

УДК 534.222.2

КАВИТАЦИОННАЯ ЭРОЗИЯ В УСЛОВИЯХ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю. М. ДУДЗИНСКИЙ

Одесский национальный политехнический университет

Получено 20.12.2005 ◊ Пересмотрено 09.02.2006

Представлены результаты исследования ближнего поля осесимметричного гидродинамического излучателя при наличии гидростатического давления в герметичной емкости. Кавитационная активность в ближнем поле изучалась экспериментально по эрозии образцов. Показано, что с ростом избыточного статического давления в геометрической прогрессии увеличиваются удельные характеристики эрозии. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов.

Представлені результати дослідження ближнього поля осесиметричного гідродинамічного випромінювача при наявності гідростатичного тиску в герметичній ємності. Кавітаційна активність у ближньому полі вивчалась експериментально за ерозією зразків. Показано, що з ростом надлишкового статичного тиску в геометричній прогресії збільшуються питомі характеристики ерозії. Проведено порівняння теоретичних і експериментальних результатів.

The paper deals with experimental investigation of the near field of axially-symmetric hydrodynamic radiator with a hydrostatic pressure in a hermetic tank. The cavitation activity in the near field was studied experimentally by erosion of test specimens. It is shown that the specific characteristics of erosion increase with the hydrostatic pressure in geometric progression. The theoretical results are compared with experimental ones.

ВВЕДЕНИЕ

Кавитация может вызвать разрушение практически любой твердой поверхности. С одной стороны, кавитационные явления в потоках жидкости существенно снижают сроки эксплуатации гидравлического оборудования, гидросооружений, гребных винтов, форсунок дизельных двигателей и других конструкций. С другой стороны, эрозионное разрушение поверхностных пленок под воздействием кавитации в мощных акустических полях широко применяется для интенсификации различных технологических процессов – диспергирования твердых присадок технических масел, очистки поверхностей от нагара, окалины, ржавчины, абразивных частиц притирочных паст и т. д.

Поскольку кавитационному разрушению подвержены твердые тела с различными физико-механическими, электрическими и химическими свойствами, выделяют несколько механизмов эрозии их поверхности [1, 2]:

- коррозионное разрушение (кавитация и коррозия взаимно усиливают друг друга, так что результирующее разрушение тел в химически активных средах оказывается большим, чем просто суммарное действие этих факторов, взятых по отдельности);
- электрохимические эффекты, обусловленные большими электрическими потенциалами, возникающими при схлопывании каверн на твердой поверхности (известно, что кавитаци-

онное разрушение в очень агрессивной среде можно существенно ослабить с помощью “катодной защиты” [3]);

- механическое воздействие кавитации (микроударные волны и кумулятивные микроструи, образующиеся при схлопывании каверн, способны деформировать поверхностный слой тела и вырывать из него микрочастицы) [4];
- химическое воздействие кавитации (например, на поверхности медных и алюминиевых сплавов оно приводит к быстрому их разрушению в водных растворах) [5];
- тепловое воздействие кавитации (при схлопывании кавитационной каверны генерируются импульсы высокой температуры; заметим, однако, что тепловая энергия может аккумулироваться только в неметаллических телах с низкой теплопроводностью) [2].

По-видимому, рассматривая различные задачи гидромеханики, акустики, ультразвуковых технологий, перечень механизмов кавитационного разрушения твердых тел можно продолжить. Однако в конкретных условиях (в зависимости от материала тела, свойств рабочей жидкости, характеристик потока, акустического поля и других факторов) решающим является только один из упомянутых механизмов, а воздействие остальных несущественно.

