

УДК 621.647.23

Луговской А.Ф., д.т.н., проф., Мовчанюк А.В., к.т.н., доц., Зилинский А.И., Гришко И.А., к.т.н.
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ОДНОМЕРНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КАВИТАТОРОВ

Lugovskiy O., Movchanuk A., Zilinskyi A., Gryshko I.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute» (atoll-sonic@rambler.ru)

CALCULATION METHOD FOR RATIONAL SIZES OF ONE-DIMENSIONAL ULTRASONIC CAVITATOR

В работе предложена методика расчета основных акустических размеров ультразвукового кавитационного технологического оборудования для обработки в потоке жидкостей с помощью высокоинтенсивного ультразвука. Концентрация ультразвуковой энергии достигнута за счет применения ступенчатого трансформатора колебательного давления. Даны рекомендации по поводу возможностей дополнительного повышения эффективности кавитационной обработки. Обосновано создание сложной резонансной системы с учетом особенностей кавитационно обрабатываемой жидкости. Предложенная методика учитывает параметры жидкости, конструктивные особенности кавитационной камеры и примененные в колебательной системе конструктивные материалы.

Ключевые слова: ультразвуковая кавитационная обработка, ультразвуковые излучатели, трансформатор колебательного давления, ультразвуковая кавитация.

Эффективность технологических процессов, использующих явление ультразвуковой кавитации, зависит от интенсивности ультразвуковых колебаний, вводимых в жидкость. Поэтому инженерные решения в области создания кавитационного технологического оборудования направлены на поиск путей повышения интенсивности ультразвуковых колебаний в жидкости [1-3]. Перспективным является применение ультразвуковых резонансных трансформаторов колебательного давления, в которых с высоким КПД вводится в жидкость ультразвуковая волна малой интенсивности, а необходимый высокий уровень интенсивности колебаний достигается за счет изменения геометрической формы кавитационной камеры. Примером являются ступенчатые или конические трансформаторы колебательного давления [4,5].

Для достижения максимальной технологической эффективности сложных колебательных систем необходимо обеспечить равенство частот собственных колебаний ультразвукового привода-излучателя и жидкости в объеме кавитационной камеры. Поэтому расчет ультразвукового технологического оборудования необходимо начинать с расчета частоты собственных колебаний жидкости в кавитационной камере.

Поведение жидкости в кавитационной камере описывается волновым уравнением. В зависимости от количества координат в решении уравнения кавитационные камеры можно разделить на одномерные (решение зависит только от одной координаты) и многомерные (решение зависит от нескольких координат). Решение волнового уравнения позволяет найти распределение колебательной скорости и звукового давления во внутреннем объеме кавитационной камеры. Анализ решений позволяет выбрать наиболее рациональные рабочие частоты, при которых могут быть получены заданные значения колебательного давления. Наиболее перспективными для получения больших интенсивностей ультразвука являются одномерные кавитационные камеры, в которых фронт звуковой волны считается плоским и создается режим стоячих волн. При этом изменением геометрии можно добиться существенного увеличения звукового давления путем изменения площади поперечного сечения кавитационной камеры в направлении излучения.

Целью статьи является создание методики расчета ультразвуковых кавитаторов с одномерной кавитационной камерой, возбуждаемых ультразвуковым резонансным приводом-излучателем, обеспечивающих высокую эффективность кавитационной обработки жидких сред.

С целью повышения интенсивности ультразвуковых колебаний в жидкости создают кавитационные камеры специальной конфигурации, позволяющие сконцентрировать ультразвуковую энергию до требуемого технологическим процессом уровня. Примером такой кавитационной камеры является, упомянутый ранее, гидравлический трансформатор колебательного давления, представляющий собой в общем случае резонансную камеру с уменьшающейся вдоль оси камеры площадью.

Наиболее технологичным исполнением такого трансформатора является резонансная двухступенчатая цилиндрическая камера, длина которой кратна четному количеству четвертей длины стоячей волны в жидкости, заполняющей камеру, а длины ступеней большего и меньшего диаметров кратны нечетному количеству

четвертей длины стоячей волны в жидкости (рис.1). При этом внутренний диаметр большей ступени камеры должен быть существенно меньше половины длины волны в жидкости. При этом вдоль кавитационной камеры установится плоская ультразвуковая волна, что позволит максимально эффективно использовать при обработке жидкости энергию ультразвуковой волны.

