

ОЧИСТКА ТВЕРДЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПОЛЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

О. В. СУХАРЬКОВ *, Ю. М. ДУДЗИНСКИЙ **

* *Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова*

** *Одесский национальный политехнический университет*

Work is devoted to a problem of clearing of details of machines from operational asphalt-pitchy pollutants. Direct-flow hydrodynamic radiators short exponential pulses in which spectrum there is a series of harmonics are used. The short-range fields of these sources of a sound are investigated. Results of experimental researches on clearing through and stopped cylindrical apertures from model pollutants with the application of hydrodynamic radiators are submitted. Comparison of technology of clearing with use axially symmetric hydrodynamic and magnetostrictive converters is carried out.

ВВЕДЕНИЕ

Качество очистки во многом предопределяет срок службы и надёжность работы различных машин. Особенно тщательная очистка нужна для некоторых прецизионных деталей: поршневые пары двигателей внутреннего сгорания, топливной аппаратуры, аксиально-поршневых насосов и т.д. Затопленные струи не всегда обеспечивают необходимую чистоту поверхностей и мало эффективны для удаления абразивных микрочастиц и тяжелых асфальто-смолистых отложений. Традиционно применяются также химическое и электрохимическое обезжиривание, промывка органическими растворителями под давлением. Однако в современном машиностроении все большее применение находят детали и узлы из алюминиевых и магниевых сплавов, подвергающихся сильному коррозионному разрушению и химическому растрескиванию в агрессивных средах. Использование на производстве органических растворителей крайне нежелательно по причине пожарной, взрывобезопасности и экологии.

Введение акустических волн звуковых и ультразвуковых частот в моющий раствор позволяет ускорить процесс очистки, получить высокую степень чистоты поверхности [1]. Тогда во многих прикладных задачах можно заменить опасные органические растворители или кислоты щелочными растворами, либо использовать в качестве моющего раствора дистиллированную воду или химически нейтральную жидкость (толуол, трансформаторное масло и др.) с достаточно высоким порогом кавитации [2]. В последнем случае жидкости также являются диэлектриками, и основную роль в кавитационном разрушении пленок загрязнителей играет механическое воздействие кавитации на поверхность твердого тела. Поэтому необходимо увеличивать интенсивность упругих волн и найти оптимальные значения характеристик акустических полей [3, 4]: частоты и интенсивности. С чрезмерным повышением частоты кавитационный пузырек не достигает конечной стадии захлопывания, что снижает микроударное действие кавитации [4, 5] и одновременно увеличивается поглощение энергии акустических волн. Однако чрезмерное понижение рабочей частоты нежелательно из-за существенного увеличения габаритов резонансных излучателей магнитоэлектрического или пьезоэлектрического типа. Повышение интенсивности упругих волн выше некоторого значения приводит к сильной диффузии во внутреннюю полость каверны газа, растворенного в жидкости, и пузырек вырождается в пульсирующий [5, 6].

Существует предельное значение мощности возбуждающего сигнала, подводимого к электроакустическому преобразователю. Это связано с магнитным насыщением магнитострикционного и с электрическим насыщением пьезоэлектрического материала сердечника. Возможен также электрический пробой пьезокерамических пластин, размагничивание из-за нагрева магнитострикционного сердечника, а слишком большая амплитуда резонансных колебаний грозит механическим разрушением. Известно, что ускорить процесс очистки можно при повышении температуры рабочей жидкости или за счет некоторого избыточного статического давления в герметичной рабочей емкости [1, 2, 5]. В частности, в работе [4] указывается, что эрозия образцов будет расти до тех пор, пока отношение звукового к статическому давлению будет составлять $\approx 1/4$. При уменьшении этого отношения микроударное воздействие кавитации снижается. Это связано с действием двух факторов. С одной стороны при избыточном давлении повышается энергия, выделяемая при захлопывании одиночного пузырька, с другой – уменьшается концентрация микропузырьков при неизменной интенсивности акустического поля. А подводимая к электроакустическому преобразователю мощность ограничена в связи с выше изложенными причинами. В последнее время для интенсификации технологий, кроме перечисленных способов, стали применять акустические волны двух или нескольких частот [8, 9]. При этом действие нескольких акустических полей кратных (или не кратных) частот в процессах эмульгирования, диспергирования, очистки оказывается более эффективным, чем сумма воздействий каждой из этих частот [8]. В основе этого явления, возможно, лежат два механизма. Образующиеся в поле упругой волны микропузырьки имеют радиусы, отличающиеся на два порядка [5, 10] и, соответственно, широкий диапазон резонансных частот. Поэтому использование волн различных частот способствует захлопыванию большего количества каверн. С другой стороны при резонансе на низких частотах больших деформируемых каверн происходит отщепление мелких сферических пузырьков, которые, резонируя на высоких частотах, создают микроударные волны [11]. Однако, при таком подходе растет стоимость оборудования и, соответственно, готового продукта.

