

УДК 534. 222.2

## Эрозионная активность в ближнем поле струйного гидродинамического излучателя

**А.А. Бондарь**, канд. техн. наук, **В.В. Витков**, **Ю.М. Дудзинский**, д-р физ.-мат. наук, **Н.В. Маничева**  
Одесский национальный политехнический университет,  
пр. Шевченко, 1, Одесса-44, 65044, Украина.

Представлены результаты исследования ближнего поля струйного гидродинамического излучателя при наличии гидростатического давления в герметичной емкости. Экспериментально исследована кавитационная активность в ближнем поле излучателя по эрозии свинцовых образцов. Показано, что с ростом избыточного статического давления в геометрической прогрессии увеличиваются удельные характеристики эрозии: в единицу времени и за один период колебаний. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов. Результаты исследований позволяют разработать практические рекомендации по использованию данных источников звука в различных звуковых технологиях: очистка деталей машин от технологических и эксплуатационных загрязнений, эмульгирование нерастворимых жидкостей, диспергирование твердых частиц в жидкостях. Библ. 7, рис. 5.

**Ключевые слова:** *струйный гидродинамический излучатель, ближнее поле, эрозия.*

### Введение

Кавитация может вызвать разрушение практически любой твердой поверхности. В частности, кавитация в потоках жидкости существенно снижает сроки эксплуатации гидравлического оборудования, гидросооружений, гребных винтов, форсунок дизельных двигателей и др. С другой стороны, эрозионное разрушение поверхностных пленок под воздействием кавитации в мощных акустических полях широко применяется для интенсификации различных технологических процессов: диспергирование твердых присадок технических масел, очистка поверхностей деталей (нагар, окалина, ржавчина, абразивные частицы притирочных паст и др.) и т.д.

Поскольку кавитационному разрушению подвержены твердые вещества с различными физико-механическими, электрическими, химическими свойствами, то можно выделить несколько механизмов эрозии поверхности тел:

- 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) [1, 2];
- электрохимические эффекты, обусловленные большими электрическими потенциалами при схлопывании каверн на твердой поверхности (известно, что кавитационное разрушение в очень агрессивной среде можно существенно ослабить с помощью «катодной защиты» [3]);
- механическое воздействие кавитации (микроударные волны и кумулятивные микроструйки, образующиеся при схлопывании каверн, способны деформировать поверхностный слой тела, вырывать из него микрочастицы) [1, 4];
- химическое воздействие кавитации (на поверхности медных и алюминиевых сплавов, например, приводит к быстрому их разрушению в водных растворах) [1, 5];
- тепловое воздействие кавитации (при схлопывании кавитационной каверны генерируются импульсы высокой температуры, однако теплота может аккумулироваться только в неметаллических телах с низкой теплопроводностью) [1].

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

Последнее десятилетие все большее применение в автомобилестроении получают алюминиевые и магниевые сплавы. При очистке соответствующих деталей и узлов моющие растворы оказывают разрушающее воздействие на

поверхность очищенного металла (коррозия, химическое растрескивание и др.), а введение в рабочую жидкость акустических полей высокой интенсивности только усиливает эти механизмы. Поэтому в ультразвуковых методах очистки последнее время прослеживается тенденция снижения концентраций поверхностно активных веществ, переход на дистиллированную воду, а еще предпочтительнее – на химически нейтральные жидкости (минеральные масла, толуол и др. органические жидкости). В последнем случае жидкости также являются диэлектриками, и основную роль в кавитационном разрушении пленок загрязнителей играет механическое воздействие кавитации на поверхность твердого тела. Однако в нейтральной среде необходимо повысить ударное воздействие схлопывающихся паровых каверн, например, создавая избыточное статическое давление в рабочей емкости и одновременно увеличивая интенсивность акустического поля.

Представляет интерес исследовать эрозионные свойства ближнего поля струйного гидродинамического излучателя (ГДИ) в условиях избыточного статического давления в герметичной емкости.

