

тивоморозных добавок и желательнее разместить в при-  
стройстве к бетоносмесительному цеху.

Аппаратное обеспечение для приготовления суспензии традиционное: мешалка с загрузочным отверстием и вертикальным лопастным валом, а также насосом для перекачки раствора в расходный бак бетоносмесительного отделения. Расходный бак устанавливается на отметке дозировочного отделения (3 этаж бетоносмесительного узла). Объем мешалки выбирается, исходя из 3-4 часовой производительности бетоносмесительного узла. Если потребность в бетоне М300 составляет 10 м<sup>3</sup>/час, то при расходе цемента 400 кг на 1 м<sup>3</sup> масса цемента составит 4 т. Расход биокремнезема (при 10-процентной добавке его к массе цемента) будет 400 кг. При 4-часовом запасе необходимое количество биокремнезема в диатомитовой суспензии должно быть 1,6 т. С учетом содержания сухого биокремнезема в количестве 700 кг в 1000 л, 4-часовой объем суспензии должен быть 1600/700 = 2,3 м<sup>3</sup>. Таким образом, требуемый объем мешалки с учетом коэффициента наполнения 0,7-0,8 должен быть 2,8-3,0 м<sup>3</sup>.

Был проведен сравнительный эксперимент по изготовлению реакционно-порошкового бетона с использованием биокремнезема как в сухом виде, так и в виде суспензии, в количестве 10 % от массы цемента в пересчете на сухое вещество. На первом этапе приготовления водная суспензия биокремнезема, стабилизированная известью с соотношением, указанным выше. После выдерживания суспензии в течение трех суток были изготовлены образцы трех составов. В первом составе

биокремнезем перемешивался с компонентами бетонной смеси в сухом виде, во втором – биокремнезем вводился в виде суспензии, третий состав являлся контрольным – без добавления биокремнезема. Проведенный эксперимент показал, что применение биокремнезема увеличивает прочность при сжатии на 28-е сутки твердения на 15 % по сравнению с контрольным и не зависит от способа введения пуццоланической добавки. При этом уменьшается количество вовлеченного воздуха по сравнению с использованием порошкообразного микрокремнезема.

#### Литература

1. Калашников В.И. Через рациональную реологию — в будущее бетонов // Технологии бетонов. 2007. № 5. С. 8-10; 2007. № 6. С. 8-11; 2008. № 1. С. 22-26.
2. Калашников В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения. Строит. материалы. № 10. 2012. С. 70-72.
3. Щукин Е.Д., Перцев А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Высш. школа. 2004. 445 с.

#### References

1. Kalashnikov V.I. Through rational rheology to the future of concrete // Tekhnologii betonov. 2007. № 5. S. 8-10; 2007. № 6. S. 8-11; 2008. № 1. S. 22-26.
2. Kalashnikov V.I. What new generation power-activated concrete is. Stroitel'nye materialy. №10, 2012. S. 70-72.
3. Shchukin E. D., Pertsev A.V., Amelina E.A. Colloid chemistry. M.: Vysshaya shkola. 2004. 445 s.

УДК 674.03:621.034

## Методика выбора параметров генератора для ультразвуковой окорки лесоматериалов

Г.Д. Гаспарян

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

Garik.gasparyan@yandex.ru

Статья поступила 30.10.2012, принята 2.02.2013

*Рассмотрены основные показатели ультразвуковых генераторов с целью оптимизации технологии ультразвуковой окорки лесоматериалов. Предложена методика определения основных технологических параметров, на основе которых моделируются показатели ультразвукового генератора, применяемого в окорке лесоматериалов. Описана методика, обеспечивающая выбор параметров ультразвукового генератора, работающего в паре с колебательной системой. Представлен процесс формирования кавитационного процесса, разрушающего элементы коры. В соответствии с разработанной методикой получены выражения и зависимости основных эксплуатационных параметров ультразвукового генератора. Осуществлен расчет акустической и электрической мощности электронного генератора с целью формирования в жидкой среде кавитационного эффекта с необходимыми показателями, позволяющими разрушить связи между элементами коры окашиваемого лесоматериала. Разработана математическая модель процесса схлопывания кавитационного пузырька, что позволяет провести оценку энергии, возникающей при возникновении кавитационного эффекта, разрушающего слой коры.*

**Ключевые слова:** окорка, кора, ультразвук, ультразвуковая окорка, лесоматериал, кавитационный эффект, колебательная система.

