

УДК 621.7.022.6:621.81

ОЧИСТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ В ПОЛЕ КОРОТКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

Ю. М. ДУДЗИНСКИЙ*, О. В. СУХАРЬКОВ**

*Одесский национальный политехнический университет

**Одесская национальная академия связи

Получено 13.02.2007

Работа посвящена проблеме очистки деталей машин от эксплуатационных асфальто-смолистых загрязнений. Используются прямоточные гидродинамические излучатели коротких экспоненциальных импульсов, в спектре которых имеется ряд гармоник. Исследовано ближнее поле этих источников звука. Получены пространственные зависимости нелинейного затухания уровня и интенсивности акустических импульсов. Представлены результаты экспериментальных исследований по очистке сквозных и глухих цилиндрических отверстий от модельных загрязнителей с помощью гидродинамических излучателей. Установлена корреляция между удельной поглощенной мощностью и эффективностью очистки. Проведено сравнение технологий очистки при использовании осесимметричных гидродинамических и магнитострикционных преобразователей.

Роботу присвячено проблемі очищення деталей машин від експлуатаційних асфальто-смолистих забруднень. Використовуються прямоточні гідродинамічні випромінювачі коротких експоненціальних імпульсів, спектр яких містить ряд гармонік. Досліджено ближнє поле цих джерел звуку. Отримані просторові залежності нелінійного загасання рівня й інтенсивності акустичних імпульсів. Представлені результати експериментальних досліджень з очищення наскрізних і глухих циліндричних отворів від модельних забруднювачів за допомогою гідродинамічних випромінювачів. Установлено кореляцію між питомою поглиненою потужністю й ефективністю очищення. Проведено порівняння технологій очищення при використанні осесиметричних гідродинамічних і магнітострікційних перетворювачів.

The study is devoted to the problem of clearing the machine parts from the consumption asphalt-resin pollutants. The direct-flow hydrodynamic radiators of short exponential pulses, with spectra containing a series of harmonics, were used. The near fields of such sound sources have been investigated. The dependences for the nonlinear damping of the level and intensity of the acoustic pulses were obtained. The results of experimental researches on clearing the through and blind cylindrical apertures from the model pollutants using hydrodynamic radiators have been carried out. The correlation between the specific absorbed power and clearing efficiency has been shown. Clearing technologies with the use of axisymmetric hydrodynamic and magnetostrictive transducers were compared.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных направлений использования ультразвуковых технологий в машиностроении является очистка поверхностей деталей и узлов от различных технологических и эксплуатационных загрязнений. Качество очистки во многом предопределяет срок службы и надежность работы различных машин. Особенно тщательно она должна проводиться для некоторых прецизионных деталей, например, поршневых пар двигателей внутреннего сгорания, топливной аппаратуры, аксиально-поршневых насосов и т. д. Долгое время на машиностроительных заводах для этих целей применяли паровой барботаж деталей в моющих растворах и затопленные струи, которые не всегда обеспечивают необходимую чистоту поверхностей и мало эффективны для удаления абразивных микрочастиц и тяжелых асфальто-смолистых отложений. Используются также другие методы очистки – 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. Поэтому химические методы очистки не соответствуют современным требованиям технологических процессов. Использование на производстве органических растворителей крайне нежелательно и из соображений экологической, пожарной и взрывобезопасности.

Введение акустических волн звуковых и ультразвуковых частот в моющий раствор позволяет ускорить процесс очистки, получить высокую степень чистоты поверхности [1]. При этих условиях 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 с достаточно высоким порогом кавитации (толуол, трансформаторное масло и др.) [2]. В последнем случае жидкости, кроме всего прочего, являются диэлектриками, а основную роль в разрушении пленок загрязнителей играет механическое воздействие кавитации на поверхность твердого

тела. Поэтому необходимо увеличивать интенсивность упругих волн и находить оптимальные значения характеристик акустических полей – частоты и интенсивности [3, 4]. Известно, что при чрезмерном повышении частоты кавитационный пузырь не достигает конечной стадии захлопывания, что снижает микроударное действие кавитации [4, 5] и одновременно увеличивается поглощение энергии акустических волн. Однако сильное понижение рабочей частоты также нежелательно из-за существенного увеличения габаритов резонансных излучателей магнитострикционного или пьезоэлектрического типов.