На протяжении последнего десятилетия все большее применение в автомобилестроении получают алюминиевые и магниевые сплавы. Однако при очистке изготовленных из них деталей и узлов моющие растворы разрушают поверхность очищенного металла (за счет коррозии, химического растрескивания и др.), а введение в рабочую жидкость акустических полей высокой интенсивности только усиливает воздействие этих механизмов. Поэтому в ультразвуковых методах очистки последнее время прослеживается тенденция к снижению концентраций поверхностно-активных веществ, переход на дистиллированную воду или химически нейтральные жидкости (минеральные масла, толуол и другие органические соединения) [6]. В последнем случае жидкости также являются диэлектриками и основную роль в кавитационном разрушении пленок загрязнителей играет механическое воздействие кавитации на поверхность твердого тела. Однако при этом необходимо повысить ударное воздействие схлопывающихся паровых каверн, например, создавая избыточное статическое давление в рабочей емкости и одновременно увеличивая интенсивность акустического поля [7].

В качестве простых в эксплуатации и надежных источников упругих волн в жидких средах¹ хорошо зарекомендовали себя осесимметричные гидродинамические излучатели (ГДИ) прямого и противотоного типа. У них отсутствуют основные недостатки, присущие электроакустическим преобразователям магнитоэлектрического или пьезоэлектрического типов [8]. Как показали ранее экспериментальные исследования, данные устройства могут генерировать акустические поля высокой интенсивности в жидкостях различной вязкости в широком диапазоне гидростатических давлений [9, 10]. В связи с этим, представляет интерес исследование эрозионных свойств ближнего поля осесимметричного гидродинамического излучателя в условиях избыточного статического давления в герметичной емкости.

1. ПОГЛОЩЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА

Частоту основной гармоники акустического сигнала, генерируемого ГДИ, задает упругая затопленная струйная оболочка. Накопителем энергии является первичный вихрь в форме тороида, а областью звукообразования – вторичный то-

роидальный вихрь с развитой кавитацией [9–13]. Пульсации вихря возбуждают струйную оболочку, которая совершает изгибные колебания. При оптимальной скорости струи, когда частота пульсаций первичного вихря совпадает с собственной частотой оболочки, наблюдается максимальный уровень тонального звука [11]. При этом круговая частота основной гармоники генерируемых акустических волн совпадает с низшей собственной частотой струйной оболочки:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_0^4 h^2 r^2 + 12}{12 \rho r^2}} E, \quad \frac{\pi}{2} \leq k_0 \ell \leq \frac{3\pi}{2}, \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \chi_i (P_* + \Delta P_{st})^i.$$

Здесь ρ , r , ℓ , h – плотность материала, средний радиус, длина и толщина струйной оболочки соответственно; E – модуль объемной упругости жидкости; k_0 – параметр цилиндрической оболочки, полученный как минимальный из корней соответствующего трансцендентного уравнения [10]; ΔP_{st} – избыточное, по сравнению с атмосферным, статическое давление; P_* – внутреннее давление в жидкости (фактически, ее порог кавитации); χ_1 – линейный, а χ_2 и χ_3 – первые два нелинейных параметра адиабатической сжимаемости жидкости [14].

Управлять частотой возможно тремя путями: изменяя геометрию оболочки (с помощью замены сопла и отражателя) [11, 12], создавая избыточное статическое давление в герметичной емкости [10, 11] или изменяя скорость истечения струи жидкости из сопла [9, 13]. Заметим, что первый способ неудобен, а второй не всегда реализуем. Третий способ более практичен, однако при этом уменьшается амплитуда изгибных колебаний струйной оболочки и, как следствие, снижается уровень акустического сигнала, вплоть до полного исчезновения. Наиболее перспективным для акустических технологий является создание в рабочей емкости необходимого избыточного статического давления с одновременным увеличением до оптимального значения скорости струи на выходе из сопла. Тогда, кроме повышения частоты основной гармоники, можно повысить уровень звука, акустогидродинамический КПД [9, 13] и интенсивность ближнего поля ГДИ [15].

Ранее в работе [15] теоретически и экспериментально исследовалось нелинейное затухание коротких экспоненциальных импульсов в ближнем по-

¹Под упругими здесь и далее понимаются волны и импульсы сжатия – разрежения.

