

7. Sinnen, O., Sousa, L. A. (2005). Communication contention in task scheduling. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 16 (6), 503–515. doi: 10.1109/tpds.2005.64
8. Sinnen, O. (2005). Communication contention in task scheduling. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 16 (6), 503–515.
9. Gergel, V. P. (2010). Research of scheduling algorithms of parallel tasks for cluster computing systems using the simulator. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University N. I. Lobachevskogo*, 5 (1), 201–208.
10. Brucker, P. (2007). *Scheduling Algorithms*. Berlin. Springer, 371. doi: 10.1007/978-3-662-03088-2
11. Bender, M. A., Bunde, D. P., Demaine, E. D., Fetete, S. P., Leung, V. J., Meijer, H., Phillips, C. A. (2005). *Communication-Aware Processor Allocation for Supercomputers*. *Lecture Notes in Computer Science*, 3608, 169–181. doi: 10.1007/11534273\_16
12. Pinedo, M. L. (2009). *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. LLC: Springer Science. Business Media, 509. doi: 10.1007/978-1-4419-0910-7\_14
13. Petrov, D. (2010). Optimal algorithm of data migration in scalable cloud storages. *System management*, 30, 180–197.
14. Borodin, A., El-Yaniv, R. (1998). *Online computation and competitive analysis*. Cambridge University Press, New York, 53.
15. Aspnes, J. (1998). *Competitive analysis of distributed algorithms*. *Lecture Notes in Computer Science*, 118–146. doi: 10.1007/bfb0029567
16. OpenStack Open Source Cloud Computing Software. Available at: <http://www.openstack.org/>

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Литвинов В. В.  
Дата надходження рукопису 24.06.2015

Мацусва Карина Андріївна, аспірант, асистент, кафедра комп'ютеризованих систем управління, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058  
E-mail: karyna\_matsueva@bigmir.net

УДК 534.8; 534.321.9; 621.8.034  
DOI: 10.15587/2313-8416.2015.46987

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОМАСООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АППАРАТАХ ПОГРУЖНОГО ГОРЕНИЯ КОЛЕБАНИЯМИ КОНТАКТИРУЮЩИХ ФАЗ

© В. Е. Никольский

*Исследован вопрос создания колебаний в контактирующих фазах (газ – жидкость) как средства интенсификации теплообменных процессов при барботажном режиме в аппаратах погружного горения (АПГ). Определены кинематические и силовые характеристики в волновом поле. Предложено размещать резонирующие барботажные устройства в зоне выхода продуктов сгорания из АПГ и входа их в жидкость. Исследования на лабораторных и действующих технологических установках подтвердили перспективность выбранного направления*

**Ключевые слова:** аппарат погружного горения, теплообменные процессы, колебания, барботажный режим

*The problem of oscillation generation in contacted gas – liquid phases as the means of intensification of heat-mass exchange processes at bubbling of the gas – liquid system in the immersed burning apparatus (IBA) was studied. Kinematic and force characteristics in the wave field were determined. It was proposed to place the resonant bubbling devices in the outlet zone of burning products from IBA and at their entry to liquid. The experiments on laboratory-scale plants and technological plants show great potential of proposed apparatus*

**Keywords:** immersed burning apparatus, heat-mass exchange processes, oscillation, bubbling

### 1. Введение

В статье рассмотрен аспект вопроса создания колебаний в контактирующих фазах газ – жидкость как средства интенсификации теплообменных процессов при прямоточном барботажном режиме взаимодействия фаз в газо-жидкостной системе в аппаратах погружного горения.

Аналитически определены кинематические и силовые характеристики в волновом поле, порождаемым взаимодействием фаз.

### 2. Постановка проблемы

Скорость технологических процессов, в том числе реакционно-разделительных, протекающих в

диффузионной области, определяется интенсивностью переноса вещества и энергии. Одним из путей интенсификации этих процессов является турбулизация контактирующих фаз на поверхности их раздела. Известно, что в турбулентном потоке элементарные струи изменяют скорость и направление, в связи с чем в каждой точке объема происходит пульсация скорости. Наложение колебаний извне в некоторых областях частот, соответствующих собственной частоте колебаний элементов структуры, приводит к интенсификации процесса переноса. Однако, литературные данные по этому вопросу весьма противоречивы как в оценке причин этого эффекта, так и в части оценки результатов интенсификации.