Среди перспективных методов можно выделить очистку деталей осесимметричными гидродинамическими излучателями (ГДИ) акустических волн [12, 13, 14], в которых часть кинетической энергии затопленной струи жидкости преобразуется в энергию акустических колебаний. Неоспоримые преимущества данных излучателей – отсутствие магнитного или электрического насыщения рабочего тела, простота эксплуатации, возможность работы в агрессивных средах, отсутствие источников высокого напряжения и вредных высокочастотных электромагнитных полей. В дискретном спектре тональных сигналов (рис. 1), генерируемых осесимметричными ГДИ, имеется набор гармоник, частоты которых могут отличаться в десятки раз [15, 16]. Следовательно, нет необходимости в использовании нескольких источников звука, что существенно упрощает аппаратную часть и снижает стоимость оборудования. Представляет интерес исследовать ближнее поле прямого осесимметричного ГДИ, особенности очистки сквозных и глухих отверстий и сравнить их с другими методами очистки.

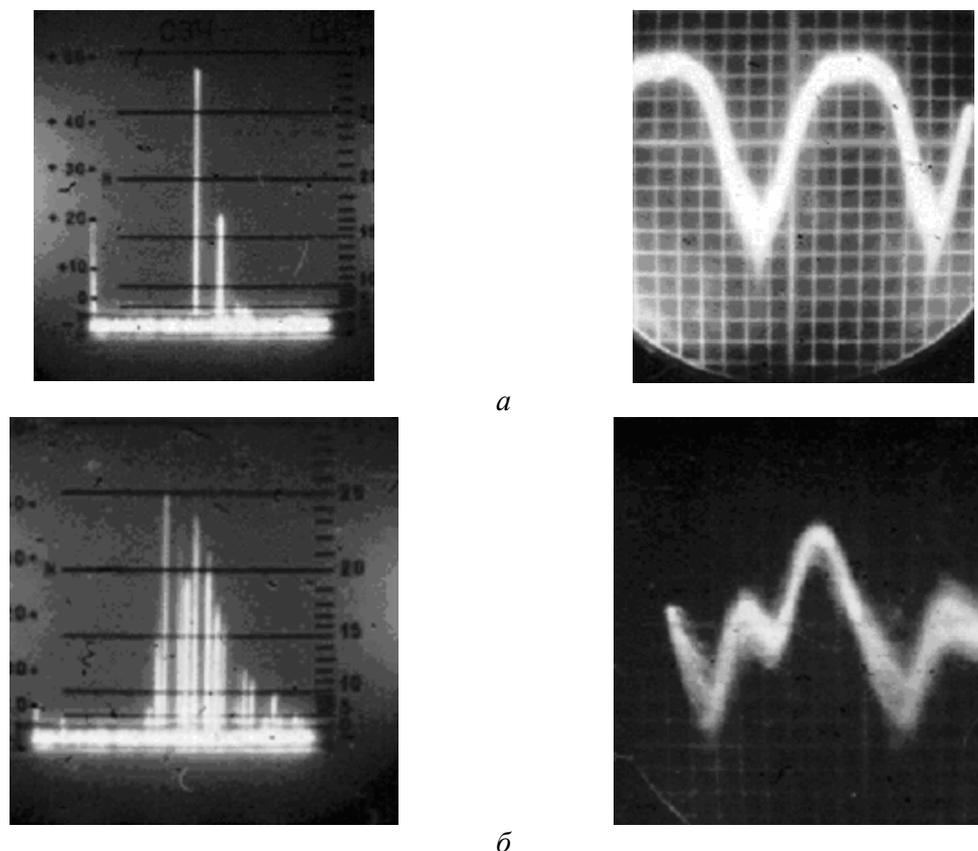


Рис. 1. Осциллограммы и соответствующие им спектрограммы акустических сигналов, излучаемых: а – противоточным ГДИ в трансформаторном масле, б – прямоточным ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием в воде

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки для исследования процесса очистки сквозных и глухих отверстий и фотография прямоточного ГДИ, работающего вблизи глухого дна. Рабочая емкость 1, заполнена водным раствором Лабомид – 101 (концентрация 20 г/л). Через фильтр 2 жидкость поступает на вход регулируемого насоса 3, питающего излучатель. Температура моющего раствора контролируется термометром 4, расход Q – индукционным расходомером, по показаниям которого можно вычислить скорость v истечения жидкости из сопла излучателя. С помощью образцового манометра 6 контролируется избыточное статическое давление, возникающего внутри цилиндрической гильзы 7 в процессе очистки глухих отверстий. Основными элементами цилиндрического ГДИ являются кольцевое сопло 8, кольцевой насадок 9 и ступенчатое цилиндрическое препятствие 11. В схеме установки предусмотрено съемное дно 13, в случае установки которого цилиндрическое отверстие становится глухим.