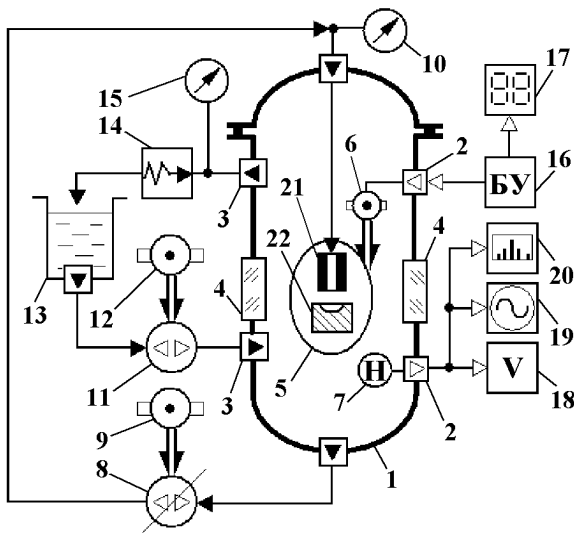


Рис. 1. Функциональная схема эксперимента

ле излучателя рассматриваемого типа. Интенсивность импульса можно записать как:

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

где

$$\Pi_0(\xi) = [1 - \Phi(\xi)] \exp(\xi^2);$$

$$\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi \exp(-t^2) dt;$$

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

В последнем выражении $\alpha_0 = 2\alpha/\omega^2$ – коэффициент поглощения для интенсивности плоской волны за счет физического затухания в среде [16]; ω – круговая частота гармоники; β_1 и β_2 – безразмерные коэффициенты, соответствующие длительности фронтов импульса [17]; p_0 – действующее значение акустического давления вблизи активной зоны звукообразования; ρ – плотность жидкости; c – скорость звука. Функция $\Phi(\xi)$ представляет собой интеграл вероятности.

Дифференцированием функции интенсивности по координате можно получить выражение для акустической мощности, поглощенной в единице объема жидкости:

$$i(r) = \frac{\partial I}{\partial r} = \frac{p_0^2(\beta_1 - \beta_2)}{\rho c(\beta_1 + \beta_2)} \left[-\frac{2F}{r^3} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial F}{\partial r} \right], \quad (3)$$

где

$$F = \beta_1\Pi_0(\xi_1) - \beta_2\Pi_0(\xi_2);$$

$$\frac{\partial F}{\partial r} = \beta_1^3\Pi_1(\xi_1) - \beta_2^3\Pi_1(\xi_2);$$

$$\Pi_1(\xi) = [1 - \Phi(\xi)] \exp(\xi^2) - \frac{1}{\sqrt{\pi\xi}}.$$

Пренебрегая в выражении для $i(r)$ первым слагаемым ($\sim r^{-3}$), по сравнению со вторым ($\sim r^{-2}$), окончательно получим

$$i(r) = \frac{\partial I}{\partial r} = \frac{I_0(\beta_1 - \beta_2)}{r^2(\beta_1 + \beta_2)} \times [\beta_1^3\Pi_1(\xi_1) - \beta_2^3\Pi_1(\xi_2)], \quad (4)$$

В формуле (4) I_0 – действующее значение интенсивности поля вблизи активной зоны звукообразования:

$$I_0 = \frac{p_0^2}{\rho c}. \quad (5)$$

Можно предположить, что дополнительное нелинейное затухание энергии упругого импульса должно быть пропорционально степени кавитационного разрушения твердых преград.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальное исследование характеристик акустических полей и кавитационной эрозии образцов в условиях избыточного статического давления проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 1. Она состоит из герметичной емкости 1 с электрическими разъемами 2, патрубками 3 и иллюминаторами 4. Внутри емкости 1, заполненной рабочей жидкостью, помещен осесимметричный ГДИ 5, снабженный редукторным двигателем 6 (РД-09), и гидрофон 7. Излучатель питается от системы насос 8 – электродвигатель 9 с плавно регулируемым расходом жидкости. Давление нагнетания измеряется с помощью манометра 10. Следует отметить, что емкость 1, ГДИ 5, насос 8 и соединительные трубопроводы представляют собой замкнутую систему, так что внутри рабочей емкости, на входе насоса и на выходе сопла действует одинаковое избыточное статическое давление ΔP_{st} . Последнее создается вспомогательным насосом 11 с электродвигателем 12. На вход вспомогательного насоса жидкость поступает из емкости 13, сообщающейся с атмосферой, а выход насоса 11 соединен с одним из патрубков 3. Регулировка статического давления осуществляется с

