отнести проточные цилиндрические кавитационные камеры. В работе [6] был рассмотрен режим работы и методика расчета [6] камер с радиальными колебаниями стенок. В таких камерах наибольшая интенсивность кавитационных явлений достигается на оси камеры. Однако такая конструкция камеры не всегда является приемлемой. Например, при имеющемся диаметре трубопровода невозможно добиться работы кавитатора в ультразвуковой области частот. В таком случае возможен переход на радиально-изгибные моды колебаний стенок кавитатора. В работе [1] была рассмотрена подобная конструкция кавитатора. Он представляет собой отрезок трубы, на образующей поверхности которого расположены ультразвуковые резонансные приводы. Автор успешно решил задачу анализа – по известным размерам трубы можно найти рабочую частоту кавитатора. В практической деятельности часто необходимо решать задачу синтеза – по заданной рабочей частоте необходимо найти рациональные размеры кавитатора. При этом кавитатор удобно разбить на одинаковые секции малой длины. Это позволяет выбирать необходимое количество секций исходя из времени обработки технологической жидкости.

Вопросы проектирования таких кавитаторов и особенности их работы недостаточно освещены в литературе.

**Целью** статьи является создание методики расчета резонансных ультразвуковых кавитационных камер при радиально-изгибных колебаниях стенок камеры.

**Исследование.** Цилиндрическая проточная кавитационная камера представляет собой отрезок трубы или кольцо радиуса  $a_{cp}$ , длиной  $l_k$  и толщиной стенки  $h_k$ . Кавитатор изготавливается из кавитационно стойкого материала со скоростью звука  $c_k$ . Как видим, проточный кавитатор с радиально-изгибными колебаниями стенок конструктивно совпадает с кавитатором с радиальными колебаниями стенок. По аналогии, рассматривать задачу о распространении акустических колебаний в технологической жидкости, заполняющей внутренний объем камеры, рационально в цилиндрических координатах. Начало координат совмещено с дном камеры, а распространение акустических колебаний происходит вдоль оси  $z$  (рис.1).

Задачу о распределении звукового давления, а следовательно и кавитационной области, удобно решать для потенциала скорости  $\Phi(r, \varphi, z)$ , который прямо пропорционален звуковому давлению. Волновое уравнение для потенциала скорости в цилиндрических координатах имеет вид [7]:

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

При этом граничные условия на стенках кавитатора

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0. \quad (2)$$

Задачу о распределении потенциала скорости удобно искать методом Фурье. Пусть искомое распределение потенциала скорости представляет собой произведение функций, зависящих только от одной координаты и функции, зависящей от времени

$$\Phi(r, \varphi, z, t) = R(r) \cdot \Psi(\varphi) \cdot Z(z) \cdot T(t), \quad (3)$$

где  $R(r)$  - функция, зависящая только от  $r$ ,  $\Psi(\varphi)$  - функция, зависящая только от  $\varphi$ ,  $Z(z)$  - функция, зависящая только от  $z$ ,  $T(t)$  - функция зависящая только от  $t$ .

Подставив выражение (3) в (1) и сгруппировав члены, получим:

$$\left( \frac{1}{R} \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{1}{\Psi} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} \right) + \left( \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}. \quad (4)$$

Данное уравнение будет иметь решение, если каждое из слагаемых, стоящих в скобках, будет равно константе:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = -k^2, \quad (5)$$

$$\frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = -k_z^2, \quad (6)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{1}{\Psi} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} = -k_r^2. \quad (7)$$

Константу  $k$ , не зависимо от индекса, часто называют постоянной распространения. Подставив выражения (5)-(7) в (4), получим выражение, связывающее между собой постоянные распространения по различным координатам:

$$k_z^2 = k^2 - k_r^2. \quad (8)$$

Полученное выражение показывает, что постоянные распространения по различным координатам взаимосвязаны. Отметим, что в связи с тем, что постоянная распространения пропорциональна длине волны, можно сказать, что длина волны в цилиндрическом кавитаторе всегда меньше длины волны по сравнению с распространением звука в свободном пространстве.