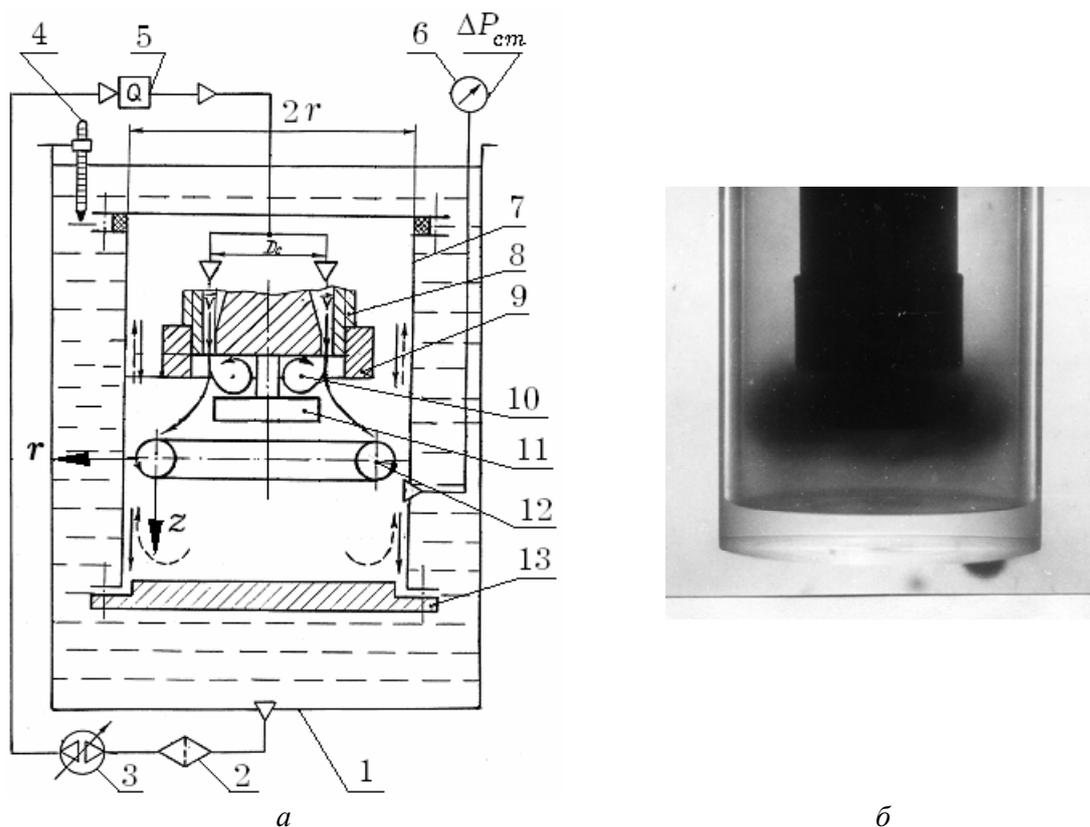


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (а) и работающий вблизи глухого дна ГДИ (б)

При включении насоса 3 моющий раствор из емкости 1 через фильтр 2 поступает по трубопроводу на вход ГДИ. Вытекающая из кольцевого сопла 8 струя, с регулируемой скоростью v , раздваивается. Часть потока уходит в окружающую среду, а другая заворачивается в проточку ступенчатого препятствия 11 и образует неустойчивый пульсирующий первичный кавитационный вихрь 10 в форме тора. Внутри него образуется развитая кавитация. Частотные характеристики излучателя определяются затопленной струей, которую можно рассматривать, как упругую оболочку [12, 15, 16]. В результате возбуждения вихрем 10 струйной оболочки она совершает изгибные колебания. В фазе растяжения свободного края струи каверны выносятся потоком наружу и образуют вторичную тороидальную область 12 развитой кавитации (рис. 2б). В этой области, происходит коллапс паровых и парогазовых пузырьков, в результате чего генерируется тональный акустический сигнал (рис. 1). Поэтому вторичный вихрь 12 можно считать зоной гидродинамического звукообразования.