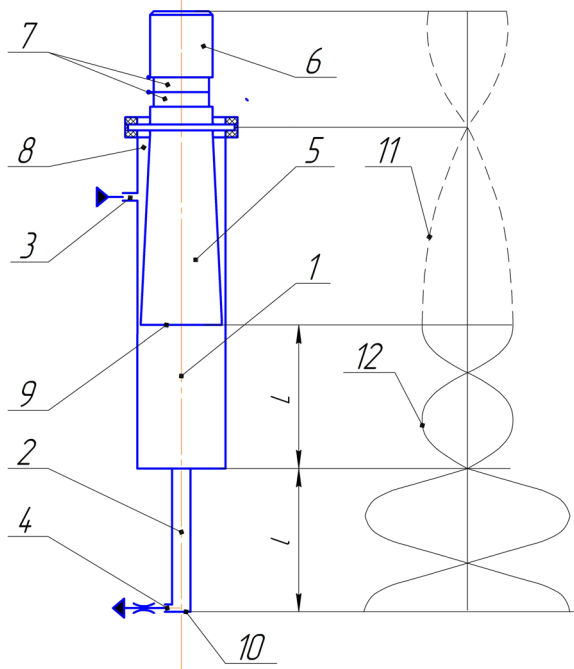


Рис.1. Расчетная схема ступенчатого гидравлического трансформатора колебательного давления

(1 - ступень большого диаметра трансформатора; 2 - ступень малого диаметра трансформатора; 3 - входной патрубок; 4 - выходной патрубок; 5 - излучающая накладка пьезоэлектрического преобразователя; 6 - демпфирующая накладка; 7 - пьезокерамические элементы; 8 - воздушная камера; 9 - излучающая поверхность; 10 - отражающая поверхность; 11 - волна деформации в пьезоэлектрическом преобразователе; 12 - волна давления в жидкости)

На расчетной схеме рис.1 представлен случай построения ступенчатого гидравлического трансформатора колебательного давления с использованием полуволнового ультразвукового пьезоэлектрического излучателя, состоящего из последовательно составленных и армированных излучающей накладкой 5, пьезокерамических элементов 7 и демпфирующей накладкой 6. Диаметр излучающей поверхности 9 и диаметр большей ступени трансформатора выбраны существенно меньше половины длины волны. Этим обеспечен поршневой характер колебаний поверхности излучателя и плоская акустическая волна во внутреннем объеме кавитационной камеры. Ультразвуковой излучатель закреплен в узловой точке волны деформации 11, устанавливающейся по его длине. Благодаря герметичности крепления ультразвукового излучателя в корпусе трансформатора давления организована замкнутая воздушная полость 8, которая не позволяет обрабатываемой жидкости смачивать узловую зону излучателя и снижать эффективность ввода ультразвуковой энергии в жидкость через излучающую поверхность.

Распространение упругих колебаний в жидкости в докавитационном режиме можно описать волновым уравнением для потенциала скорости [6,7]:

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = f(x, y, z, t), \quad (1)$$

где Φ - потенциал скорости; $f(x, y, z, t)$ - функция, определяемая граничными условиями.

Поскольку в данном случае ультразвуковые волны излучаются в цилиндрическую камеру ограниченного объема, в которой конструктивно обеспечено существование только плоской волны и целью является получение стоячих волн по длине камеры, то волновое уравнение (1) для собственных колебаний жидкости в такой камере можно упростить и записать в виде

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + k^2 \Phi = 0, \quad (2)$$

где $k = \frac{2\pi f}{c_{ж}} = \frac{\omega}{c_{ж}}$ - волновое число; $c_{ж}$ - скорость звука в жидкости; f - частота колебаний.

Представляя общее решение уравнения (2) в виде $\Phi = A \cos\left(\frac{\omega}{c_{ж}} x + \beta\right)$, получим:

$$\Phi = A \cos(\omega t + \alpha) \cos\left(\frac{\omega}{c_{ж}} x + \beta\right).$$

Обращая в нуль значения α и β , путем выбора начала координат и начала отсчета, получим:

$$\Phi = A \cos \omega t \cos \frac{\omega}{c_{жс}} x.$$

Тогда для скорости и звукового давления в стоячей волне можно соответственно записать:

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = A \frac{\omega}{c_{жс}} \cos \omega t \cdot \sin \frac{\omega}{c_{жс}} x;$$

$$p_{зв} = -\rho_{жс} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho_{жс} \cdot \sin \omega t \cos \frac{\omega}{c_{жс}} x,$$
(3)

где $\rho_{жс}$ - плотность жидкости.