При контактировании газа и жидкости в барботажном устройстве типа аппарата погружного горения (АПГ) возникают колебания контактирующих фаз газ – жидкость, частотные характеристики которых связаны непосредственно со скоростью движения газовой фазы, нестабильностью межфазной поверхности, волнообразованием на поверхности газожидкостного слоя, схлопыванием пузырьков при конденсации паров жидкой фазы, возникновением межфазной турбулентности и турбулентных пульсаций, порождаемых нестабильностью свободной поверхности и поверхности раздела фаз и т. д.

Энергия газовых струй в газожидкостном слое преобразуется в кинетическую энергию пульсаций и потенциальную энергию поверхностного натяжения, которые, в свою очередь, могут переходить друг в друга.

Амплитудно-частотные характеристики колебаний в газожидкостном слое определяются многими факторами: конструкцией распределителей газа, частотой отрыва пузырей и их размером, скоростью контактирующих фаз и их физико-химическими свойствами, давлением, температурой и др.

Таким образом, при контактировании газа и жидкости ввиду одновременного появления колебаний давления, вызванных различными причинами и имеющих различные амплитудно-частотные характеристики, образуется сложная колебательная система со многими степенями свободы. Элементы структуры газожидкостной системы можно представить как несвязанные между собой резонаторы с различными собственными частотами колебаний. Тогда основная задача интенсификации процессов в газожидкостных системах методом наложения внешних колебаний сводится к выбору спектра воздействия, согласованного с акустическими свойствами системы.

### 3. Литературный обзор

По спектральному воздействию различают узко- и широкополосное воздействие [1]. При узкополосном воздействии, налагаемые колебания характеризуются частотой, изменяющейся в узком диапазоне. Воздействие на систему будет эффективно лишь тогда, когда частота воздействия лежит в интервале полосы чувствительности. Максимальный эффект интенсивности реализуется при совпадении частот налагаемых и собственных колебаний элементов структуры слоя, когда наступает резонанс. Для газожидкостных систем с широким спектром собственных частот более эффективным окажется широкополосное воздействие близкого спектра или налагаемое извне узкополосное воздействие с частотой, близкой к собственной частоте колебаний преобладающих элементов системы [1].

В газожидкостных системах перенос вещества осуществляется при высоких значениях критерия Рейнольдса и преимущественно за счет крупномасштабных пульсаций, характеризующихся пульсационной скоростью  $U'$  и масштабом пульсаций  $L$ . Принимают [2], что коэффициент турбулентной диффузии  $D_{mp}$ , определяемый как объем одной из контактирующих фаз, переносимый за счет турбулентных пуль-

саций через единицу площади сечения потока на единицу длины, связан с параметрами турбулентных пульсаций следующим образом:

$$D_{mp} = e^2 dU/dl.$$

Известно, что локальные гидродинамические параметры газожидкостного слоя изменяются по его высоте случайным образом, причем средняя частота пульсаций газосодержания, скорости газовой фазы, статистического давления и т. п. лежит в пределах 1–15 с<sup>-1</sup>. В этой связи, одним из перспективных направлений интенсификации массообменных аппаратов является, как отмечено выше, генерирование в газожидкостном слое вынужденных колебаний с параметрами, близкими вышеуказанным.

Несмотря на то, что изучению вопроса о влиянии пульсаций контактирующих фаз на эффективность процессов теплообмена в газожидкостном слое посвящено значительное количество исследований, в настоящее время практически отсутствуют сведения о газожидкостных промышленных массообменных аппаратах или реакторах, где этот эффект был бы практически реализован. Затруднения в практической реализации результатов исследований, по-видимому, связаны, прежде всего, с тем, что в газожидкостных системах происходит быстрое затухание налагаемых колебаний уже на первой ступени контакта фаз.

Учитывая то, что в газожидкостных потоках гашение пульсаций происходит более интенсивно, чем в однофазных системах, вследствие трения потоков фаз, следует отметить неперспективность решения задач интенсификации путем создания пульсаций газовой фазы на входе в аппарат. Гораздо перспективней, как будет отмечено ниже, использовать для интенсификации частотно-модульные колебания, которые практически не гасятся в дисперсных системах. Создание пульсаций на каждой ступени контакта также нерационально, так как неизбежно приводит к значительному усложнению массообменного аппарата и увеличению энергетических затрат. С учетом этого, колебания извне целесообразно налагать не на весь слой (это малоэффективно и энергетически невыгодно), а локально в местах наибольшей эффективности контакта фаз – в момент входа газа в жидкость, а также в момент разрушения или образования газожидкостного слоя.