В настоящей работе для оценки эффективности очистки прецизионных деталей с помощью ГДИ использовался метод весового определения остаточного загрязнителя очищаемых деталей [2, 17] на аналитических весах с ценой деления $\delta m = 0.01 \text{ мг}$:

$$\Delta m = m_1 - m_0,$$

где m_1 – масса образца с загрязнителем; m_0 – масса чистого образца. Эффективность очистки деталей удобно оценивать по очищающей способности излучателя, которая выражается как величина, обратная времени очистки, и определяется по формуле [1]:

$$\beta = \frac{10^3}{t},$$

где t – время очистки, 10^3 – масштабный коэффициент.

На первом этапе исследовалась очистка от модельных загрязнителей, на втором – от тяжелых асфальтосмолистых отложений (нагар). В качестве модельного использовался прочный загрязнитель, разработанный в ГОСНИТИ [2]. Выбор этого состава обусловлен тем, что асфальтосмолистые отложения относятся к сложным эксплуатационным загрязнениям с высокой степенью адгезии к поверхности (0.3...1.0) МПа. Состав загрязнителя:

- 45.7% битума нефтяного (ГОСТ 781 – 78),
- 24.5% дизельного масла ДС-8 (ГОСТ 8581 – 78),
- 11.4% песка кварцевого ПК-3 (ГОСТ 9077 – 82),
- 18.4% литейного кокса КЛ-3.

