

УДК 534-8
DOI: 10.12737/24207

**Р.И. Нигметзянов, к.т.н., С.К. Сундуков, к.т.н.,
Д.С. Фатюхин, д.т.н.**
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64)
E-mail: sergey-lefmo@yandex.ru

Совершенствование технологии ультразвуковой очистки рабочих поверхностей деталей машин на основе феноменологического исследования кавитационных образований

Приведены результаты исследований, основанных на высокоскоростной видеосъемке явлений, возникающих в жидкости при введении в неё колебаний ультразвуковой частоты.

Установлено, что учитывая специфику воздействия пузырьков, тяжелей и кластеров удается локализовать зону очистки, уменьшить время обработки, снизить потребляемую мощность, а также избежать кавитационных повреждений поверхностей изделий.

Ключевые слова: кавитация; кавитационная область; кавитационный тяж; кавитационный кластер.

**R.I. Nigmatzyanov, Can. Eng., S.K. Sundukov, Can. Eng.,
D.S. Fatyukhin, D. Eng.**
(Moscow State Highway technical University (MADI), 64, Leningradsky Avenue, 125319 Moscow)

Technology improvement of ultrasonic refinement of machinery work surfaces based on phenomenological investigation of cavity formations

The study of processes based on cavitation use required a clear definition of phenomena arising in liquid at high-frequency oscillation impact upon it. For the in-depth study of the phenomena under investigation in the given work there was used a high-speed video filming.

As the analysis of high-speed filming has shown after closing a bubble is divided into many pieces which, in their turn, pulse in-phase. At the same time there is observed a formation of complex bubble formations which are offered to be called clusters (Fig. 3).

Bubbles formed under the influence of variable acoustic pressure and located at a small distance from each other combine. Two processes take place simultaneously – bubbles combining (coalescence) and the integration of small bubbles in larger ones under the influence of cohesion forces with the formation of general structures (coagulation). The coalescence is followed with the transition of a system in a state with lower free energy.

Keywords: cavitation; cavitation area; cavitation tension; cavitation cluster.

Ультразвуковая жидкостная обработка нашла широкое применение в самых различных областях промышленности. Технологические операции, производительность и качество которых повышается с применением ультразвука – это эмульгирование, диспергирование, пропитка, очистка и др.

Основными преимуществами дисперсных сред, полученных с использованием ультразвука, является их однородность, стабиль-

ность (т.е. длительное отсутствие расслаивания при хранении), а также возможность регулирования размеров частиц дисперсной фазы. Пропитанные при воздействии ультразвука изделия обладают повышенной вибропрочностью, виброустойчивостью, тепло- и влагоустойчивостью, ударной прочностью. Ультразвуковая очистка позволяет обеспечить требуемую чистоту изделий на макро-, микро- и субмикроразмерном уровне.

При разработке технологии наиболее сложными являются вопросы обеспечения дозированного воздействия эффектов, создаваемых ультразвуком, в четко определённом объёме жидкости с заданной интенсивностью.

Наиболее значимое явление, способствующее удалению загрязнений с поверхностей деталей, ускорению химических реакций и др. – кавитация. Регулирование кавитационного воздействия достигается выбором оборудования и технологических параметров обработки. При этом создание рациональной технологии, учитывающей специфику объектов обработки, должно основываться на глубоком изучении физических механизмов, оказывающих наибольшее влияние на эффективность обработки.

С точки зрения технологического применения выделяют как минимум три, принципиально отличающихся между собой, режима ультразвукового жидкостного воздействия:

1. Докавитационный режим, при котором не происходит разрывов сплошности жидкости, собственно кавитации. Основным механизмом воздействия этого режима является переменное звуковое давление. Этот режим характеризуется удельной акустической мощностью до $1...2 \text{ Вт/см}^2$.

2. Увеличение мощности свыше $1...2 \text{ Вт/см}^2$ приводит к образованию разрывов сплошности жидкости, заполненных паром, газом или их смесью, и захлопывание этих полостей – кавитацией.

3. Режим высокоамплитудной обработки наступает при превышении мощности $10...12 \text{ Вт/см}^2$. Переход к высокоамплитудной обработке характеризуется образованием крупномасштабных гидродинамических потоков, которые количественно и качественно изменяют распределение кавитационных явлений в озвучиваемом объёме.

При создании технологий используются только 2-й и 3-й режимы, поскольку ощутимое действие на свойства изделий требует достаточного уровня излучаемой мощности.