Разобьём уравнение (7) на два слагаемых, стоящих в скобках

$$\left( \frac{r^2}{R} \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{r}{R} \frac{\partial R}{\partial r} - k_r^2 r^2 \right) + \left( \frac{1}{\Psi} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} \right) = 0.$$

По аналогии, приняв, что каждое слагаемое равно константе, получаем

$$\frac{1}{\Psi} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} = -m^2, \quad (9)$$

$$\frac{1}{R} \left( \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} \right) - k_r^2 - \frac{m^2}{r^2} = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) представляет собой уравнение Бесселя, решение которого имеет вид

$$R(r) = A \cdot J_m(k_r r) + A' \cdot N_m(k_r r),$$

где  $A, A'$  - константы,  $J_m$  - функция Бесселя порядка  $m$ ,  $N_m$  - функция Неймана порядка  $m$ .

Функцию Неймана из решения нужно исключить, так как при нулевом значении аргумента она стремится к  $-\infty$ , что противоречит физическому смыслу. Исходя из этого, решение уравнения (10) имеет вид

$$R(r) = A \cdot J_m(k_r r). \quad (11)$$

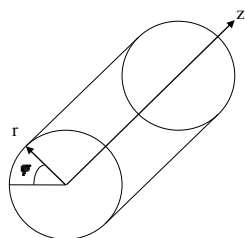


Рис. 1. Расчетная схема цилиндрической кавитационной камеры

Решением уравнения (9) является комбинация гармонических функций. В случае, если стенки кавитационной камеры совершают радиальные колебания, задача становится симметричной и не зависящей от  $\varphi$ . Исходя из этого, можно записать решение уравнения (9) в виде

$$\Psi(\varphi) = const \quad (12)$$

Решением уравнения (6) является комбинация экспоненциальных функций, каждая из которых соответствует прямой и отраженной волне:

$$Z(z) = Be^{jk_z z} + Ce^{-jk_z z}, \quad (13)$$

где  $B, C$  - постоянные интегрирования.

Подставив (11), (12), (13) в (3) и опустив множитель, отвечающий за время, получаем

$$\Phi(r, \varphi, z) = A_m \cdot J_m(k_r r) \cdot \cos(m \cdot \varphi) \cdot (Be^{jk_z z} + Ce^{-jk_z z}).$$

Как видим основное отличие кавитатора с радиально-изгибными колебаниями стенок является наличие в решении функций Бесселя высоких порядков.

Соотношения между постоянными распространения будем искать из граничных условий. Если принять, что стенки кавитационной камеры являются абсолютно жесткими, то производная потенциала скорости на стенке кавитационной камеры радиуса  $a$  равна 0 исходя из (2):

$$\frac{\partial}{\partial r} J_m(k_r r) = 0, \quad \exists r = a. \quad (14)$$

Воспользовавшись соотношением:

$$\frac{\partial}{\partial r} J_m(k_r r) = \frac{1}{2} J_{m-1}(k_r r) - \frac{1}{2} J_{m+1}(k_r r). \quad (15)$$

Решение уравнения (14) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Нули производной функции Бесселя  $m$ -го порядка

Порядок функции, $m$	Номер решения, $i$				
	1	2	3	4	5
1	1,8412	5,3314	8,5363	11,7060	14,8636
2	3,0542	6,7061	9,9695	13,1704	16,3475
3	4,2012	8,0152	11,3459	14,5858	17,7887
4	5,3175	9,2824	12,6819	15,9641	19,1960
5	6,4156	10,5199	13,9872	17,3128	20,5755
6	7,5013	11,7349	15,2682	18,6374	21,9317
7	8,5778	12,9324	16,5293	19,9419	23,2681
8	9,6474	14,1155	17,774	21,229	24,5872

Кавитационная камера, совершающая радиально-изгибные колебания, может быть представлена в виде эквивалентного тонкого кольца. Частота изгибных колебаний тонкостенного кольца [8] определяется зависимостью

$$f = \frac{c_m \cdot h_k}{2\pi \cdot a_{cp}^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{12}} \cdot \sqrt{\frac{m^2 \cdot (1-m^2)^2}{1+m^2}}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (16)$$

В данном выражении  $m$  будет соответствовать половине количества узлов (пучностей) колебаний на поверхности цилиндрической кавитационной камеры и будет совпадать с  $m$  в выражении (11) (рис.2).