На отражающей торцевой поверхности 10 камеры (рис.1) справедливо условие

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \text{ при } x = L + l.$$

Исходя из полученного выражения (3) для скорости в рассматриваемой стоячей волне нулевые значения, т.е. узловые точки, отстоят друг от друга на расстояние

$$\frac{c_{жс}}{2f} \cdot n = \frac{\lambda_{жс}}{2} \cdot n, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где $\lambda_{жс}$ - длина стоячей волны, а четверть длины стоячей волны, соответственно, будет составлять

$$\frac{\lambda_{жс}}{4} = \frac{c_{жс}}{4 \cdot f}.$$

Тогда, для варианта, представленного на расчетной схеме (рис.1), можно записать:

$$f = \frac{c_{жс}}{2(L+l)} \cdot n \text{ или } L+l = \frac{\lambda_{жс}}{2} \cdot n, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$
(4)

Подбором продольных размеров ступеней кавитационной камеры можно обеспечить желаемую частоту собственных колебаний жидкости.

Вынужденные колебания, вводимые в жидкость пьезоэлектрическим приводом-излучателем, для получения резонансного эффекта должны соответствовать значению собственной частоты колебаний жидкости в объеме камеры, полученному по выражению (4). Поэтому ультразвуковой привод-излучатель кавитатора необходимо рассчитывать, исходя из условия

$$f_{рез.изл.} = f,$$

где $f_{рез.изл.}$ - резонансная частота ультразвукового привода-излучателя.

Расчет акустических размеров ультразвукового привода-излучателя удобно выполнить, воспользовавшись работой [1].

Уравнение продольных колебаний составного пьезоэлектрического излучателя в общем виде можно записать как

$$S \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial U}{\partial x} \right),$$
(5)

где U - продольное перемещение; c - скорость звука в составных элементах привода-излучателя; S - площадь поперечного сечения.

Для излучателя, совершающего гармонические колебания и имеющего некоторую собственную частоту, решение уравнения (5) может быть получено в виде

$$U(x, t) = U(x) (P \sin \omega t + Q \cos \omega t).$$

Для расчетной схемы привода-излучателя, представленной на рис.2, в случае гармонических колебаний решения общего уравнения (5) продольных колебаний могут быть записаны как

$$U_1(x, t) = \left(B \cos \frac{\omega}{c_1} x + C \sin \frac{\omega}{c_1} x \right) \sin(\omega t + \phi);$$
(6)

$$U_2(x, t) = \left(D \cos \frac{\omega}{c_2} x + Q \sin \frac{\omega}{c_2} x \right) \sin(\omega t + \phi);$$
(7)

$$U_3(x, t) = \left(G \cos \frac{\omega}{c_3} x + H \sin \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \phi),$$
(8)

где $\omega = 2\pi f_{рез.изл.}$ - круговая частота привода-излучателя; c_1, c_2, c_3 - скорости звука, соответственно, в демпфирующей накладке, пьезокерамике и излучающей накладке.

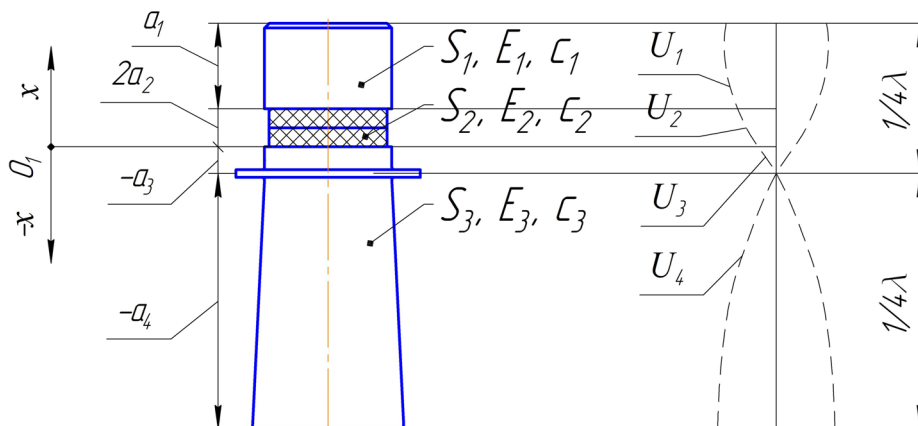


Рис. 2. Расчетная схема полуволнового составного пьезоэлектрического излучателя

Граничные условия для колебательной системы в соответствии с расчетной схемой (рис.2) представим в виде

$$U_3 = 0 \quad \text{при } x = -a_3; \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= U_3 \\ E_2 S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} &= E_3 S_1 \frac{\partial U_3}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{при } x = 0; \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= U_1 \\ E_2 S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} &= E_1 S_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{при } x = 2a_2; \quad (11)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = a_1 + 2a_2, \quad (12)$$

где E_1, E_2, E_3 - модуль упругости на растяжение материала, соответственно, демпфирующей накладки, пьезокерамики и излучающей накладки; S_1, S_2, S_3 - площади поперечного сечения, соответственно, демпфирующей накладки, пьезокерамики и излучающей накладки.