С одной стороны, превышение интенсивности упругих волн над некоторым значением приводит к сильной диффузии во внутреннюю полость каверны газа, растворенного в жидкости. Тогда пузырек вырождается в пульсирующий (без схлопывания) [5, 6]. С другой стороны, всегда существует предельно возможное значение мощности возбуждающего сигнала, подводимого к электроакустическому преобразователю. Это связано с магнитным насыщением магнитострикционного и электрическим насыщением пьезоэлектрического материала сердечника. Кроме того, чрезмерное увеличение подводимой к излучателю мощности может привести к электрическому пробою пьезокерамических пластин или размагничиванию из-за нагрева магнитострикционного сердечника. Далее, слишком большая амплитуда резонансных колебаний грозит механическим разрушением устройства. Поэтому на практике зачастую, ограничивая мощность возбуждения активных элементов излучателей, создают акустические поля высокой интенсивности с помощью концентраторов или фокусирующих устройств [5, 7]. Однако применение стержневых концентраторов уменьшает объем рабочей зоны и, соответственно, увеличивает длительность технологического процесса. Сферические фокусирующие устройства сложны в изготовлении и дороги, что приводит к высокой себестоимости готового продукта.

Известно, что ускорить процесс очистки можно повышением температуры рабочей жидкости или за счет некоторого избыточного статического давления в герметичной рабочей емкости [1, 2, 5]. Оптимальное значение температуры находится в диапазоне от 40 до 50°C для водных растворов и от 15 до 20°C – для органических растворителей. Согласно литературным источникам [1, 5], создание в герметичной рабочей емкости избыточного статического давления порядка 0.2–0.4 МПа приводит к возрастанию в пять–шесть раз эрозии алюминиевых и свинцовых образцов. Это дает возмож-

ность существенно ускорить процессы эмульгирования, диспергирования, очистки и др. В частности, в работе [4] указывается, что эрозия образцов будет расти до тех пор, пока отношение звукового давления к статическому не составит $\sim 1/4$. 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, а с другой – уменьшается концентрация микропузырьков при неизменной интенсивности акустического поля. Подводимая к электроакустическому преобразователю мощность всегда ограничена.

В последнее время для интенсификации технологических процессов, кроме перечисленных способов, стали применять акустические волны, содержащие две и более частот [11, 12]. 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 по отдельности [11]. В основе этого явления, возможно, лежат два механизма. С одной стороны, образующиеся в поле упругой волны микропузырьки могут иметь радиусы, различающиеся на два порядка [5, 13] и, соответственно, широкий диапазон резонансов. 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 [14].

Среди перспективных методов можно выделить очистку деталей осесимметричными гидродинамическими излучателями акустических волн (ГДИ) [8–10], в которых часть кинетической энергии затопленной струи жидкости преобразуется в энергию акустических колебаний. Неоспоримыми преимуществами данных излучателей являются 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, 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. Исходя из это-

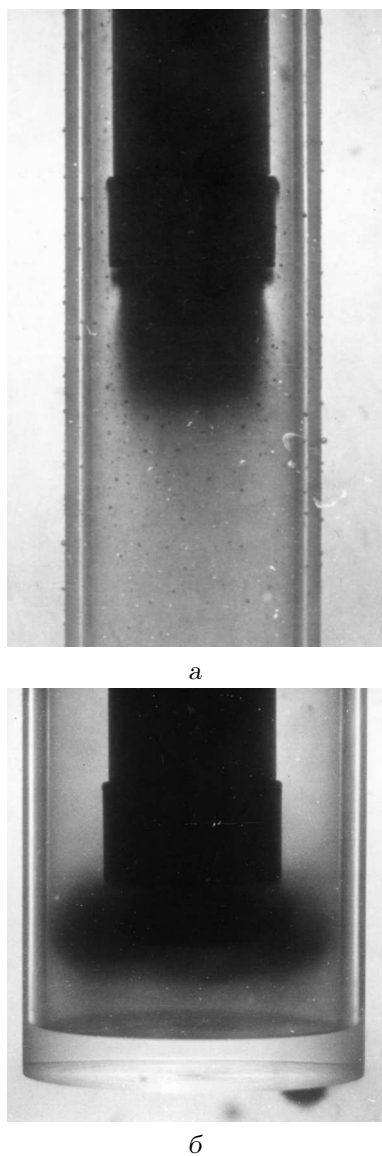


Рис. 1. Фотографии работающего прямооточного гидродинамического излучателя:
а – в сквозном канале;
б – в глухом канале вблизи дна

го, представляется интересным исследовать ближнее поле прямооточного осесимметричного ГДИ, особенности очистки сквозных и глухих отверстий и сравнить их с другими методами очистки.