Расчеты, проведенные по (16), показывают, что конструктивно приемлемые размеры труб для изготовления кавитатора, могут быть получены только для  $m \geq 3$ .

Рассмотрим возможность совпадения частоты собственных колебаний стенок кавитационной камеры при радиально-изгибных колебаниях с частотой собственных колебаний жидкости в камере. Преобразуем (16) к виду

$$a_{cp} = \frac{c_m \cdot h_k}{c_{liquid} \cdot root_{m,i}} \cdot \sqrt{\frac{1}{12}} \cdot \sqrt{\frac{m^2 \cdot (1-m^2)^2}{1+m^2}}. \quad (17)$$

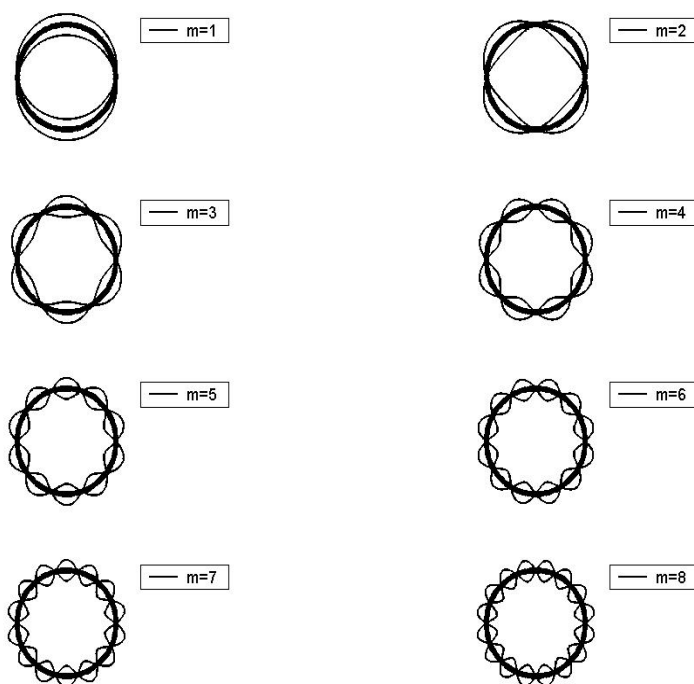


Рис. 2. Формы колебаний стенок кавитационной камеры при радиально-изгибных колебаниях для различных значений  $m$  (при  $m = 1$  кольцо движется как единое целое)

Отметим, что при получении выражения мы пренебрегли погрешностью, вносимой толщиной стенок кавитационной камеры. В общем случае  $a_{cp}$  для кавитационной камеры и для жидкости отличаются на половину толщины стенки камеры  $h_k$ .

Как видим, частоты могут совпасть только при определенном среднем радиусе кавитационной камеры, определенной толщине стенок и определенных параметрах жидкости, заполняющей камеру. Поделив (16) на (17), получаем

$$f = \frac{c_{liquid} \cdot root_{m,i}}{2 \cdot \pi \cdot a_{cp}}$$

Анализ полученного выражения для воды показывает (табл. 2), что совпадение частот возможно для первого корня для всех значений  $m$  и первого и второго корня при  $m = 7$ ,  $m = 8$ . Диапазон рабочих частот будет лежать выше 30 кГц. Следует отметить, что совпадение частот будет наблюдаться для больших значений толщины стенок кавитатора. Полученное выражение с учетом позволяет рассчитать необходимую толщину стенок кавитатора

$$h_k = \frac{(c_{liquid})^2 \cdot (root_{m,i})^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot c_m \cdot \sqrt{\frac{1}{12}} \cdot \sqrt{\frac{m^2 \cdot (1-m^2)^2}{1+m^2}}}$$

Таблица 2

Порядок функции, $m$	Пределы изменения среднего диаметра трубы в мм	
	Номер решения, $i$	
	1	2
3	40...55	
4	52...75	
5	62...90	
6	72...110	
7	81...130	124...130
8	92...145	135...145