Изучение процессов, основанных на использовании кавитации, требует чёткого определения феноменов, возникающих в жидкости при высокочастотном колебательном воздействии на неё. Основным объектом исследования является парогазовая полость (пузырёк) [1].

На рис. 1 показаны последовательно снятые кадры скоростной киносъёмки, полученные под торцом излучателя колебаний. Скорость съёмки – 60 000 кадров/с, частота колебаний

– 22 000 Гц.

На фотографиях видны все стадии жизни кавитационного пузырька: от образования до схлопывания.

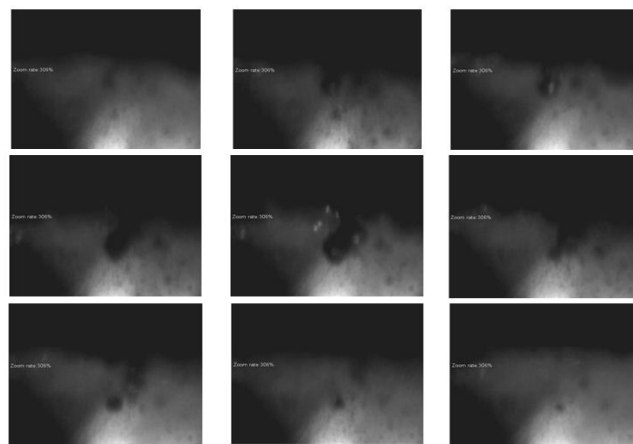


Рис. 1. Кинограмма пульсаций и схлопывания пузырька вблизи излучателя

Кавитация возникает при колебании пузырьков, радиусы которых находятся в широком интервале значений от $R_{кр}$ до $R_{рез}$. Наименьшее критическое значение радиуса можно приблизительно определить из выражения [2]:

$$R_{кр}^3 + 2 \sigma R_{кр}^2 / P_{ст} - 32 \sigma R_{кр}^2 / 27 P_{ст} (P_{ст} - P_0)^2 = 0, (1)$$

где $R_{кр}$ – наименьший критический радиус пузырька; σ – поверхностное натяжение на границе раздела жидкость–газ; $P_{ст}$ – статическое давление; P_0 – внешнее гидростатическое давление.

Резонансными размерами пузырьков являются такие размеры, которые соответствуют частоте приложенной звуковой волны. Существует формула [3] для определения размеров пузырьков, колеблющихся в резонансе с колебаниями точечного излучателя:

$$f = \frac{1}{2\pi R_{рез}} \sqrt{\frac{3\gamma(P_0 + 2\sigma/R_{рез})}{\rho}}, (2)$$

где $R_{рез}$ – резонансный радиус пузырька; γ – отношение удельных теплоемкостей газа в пузырьке; ρ – плотность жидкости.

Пузырьки, размеры которых меньше $R_{кр}$, в ультразвуковой кавитации (при заданном статическом давлении $P_{ст}$) участвовать не будут. Если радиус пузырька больше резонансного захлопывания не произойдет, и пузырек будет пульсировать в поле со сложным изменением

своей формы.

Таким образом, по характеру производимого действия и по длительности существования в звуковом поле основными кавитационными образованиями принято считать захлопывающиеся и пульсирующие пузырьки [4, 5].

Существование изолированного пузырька маловероятно. Большинство исследователей сходятся во мнении, что мощное ультразвуковое излучение вызывает образование множества пузырьков, взаимодействующих между

собой. Скопление пузырьков принято называть кавитационной областью [4, 5].

Полученные видеоматериалы показывают, что форма кавитационных полостей на различных стадиях колебаний далека от сферической. При этом необходимо отметить, что больший объем кавитационной области занимают не одиночные пузырьки, а их конгломераты (рис. 2), размеры которых составляют в среднем 200 ... 600 мкм, при этом размеры пузырьков значительно меньше – до 50 мкм.