помощью клапана 14, вход которого подключен к другому патрубку 3. Избыточная жидкость поступает в емкость 13. Статическое давление контролируется образцовым манометром 15.

Для регулировки расстояния между соплом 21 и отражателем 22 ГДИ снабжен механизмом типа винт–гайка. На гайке и оси двигателя 6, управляемого блоком 16, имеется пара зубчатых колес. С помощью соответствующего датчика и счетчика импульсов 17 осуществляется измерение расстояния между соплом и отражателем с точностью 0.01 мм. Сигнал с выхода гидрофона 7 поступает на вольтметр 18, осциллограф 19 и спектроанализатор звуковых и ультразвуковых частот 20.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ И ЭРОЗИОННАЯ АКТИВНОСТЬ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ГДИ

На первом этапе исследовались амплитудно-частотные характеристики данного типа излучателей. Избыточное статическое давление плавно регулировалось в диапазоне от 0 до 2.4 МПа. При этом система настраивалась на максимальный уровень звука путем подбора оптимальной скорости струи на выходе из сопла и оптимального расстояния между соплом и отражателем [11, 12]. С помощью калиброванного гидрофона и электронного вольтметра оценивался интегральный уровень звукового давления p_0 , а по формуле (5) вычислялась интенсивность акустического поля I_0 . Частота основной гармоники измерялась с помощью спектроанализатора.

На рис. 2 приведена низшая частота собственных колебаний затопленной струйной оболочки как функция избыточного статического давления в герметичной емкости. Маркеры – результаты экспериментальных измерений частоты основной гармоники акустических волн в условиях избыточных давлений в невозмущенной жидкости. Сплошная линия – регрессия по экспериментальным точкам. Штриховая кривая получена в результате расчета по формуле (1). В диапазоне статических давлений $\Delta P_{st} = 0 \div 2.4$ МПа отмечается практически линейное возрастание частоты почти на порядок. При этом, как видно из графика, частота основной гармоники генерируемого звука совпадает с низшей частотой автоколебаний затопленной осесимметричной струйной оболочки.

На рис. 3 представлена зависимость интенсивности акустического сигнала от избыточного статического давления в герметичной емкости. Измерения проводились вблизи вторичного тороидаль-

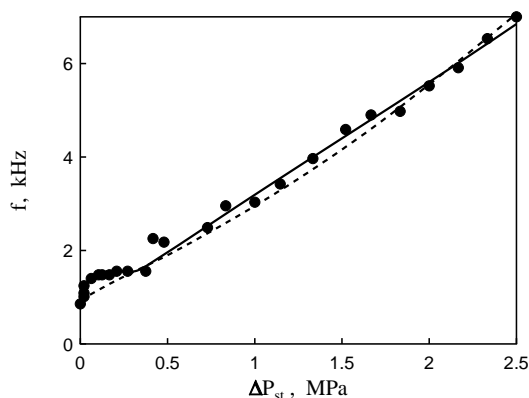


Рис. 2. Зависимость частоты основной гармоники сигнала от статического давления:
● – эксперимент в невозмущенной жидкости,
сплошная – регрессия по экспериментальным точкам,
штриховая – расчет по формуле (1)