### 4. Аналитические и экспериментальные исследования колебаний контактирующих фаз в аппаратах погружного горения

В связи с тем что газожидкостной слой можно, рассматривать как совокупность пузырьков, ячеек, струй, вихрей различных размеров, при выборе конструкции устройств для ввода газа в жидкость необходимо учитывать: параметры пульсации, создаваемых выбранным устройством в системе, закон распределения и размер пузырьков, частоту их собственных колебаний, количество поглощенной энергии и, наконец, количество жидкости внутри пузырьков, оказывающее существенное влияние на скорость распределения звука и частоту собственных колебаний.

Авторами аналітично були визначені вказані параметри з урахуванням отриманих залежностей, розроблені відповідні пристрої для створення пульсацій контактуючих фаз. Вмонтовані в АПГ, пристрої пройшли випробування на універсальному нагрівачі технологічних рідин, на який отримані ТУ [3].

Апарат поглиблюючого горіння з пристроєм для створення пульсацій представлений на рис. 1.

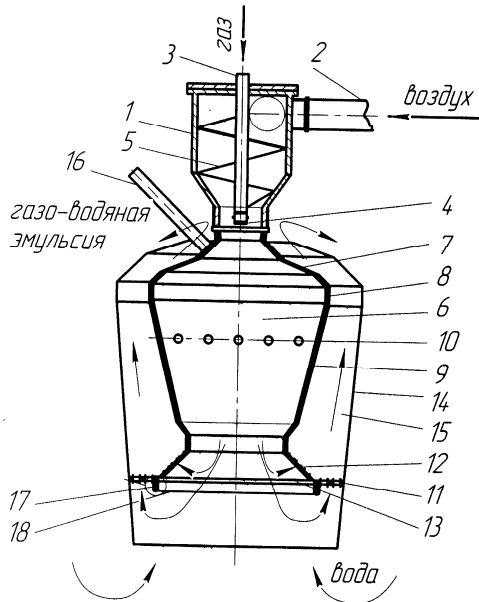


Рис. 1. Апарат поглиблюючого горіння з модуляцією контактуючих фаз: 1 – горелочне пристрій; 2 – патрубок для подачі повітря; 3 – патрубок для подачі палива; 4 – газосопловий насадок; 5 – винт-завихритель; 6 – камера згорання; 7 – диффузор; 8 – циліндричний діляк; 9 – конфузор; 10 – система отворів; 11 – газорозподільний пристрій; 12 – перфорований діляк; 13 – основа; 14 – циркуляційна труба; 15 – кільцевий зазор; 16 – підпалювальне пристрій; 17 – пружини; 18 – резонуюче клапанне пристрій

Апарат містить горелочне пристрій 1 з патрубком для подачі повітря на горіння 2 і патрубком подачі палива 3 з газосопловим насадком 4. К нижній частині корпусу горелки і соосно закріпленим винтом-завихритель 5 приєднана камера згорання 6, що складається з диффузора 7, циліндричного діляка 8 і конфузора 9 з системою отворів для проходження продуктів згорання 10. К конфузору приєднано газорозподільний пристрій 11 з перфорованим діляком 12 і основою 13. Соосно з камерою згорання розташована циркуляційна труба 14 з кільцевим зазором перемінного сечення 15. К диффузору 7 камери згорання 6 приєднано підпалювальне паливно-повітряну суміш пристрій 16. Під газорозподільним механізмом з допомогою пружин 17 кріпиться резонуюче клапанне контактно-е пристрій 18, призначення якого – турбулізація потоку продуктів згорання і створення пульсацій на границі фаз в системі газ – рідина.

Коливання клапанного контактного пристрою здійснюється не зовнішнім джерелом енергії, а виникають за рахунок різниці тисків контактуючих фаз газ – рідина. Швидкість теплообміну між газом (продуктами згорання) і рідиною визначається інтенсивністю переносу речовини і енергії при контакті фаз. Це забезпечується турбулізацією контактуючих фаз.