### 1. Экспериментальная установка

Экспериментальное исследование кавитационной эрозии образцов в условиях избыточного статического давления проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1. Состоит она 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  $\Delta P_{ст}$ . Последнее создается вспомогательным насосом 11 и 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 0,01мм.

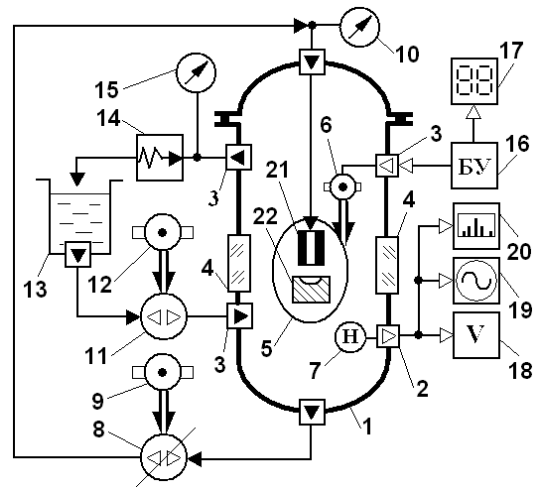


Рис. 1. Функциональная схема эксперимента

Сигнал с выхода гидрофона 7 поступает на вольтметр 18, осциллограф 19 и спектроанализатор звуковых и ультразвуковых частот 20. Образцы в виде свинцовых пластинок крепились с помощью зажима внутри герметичной емкости 1 (рис. 1) на расстоянии  $r$  от активной зоны звукообразования – вторичного тороидального вихря (рис. 2). Кавитационное разрушение образцов оценивалось весовым методом на аналитических весах с ценой деления 0,01мг.



Рис. 2. Фотография рабочего органа струйного противоточного ГДИ

## 2. Эрозионные характеристики ближнего поля струйного гидродинамического излучателя

Эрозионное действие осесимметричного ГДИ оценивалось по разрушению свинцовых образцов весовым методом. Образцы представляли собой пластинки с габаритами  $15 \times 12 \times 1$  мм (рис. 3) и располагались вблизи первичного и вторичного тороидальных вихрей развитой кавитации [6] — активной зоны гидродинамического звукообразования (рис. 2). Уменьшение массы образцов измерялось с помощью аналитических весов, имеющих цену деления  $10^{-5}$  г. При этом время озвучивания не превышало 155 мин во избежание больших погрешностей измерения. В качестве рабочей жидкости использовалось трансформаторное масло — диэлектрическая, химически нейтральная жидкость, что позволило оценить микроударную эрозионную активность зоны звукообразования осесимметричного излучателя.

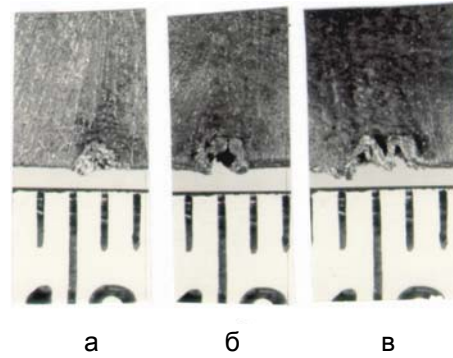


Рис. 3. Образцы после кавитационного воздействия

Временные зависимости эрозии свинцовых образцов в мощных акустических полях при различных гидростатических давлениях  $\Delta P_{ст}$  представлены на рис. 4. В диапазоне избыточных давлений  $\Delta P_{ст} = (0 \dots 0.48)$  МПа время озвучивания составляло  $\Delta t = (5 \dots 15)$  мин (рис. 4 а).