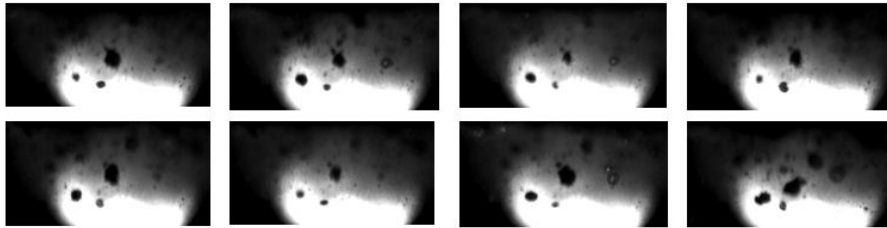


Рис. 2. Пульсации кавитационных образований в воде вблизи излучателя, полученные при скорости съемки 60 000 кадров/с, при частоте колебаний излучателя $f = 22$ кГц ($\times 300$)

Условием отсутствия динамического взаимодействия одиночных пузырьков между собой [4] можно считать пренебрежительно малую разницу между скоростью потока, создаваемого одним пузырьком и скоростью стенки второго пузырька $v_{пот} / v_{пуз} \ll 1$. В этом случае

$$R_{кр} = 3R_{max}; a_{кр} = 4R_{max}, \quad (3)$$

где $R_{кр}$ – критический радиус пузырька; R_{max} – максимальный радиус пузырька; $a_{кр}$ – критическое расстояние между центрами пузырьков.

При создании мощных ультразвуковых полей в ванне, заполненной жидкостью, под излучателем при амплитуде колебательных смещений выше 1,0 мкм образуется кавитационная область в виде белых облачков, соединенных нитями быстро перемещающихся пузырьков.

Структура и динамика кавитационной области оказывает значительное влияние на интенсивность ультразвукового воздействия. Результаты анализа скоростной съемки кавитационных процессов позволили выявить характер образования и пульсаций сложных пузырьковых структур.

Кавитационный захлопывающийся пузырёк существует очень непродолжительное время. Как показывает анализ скоростной съемки и результаты ряда исследований [6] после захлопывания пузырёк разделяется на множество осколков, которые в свою очередь синфазно пульсируют. При этом наблюдается формирование сложных пузырьковых образований,

назовём их кластерами (рис. 3).

Образованные под воздействием переменного звукового давления и находящиеся на небольшом расстоянии друг от друга пузырьки объединяются. Одновременно происходят два процесса – слияние пузырьков (коалесценция) и объединение мелких пузырьков в более крупные под влиянием сил сцепления с образованием общих структур (коагуляция). Коалесценция сопровождается переходом системы в состояние с более низкой свободной энергией [7].

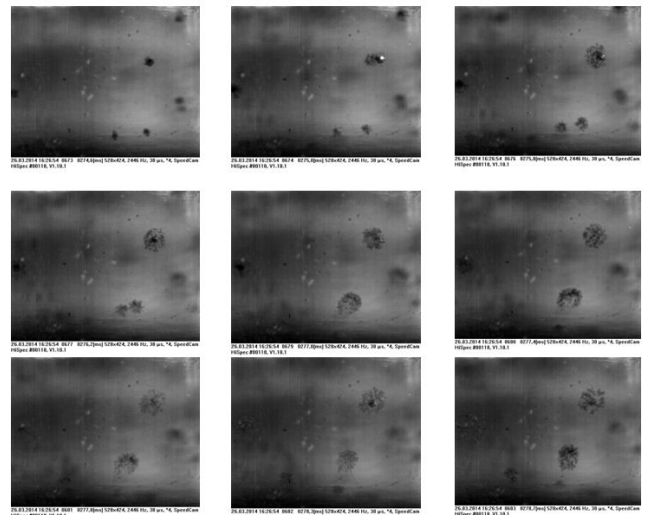


Рис. 3. Образование и пульсации кавитационного кластера (скорость съемки 2446 Гц)

Объединение пузырьков в кластеры происходит как в жидкости (рис. 4), так и у границы раздела фаз (рис. 5). Кроме пульсаций кавитационные кластеры поступательно перемеща-

ются в озвучиваемом объеме достаточно продолжительное время, соответствующее времени 10 ... 100 тыс. колебаний источника ультразвука.

Необходимо отметить, что размер кластера на протяжении всего его существования изменяется незначительно. При движении кластера часть пузырьков рассеивается за счет их захлопывания, а другая часть отделяется под действием сопротивления жидкости. В то же время происходит поглощение кластером других близкорасположенных пузырьков и кластеров, что приводит к пополнению его объема (рис. 6).