# Generator parameters selection technigue for ultrasonic barking

G.D. Gasparyan

Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia

Garik.gasparian@yandex.ru

Received 30.10.2012, accepted 2.02.2013

*The basic indicators of ultrasonic generators in order to optimize the ultrasonic barking technology have been considered. The technique to determine the main technological parameters being basic for modeling the indicators of the ultrasonic generator used in debarking has been proposed. The technique for providing the choice of the parameters of ultrasonic generators running together with an oscillating system has been described. The formation of the cavitation process that destroys bark elements has been presented. In accordance with the established procedure, the expressions and dependences of the ultrasonic generator main operating parameters have been obtained. The calculation of acoustic and electric power of the electronic generator to form the cavitation effect with necessary indicators to destroy the connection between bark elements of the debarked timber has been performed. A mathematical model of the process of a cavitation bubble collapse has been developed. It enables to assess energy generated when a cavitation effect damaging the bark layers occurs.*

**Key words:** barking, bark, ultrasound, ultrasonic barking, timber, cavitation effect, oscillating system.

Создание нового оборудования, позволяющего повысить эффективность окорки лесоматериалов на предприятиях деревообработки, предполагает не только применение и внедрение новых принципов и технических систем в производство, но и формирование принципиально новых технологических процессов, в частности – энергоэффективных процессов.

В этой статье предлагается развитие темы ультразвуковой окорки лесоматериалов. Этот процесс основывается на возникающих в жидкой среде физических процессах, позволяющих разрушать слои коры и связи между их элементами.

Для оптимизации параметров ультразвуковой окорки круглых лесоматериалов разработаны математические модели различных процессов, происходящих при реализации технологии. Ультразвуковая окорка является сложной системой процессов, происходящих при воздействии ультразвуковых волн на различные участки слоев коры и среды окоривания.

В основе физического влияния ультразвука на элементы коры лежит кавитационный эффект, позволяющий синтезировать различные процессы для отрыва коры от древесины. С учетом этого разработаны математические модели возникновения кавитационного эффекта при ультразвуковой окорке, протекания гидродинамических процессов, влияющих на физический отрыв коры от древесины.

На основе исследуемых параметров кавитирующей среды разработана методика расчета предельных параметров электронных генераторов ультразвуковых технологических аппаратов, таких, как запас мощности и диапазон изменения частоты, для работы с жидкими средами, при условии реализации в них режима развитой кавитации.

Методика обеспечивает выбор параметров ультразвуковых генераторов, работающих в составе с полуволновыми пьезоэлектрическими стержневыми колебательными системами с эллиптическими рабочими инструментами (рис. 1), и описывает сегмент поверхности окориваемого лесоматериала [4 – 9].

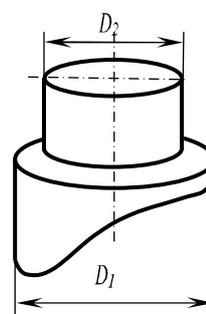


Рис. 1. Эскиз ультразвукового инструмента

Вместе с тем, предлагаемая методика расчета может быть использована как базовая для адаптации в случае использования рабочих инструментов другой геометрической формы.

Исходные данные для расчета основных параметров электронных ультразвуковых генераторов:

$\rho_{узкс}$  – плотность материала колебательной системы;

$c_{узкс}$  – скорость звука в материале колебательной системы;

$\rho_k$  – плотность коры;

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости;

$c_{ж}$  – скорость звука в обрабатываемой среде;

$f$  – частота ультразвуковых колебаний;

$D_1$  – диаметр излучающей поверхности инструмента;

$D_2$  – диаметр сечения волновода колебательной системы, к которому присоединяется рабочий инструмент;

$P_0$  – гидростатическое давление;

$P_{п}$  – давление насыщенных паров;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения обрабатываемой среды;

$K$  – индекс кавитации.