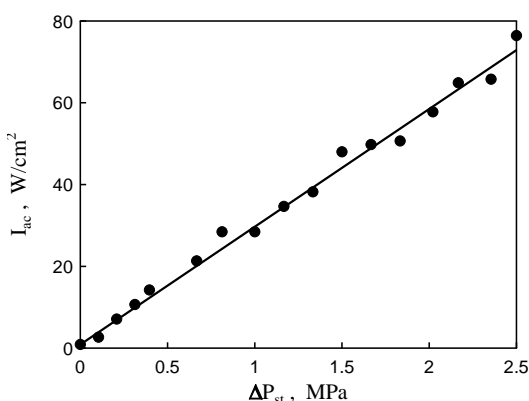


Рис. 3. Зависимость интенсивности акустического поля от статического давления в емкости

ного вихря – активной зоны гидродинамического звукообразования [15, 17]. В диапазоне ΔP_{st} от 0 до 2.4 МПа $I(\Delta P_{st})$ практически линейно возрастает примерно от 2 до 70 Вт/см².

Экспериментальное исследование кавитационной эрозии образцов в условиях избыточного статического давления проводились на установке, схема которой показана на рис. 1. Эрозионное действие осесимметричного ГДИ оценивалось по разрушению свинцовых образцов весовым методом. В качестве рабочей жидкости использовалось трансформаторное масло – диэлектрическая, химически нейтральная к металлу жидкость. Это позволило оценить микроударную эрозионную активность в ближнем поле осесимметричного излучателя. Образцы представляли собой пластинки с габаритами 15 × 8 × 1 мм (рис. 4). Они

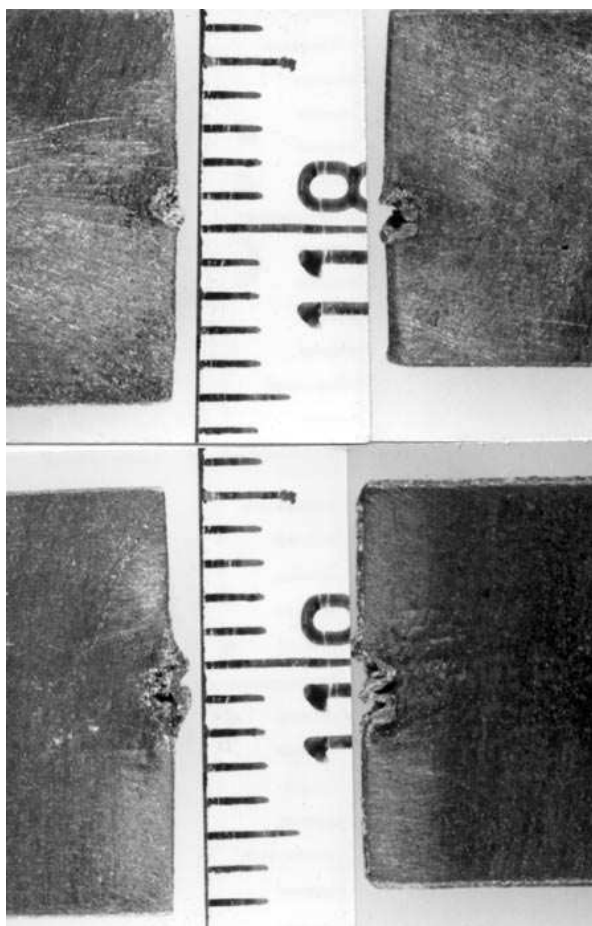


Рис. 4. Образцы после обработки в активной области гидродинамического звукообразования

располагались вблизи вторичного тороидального вихря развитой кавитации [15, 17] – активной зоны гидродинамического звукообразования.