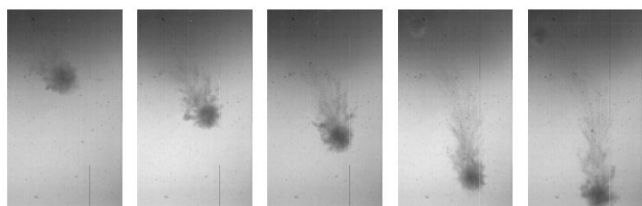


Рис. 4. Колебания и перемещение пузырькового кластера в керосине (частота колебаний – 6,9 кГц; скорость съемки – 500 кадров/с)

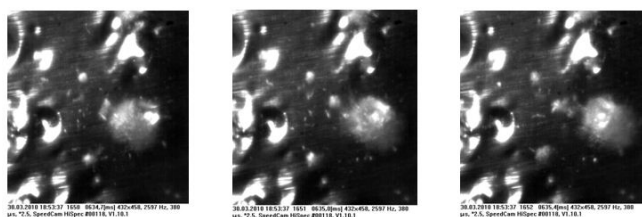


Рис. 5. Кинограмма пульсаций кластера у поверхности фольги, полученная при скорости съемки 2 600 кадров/с

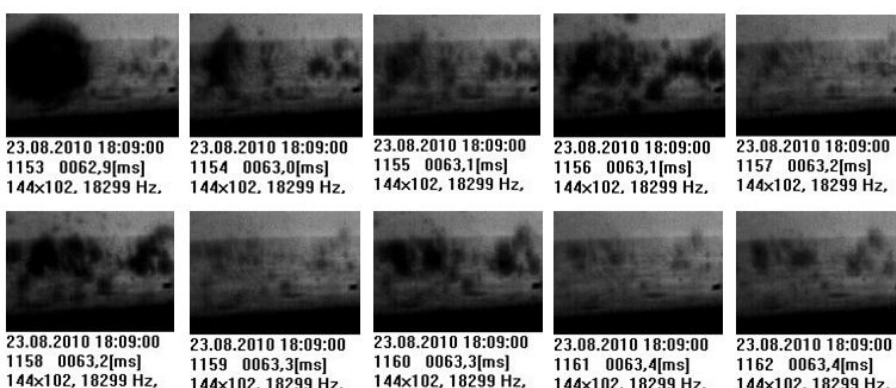


Рис. 8. Образование кластера, его пульсации и разрушение (скорость съемки 18 299 кадров/с)

На рис. 9. представлена кинограмма пульсаций пузырька у поверхности фольги. На 1 – 7 кадрах хорошо видно объединение пузырьков. После объединения колебания пузырька приводят к деформации фольги.

Кроме кавитационных кластеров необходимо выделить кавитационные образования, в



Рис.6. Кинограмма пульсаций кластера у поверхности образца, полученная при скорости съемки 1500 кадров/с

Кинограмма, полученная со скоростью в 2 раза превышающей скорость колебаний кавитационного кластера у поверхности зеркала, показана на рис. 7. На кадрах хорошо видно замыкание кластера внутрь, которое аналогично модели схлопывания пузырька, описанной в [8]. Очевидным отличием от известных моделей является замыкание не одиночного пузырька, а кластера.

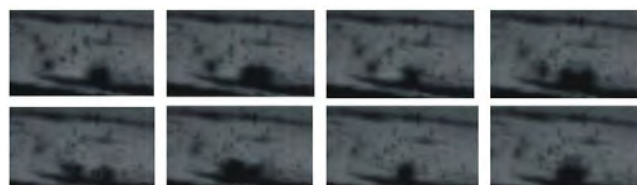


Рис. 7. Кавитационный кластер у поверхности зеркала (скорость съемки 14 500 кадров/с)

Отмечено, что при схлопывании (замыкании) кластера не происходит заметного ударного воздействия. Периодически пузырьки, образующие кластер, объединяются, пульсируют, разъединяются (рис. 8).

литературе получившее название кавитационных тяжей [4, 5]. Кавитационные тяжи обычно образуются у боковой поверхности излучателя, а также в зонах образования стоячих волн (рис. 10).

Динамика пульсаций кавитационного тяжа схожа с динамикой кластера. В этом случае

также происходят пульсации и схлопывания составляющих его пузырьков. Кинограмма кавитационного течения представлена на рис. 11.

Таким образом, для описания явлений, происходящих в области действия акустической кавитации, необходимо ввести понятие кавитационного кластера. Согласно наиболее распространенным определениям, кластеры (от англ. *cluster*, буквально – пучок, рой, скопление) – группы близко расположенных, тесно связанных друг с другом атомов, молекул, ионов, иногда ультрадисперсных частиц. По отношению к кавитационным образованиям наиболее подходит следующее определение кластера: объединение нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельная единица, обладающая определёнными свойствами.