Учет условия (9) позволяет из уравнения (8) получить

$$G \cos \frac{\omega}{c_3} a_3 = H \sin \frac{\omega}{c_3} a_1 \quad \text{или} \quad G = H \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3. \quad (13)$$

При этом уравнение (8) примет вид

$$U_3(x, t) = H \left(\sin \frac{\omega}{c_3} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 \cos \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \phi). \quad (14)$$

Первая половина граничного условия (10) позволяет из уравнений (7) и (14) получить

$$D = H \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3. \quad (15)$$

Вторая половина условия (10) после дифференцирования уравнений (7) и (14) позволяет записать

$$E_2 S_2 \frac{Q}{c_2} = E_3 S_1 \frac{H}{c_3} \quad \text{или} \quad \frac{Q}{H} = \frac{E_3 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_3}. \quad (16)$$

Тогда, общее решение (15) и (16) позволяет получить

$$\frac{Q}{D} = \frac{E_3 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3}. \quad (17)$$

Граничное условие (12) приводит уравнение (6) к равенству

$$C = B \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2). \quad (18)$$

Учитывая (18), уравнение (6) перепишем в виде

$$U_1(x, t) = B \left[\cos \frac{\omega}{c_1} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} x \right] \sin(\omega t + \phi). \quad (19)$$

Учет первой половины условия (11) приводит уравнения (7) и (19) к виду

$$D \left(\cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \frac{D}{C} \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) = B \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]. \quad (20)$$

Вторая половина граничного условия (11) позволяет после дифференцирования записать равенство

$$\begin{aligned} D \left(\frac{D}{C} \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) = \\ = B \frac{E_1 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_1} \left[\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

Разделив равенства (20) и (21) и учитывая соотношение (17), после преобразований окончательно получим

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 S_1 c_2 \left(Z \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)}{E_2 S_2 c_3 \left(Z \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)}, \quad (22)$$

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

Выражение (22) позволяет, задавшись желаемой толщиной, площадью и материалом демпфирующей накладки, выбрав тип и размеры пьезоэлектрической керамики, определить линейный размер a_3 до узловой точки крепления привода-излучателя.

Продольный размер a_4 привода-излучателя, соответствующий при выбранной полуволновой акустической схеме (рис.2) четверти стоячей волны, для случая малой конусности излучающей накладки может быть определен из зависимости

$$a_4 = \frac{c_3}{4f_{\text{рез.изл.}}}.$$

Дополнительное повышение интенсивности кавитации может быть достигнуто путем повышения статического давления в обрабатываемой жидкости, что обеспечивается установкой дросселя на выходном патрубке 4 (рис.1).

Степень развития кавитации характеризуется числом кавитации, которое определяется выражением [8]

$$\chi = \frac{p_{\text{ст}} - p_{\text{н.л.}}}{p_{\text{зв}}},$$

где $p_{\text{ст}}$ - статическое давление; $p_{\text{н.л.}}$ - давление насыщенного пара.

При этом амплитуда звукового давления определяется известной зависимостью

$$p_{\text{зв}} = 2\pi f_{\text{рез.изл.}} \rho c_{\text{ж}} e,$$

где e - амплитуда колебаний излучающей поверхности.

Оптимальным является соотношение [9] $\frac{p_{\text{ст}}}{p_{\text{зв}}} = 0,4$.

Предложенная методика расчета позволяет определить основные акустические размеры ультразвукового кавитационного технологического оборудования, позволяющего обработать жидкость в потоке высокоинтенсивным ультразвуком. Высокая интенсивность ультразвука обеспечена применением трансформатора колебательного давления. Методика учитывает свойства обрабатываемой жидкости, конструктивные особенности кавитационной камеры, использованные материалы и выбранный для привода-излучателя тип пьезокерамики.