1. НЕЛИНЕЙНОЕ ЗАТУХАНИЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В данном исследовании использован ряд прямооточных ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием [8, 17], имеющих различные геометрические параметры. Проводилась очистка скво-

зных и глухих цилиндрических отверстий от модельных загрязнителей. На рис. 1, а представлена фотография на просвет излучателя, генерирующего акустическое поле в сквозном цилиндрическом канале ограниченного радиуса, а на рис. 1, б – вблизи дна глухого канала.

Как уже упоминалось, осесимметричными ГДИ генерируются негармонические короткие импульсы, в спектре которых, кроме основной, имеются высшие гармоники. Типичные огибающие таких акустических сигналов релаксационного типа и их спектры представлены на рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения от частоты приводит к тому, что при распространении негармонических волн спектральные составляющие импульса затухают неодинаково [17]. При этом видоизменяется форма импульса, а также меняется соотношение между энергией импульса и поглощенной энергией в данной точке [18].

Ранее было показано, что представленные на рис. 2 отдельные импульсы можно описать суммой двух экспонент [19, 20]. Так, для плоских волн

$$p = p_0 \exp \left[-\beta_1 \left(t - \frac{z}{c} \right) \right] - p_0 \exp \left[-\beta_2 \left(t - \frac{z}{c} \right) \right], \quad (1)$$

а для сферических –

$$p = \frac{p_0}{r} \exp \left[-\beta_1 \left(t - \frac{r}{c} \right) \right] - \frac{p_0}{r} \exp \left[-\beta_2 \left(t - \frac{r}{c} \right) \right]. \quad (2)$$

Здесь p_0 – амплитуда импульса на границе активной зоны звукообразования; t – время; z, r – расстояние от границы зоны звукообразования до точки поля вдоль оси и вдоль радиуса цилиндрического отверстия соответственно; c – скорость звука; β_1, β_2 – безразмерные коэффициенты, соответствующие крутизне фронтов импульса.

Анализ осциллограмм показал, что длительность τ одиночного импульса составляет примерно $T_0/4$, где период следования определяется частотой f_0 основного тона – низшей гармоникой спектра. Исходя из этого, можно подобрать подходящие значения β_1, β_2 . В работах [19, 20] получены выражения для нелинейного затухания экспоненциальных импульсов в плоской и сферически расходящейся волнах. В статье [21] установлена корреляция между нелинейным поглощением коротких экспоненциальных импульсов и эрозией металлических образцов.

Можно предположить, что в поперечном сечении наблюдается цилиндрическая расходящаяся

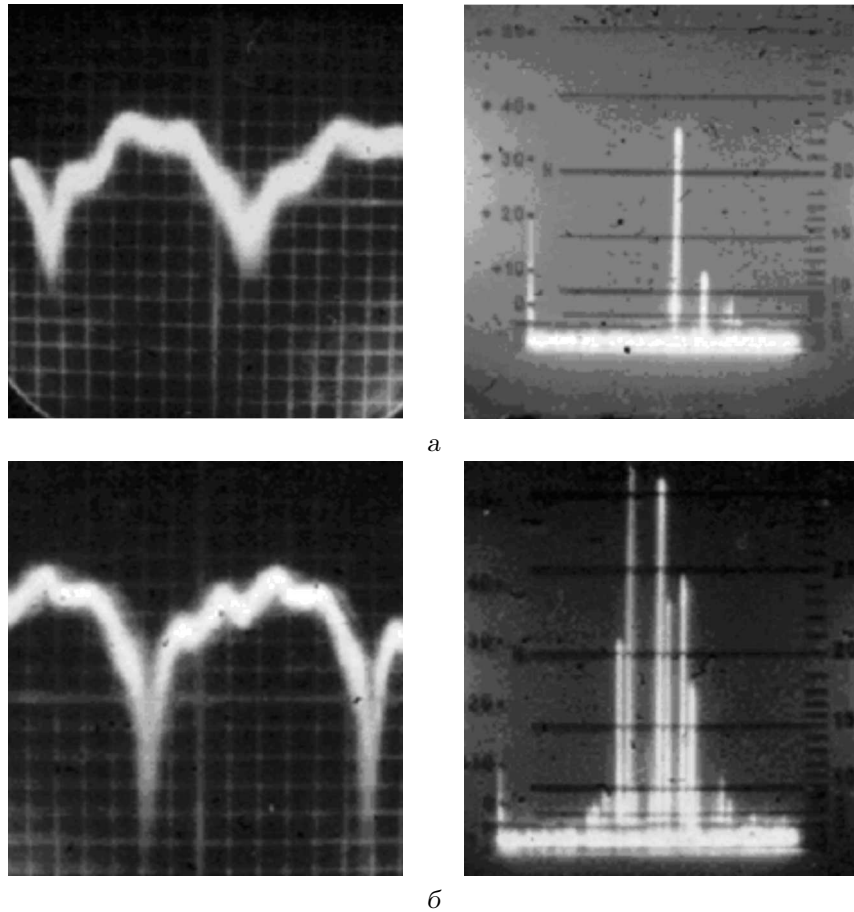


Рис. 2. Осциллограммы и соответствующие им спектрограммы акустических сигналов:

а – для противоточного ГДИ в трансформаторном масле;
 б – для прямоточного ГДИ с кольцевым соплом
 и ступенчатым препятствием в воде

волна, для которой необходимо получить зависимости интенсивности $I_{\text{cyl}}(r)$ и уровня $p_{\text{cyl}}(r)$ звука от радиальной координаты r . По аналогии с работой [19], представим короткий импульс в цилиндрически расходящейся волне суммой двух экспонент:

$$p = \frac{p_0}{\sqrt{r}} \left[\exp\left(-\beta_1 \left(t - \frac{r}{c}\right)\right) - \exp\left(-\beta_2 \left(t - \frac{r}{c}\right)\right) \right]. \quad (3)$$

Тогда функция колебательной скорости может быть найдена из уравнения движения жидко-

сти [22]:

$$v = -\frac{1}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{p_0}{\rho c \sqrt{r}} \left[\left(\frac{1}{r} - \frac{\beta_1}{c} \right) \exp\left(-\beta_1 \left(t - \frac{r}{c}\right)\right) - \left(\frac{1}{r} - \frac{\beta_2}{c} \right) \exp\left(-\beta_2 \left(t - \frac{r}{c}\right)\right) \right].$$

Используем теорему Рэлея о спектральной плотности энергии [23], учтя, что запаздывание по времени на $\Delta t = R/c$ не изменяет спектральной плотности. При квадратичной зависимости коэффициента поглощения в среде от частоты получим следующее выражение для интенсивности акустиче-

ского поля:

$$I(r) = \int_0^{\infty} p v dt = \frac{p_0^2 (\beta_2 - \beta_1)^2}{\pi \rho c r^2} \times \\ \times \int_0^{\infty} \frac{\exp(-\alpha_0 \omega^2 r) d\omega}{\omega^4 + \omega^2 (\beta_1 - \beta_2)^2 + \beta_1^2 \beta_2^2},$$

где ρ – плотность жидкости; $\alpha_0 = 2\alpha/\omega^2$; α – коэффициент затухания звука в жидкости; ω – круговая частота. Разложив подынтегральное выражение на простые дроби, приходим к табличному интегралу [24] и окончательно имеем

$$I_{\text{cyl}}(r) = \frac{p_0^2 (\beta_1 - \beta_2)}{2 \rho c r (\beta_2 + \beta_1) \beta_1^2} \times \\ \times [\beta_1 \Pi_0(\xi_1) - \beta_2 \Pi_0(\xi_2)],$$

$$\Pi_0(\xi) = [1 - \Phi(\xi)] \exp(\xi^2), \quad (4)$$

$$\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi,$$

$$\xi_1 = \beta_1 \sqrt{\alpha_0 r}, \quad \xi_2 = \beta_2 \sqrt{\alpha_0 r}.$$

Здесь функция $\Pi_0(\xi)$ выражается через интеграл вероятности $\Phi(\xi)$. Соответственно, эффективное значение звукового давления будет

$$p_{\text{cyl}}(r) = p_0 \times \\ \times \sqrt{\frac{(\beta_1 - \beta_2)}{2r(\beta_2 + \beta_1)\beta_1^2} [\beta_1 \Pi_0(\xi_1) - \beta_2 \Pi_0(\xi_2)]}. \quad (5)$$

Большинство измерительных приборов регистрирует эффективное значение уровня сигнала. Поэтому необходимо установить соотношение между эффективным p и амплитудным p_0 значениями давления. Воспользуемся известным соотношением [25]

$$p^2 = \frac{p_0^2}{T_0} \int_0^{T_0} [\exp(-\beta_1 t) - \exp(-\beta_2 t)]^2 dt,$$

где период следования импульсов определяется через частоту основного тона сигнала $T_0 = 1/f_0$. Тогда

$$p_0 = p \sqrt{\frac{T_0}{\int_0^{T_0} [\exp(-\beta_1 t) - \exp(-\beta_2 t)]^2 dt}}. \quad (6)$$

Интеграл в выражении (6) вычисляется элементарно и конечное выражение здесь не приводится.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 3 представлена схема экспериментальной установки для исследования процесса очистки сквозных и глухих отверстий. Рабочая емкость 1 заполнена водным раствором Лабомид-101 (концентрация 20 г/л). Через фильтр 2 жидкость поступает на вход регулируемого насоса 3, питающего осесимметричный ГДИ. 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, возникающее внутри цилиндрической гильзы 7 в процессе очистки глухих отверстий. Основными элементами прямого ГДИ являются кольцевое сопло 8, кольцевая насадка 9 и ступенчатое цилиндрическое препятствие 11. В схеме установки предусмотрено съемное дно 13, в случае установки которого цилиндрическое отверстие становится глухим [26].