Уменьшение массы образцов оценивалось на аналитических весах, имеющих цену деления 10^{-8} кг. В диапазоне избыточных давлений $\Delta P_{st} = 0 \div 0.48$ МПа время озвучивания составляло $\Delta t = [5; 15]$ мин. С увеличением давления в рабочей емкости приходилось уменьшать временные интервалы кавитационной обработки пластин до $30 \div 90$ с. Это связано с тем, что в диапазоне $\Delta P_{st} = 0 \div 2.4$ МПа существенно растет интенсивность поля вблизи зоны звукообразования (см. рис. 3). Соответственно, должна значительно возрастать и эрозионная активность ГДИ. Поэтому при большом времени озвучивания на образце могут образовываться крупные сквозные каверны, соответствующие вторичной вихревой зоне, так что дальнейшая обработка не будет приводить к значительному уменьшению его массы. Чтобы избежать

ложного вывода об уменьшении эрозионной активности, в диапазоне статических давлений $\Delta P_{st} = 0.64 \div 1.36$ МПа был выбран временной интервал $\Delta t = 0.5 \div 2$ мин. При дальнейшем увеличении ΔP_{st} эрозионная активность настолько возрастает, что возможно выпадение больших объемов образца из-за неравномерной эрозии его поверхности. Чтобы избежать этого, в диапазоне $\Delta P_{st} = 1.5 \div 2.4$ МПа время озвучивания пластинок необходимо уменьшить до $\Delta t = 20 \div 60$ с. Так как в экспериментах различны значения времени озвучивания, сравнение экспериментальных результатов по уменьшению массы образцов и оценка влияния статического давления на эрозионную активность затруднены. Поэтому представляет интерес получение зависимости скорости эрозии (условно, за 1 с озвучивания) от избыточного давления в рабочей емкости:

$$\delta m = \frac{\Delta m}{\Delta t}.$$

На рис. 5 представлены в относительных единицах несколько теоретических зависимостей поглощенной в единичном объеме жидкости энергии упругого импульса (4) от расстояния до вторичного тороидального вихря развитой кавитации – активной области гидродинамического звукообразования. За условную единицу принята величина i_0 – удельное поглощение энергии импульса при гидростатическом давлении, близком к атмосферному ($\Delta P_{st} \rightarrow 0$) на расстоянии $r = 0.7$ мм от вторичного вихря. В формуле (4) в качестве значений I_0 используются результаты экспериментального исследования ближнего поля, представленные на рис. 3. На рис. 5 маркерами показаны полученные данные о скорости эрозии образцов $\delta m(r; \Delta P_{st})$. Все точки усреднены по пяти измерениям. Видна явная корреляция между процессом нелинейного поглощения в единичном объеме жидкости энергии экспоненциального упругого импульса и скоростью эрозии твердой преграды. Как видно из графика, с ростом интенсивности акустического поля увеличивается эффективная зона эрозии: от 0.8 мм при $I_0 = 2$ Вт/см² ($\Delta P_{st} = 0$) до 4 мм при $I_0 = 30$ Вт/см² ($\Delta P_{st} = 1$ МПа).

Во всех описанных экспериментах осесимметричная гидродинамическая излучающая система при заданном избыточном статическом давлении настраивалась на максимальный уровень звука путем соответствующего выбора скорости истечения жидкости из сопла $v(\Delta P_{st})$ [11]. На рис. 6 приведена экспериментальная зависимость скорости эрозии свинцовых пластинок от статического давления в жидкости $\delta m(\Delta P_{st})$. При этом в диапазоне $\Delta P_{st} = 0 \div 2.4$ МПа удельное уменьшение массы

образцов возросло на два порядка. Анализ показал, что эта характеристика может быть описана функцией вида

$$\delta m = K_{1,2}(\Delta P_{st})^2,$$

где $K_1 = 9.375 \cdot 10^{-23}$ кг/Па² для диапазона $\Delta P_{st} = 0 \div 0.8$ МПа; $K_2 = 1.590 \cdot 10^{-22}$ кг/Па² для диапазона $\Delta P_{st} = 0.8 \div 2.4$ МПа.