При контакті в АПГ газу і рідини виникають амплітудно-частотні коливання контактуючих фаз, які пов'язані з швидкістю газового потоку, нестабільністю міжфазної поверхні, хвилюванням газорідкого шару. Це сприяє виникненню міжфазової турбулентності і турбулентної пульсації поверхні розділу контактуючих фаз. В результаті енергія газового потоку в газорідкому шарі трансформуються в кінетичну енергію пульсацій і потенціальну енергію поверхневого натяження. При цьому вони взаємно переходять одне в одне.

Максимальний ефект процесу відбувається при співпадінні налагаємих частот і власних коливань елементів структури газорідкого шару, т.е. з виникненням резонансу.

Частоту коливань пульсуючого в рідині бульбашки з метою оцінки впливу хвильового поля, створюваного бульбашкою, що проходить через шар рідини, на теплообмін в газорідких пристроях досліджували в наступній послідовності: визначали кінематичні і силові характеристики хвильового поля бульбашки, розглядаючи її як сферичний випромінювач, а потім враховували вплив на власну частоту коливань бульбашки приєднаної маси рідини. Якщо представити бульбашку в вигляді пульсуючої сфери, всі точки якої коливаються за наступним законом [4]

$$V_n(\tau) = \frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = V_0 \exp(i\omega\tau), \quad (1)$$

де  $V_n(\tau)$  – швидкість коливання точок по нормалі к поверхні сфери,  $\Phi$  – потенціал швидкості,  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота, тоді хвильове поле навколо пульсуючої сфери без урахування кутових координат визначається відомим хвильовим рівнянням [4]:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \tau^2} - C^2 \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) \right] = 0. \quad (2)$$

Частинне рішення рівняння (2) з урахуванням (1) має вигляд [5]

$$\Phi = \frac{1}{r} \left[ A \exp(-i \frac{\omega}{C} r) + B \exp(i \frac{\omega}{C} r) \right]. \quad (3)$$

Використовуючи відомі [4] зв'язки  $\Phi$  з рівнянням гідродинаміки лінійного наближення, можна отримати радіальну складову швидкості частинки рідини

$$V = - \frac{\partial \Phi}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \left[ A(1 + ikr) e^{i(\omega\tau - kr)} + B(1 - ikr) e^{i(\omega\tau + kr)} \right] \quad (4)$$

и волнового давления

$$P = i\omega\rho\Phi; \tag{5}$$

$$P = \frac{i\omega\rho}{r} [A \exp(-ikr) + B \exp(ikr)] e^{i\omega\tau}, \tag{6}$$

где  $k=\omega/c$  – волновое число.

Коэффициенты А и В в уравнении (4) определяли по следующим соображениям. Из условий излучения  $\Phi_{r \rightarrow \infty} \rightarrow 0$  следует, что В=0. С учетом (1) при  $r=a$  получим выражение для А:

$$A = V_0 a^2 / (1 + ika). \tag{7}$$

Подставляя выражения (6) и (7) для А и В в (3)–(5), найдем, что для волнового поля пульсирующей сферы:

$$\Phi = \frac{1}{r} \frac{V_0 a^2}{1 + ika} \exp[i(\omega\tau - kr_1)]; \tag{8}$$

$$V = \frac{V_0 a^2}{1 + ika} \frac{1 + ikr}{r^2} \exp[i(\omega\tau - kr_1)]; \tag{9}$$

$$P = \frac{V_0 a^2}{1 + ika} \rho \frac{i\omega}{r} \exp[i(\omega\tau - kr_1)]; \tag{10}$$

при

$$r_1 = r - a. \tag{11}$$

Имея кинематические и силовые характеристики волнового поля, определим активную и реактивную составляющие механического импеданса колебательной системы пузырьков газа - жидкость с учетом присоединенной к пузырьку массы жидкости [6, 7]. Исходя из [6], присоединенная к пульсирующей сфере масса жидкости

$$M = \frac{\phi}{\omega} = \frac{\rho c 4\pi a^2}{\omega} \frac{ka}{1 + k^2 a^2} = \frac{4\pi a^3 \rho}{1 + k^2 a^2} = \frac{3M_0}{1 + k^2 a^2}, \tag{12}$$

где  $M_0$  - масса жидкости в объеме шара радиуса  $a$ . Для низких частот  $K \rightarrow 0$  и  $M \rightarrow 3M_0 = 4\pi a^3 \rho_{ж}$ ; т. е. получаем известное [6] утверждение о том, что масса жидкости, присоединенная к пульсирующему пузырьку газа, численно равна утроенной массе жидкости, вытесненной этим пузырьком.