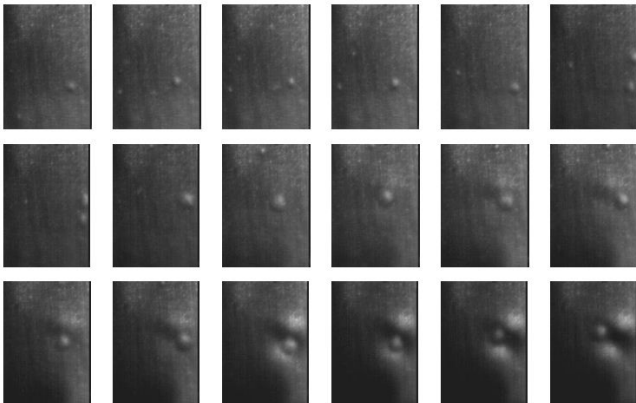


Рис. 9. Кинограмма деформации алюминиевой фольги кластером, полученная при скорости съемки 5 500 кадров/с

На основании проведенных исследований удалось предложить технологические рекомендации по совершенствованию очистки прецизионных изделий машиностроения с учётом неповреждаемости их поверхности в процессе обработки. Установлено, что наибольшее разрушение поверхности наблюдается в режиме развитой кавитации, т.е. через несколько периодов после включения колебаний.

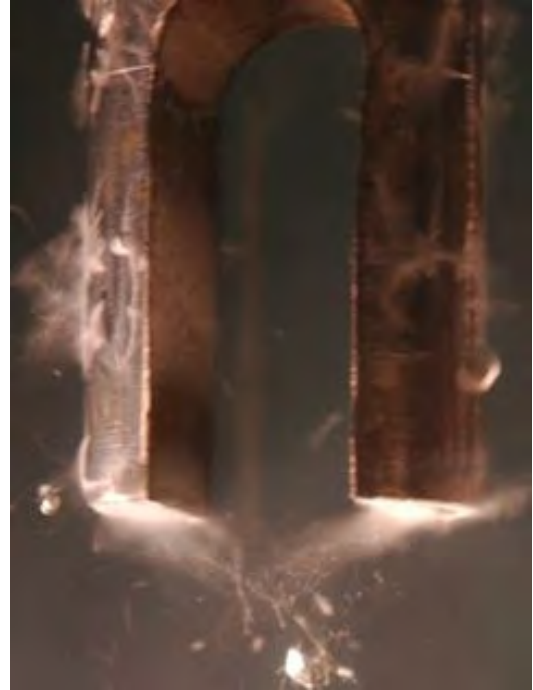


Рис. 10. Кавитационные течи у поверхности излучателя

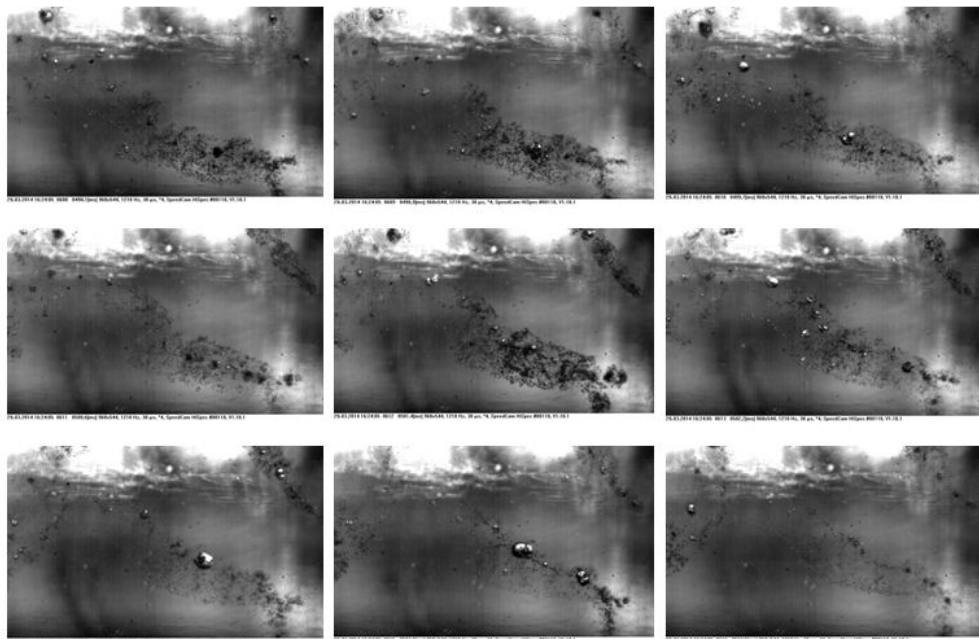


Рис. 11. Динамика пульсаций кавитационного течения (скорость съемки 1 218 кадров/с)