Рассмотрим распределение потенциала скорости при радиально-изгибных колебаниях стенок в трубчатом кавитаторе. Согласно (3), (16) и табл.2:

$$\Phi(r, \varphi) = A_m \cdot J_m \left( \frac{root_{m,i}}{a_{cp}} \cdot r \right) \cdot \cos(m \cdot \varphi).$$

Анализ полученного выражения (рис.3) показал, что в центре кавитатора всегда будет узел (минимум) потенциала скорости, а следовательно, минимум звукового давления и минимальная интенсивность кавитационных явлений. При этом  $m$  будет соответствовать половине количества узлов (пучностей) потенциала скорости на поверхности цилиндрической кавитационной камеры, а  $i$  количеству пучностей в осевом направлении.

Произведение  $2 \cdot m \cdot i$  будет соответствовать количеству пучностей потенциала скорости (звукового давления) в поперечном сечении кавитатора. При этом плотность ультразвуковой энергии будет оставаться неизменной. Следовательно, чем больше произведение  $2 \cdot m \cdot i$ , тем более равномерную обработку жидкости можно осуществлять в проектируемом кавитаторе.

В случае не совпадения собственных частот колебаний в жидкости и стенках кавитатора, формой кавитационной области можно управлять заданием соответствующих граничных условий для жидкости вдоль оси кавитатора.

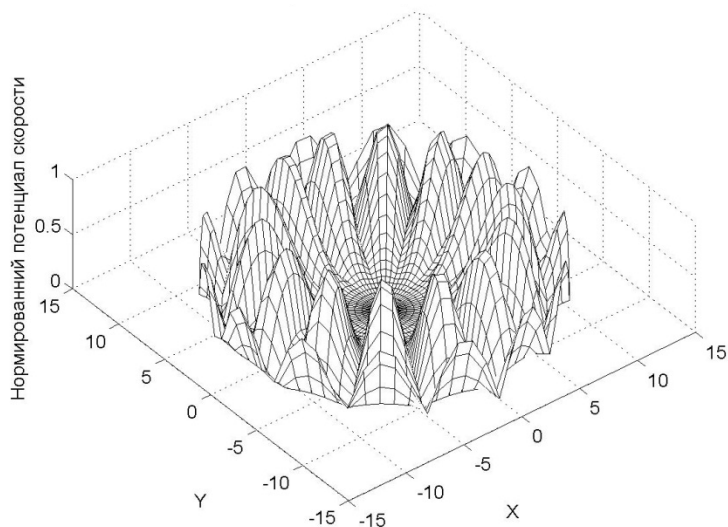


Рис. 3. Распределение потенциала скорости в поперечном сечении кавитационной камеры для  $m = 7$ ,  $i = 2$

Проектирование кавитатора с радиально-изгибными колебаниями стенок может вестись из следующих начальных предпосылок: известен средний диаметр стенок кавитатора, продиктованный требованиями технологического процесса - необходимо найти рабочую частоту и толщину стенок кавитатора (методика 1); известна рабочая частота кавитатора - необходимо рассчитать средний диаметр и толщину стенок кавитатора (методика 2).

Порядок расчета кавитатора не включает в себя расчет минимальной толщины стенок кавитатора, который необходимо производить исходя из требований прочности.

#### Методика 1.

##### Исходные данные для расчета.

$2 \cdot a_{cp}$  - средний диаметр стенок кавитатора;

$c_m$  - скорость звука в материале стенок кавитатора;

$c_{liquid}$  - скорость звука в обрабатываемой жидкости.

##### Порядок расчета.

- Исходя из совпадения частот собственных, рассчитываем возможную толщину стенки кавитатора

$$h_{k,m,i} = \frac{a_{cp} \cdot c_{liquid} \cdot root_{m,i}}{c_m \cdot \sqrt{12} \cdot \sqrt{\frac{m^2 \cdot (1-m^2)^2}{1+m^2}}}, \quad m = 1, 2 \dots 8, i = 0, 1 \dots 5$$

Значение  $root_{m,i}$  выбираем из таблицы.