Согласно выражению (1), частота акустических волн в жидкости $f_0 = \omega_0/2\pi$ растет с повышением избыточного статического давления в герметичной емкости. В частности, в диапазоне ΔP_{st} от 0 до 2.4 МПа величина $f_0(\Delta P_{st})$ практически линейно возрастает от 0.95 до 7.5 кГц (см. рис. 2). При этом интенсивность поля $I(\Delta P_{st})$ также линейно увеличивается с 2 до 70 Вт/см² (см. рис. 3). Поэтому следует предположить, что эрозионная активность в ближнем поле осесимметричного ГДИ растет как за счет повышения интенсивности генерируемых акустических волн, так и за счет роста частоты, т. е. числа ударных воздействий на твердую преграду в единицу времени. Исходя из этого, важно оценить элементарную эрозию образца за один период волны:

$$dm = \frac{\delta m}{f_0}.$$

На рис. 7 представлена зависимость элементарной эрозии от избыточного статического давления в жидкости, которая линейна в диапазоне $\Delta P_{st} = 0 \div 2.4$ МПа. При этом скорость возрастания функции $dm(\Delta P_{st})$ различается в двух диапазонах значений ΔP_{st} :

$$dm = a_{1,2}\Delta P_{st},$$

где $a_1 = 3.105 \cdot 10^{-17}$ кг/Па для $\Delta P_{st} = 0 \div 0.8$ МПа; $a_2 = 7.438 \cdot 10^{-17}$ кг/Па для $\Delta P_{st} = 0.8 \div 2.4$ МПа.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Исследованы амплитудные и частотные характеристики ближнего поля осесимметричного гидродинамического излучателя.
2. Получена теоретическая зависимость удельной энергии упругого экспоненциального импульса, поглощенной в единице объема жидкости, от осевой координаты и избыточного статического давления в жидкости.
3. Установлена прямая зависимость между удельной поглощенной энергией импульса и эрозией образцов.

Ю. М. Дудзинский

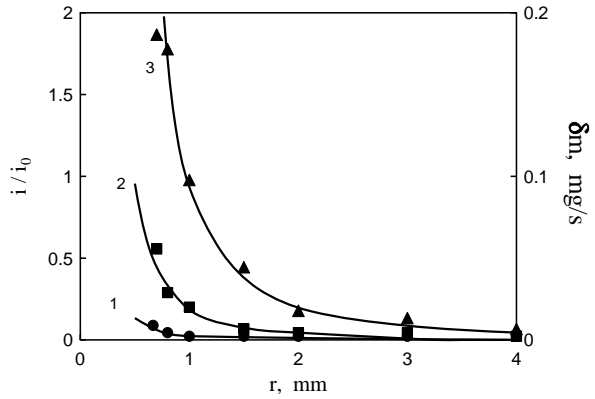


Рис. 5. Зависимости удельной поглощенной энергии акустического импульса и уменьшения массы образца от расстояния до границы области звукообразования:

сплошные – расчет по формуле (4),
 маркеры – уменьшение массы образцов в единицу времени при избыточном статическом давлении;
 1 – $\Delta P_{st} = 0$, 2 – $\Delta P_{st} = 0.5$ МПа, 3 – $\Delta P_{st} = 1.0$ МПа

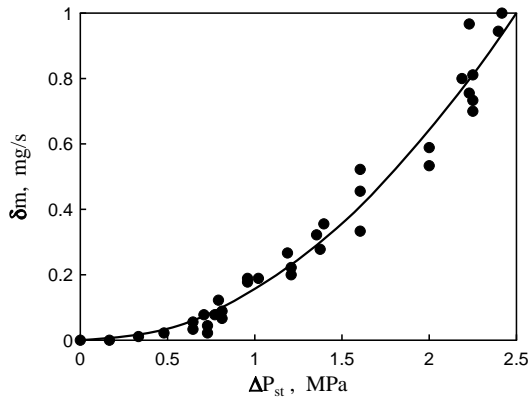


Рис. 6. Зависимость скорости эрозии образцов от избыточного статического давления в жидкости