На следующем этапе реализации методики осуществляется расчет давления ультразвукового поля  $P_M$ , при котором достигается режим развитой кавитации. Для этого:

– определяется значение максимального размера  $R_{MAX}$  парагазового пузырька:

$$R_{MAX} = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}, \quad (1)$$

$$p = -\frac{P_0 3\gamma}{4\pi^2 \rho_{ж} f^2}, \quad q = -\frac{3\gamma\sigma}{2\pi^2 \rho_{ж} f^2}, \quad (2)$$

где:

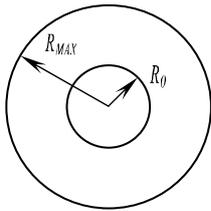
– средняя величина максимального радиуса разрушающего кору кавитационного пузырька принимается равной:

$$\bar{R}_{MAX} = \frac{R_{MAX}}{2}; \quad (3)$$

– индекс кавитации, при котором наступает режим развитой кавитации, представляется в следующем виде:

$$K = \frac{\Delta V_{CF}}{V_{CF}} = \frac{\frac{4}{3}\pi \cdot (R^3 - R_0^3)}{\frac{4}{3}\pi \cdot (R_{MAX}^3 - R_0^3)} = \frac{R^3 - R_0^3}{R_{MAX}^3 - R_0^3} \quad (4)$$

где  $\Delta V_{CF}$  – вытесненный из сферы объем жидкости;  $V_{CF}$  – объем сферы, ограниченный радиусом  $R_{MAX}$ ;



**Рис. 2.** Формирование разрушающего кору кавитационного пузырька

– радиус кавитационного пузырька определяется из выражения (4), приняв  $R_0 = 0$  (так как  $R_0 \ll R$ )

$$R = \sqrt[3]{K \bar{R}_{MAX}}; \quad (5)$$

– рассчитывается давление ультразвукового поля:

$$P_M = P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R} - \left( P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \frac{R_0^3}{R^3}; \quad (6)$$

– величина среднего звукового давления определяется из следующего выражения:

$$\bar{P}_M = \frac{P_M}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Далее производится расчет мощности ультразвуковых колебаний при заданных параметрах поверхности излучателя и величине звукового давления  $P_M$ . Для этого:

– рассчитывается интенсивность ультразвуковых колебаний по следующей формуле:

$$I = \frac{\bar{P}_M^2}{2\rho_{ж} c_{ж}}; \quad (8)$$

– производится расчет акустической мощности, необходимый для пьезоэлектрического преобразователя:

$$P_{AK} = I \cdot \left( \frac{\pi D_1^2}{2} - \frac{\pi D_2^2}{4} \right); \quad (9)$$

– определяется электрическая мощность для пьезоэлектрического преобразователя:

$$P_{эл} = P_{AK} \eta_{эл}. \quad (10)$$

На основании полученных исходных данных и предварительных расчетов определяется возможный диапазон изменения резонансной частоты колебательной системы (УЗКС) при реализации режима развитой кавитации [9 – 13]. В связи с этим:

– определяется резонансный размер ультразвуковой колебательной системы из выражения:

$$l_1 = \frac{c_{УЗКС}}{2f}; \quad (11)$$

– определяется масса жидкости, присоединенной к излучающей поверхности колебательной системы:

$$m = \left( \frac{\pi \cdot D_1^2}{2} - \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \right) \cdot h \rho_{ж}, \quad (12)$$

где  $h$  – толщина присоединенного слоя жидкости;

– рассчитывается длина эквивалента присоединенной массы из металла колебательной системы, соответствующего присоединенной массе жидкой среды:

$$\Delta l = \frac{4m}{\rho_{УЗКС} \cdot \pi \cdot D_2^2}; \quad (13)$$

– определяется частота колебательной системы с эквивалентной присоединенной массой:

$$f_1 = \frac{c_{УЗКС}}{2(l + \Delta l)}. \quad (14)$$

Практические исследования показали, что с увеличением площади излучения замедляется уменьшение резонансной частоты УЗКС. Это связано с тем, что с увеличением диаметра эллиптический рабочий инструмент не может совершать возвратно-поступательные продольные движения, а только поперечные колебания и, как следствие, появляются участки с нулевой амплитудой колебаний.