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

Очистке подвергалась внутренняя поверхность стальных гильз 7, диаметр $2r$ которых изменялся от 18 до 50 мм, а высота внутренней поверхности оставалась неизменной (50 мм). Специальное координатное устройство позволяло плавно перемещать ГДИ по оси гильзы с фиксированной скоростью 2, 5 и 10 мм/с. Время очистки де-

талей определялось числом проходов излучателя по оси гильзы. Следует отметить, что возвратно-поступательное движение ГДИ при таких малых скоростях не влияет на его работу и процесс очистки. Экспериментальные исследования и оценка эффективности очистки внутренних поверхностей деталей проводились согласно методике, представленной в работе [27].

Для оценивания эффективности очистки прецизионных деталей с помощью ГДИ нами применялся метод весового определения остаточного загрязнителя [2, 28]. В качестве модельного использовался прочный загрязнитель, разработанный в ГОСНИТИ, моделирующий тяжелые асфальто-смолистые отложения в двигателях внутреннего сгорания [2]. Такой выбор обусловлен тем, что асфальто-смолистые отложения относятся к сложным эксплуатационным загрязнениям с высокой степенью адгезии.

Состав загрязнителя, моделирующий асфальто-смолистые отложения, был таким:

- 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 [2]. Расплавленный при температуре 150°C битум смешивали с дизельным маслом. Кокс и кварц по отдельности 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 массы. Загрязнитель наносился на подогретые до 175÷185°C образцы. При этом нанесенное шпателем загрязнение разжижалось и покрывало поверхность равномерным слоем толщиной 120÷150 мкм. Следовательно, на поверхность детали площадью 1 см² наносилось примерно 4.5÷5.5 мг модельного загрязнителя. Затем образцы выдерживались при комнатной температуре в течение двух часов. Масса пленки загрязнителя определялась весовым методом по формуле

$$m = m_1 - m_0,$$

где m_1 – масса образца с загрязнителем; m_0 – масса очищенного образца.

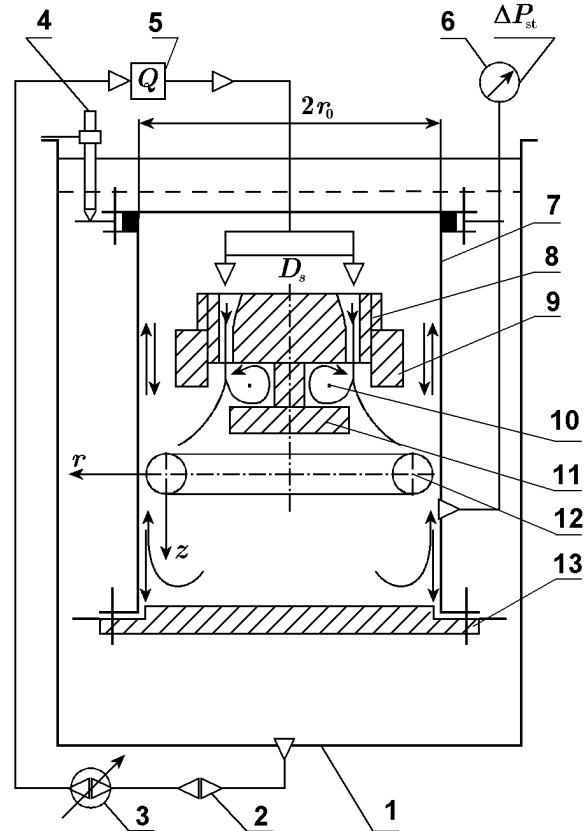


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Объектами очистки служили внутренние боковые поверхности сквозных и глухих цилиндрических гильз. Модельные загрязнители наносились на предварительно отшлифованные наждачной бумагой (N 250) и обезжиренные ацетоном образцы. Для набора статистики в каждом временном интервале озвучивания использовались по семь образцов. Образцы взвешивались до и после очистки на аналитических весах с точностью $\delta m = 0.01$ мг. Критерием качественной очистки служил остаток загрязнений на поверхности детали, не превышающий 0.01 мг/см², что соответствует высшему, десятому баллу макроочистки [2]. Эффективность очистки деталей оценивалась по очищающей способности гидродинамического излучателя, которая выражается как величина, обратная времени очистки, и определяется по формуле [1]

$$\beta = \frac{10^3}{t}. \quad (7)$$

Здесь t – время очистки, 10^3 – коэффициент, позволяющий представить результат в форме, удобной для сравнения.