- Рассчитываем рабочую частоту кавитатора

$$f_{m,i} = \frac{c_m \cdot h_{k,m,i}}{2\pi \cdot a_{cp}^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{12}} \cdot \sqrt{\frac{m^2 \cdot (1-m^2)^2}{1+m^2}}.$$

3. Проверяем выполнение условия

$$22000 \leq f_{m,i} \leq 66000.$$

Если условие не выполняется для любых целых значений  $m$ ,  $i$ , проводим расчет без соблюдения условия совпадения собственных частот.

4. Выбираем наименьшее значение  $f_{m,i}$  и соответствующее ему значение  $h_{k,m,i}$ .

5. Рассчитываем частоты радиальных резонансов кавитатора

$$f_n = \frac{c_m}{2\pi \cdot a_{cp}} \sqrt{1+n^2}.$$

Если  $f_{m,i}$  и  $f_n$  отличаются меньше, чем на 10% корректируем значение  $h_{k,m,i}$ .

6. Выбираем высоту кавитатора  $l_k$  из условия

$$l_k \leq \frac{c_m}{2 \cdot f_{m,i}}.$$

### Результат расчета.

Рабочая частота кавитатора  $f_{m,i}$ , толщина стенки кавитационной камеры  $h_{k,m,i}$ , высота кавитационной камеры  $l_k$ .

### Методика 2.

#### Исходные данные для расчета.

$f$  - рабочая частота кавитатора;

$c_m$  - скорость звука в материале стенок кавитатора;

$c_{liquid}$  - скорость звука в обрабатываемой жидкости.

#### Порядок расчета.

1. Исходя из совпадения частот собственных, рассчитываем возможную толщину стенки кавитатора

$$h_{k,m,i} = \frac{(c_{liquid})^2 \cdot (root_{m,i})^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot c_m \cdot \sqrt{\frac{1}{12}} \cdot \sqrt{\frac{m^2 \cdot (1-m^2)^2}{1+m^2}}}.$$

Значение  $root_{m,i}$  выбираем из таблицы.

2. Выбираем конструктивно целесообразное значение  $h_{k,m,i}$ . В случае конструктивно нецелесообразных значений  $h_{k,m,i}$  проводим расчет исходя из отсутствия совпадения собственных частот.

3. Рассчитываем частоты радиальных резонансов кавитатора

$$f_n = \frac{c_m}{2\pi \cdot a_{cp}} \sqrt{1+n^2}.$$

Если  $f$  и  $f_n$  отличаются меньше, чем на 10% корректируем значение  $h_{k,m,i}$ .

4. Выбираем высоту кавитатора  $l_k$  из условия

$$l_k \leq \frac{c_m}{2 \cdot f_{m,i}}.$$

### Результат расчета.

Толщина стенки кавитационной камеры  $h_{k,m,i}$ , высота кавитационной камеры  $l_k$ .

**Выводы.** Предложенная методика расчета позволяет проектировать ультразвуковые резонансные кавитационные камеры резонансного типа с радиально-изгибными колебаниями стенок. Проектирование может проводиться исходя из заданного диаметра кавитатора либо рабочей частоты кавитатора. При этом на оси кавитатора практически будут отсутствовать кавитационные явления. При высоких модах колебаний обработка жидкости будет осуществляться более равномерно. По результатам расчета можно сформулировать требования к ультразвуковым приводам, установленным на образующей поверхности кавитатора.

**Анотація.** Розроблено методику розрахунку ультразвукових кавітаційних камер резонансного типу з радіально - згинними коливаннями стінок камери. Шляхом аналізу розв'язків хвильового рівняння в циліндричних координатах показано, що мінімальна інтенсивність кавітації буде спостерігатись на осі камери. Показано, що кількість вузлів коливань у рідині залежить від моди коливань стінок камери та швидкості звуку в рідині. Показано, що значний вплив на робочу частоту камери і розподіл звукового тиску у внутрішньому об'ємі камери має товщина стінок камери. Отримані співвідношення дозволяють розрахувати геометричні розміри камери при різних вихідних даних.

**Ключові слова:** ультразвукова кавітаційна обробка; трубчастий кавітатор; ультразвукова кавітація; ультразвукове технологічне обладнання.

**Abstract. Purpose.** Developing the method for calculating the ultrasonic resonant cavitation cells with radial-bending fluctuations of the cell walls is presented.