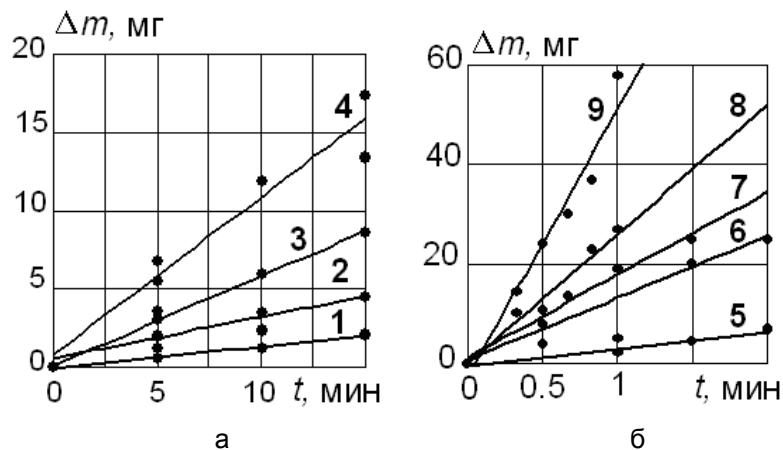


Рис. 4. Временные зависимости эрозии образцов в акустическом поле ГДИ при статическом давлении в жидкости: 1 —  $\Delta P_{ст} = 0$ ; 2 —  $\Delta P_{ст} = 0.16$  МПа; 3 —  $\Delta P_{ст} = 0.32$  МПа; 4 —  $\Delta P_{ст} = 0.48$  МПа; 5 —  $\Delta P_{ст} = 0.64$  МПа; 6 —  $\Delta P_{ст} = 0.80$  МПа; 7 —  $\Delta P_{ст} = 1.20$  МПа; 8 —  $\Delta P_{ст} = 1.36$  МПа; 9 —  $\Delta P_{ст} = 1.60$  МПа

С увеличением давления в рабочей емкости приходилось уменьшать временные интервалы кавитационной обработки пластин с 15 мин до 30 сек. Связано это с тем, что в диапазоне избыточного статического давления  $\Delta P_{ст} = (0 \dots 2.4)$  МПа уровень акустического сигнала увеличивается, приблизительно, на порядок [6], а поскольку при этом существенно растет частота основного тона [7], то на два порядка возрастает интенсивность звукового поля вблизи зоны звукообразования [6]. Соответственно должна существенно возрастать и эрози-

онная активность ГДИ. Поэтому при большом времени озвучивания на образце могут образовываться крупные каверны, соответствующие вторичной вихревой зоне (рис. 3, б), так что дальнейшее озвучивание не приведет к значительному уменьшению массы образца. Чтобы избежать ложного вывода об уменьшении эрозионной активности, в диапазоне статических давлений  $\Delta P_{ст} = (0.64 \dots 1.36)$  МПа был выбран временной интервал  $\Delta t = (0.5 \dots 2)$  мин (рис. 4, б). С дальнейшим увеличением  $\Delta P_{ст}$  эрозионная активность настолько возрастает, что воз-

можно выпадение больших объемов образца из-за неравномерной эрозии его поверхности (рис. 3, в). Чтобы избежать этого в диапазоне  $\Delta P_{ст} = (1.5...2.4)$  МПа время озвучивания пластинок необходимо уменьшить до  $\Delta t = (20...60)$  сек (рис. 4, б).

Во всех экспериментах при заданном избыточном статическом давлении струйный ГДИ настраивался на максимальное звучание путем соответствующего выбора скорости истечения жидкости из сопла, а в случае необходимости повышения акусто-гидродинамического КПД системы, можно выбрать оптимальное соотношение наружного и внутреннего диаметров сопла [6].

### 3. Анализ результатов исследований

Анализ временных зависимостей эрозионной активности ГДИ показывает линейный рост  $\Delta m(\Delta t)_{\Delta P}$  во всем исследованном диапазоне статических давлений  $\Delta P_{ст} = (0...2.4)$  МПа. Это можно считать еще одним подтверждением ранее установленного факта [6], что в этом диапазоне избыточных давлений в рабочей емко-

сти, подбирая оптимальное значение скорости струи на выходе сопла, можно добиться линейного роста интенсивности акустического сигнала вблизи зоны звукообразования ГДИ.