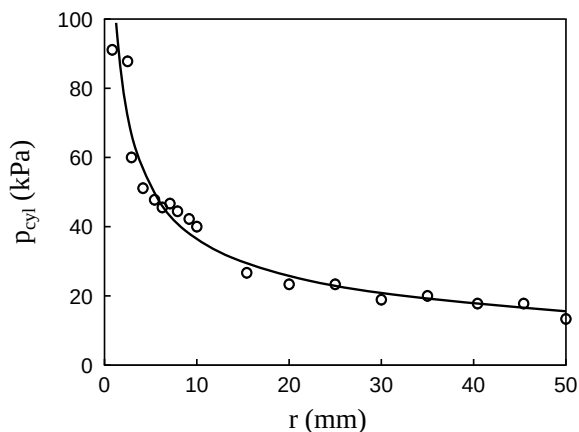
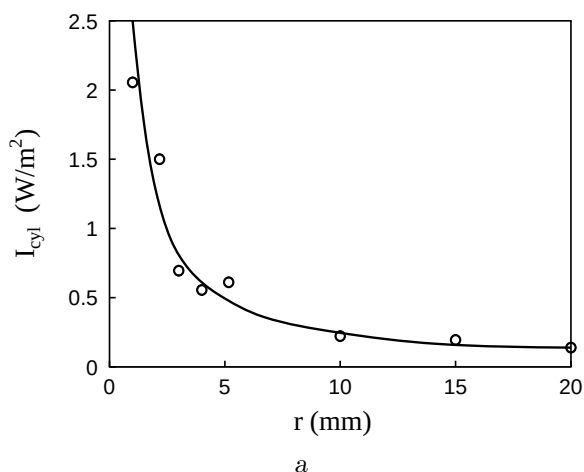
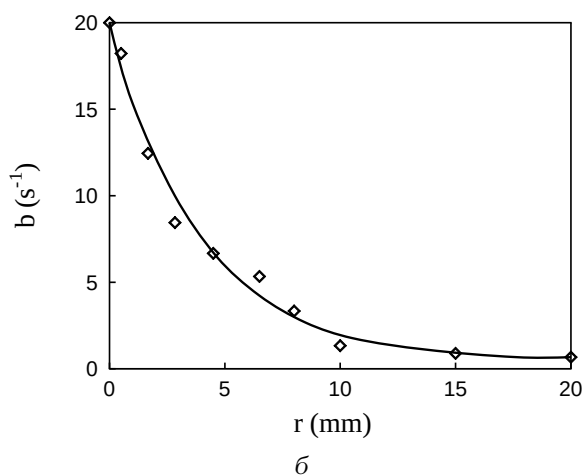


Рис. 4. Зависимость уровня звука от радиальной координаты



а



б

Рис. 5. Зависимости интенсивности цилиндрической волны (а) и эффективности очистки поверхности (б) от радиальной координаты

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила установить, что при использовании модельных загрязнителей доверительный интервал составлял не более 10 % при надежности 0.95, если остаточная масса попадала в интервал $0.008 \div 0.012$ мг/см². Это достаточно для объективной оценки эффективности очистки прецизионных деталей по критерию [2]. В ходе экспериментов использовался один прямоточный ГДИ, основные геометрические параметры которого были следующими: радиус $R_c = 6.5$ мм и ширина $h = 0.5$ мм кольцевого сопла [29]. Поскольку известен радиус вторичного тороидального вихря 12 и внутренний радиус стальных гильз 7 (см. рис. 3), то можно определить расстояние r от границы зоны звукообразования до текущей точки акустического поля в выражениях (4) и (5).

На первом этапе проводилось исследование характеристик акустических полей в цилиндрически расходящейся волне. Результаты измерений зависимости эффективного акустического давления от радиальной координаты представлены точками на рис. 4. Там же для сравнения показана теоретическая зависимость $p_{cyl}(r)$ согласно формуле (5). При этом амплитудные значения давления $p_0(r)$ были рассчитаны по формуле (6), а затем с помощью регрессии получена величина p_0 на границе зоны звукообразования ($r = 0$).