В связи с этим необходимо определить поправочный коэффициент  $K_F$ , позволяющий скорректировать расчетное значение частоты УЗКС [15, 16].

Выполняется корректировка частоты  $f_1$ :

$$\bar{f}_1 = K_F \frac{c_{УЗКС}}{2(l + \Delta l)}. \quad (15)$$

Диапазон изменения резонансной частоты колебательной системы определяется по следующей формуле:

$$\Delta f = f - \bar{f}_1. \quad (16)$$

Предельные параметры ультразвукового генератора при окорке лесоматериалов в жидких средах основаны на анализе модели кавитирующей среды, представленной в виде одиночного кавитационного пузырька и позволяющей установить связь акустических свойств жидких кавитирующих сред с параметрами первичного ультразвукового поля.

При определении зависимостей параметров генератора, предназначенного для ультразвуковой окорки лесоматериалов и создания соответствующей технологической среды, необходимо определить зависимости энергетических показателей, возникающих при кавитационном эффекте.

При схлопывании кавитационного пузырька выделяется кинетическая энергия, которая превращается в энергию активации разрушения камбиального слоя, что вызывает снижение плотности слоев коры и отрыв небольших ее частиц:

$$W_{кин} = 2\pi r U^2 R^4 \int_R^\infty \frac{dr}{r^2} = 2\pi r U^2 R^3, \quad (15)$$

где  $U$  – скорость сферической стенки;  $R$  – мгновенный радиус захлопывающейся сферы.

Скорость определяется по следующей формуле:

$$U = \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{P}{\rho} \right) \cdot \left( \frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right)}, \quad (16)$$

где  $R_0$  – первоначальный радиус сферы (рис. 3)

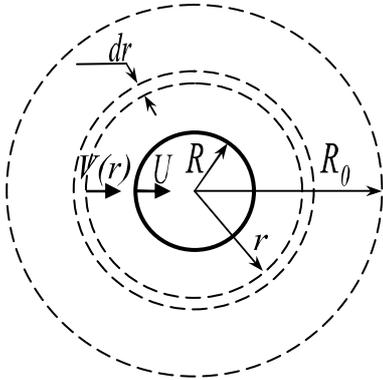


Рис. 3. Модель кавитационного пузырька

В связи с тем, что в момент захлопывания полости скорость движения сферической стенки становится соизмеримой со скоростью звука в жидкой среде, необходимо выбрать аппроксимацию движения границы раздела, учитывающую эффекты сжимаемости жидкости. Такой аппроксимацией является аппроксимация Кирквуда-Бете (формула 2.49), которая наилучшим образом описывает стадию захлопывания кавитационного пузырька [6]:

$$R \left( 1 - \frac{U}{A} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + 3 \left( 1 - \frac{U}{3A} \right) \cdot \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 - \left( 1 + \frac{U}{A} \right) H - \frac{U}{A} \left( 1 - \frac{U}{A} \right) R \frac{dH}{dR} = 0, \quad (17)$$

где  $A = \sqrt{\frac{1}{\beta \cdot \rho_{L_0} (\beta (P - P_{L_0}) + 1)}}$  – локальная скорость

звука в жидкости;  $H = \frac{1}{\beta \cdot \rho_{L_0}} \ln \frac{\beta \cdot \left( P_v - \frac{2\sigma}{R} - P_{L_0} \right) + 1}{1 - \beta \cdot P_A \sin(\omega \cdot t)}$  –

свободная энтальпия на поверхности сферы [5].