Загрязнитель готовился по следующей технологии. Расплавленный битум при температуре 150°C смешивали с дизельным маслом. Кокс и кварц отдельно перемешивали и нагревали до 100°C . Расплавленную смесь битума с маслом соединяли с подогретой смесью кокс – песок и тщательно перемешивали в термостате при температуре 150°C до образования однородной структуры. Загрязнитель наносился на подогретые до $(175...185)^{\circ}\text{C}$ образцы равномерным слоем толщиной $(120...150)$ мкм. Следовательно на поверхность площадью 1см^2 наносилось примерно $(4.5...5.5)$ мг модельного загрязнителя.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила установить, что для модельных загрязнителей доверительный интервал составлял не более 10% при надёжности 0.95, если остаточная масса попадала в интервал $(0.008...0.012)$ мг/см². Это достаточно для объективной оценки эффективности очистки прецизионных деталей по критерию, приведенному в монографии [2]. На первом этапе проводились исследования по очистке дна глухого отверстия от модельного загрязнения. Зависимости $\beta(z)$ эффективности очистки от расстояния между дном и торцом ступенчатого препятствия представлены на рис. 3а. В экспериментах были использованы три ГДИ с одинаковой шириной ($a = 0.5\text{мм}$) и различными диаметрами D_c кольцевого щелевого сопла: 13.0 мм (кривая 1), 19.5 мм (кривая 2), 26.0 мм (кривая 3). Все зависимости имеют ярко выраженный максимум, который соответствует такому расстоянию z , когда очищаемая плоская поверхность расположена у границы зоны звукообразования – вторичной тороидальной области развитой кавитации (рис. 2б).

На втором этапе модельных экспериментов проводились исследования по очистке боковой поверхности сквозного отверстия. Зависимости $\beta(D)$ эффективности очистки от диаметра D отверстия представлены на рис. 3б. Номера кривых соответствуют осесимметричным ГДИ с перечисленными выше геометрическими параметрами. В этом случае также имеет место максимальная эффективность очистки, когда боковая поверхность находится вблизи зоны звукообразования.

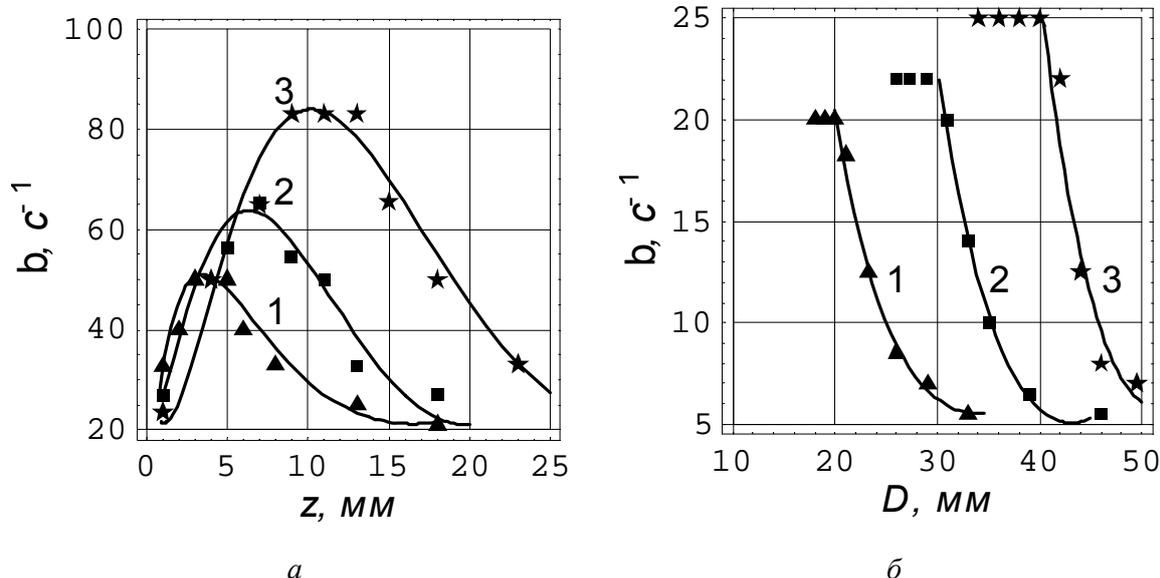


Рис. 3. Зависимости от расстояния до зоны звукообразования эффективности очистки:
а – дна глухого отверстия; б – внутренней поверхности сквозного отверстия