Зависимость интенсивности цилиндрической волны от расстояния была найдена пересчетом данных $p_{cyl}(r)$. На рис. 5, а она представлена точками. Там же сплошной линией показана теоретическая зависимость $I_{cyl}(r)$, рассчитанная по формуле (3). Малая дисперсия экспериментальных данных относительно расчетной кривой указывает на то, что выражение вида (3) достаточно точно моделирует временную функцию акустического сигнала, генерируемого осесимметричными ГДИ внутри цилиндра ограниченного диаметра.

На втором этапе оценивалась эффективность очистки пристеночной области глухих отверстий в гильзах. На рис. 5, б представлены результаты экспериментальных исследований величины $\beta(r)$ от радиальной координаты. При этом использовался один ГДИ, у которого наружный радиус тороидальной зоны звукообразования составлял примерно 10 мм. Здесь радиальная координата точки поля – это расстояние от внешней границы этого тора до внутренней поверхности гильзы. Излучатель перемещался с фиксированной скоростью вдоль оси отверстия. Турбулентные течения, на-

правления которых показаны на рис. 3 стрелками, способствуют выносу отделенных частиц загрязнителя из зоны очистки. Скорость потока моющего раствора вблизи стенок отверстия составляет примерно $10 \div 20$ м/с, в зависимости от диаметра гильзы [26].

Таким образом, на внутреннюю стенку гильзы воздействовало акустическое поле с интенсивностью $I_{\text{свл}}(r)$. Сравнение результатов, представленных на рис. 5, показывает хорошую корреляцию зависимостей интенсивности цилиндрической звуковой волны и эффективности очистки от радиальной координаты. В частности, крутизна обеих функций существенно увеличивается на расстоянии $r \leq 5$ мм, что соответствует половине радиуса тороидальной зоны гидродинамического звукообразования.

Интересно провести сравнение эффективности очистки с помощью осесимметричного ГДИ и магнитострикционного излучателя, данные по которому были полученными ранее [10]. Зависимости массы остаточного загрязнителя (в относительных единицах) от времени озвучивания плоских стальных образцов представлены на рис. 6. Экспериментальные точки – результаты усреднений по семи образцам. При использовании прямого ГДИ время полной очистки составляет приблизительно 30 с, а магнитострикционного излучателя – 40 с. Этот результат согласуется с выводами, представленными в работе [11]. Отметим, что в первом случае спектр сигнала – полигармонический (см. рис. 2), а во втором – моногармонический.

ВЫВОДЫ

1. Решена задача о затухании коротких импульсов экспоненциальной формы, генерируемых в жидкости осесимметричными гидродинамическими излучателями.
2. Проведено экспериментальное исследование по очистке цилиндрических отверстий с помощью осесимметричных излучателей от модельных загрязнителей, имитирующих асфальто-смолистые отложения. Оценена зона наибольшей эффективности этих источников звука.
3. Показана корреляция между нелинейным затуханием негармонических импульсов и эффективностью очистки.
4. Проведено сравнение результатов использования в задаче очистки осесимметричных и магнитострикционных излучателей. Показано

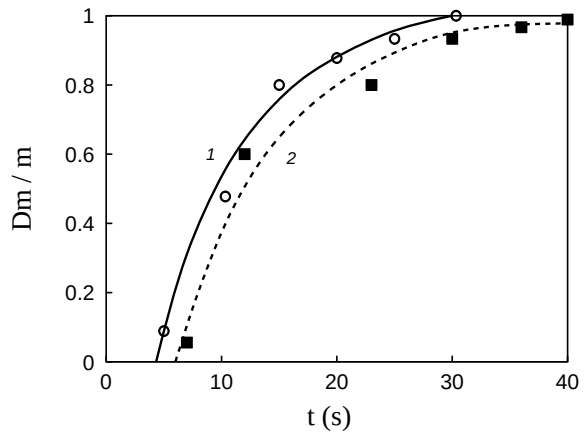


Рис. 6. Зависимость остаточного загрязнителя от времени озвучивания:

1 – осесимметричным ГДИ;
2 – магнитострикционным излучателем

преимущество коротких импульсов, в спектре которых имеется ряд гармоник, по сравнению с моногармоническим сигналом.