Снижение риска кавитационного разрушения деталей достигается применением импульсного воздействия. Выявлено, что при ультразвуковом воздействии со скважностью импульсов $S = 6/5 \dots 6/4$ не происходит заметных изменений поверхностного слоя объектов обработки (поскольку не успевает наступить режим развитой кавитации) и, в тоже время, удается обеспечить необходимую степень удаления загрязнений. Кроме того потребляемая оборудованием мощность снижается на 35 ... 40 %.

Другим технологическим приёмом, основанным на изучении кавитационных образований, является использование совместного воздействия основного высокоамплитудного источника излучения с амплитудой колебательных смещений 15 ... 50 мкм и частотой 20 ... 30 кГц и дополнительно низкоамплитудного источника, работающего на той же частоте. Общая зона устойчивого кавитационного воздействия формируется протяженностью $L = (4 \dots 5) l$ от зоны акустического воздействия основного источника излучения, где l – протяженность зоны активного акустического воздействия основного источника акустических колебаний.

Изучение динамики различных кавитационных образований позволяет осуществлять выбор рациональных режимов обработки. Учитывая специфику воздействия пузырьков, тяжелей и кластеров удается локализовать зону обработки в технологическом объёме, уменьшить время обработки, снизить потребляемую мощность, а также избежать кавитационных повреждений поверхностей изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Келлер, О.К. Ультразвуковая очистка / О.К. Келлер, Г.С. Кратыш, Г.Д. Лубяницкий. – Л.: Машиностроение, 1975. – 171 с.
2. Акуличев, В.А. Пульсация кавитационных полосей. Мощные ультразвуковые поля. – М.: Наука, 1968. – С.129 – 167.

3. **Физическая акустика** / под ред. У. Мезона. – М.: Мир, 1967. – 121 с.

4. **Основы физики и техники ультразвука**: Учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

5. **Розенберг, Л.Д.** Физика и техника мощного ультразвука. Мощные ультразвуковые поля. – М.: Наука, 1970. – 688 с.

6. **Казанцев, В.Ф.** Физические основы технологического применения ультразвука: учеб. пособ. М.:МАДИ(ГТУ), 2008. – 102с.

7. **Кузнецов, С.Ю., Ливанский, А.Н., Сундуков, С.К., Чендаров, А.С.** Методы оценки ультразвуковых эффектов в жидкой среде // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 10 (52). – С. 33–39.

8. **Сиротюк, М. Г.** Акустическая кавитация / отв. ред. В. А. Акуличев, Л. Р. Гаврилов; Тихоокеан. океанол. ин-т им. В. И. Ильичёва ДВО РАН. – М.: Наука, 2008. – 271 с.

REFERENCES

1. Keller, O.K. *Ultrasonic Purification* / O.K. Keller, G.S. Kratysh, G.D. Lubyantsky. – L.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 171.

2. Akulichev, V.A. *Pulsation of Cavitation Cavities. Power Ultrasonic Fields*. – M.: Science, 1968. – pp.129 – 167.

3. *Physical Acoustics* / under the editorship of U. Meson. – M.: World, 1967. – pp.121.

4. *Fundamentals of Physics and Engineering of Ultrasound: textbook for colleges* / B. A. Agranat, M. N. Dubrovina, N. N. Khavsky et al. – M.: Higher School, 1987. – pp. 352.

5. Rosenberg, L.D. *Physics and Engineering of Power Ultrasound. Power Ultrasonic Fields*. – M.: Science, 1970. – pp. 688.

6. Kasantsev, V.F. *Physical Fundamentals of Ultrasound Technological Application: textbook*. М.:МАДИ(СТУ), 2008. – pp.102.

7. Kuznetsov, S.Yu., Livansky, A.N., Sundukov, S.K., Chendarov, A.S. Assessment methods of ultrasonic effects in liquid environment // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – № 10 (52). – pp. 33–39.

8. Sirotiuk, M. G. *Acoustic Cavitation* / executive editor V. A. Akulichev, L. R. Gavrilov; Pacific Oceanology Institute FEB RAS. – M.: Science, 2008. – pp. 271.

Рецензент д.т.н. Л.Г. Петрова