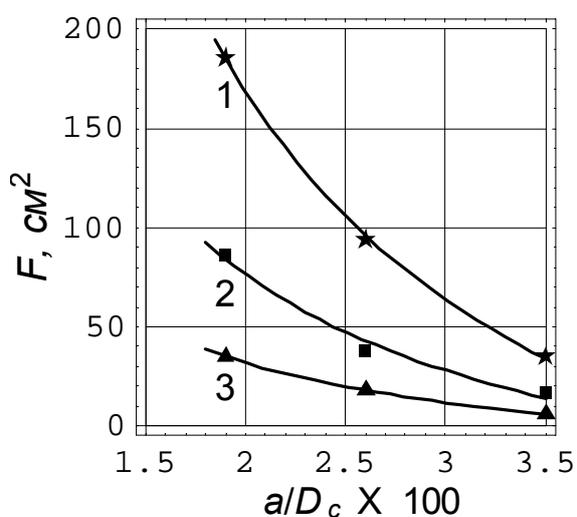


Рис. 4. Зависимость площади очищенной поверхности от соотношения толщины и среднего радиуса кольцевого сопла:
1 – застаревшие масла и смазки;
2 – тяжелые асфальтосмолистые отложения;
3 – нагар

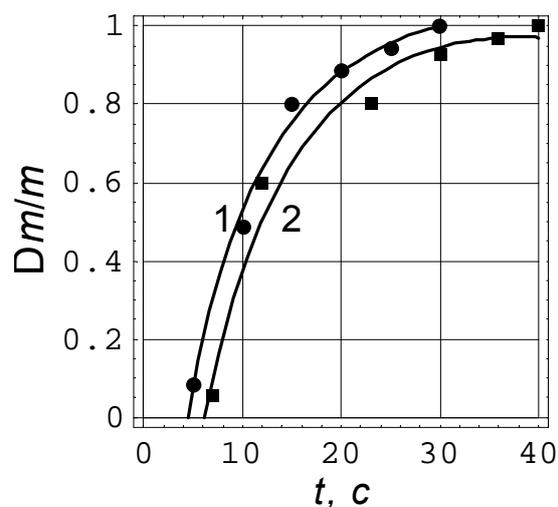


Рис. 5. Зависимость остаточного загрязнителя от времени озвучивания:
1 – осесимметричным ГДИ,
2 – магнитострикционным излучателем

На третьем этапе очистке подвергались плоские поверхности деталей автомобильных двигателей от трех типов характерных загрязнений: застаревшие масла и смазки, тяжелые асфальтосмолистые отложения, нагар. В ходе экспериментов очищаемые поверхности располагались на оптимальном расстоянии ($z = 0.3D_c$) от торца ступенчатого пре-

пятствия излучателя. Для очистки всей поверхности необходимо осуществлять перемещение детали относительно зоны звукообразования излучателя. Поэтому представляет оценить площадь очистки. Зависимость $F(a/D_c)$ площади очищенной поверхности от геометрических параметров ГДИ для различных типов загрязнений представлены на рис. 4. С ростом соотношения толщины и среднего радиуса затопленной кольцевой струи значение F уменьшается. Также видно, что площадь очищенной поверхности тем меньше, чем выше степень адгезии загрязнителя к материалу детали.

Представляет интерес провести сравнение эффективности очистки с помощью осесимметричного ГДИ и магнитострикционного излучателя, полученными ранее [10]. Зависимости массы остаточного загрязнителя (в относительных единицах) от времени озвучивания плоских стальных образцов представлены на рис. 5. Экспериментальные точки – результаты усреднений по семи образцам. При использовании прямочного ГДИ (кривая 1) время полной очистки составляет приблизительно $30c$, магнитострикционного излучателя – $50c$. В первом случае спектр сигнала полигармонический (рис. 1), во втором – моногармонический. Этот результат согласуется с выводами, представленными в работе [8].