1. *Ультразвуковая технология* / Под ред. Б. А. Аграната. – М.: Металлургия, 1974. – 503 с.
2. Тельнов А. Ф., Козлов Ю. С., Кузнецов О. К. Моющие средства, их использование в машиностроении и регенерация. – М.: Машиностроение, 1993. – 208 с.
3. Агранат Б. А. Очистка ультразвуковая // *Ультразвук: маленькая энциклопедия* / Под ред. И. П. Голяминой. – М.: Сов. энцикл, 1979. – С. 400.
4. Costes S., Tierce P. Characterization of efficiency of ultrasonic equipment. Experimental results of different kinds of transducers // *Proc. Third Meet. Appl. Power Ultrasound in Phys. Chem. Proces.* – Paris, 2001. – P. 137–142.
5. Сиротюк М. Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // *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 // *16-th Int. Sympos. Nonlin. Acoust.* – Moscow, Aug. 19–23, 2002. – P. 963–970.
7. Каневский И. Н. Концентратор ультразвуковой // *Ультразвук: маленькая энциклопедия* / Под ред. И. П. Голяминой. – М.: Сов. энцикл, 1979. – С. 169–172.
8. Дудзинский Ю. М. Динамика затопленной осесимметричной кольцевой струи // *Доп. НАН України.* – 2006. – N 1. – С. 46–51.
9. Дудзінський Ю. М. Змуснені осесиметричні коливання циліндричної оболонки в потоці суцільного середовища // *Машинознавство.* – 2006. – N 4(106). – С. 26–29.
10. Дудзинский Ю. М., Сухарьков А. О., Сухарьков О. В. Очистка прецизионных деталей машин в мощных акустических полях // *Прогрессивные*

- технологии и системы машиностроения.– Донецк: Дон. НТУ, 2003.– С. 123–127.
11. Dezhkunov N. V., Francescutto A., Ciuti P. Enhancement of the conversion and concentration of energy in a multibubble cavitation zone // 16-th Int. Sympos. Nonlin. Acoust.– Moscow, Aug. 19–23, 2002.– P. 919–926.
 12. Maksimov A. O., Leighton T. G., Sosedko E. V. Nonlinear Transient Bubble Oscillations // 16-th Int. Sympos. Nonlin. Acoust.– Moscow, Aug. 19–23, 2002.– P. 987–990.
 13. 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.
 14. 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 // 16-th Int. Sympos. Nonlin. Acoust.– Moscow, Aug. 19–23, 2002.– P. 931–934.
 15. Дудзінський Ю. М. Динаміка струминної оболонки і спектр акустичного сигналу // Вісн. Київ. ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки.– 2006.– N 4.– С. 89–97.
 16. Дудзінський Ю. М., Сухарьков О. В. Спектр звуку, генерованого зануреною осесиметричною струминною оболонкою // Мат. методи фіз.-мех. поля.– 2007.– N 1.– С. 198–202.
 17. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику.– М.: Наука, 1966.– 520 с.
 18. Наугольных К. А. Поглощение волн конечной амплитуды // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга.– М.: Наука, 1968.– С. 7–50.
 19. Дудзинский Ю. М. Ближнее поле осесимметричного гидродинамического излучателя // Акуст. вісн.– 2004.– **7**, N 4.– С. 48–51.
 20. Дудзинский Ю. М. О нелинейном затухании экспоненциальных упругих импульсов // Акуст. вісн.– 2005.– **8**, N 1–2.– С. 51–53.
 21. Дудзинский Ю. М. Кавитационная эрозия в ближнем поле осесимметричного гидродинамического излучателя // Акуст. вісн.– 2005.– **8**, N 4.– С. 46–50.
 22. Скучик Е. Основы акустики. Том 1.– М.: Мир, 1976.– С. 402–403.
 23. Харкевич А. А. Спектры и анализ.– М.: Физматгиз, 1962.– 23 с.
 24. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений.– М.: Физматгиз, 1963.– 326–352 с.
 25. Клюкин И. И., Колесников А. Е. Акустические измерения в судостроении.– Л.: Судостроение, 1982.– 255 с.
 26. Максимов В. Г., Сухарьков О. В., Сухарьков А. О. Технологические возможности гидродинамических излучателей в процессе очистки внутренних поверхностей деталей автомобилей // Тр. Одес. политехн. ун-та.– 2003.– **19**.– С. 59–65.
 27. Максимов В. Г., Сухарьков О. В., Сухарьков А. О. Очистка деталей автомобилей с использованием гидродинамических излучателей // Тр. Одес. политехн. ун-та.– 2002.– **17**.– С. 65–68.
 28. Агранат Б. А., Гутнова Л. Б., Лямшев Л. М. О методах оценки эффективности установок ультразвуковой очистки // Акуст. ж.– 1972.– **18**, N 3.– С. 337–342.
 29. Сухарьков О. В. Акустические характеристики осесимметричных прямоочных гидродинамических излучателей // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова.– 2005.– N 2.– С. 60–65.