**Design/methodology/approach.** The solution of the wave equation for the fluid that fills the inner volume of the cavitation chamber is analyzed. It is found that the minimum value of sound pressure is on the cavitator axis. It is shown that the number of fluctuations nodes in a liquid depends on the modes of the cell walls and the speed of sound in the liquid.

**Findings.** It is shown that the wall thickness of the cell has significant impact on the operating frequency and sound pressure distribution in the internal volume of the cell. The operating frequency can be chosen for any diameter of the pipe with condition this frequency is ultrasonic.

**Originality/value.** The obtained values allow to calculate the geometric dimensions of the cell at different output data.

**Keywords:** ultrasonic cavitation treatment; tubular cavitator; ultrasonic cavitation; ultrasonic processing equipment.

#### Библиографический список использованной литературы

1. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. – 244 с.
2. Эльпинер И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие / И.Е. Эльпинер. – М.: Физматиз, 1963. – 430 с.
3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
4. Мовчанюк А.В. Методика расчета конических ультразвуковых кавитационных камер / А.В. Мовчанюк // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – Київ, 2015. – Вип. 72. – С. 104 – 108.
5. Мовчанюк А.В. Методика расчета цилиндрических ультразвуковых кавитационных камер, возбуждаемых на основной моде радиальных колебаний / А.В. Мовчанюк // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – Київ, 2015. – Вип. 74. – С. 133 – 139.
6. Луговской, А. Ф. Исследование работы ультразвукового трубчатого кавитатора в режиме радиальных колебаний / А. Ф. Луговской, И. А. Гришко, А. В. Мовчанюк // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць. – 2010. – № 59. – С. 285–287.
7. Лепендин Л. Ф. Акустика: Учеб. Пособие для вузов / Л. Ф. Лепендин. – Москва: Высш. Школа, 1978. – 448 с.
8. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / Пер. с. англ. Л.Г. Корнейчука; Под. ред. Э.И. Григолока / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уйвер. – Москва: Машиностроение, 1985. – 472 с.

#### References

1. Luhovskoi A.F. Ultrazvukovaia kavytatsiya v sovremennykh tekhnolohiyakh. A.F. Luhovskoi, N.V. Chukhraev. Kyiv: Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr «Kyivskiy universytet», 2007. 244 pp.
2. Elpyner Y.E. Ultrazvuk. Fyzyko-khymicheskoe y byolohycheskoe deistviye. Y.E. Elpyner. Moscow: Fyzmatyz, 1963. 430 p.
3. Goljamina I.P., Ul'trazvuk. Malen'kaja jenciklopedija (Ultrasound. Small encyclopedia) Moscow, Sovetskaja jenciklopedija, 400 p.
4. Movchaniuk A.V. Metodyka rascheta konycheskykh ultrazvukovykh kavytatsyonnykh kmer. A.V. Movchaniuk. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Serija mashynobuduvannia. Kyiv, 2015. Vyp. 72. pp. 104 – 108.
5. Movchanjuk A.V. Metodika rascheta cilindricheskikh ul'trazvukovykh kavitacionnykh kamer, vzbuzhdaemyh na osnovnoj mode radial'nyh kolebanij. Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu Ukraini «Kiyvskij politekhnichnij instytut». Serija mashinobuduvannja. Kiyv, 2015. Vip. 74. P. 133 – 139.
6. Lugovskiy A.F., Movchanjuk A.V., Grishko I.A., Issledovanie raboty ul'trazvukovogo trubchatogo kavitatora v rezhimeradial'nyh kolebanij (The study of the ultrasonic tubular cavitator mode of radial oscillations) Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 2010. no 59. pp. 285 – 287.
7. Lependyn L. F. Akustyka: Ucheb. Posobyie dlia vtuzov. L. F. Lependyn. Moscow: Vissh. Shkola, 1978. 448p.
8. Tymoshenko S. P. Kolebaniya v ynzhenernom dele. Per. s. anh. L.H. Korneichuka; Pod. red. Э.И. Hryholiuka. S. P. Tymoshenko, D. Kh. Yanh, U. Uyver. Moscow: Mashynostroenye, 1985. 472p.

Подана до редакції 03.11.2015