Дифференциальное уравнение 2-го порядка не может быть решено аналитически в общем виде. Для поиска численного решения применяется метод конечных разностей. Суть данного метода заключается в том, что область непрерывного изменения аргумента заменяется сеткой – конечным дискретным множеством точек, называемых узлами. Дискретизируем временной параметр, и каждому значению времени  $t_i$  сопоставим значение радиуса. Аналогично непрерывные функции скорости звука в жидкости и удельной энтальпии заменим значениями на  $i$ -м шаге:  $A_i$  и  $H_i$  соответственно. Производные заменим их аппроксимациями.

В результате применения метода сеток система уравнений заменится конечно-разностной схемой:

$$R_i \left( 1 - \frac{R_i - R_{i-1}}{A_{i-1} \Delta t} \right) \frac{R_i - 2R_{i-1} + R_{i-2}}{(\Delta t)^2} + 3 \left( 1 - \frac{R_i - R_{i-1}}{3A_{i-1} \Delta t} \right) \times \left( \frac{R_i - R_{i-1}}{A_{i-1} \Delta t} \right)^2 - \left( 1 + \frac{R_i - R_{i-1}}{A_{i-1} \Delta t} \right) H_{i-1} - \frac{R_i - R_{i-1}}{A_{i-1} \Delta t} \times \left( 1 - \frac{R_i - R_{i-1}}{A_{i-1} \Delta t} \right) R_i \frac{H_{i-1} - H_{i-2}}{R_i - R_{i-1}} = 0, \quad (18)$$

$$A_{i-1} = \sqrt{\frac{1}{\beta \cdot \rho_{L_0} (\beta (P_i - P_{L_0}) + 1)}}, \quad (19)$$

$$H_{i-1} = \frac{1}{\beta \cdot \rho_{L_0}} \ln \frac{\beta \cdot \left( P_v - \frac{2\sigma}{R_{i-1}} - P_{L_0} \right) + 1}{1 - \beta \cdot P_A \sin(\omega_i \cdot \Delta t)}. \quad (20)$$

В результате выполненных работ была построена математическая модель процесса схлопывания кавитационных полостей для определения выделяющейся в этом процессе энергии, позволяющей разрушить части коры и связи между корой и древесиной.

Литература

1. Гаспарян Г.Д. Разработка и обоснование параметров установки для окорки лесоматериалов ультразвуком: дис. ... канд. техн. наук. Братск, 2005. 160 с.

2. Гаспарян Г.Д. Исследование процесса ультразвуковой окорки // Вестн. КрасГАУ. 2007. № 3 (18) С. 216-221.
3. Гаспарян Г.Д. Обоснование технологической схемы окорки лесоматериалов ультразвуком // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2009. Т. 2. С.223–225.
4. Калиманов А.В. Возможности использования ультразвука в промышленности // Применение ультразвука в промышленности: сб. ст. 1959. №3. С. 48-57.
5. Кикоин И.К. Таблицы физических величин: справочник. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
6. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 2. Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука, 1968. 267 с.
7. Ультразвуковые технологии и аппараты [Электронный ресурс]: сайт лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийск. технол. ин-та. 1994-2011. URL. <http://u-sonic.ru> (дата обращения: 12.10.2012).
8. Хмельёв В.Н., Попова О.В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве. Барнаул: АлтГТУ, 1997. 160 с.
9. Хмельёв В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н. Применение ультразвуковых колебаний для интенсификации технологических процессов // Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов: сб. тез. докл. всерос. науч. – практ. конф. с междунар. участием. Красноярск, 1999. Ч. 2. С.192-193.
10. Хмельёв В.Н., Шутов В.В. Перспективы совершенствования и применения технологии ультразвуковой обработки хрупких твердых материалов // Материалы 4 международной конференции “Измерение, контроль и автоматизация производственных процессов” (“ИКАПП - 97”). Барнаул, 1997. Т. 2. С.145–147.
11. Onda Corporation Acoustic and Ultrasound Testing Products and Services [Electronic resource]// - Electronic data. Washington, cop. 2001. Mode access. URL. <http://www.ondacorp.com> (дата обращения: 15.12.2012).
12. Simon G. and Levinsen M. T. Parametric dependence of single-bubble sonoluminescence spectra // Phys. Rev. E. 2003. Vol. 68. 046307.
13. Toegel R. and Lohse D. Phase diagrams for sonoluminescing bubbles: A comparison between experiment and theory // J. Chem. Phys. 2003. Vol. 118. P. 1863-1875.
14. Ruuth S.J., Putterman S., Merriman B. Molecular dynamics simulation of the response of a gas to a spherical piston: Implications for sonoluminescence // Phys. Rev. E. 2002. Vol. 66. P. 363-372.
15. Flannigan D.J., Suslick K.S. Plasma Line Emission during Single-Bubble Cavitation // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. P. 136-158.
16. Flannigan D.J., Suslick K.S. Molecular and atomic emission during single- bubble cavitation in concentrated sulfuric acid Acoustics // Research Letters Online. 2005. Vol. 6. № 3. P. 157-161.
17. Hopkins S.D., Putterman S.J., Kappus B.A. Dynamics of a Sonoluminescing Bubble in Sulfuric Acid // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. P. 254-271.