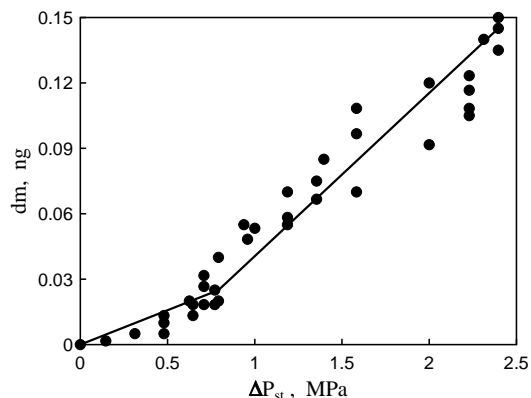


Рис. 7. Уменьшение массы образцов за один период акустической волны

4. Оценены зависимости скорости эрозии (в единицу времени) и элементарной эрозии (за один период акустической волны) от статического давления в жидкости.
1. *Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.* Кавитация.– М.: Мир, 1974.– С. 380–421.
 2. *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.
 3. *Petracchi G.* Investigations of cavitation corrosion // *Engng Digest.*– 1949.– **10**, N 9.– P. 314.
 4. *Shimada M., Kobayashi T., Matsumoto Y.* Dynamics of Cloud Cavitation and Cavitation Erosion – 1999.– ASME FEDSM99-6775.
 5. *Guan J., Matula T. J.* Time-dependence of alcohol quenching in SBSL // *Proc. 16-th Int. Sympos. Nonlin. Acoust.*– Moscow, 2002.– P. 947–950.
 6. *Максимов В. Г., Сухарьков О. В., Сухарьков А. О.* Очистка деталей автомобилей с использованием гидродинамических излучателей // *Тр. Одес. политехн. ун-та.*– 2002.– **1(17)**.– С. 65–68.
 7. *Dezhkunov N. V., Francescutto A., Ciuti P.* Enhancement of the conversion and concentration of energy in a multibubble cavitation zone // *Proc. 16-th Int. Sympos. Nonlin. Acoust.*– Moscow, 2002.– P. 919–926.
 8. *Costes S., Tierce P.* Characterization of efficiency of ultrasonic equipment: Experimental results of different kinds of transducers // *Proc. 3-rd Meet. Appl. Power Ultrasound in Phys. Chem. Proces.*– Paris, 2001.– P. 137–142.
 9. *Дудзинский Ю. М., Назаренко А. Ф.* Эффективность работы осесимметричных гидродинамических излучателей в условиях избыточного статического давления // *Акуст. ж.*– 1996.– **42**, N 4.– С. 569–572.
 10. *Дудзинский Ю. М., Дащенко А. Ф.* Собственные колебания струйной оболочки в условиях гидростатического давления // *Прикл. мех.*– 2004.– **40**, N 12.– С. 92–98.
 11. *Дудзинский Ю. М., Маничева Н. В., Назаренко О. А.* Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений // *Акуст. вісн.*– 2001.– **4**, N 2.– С. 38–46.
 12. *Дудзинский Ю. М., Попов В. Г.* Вынужденные колебания осесимметричной затопленной струйной оболочки // *Прикл. мех.*– 2004.– **40**, N 12.– С. 92–98.
 13. *Дудзинский Ю. М., Сухарьков О. В., Маничева Н. В.* Энергетика прямого гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления // *Акуст. вісн.*– 2004.– **7**, N 1.– С. 40–45.
 14. *Зарембо Л. К., Красильников В. А.* Введение в нелинейную акустику.– М.: Наука, 1966.– 520 с.
 15. *Дудзинский Ю. М.* Ближнее поле осесимметричного гидродинамического излучателя // *Акуст. вісн.*– 2004.– **7**, N 4.– С. 48–51.
 16. *Полякова А. Л.* Поглощение звука // *Ультразвук. Маленькая энциклопедия* / Под ред. И. П. Голяминой.– М.: Сов. Энцикл., 1979.– С. 257–264.
 17. *Дудзинский Ю. М.* О нелинейном затухании экспоненциальных упругих импульсов // *Акуст. вісн.*– 2005.– **8**, N 1-2.– С. 51–53.