Представив газовый пузырек в жидкости как колебательную систему с сосредоточенными параметрами, резонансную частоту такой системы можно определить по формуле:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{(m + m_s) C_s}}, \tag{13}$$

где  $m_s$  - эквивалентная масса;  $C_s$  - эквивалентная упругость;  $M$  - присоединенная масса. Поскольку  $m_s \ll M$ , то в качестве основного инерционного элемента выступает присоединенная масса. Определив эквивалентную упругость системы пузырек - жидкость как отношение изменения радиуса к общей сжимающей силе, получим:

$$\omega_0 = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{3\rho_r C_r^2}{\rho_{ж}}}, \tag{14}$$

Переходя от круговой частоты к линейной, с учетом  $\chi_p = \rho_r C_r^2$ , получим зависимость:

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\chi}{\rho_{ж}}} = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\rho_r C_r^2}{\rho_{ж}}}, \tag{15}$$

аналогичную известной ранее [8] формуле, полученной Миннертом [9] и Смитом [10] без использования представлений о волновом поле пузырька и влиянии присоединенной массы жидкости на собственную частоту его колебаний.

Заметим, что порядок получающихся по этой формуле собственных частот колебаний пузырьков размером 2–10 мм составляет  $6 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ , что гораздо выше рекомендованных 5–15  $\text{с}^{-1}$  значений эффективных частот, налагаемых на барботажный слой колебаний.

Следовательно, эффект интенсификации процессов при наложении на газожидкостной слой низкочастотных колебаний не связан с усилением колебаний пузырьков, а, по-видимому, связан с колебаниями элементов структуры больших размеров (факелов, струй, вихрей и т. п.).

Рассмотрим вопрос о поглощении и рассеянии энергии волны давления слоем жидкости с пузырьками газа. Пусть жидкость содержит пузырьки газа одинакового размера и их число в единице объема  $n$ . Определим интенсивность такой волны, которая прошла через слой жидкости с пузырьками газа. Толщину этого слоя обозначим через  $d$ , интенсивность падающей волны  $I_0$ . Слой имеет координаты  $x$ ,  $x+dx$ , толщину  $dx$ , площадь  $dS$  и содержит  $n(x)dx dS$  пузырьков газа. Полная высота слоя  $h$ .

На основании выполненного аналитического расчета полное ослабление энергии волны слоем пузырьков диаметром от 0 до  $\infty$  равно

$$D = \int_0^{\infty} n(a) Q_1(a) da. \tag{16}$$

Здесь

$$n(a) = \frac{dN}{da} = A(\ell a)^m e^{-\ell a}, \tag{17}$$

где  $A, \ell, m$  – числа, которые определяются по экспериментальным данным;  $a$  – радиус пузырька;  $n$  – число пузырьков в единице объема, радиусом  $a$ ,  $a + da$ ;  $N = \frac{1}{h} \int_0^h n(x) dx$  - среднее число частиц, приходящихся на единицу длины.

### 5. Апробация результатов исследований

Из анализа формулы (17) видно, что энергия волны давления очень быстро убывает по высоте газожидкостного слоя. Это подтверждает сделанный выше вывод о нецелесообразности создания пульсаций давления в газовом потоке на входе в аппарат, а сместить пульсации в зону контакта фаз (газ - жидкость). Конструкцию устройства для распределения

газа в жидкости также необходимо учитывать при выборе параметров пульсаций, создаваемых тем или иным способом в системе. Это следует из того, что ею прежде всего определяются размеры пузырьков и закон распределения их размеров, следовательно, частота их собственных колебаний (15), количество поглощенной энергии (16) и, наконец, количество жидкости внутри пузырьков, оказывающее существенное влияние на скорость распространения звука и частоту собственных колебаний.