## References

1. Gasparyan G.D. The development and substantiation of the plant parameters for ultrasonic barking: dis. ... kand. tekhn. nauk. Bratsk, 2005. 160 s.
2. Gasparyan G.D. The research into ultrasonic barking process // Vestn. KrasGAU. 2007. №3 (18). S. 216-221.
3. Gasparyan G.D. The substantiation of the ultrasonic barking manufacturing scheme // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta: Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri. 2009. T.2. S.223-225.
4. Kalimanov A.V. The possibilities of using ultrasound in industry // Primeneniye ul'trazvuka v promyshlennosti: sb. st. 1959. №3. S. 48-57.
5. Kikoin I. K. The physical quantities tables. M.: Atomizdat, 1976. 1008 s.
6. Rozenberg L. D. Physics and technology of high-power ultrasound. Kn. 2. High-power ultrasonic fields. M.: Nauka, 1968. 267 s.
7. Ultrasonic techniques and instruments [Elektronnyy resurs]: ofitsial'nyy sayt laboratorii akusticheskikh protsessov i apparatov Biyskogo tekhnol. in-ta. 1994-2011. Rezhim dostupa: <http://u-sonic.ru> (access date 12.10.2012)
8. Khmelev V.N., Popova O.V. Multifunction ultrasonic instruments and their application at small-scale enterprises, in agriculture and households. Barnaul: AltGTU, 1997. 160s.
9. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tsiganok S.N. The application of ultrasound vibrations to intensify technological processes // sb. tez. dokl. vsерос. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. Krasnoyarsk, 1999. S.192-193.
10. Khmelev V.N., Shutov V.V. The prospects for improvement and application of ultrasound technique for brittle hard materials working // Materialy 4 mezhdunar. konf. Barnaul, 1997. T. 2. S.145-147.
11. Onda Corporation Acoustic and Ultrasound Testing Products and Services [Electronic resource] - Electronic data. - Washington, cop. 2001. Mode access: <http://www.ondacorp.com>
12. Simon G. and Levinsen M. T. Parametric dependence of single-bubble sonoluminescence spectra // Phys. Rev. E. 2003. V.68. 046307.
13. Toegel R. and Lohse D. Phase diagrams for sonoluminescing bubbles: A comparison between experiment and theory // J. Chem. Phys. 2003. V. 118. P. 1863-1875.
14. Ruuth S.J., Putterman S., and Merriman B. (2002). Molecular dynamics simulation of the response of a gas to a spherical piston: Implications for sonoluminescence // Phys. Rev. E. 2002. V.66. P. 363-372.
15. Flannigan D.J. and Suslick K.S. Plasma Line Emission during Single-Bubble Cavitation // Phys. Rev. Lett. 2005. V95. P. 136-158.
16. Flannigan D.J. and Suslick K.S. Molecular and atomic emission during single- bubble cavitation in concentrated sulfuric acid Acoustics // Research Letters Online. 2005. V 6. -3.P.157-161.
17. Hopkins S.D., Putterman S.J., Kappus B.A. et. al. Dynamics of a Sonoluminescing Bubble in Sulfuric Acid // Phys. Rev. Lett. 2005. V.95. P. 254-271.