Анотація. В роботі запропонована методика розрахунку основних акустичних розмірів ультразвукового кавітаційного технологічного обладнання для обробки в потоці рідин за допомогою високоінтенсивного ультразвуку. Концентрація ультразвукової енергії досягнута за рахунок застосування ступінчастого трансформатора коливального тиску. Надані

рекомендації з приводу можливостей додаткового підвищення ефективності кавітаційної обробки. Обґрунтовано створення складної резонансної системи з врахуванням особливостей рідини, що кавітаційно обробляється. Запропонована методика враховує параметри рідини, конструктивні особливості кавітаційної камери та застосовані у коливальній системі конструктивні матеріали.

Ключові слова: ультразвукова кавітаційна обробка, ультразвукові випромінювачі, трансформатор коливального тиску, ультразвукова кавітація.

Abstract. The effectiveness of processes which using ultrasonic cavitation, depends on the intensity of the ultrasonic vibrations introduced to the liquid. The aim of the article is to provide a methods of calculation a ultrasonic cavitators with one-dimensional cavitation chamber excited by an ultrasonic resonator driven emitter, providing high efficiency cavitation processing of liquids.

In this work we propose a method of calculating the size of the main speakers of the ultrasonic cavitation process equipment for processing in the flow of liquids using high-intensity ultrasound. Concentration of ultrasonic energy is achieved by applying an oscillatory pressure step transformer.

In results we have recommendations about the possibilities further enhance the effectiveness of the cavitation treatment. Justified the creation of complex resonant system allowing for the treated fluid cavitation.

The proposed technique takes into account the fluid parameters, the design features of the cavitation chamber and applied in an oscillatory system structural materials.

Keywords: ultrasonic cavitation treatment, ultrasonic transducers, transformer oscillating pressure, ultrasonic cavitation.

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. Хмелев В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. – Бийск.: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та БТИ, 2007. – 400 с.
4. 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.
5. 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.
6. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика, Учеб. пособие.–2–е изд., перераб. и доп./ Г.М. Свердлин. – Л.: Судостроение, 1990. – 320 с.
7. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов – М.: Высшая школа, 1970. -710 с.
8. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
9. ООО «ТНЦ Техносоник» [сайт]. URL: <http://www.b6404.narod.ru> (дата обращения 23.07.2014).

References

1. Lugovskiy A.F., Chuhraev N.V., Ul'trazvukovaja kavitacija v sovremennyh tehnologijah (Ultrasonic cavitation in modern technologies) Kiev: Vidavnicno-poligraficnij centr «Kiivs'kij universitet», 2007. 244 p.
2. Jel'piner I.E., Ul'trazvuk. Fiziko-himicheskoe i biologicheskoe (Ultrasound. Physico-chemical and biological action) Moskov: Fizmatiz, 1963. 430 p.
3. Hmelev V.N., Leonov G.V., Barsukov R.V., Cyganok S.N., Shalunov A.V., Ul'trazvukovye mnogofunkcional'nye i specializirovannye apparaty dlja intensifikacii tehnologicheskijh processov v promyshlennosti, sel'skom i domashnem hozjajstve (Ultrasonic Multifunctional and specialized devices for intensification of technological processes in industry, agriculture and households) Bijsk.: Izd-vo Alt. gos. tehn. un-ta BTI, 2007,400 p.
4. Lugovskiy A.F., Grishko I.A., Problemy sozdanija tehnologicheskogo oborudovanija dlja ul'trazvukovogo kavitacionnogo obezzarazhivanija vody (The problem of creating technological equipment for ultrasonic cavitation water disinfection) Promislova gidravlika i pnevmatika. Vinnicja, 2009. no 4 (26). pp. 3 – 6.
5. Lugovskiy A.F., Movchanjuk A.V., Grishko I.A., Issledovanie raboty ul'trazvukovogo trubchatogo kavitatora v rezhime radial'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.
6. Sverdlin G.M., Prikladnaja gidroakustika, Ucheb. posobie. 2–e izd., pererab. i dop. (Applied Underwater Acoustics, Proc. posobie.-2nd ed., rev. and additional) Sankt-Peterburg, Sudostroenie, 1990, 320 p.
7. Koshljakov N.S., Gliner Je.B., Smirnov M.M., Uravnenija v chastnyh proizvodnyh matematicheskoj fiziki (Partial differential equations of mathematical physics) Moskow, Vysshaja shkola, 1970, 710 p.
8. Goljamin I.P., Ul'trazvuk. Malen'kaja jenciklopedija (Ultrasound. Small encyclopedia) Moskow, Sovetskaja jenciklopedija, 1979, 400 p.
9. ООО «TNC Tehnosonik» [site]. URL: <http://www.b6404.narod.ru> (at date 23.07.2014).

Подана до редакції 20.10.2014