С учетом этого, нельзя считать вопрос создания оптимальной конструкции устройства для ввода газа в жидкость решенным окончательно. Повидимому, следует сконцентрировать исследования на создание перспективных конструкций, обеспечивающих появление в зоне входа газа в жидкость, где эффективность контакта фаз высока, не только низкочастотных, но и высокочастотных колебаний. Причем, последние должны обеспечиваться не внешними источниками энергии, а создаваться за счет энергии контактирующих фаз.

### 6. Выводы

В развитие этого направления автором предложено размещение резонирующих барботажных устройств и элементов насадки к разработанным ранее конструкциям в зоне выхода продуктов сгорания из АПГ и входа их в жидкость, что обеспечит возникновение ультразвуковых колебаний (рис.1).

Исследования в лаборатории подтвердили перспективность выбранного направления для интенсификации тепломассообменных и реакционно-отделительных процессов, лимитируемых диффузионной областью их протекания.

В газожидкостных аппаратах, по мнению авторов, далеко не исчерпана возможность использования в целях интенсификации низкочастотных колебаний, создаваемых с помощью внешних источников энергии.

### Литература

1. Кардашев, Г. А. Тепломассообменные акустические процессы и аппараты [Текст] / Г. А. Кардашев, П. Е. Михайлов. – М.: Машиностроение, 1973. – 223 с.

2. Соколов, В. Н. Газожидкостные реакторы [Текст] / В. Н. Соколов, И. В. Доманский. – Л.: Машиностроение, 1973. – 216 с.

3. Универсальный нагреватель технологических жидкостей УНТЖ-101.01. ТУ У 29.7-02070758-001:2008. Техническое описание. Днепропетровск. – 2008.

4. Исакович, М. А. Общая акустика [Текст] / М. А. Исакович. – М.: Наука, 1979. – 389 с.

5. Международный электротехнический словарь // Междунар. электротехн. комис., Ком. по участию СССР в междунар. энергет. объединениях. – М.: Физматгиз, 1963 – Гр. 35 : Электромеханические устройства и их применение, 1963. – 69 с.

6. Голямина, И. П. Ультразвук: Маленькая энциклопедия [Текст] / И. П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

7. Пейн, Г. Физика колебаний и волн [Текст] / Г. Пейн. – М.: Мир, 1979. – 389 с.

8. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике [Текст] / Л. Бергман. – М.: Иностранная литература, 1975. – 659 с.

9. Minnaert, M. On musical air bubbles and the sounds of minning water [Text] / M. Minnaert // Philosophical Magazine. – 1933. – Vol. 7, Issue 16. – P. 235.

10. Smith, F. D. On the destructive mechanical effects of the Gas bubbles liberated by the passage of intense sound through a liquid [Text] / F. D. Smith // Philosophical Magazine. – 1935. – Vol. 7, Issue 19. – P. 1137.

### References

1. Kardashov, G. A. (1973). Heat-exchange acoustic process and apparatuses. Moscow, USSR: Mechanical Engineering, 223.

2. Sokolov, V. N., Domansky, I.V. (1973). Gas-liquid reactors. Leningrad, USSR: Mechanical Engineering, 216.

3. (2008). Universal heater of technological liquids UHTL-101.01. ТУ У 29.7-02070758-001:2008. Technical description. Dnepropetrovsk, Ukraine.

4. Isakovich, M. A. (1979). The general acoustics. Moscow, USSR: Science, 389.

5. (1963). Vocabulaire electrotechnique international. Gr.35: Electromechanical devices and their application. Moscow, USSR: Phymathgis, 69.

6. (1979). Ultrasound. Concise Encyclopaedia. Moscow, USSR: Soviet Encyclopaedia, 400.

7. Pein, G. (1979). Physics of oscillation and waves. Moscow, USSR: Mir, 389.

8. Bergman, L. (1975). Ultrasound and its application in science and technique. Moscow, USSR: Foreign Literature, 659.

9. Minnaert, M. (1933). On musical air bubbles and the sounds of minning water. Phil. Mag. 16 (7), 235.

10. Smith, F. D. (1935). On the destructive mechanical effects of the Gas bubbles liberated by the passage of intense sound through a liquid. Phil. Mag. 19 (7), 1137.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Єрмаков П. П.  
Дата надходження рукопису 16.06.2015*

**Никольский Валерий Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра энергетики. Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, Украина, 49005

E-mail: iresh1@mail.ru