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Проведено экспериментальное исследование по очистке сквозных и глухих цилиндрических отверстий с помощью осесимметричных излучателей от модельных загрязнителей, имитирующих тяжелые асфальтосмолистые отложения. Оценена зона наибольшей эффективности этих источников звука.
2. Оценена зависимость площади очистки поверхности от геометрических параметров осесимметричных гидродинамических излучателей и степени адгезии загрязнителя.
3. Проведено сравнение результатов использования в задаче очистки осесимметричных и магнитострикционных излучателей. Показано преимущество коротких импульсов, в спектре которых имеется ряд гармоник, по сравнению с моногармоническим сигналом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ультразвуковая технология / Под ред. Б. А. Аграната.– М.: Металлургия, 1974. – 503с.
2. Тельнов А. Ф., Козлов Ю. С., Кузнецов О. К. Моющие средства, их использование в машиностроении и регенерация.– М.: Машиностроение, 1993.– 208с.
3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия /Под ред. И. П. Голяминой.– М.: Сов. Энциклопедия, 1979.– С. 242 – 247.
4. Costes, S., Tierce, P. Characterization of efficiency of ultrasonic equipment: experimental results of different kinds of transducers/ Proceedings of the Third Meeting on the Applications of Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing.– Paris, 2001.– P. 137 – 142.

5. *Сиротюк М. Г.* Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // В кн. Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга.– М.: Наука, 1968.– С. 167 – 220.
6. *Matsumoto Y.* Micro Bubble and Bubble Cluster Dynamics in Ultrasound Field // 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics.– Moscow, August 19 – 23, 2002.– P. 963 – 970.
7. Ультразвук. Маленькая энциклопедия /Под ред. И. П. Голяминой.– М.: Сов. Энциклопедия, 1979.– С. 169 – 172.
8. *Dezhkunov N. V., Francescutto A., Ciuti P.* Enhancement of the Conversion and Concentration of Energy in a Multibubble Cavitation Zon // 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics.– Moscow, August 19 – 23, 2002.– P. 919 – 926.
9. *Maksimov A. O., Leighton T. G., Sosedko E. V.* Nonlinear Transient Bubble Oscillations// 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics.– Moscow, August 19 – 23, 2002.– P. 987 – 990.
10. *Mettin R., Luther S., Ohl C.-D., Lauterborn W.* Acoustic Cavitation Structures and Simulations by a Particle Model // Ultrason. Sonochem, 1999.– **6**.– P. 25 – 29.
11. *Voronin D. V., Sankin G. N., Teslenko V. S., Mettin R., Lauterborn W.* Bimodal Bubble Cluster as a Result of Bubble Fragmentation in a Bipolar Acoustic Pulse // 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics.– Moscow, August 19 – 23, 2002.– P. 931 – 934.
12. *Дудзинский Ю. М.* Динамика затопленной осесимметричной кольцевой струи // Доповіди НАН України.– 2006.– №1.– С. 46 – 51.
13. *Дудзінський Ю. М.* Змушені осесиметричні коливання циліндричної оболонки в потоці суцільного середовища // Машинознавство.– 2006.– №4(106).– С. 26 – 29.
14. *Дудзинский Ю. М., Сухарьков А. О., Сухарьков О. В.* Очистка прецизионных деталей машин в мощных акустических полях // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Межд. сб. науч. трудов.– Донецк: Дон. НТУ, 2003.– С. 123 – 127.
15. *Дудзінський Ю. М.* Динаміка струминної оболонки і спектр акустичного сигналу // Вісник Київського ун-ту, серія: фізико-мат. науки.– 2006.– №4.– С. 89 – 97.
16. *Дудзінський Ю. М., Сухарьков О. В.* Спектр звуку, генерованого зануреною осесиметричною струминною оболонкою // Мат. методи та фізико – мех. поля.– 2007.– №1.– С. 198 – 202.
17. *Агранат Б.А., Гутнова Л.Б., Лямшев Л.М.* О методах оценки эффективности установок ультразвуковой очистки // Акустический журнал. – 1972. – **18**. – Вып.3. – С. 337 – 342.