Сравнить экспериментальные результаты, представленные на рис. 4, оценить влияние статического давления на уменьшение массы образца трудно, т. к. в экспериментах различны значения времени озвучивания. Поэтому представляет интерес получить зависимость скорости эрозии (условно за 1 секунду озвучивания) от избыточного давления в рабочей емкости:

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

Зависимость  $\mu(\Delta P_{ст})$  приведена на рис. 5а.

Анализ показал, что эта зависимость может быть описана функцией вида:

$$\mu = K_{1,2}(\Delta P_{ст})^2,$$

где  $K_1 = 9.375 \cdot 10^{-23}$  (м·с)/кг для диапазона давлений  $\Delta P_{ст} = (0...0.8)$  МПа;

$K_2 = 1.590 \cdot 10^{-22}$  (м·с)/кг для диапазона давлений  $\Delta P_{ст} = (0.8...2.4)$  МПа.

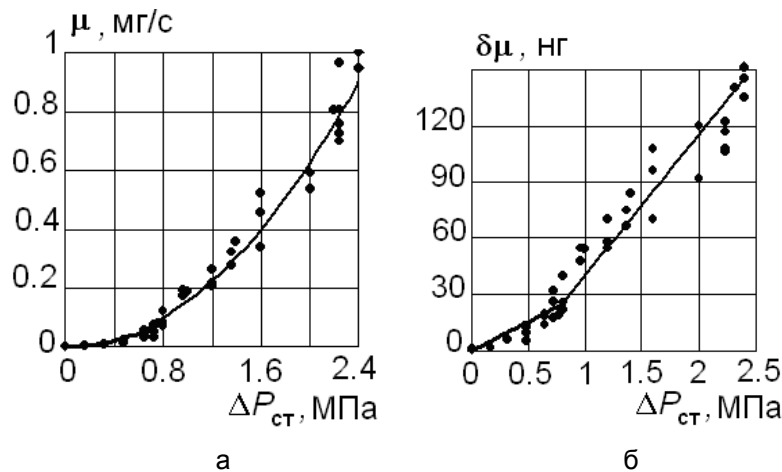


Рис. 5. Зависимости удельной эрозии (а) и интенсивности эрозии (б) образцов от статического давления в жидкости

Из ранее приведенных теоретических и экспериментальных исследований известно, что с увеличением статического давления в жидкости повышается частота основного тона генерируемого звука  $f_0$  [6, 7]. Увеличение в единицу времени количества упругих коротких импульсов также приводит к росту эрозионной активности струйного ГДИ. Поэтому имеет смысл оценить

интенсивность эрозии – уменьшение массы образца за один период акустической волны:

$$\delta\mu = \frac{\mu}{f_0}.$$

Зависимость интенсивности эрозии от статического давления в жидкости  $\delta\mu(\Delta P_{ст})$  представлена на рис. 5б. Имеет место линейный

рост уменьшения массы образца за один период волны пропорционально избыточному давлению. При этом скорость роста зависимости  $\delta_{\mu}(\Delta P_{\text{ст}})$  меняется: в нижнем диапазоне статического давления ( $\Delta P_{\text{ст}} = (0 \dots 0.8) \text{ МПа}$ ) она меньше, а в верхнем диапазоне ( $\Delta P_{\text{ст}} = (0.8 \dots 2.4) \text{ МПа}$ ) – больше. Связано это, возможно, с тем, что с ростом  $\Delta P_{\text{ст}}$  происходит растворение свободного воздуха, имеющего незначительный объем, по сравнению с жидкостью. При достижении давления 0.8 МПа весь свободный воздух растворен на молекулярном уровне и в дальнейшем газосодержание жидкости не изменяется. Уменьшение концентрации зародышей кавитации приводит к повышению порога кавитации жидкости и увеличению эрозионной активности струйного гидродинамического излучателя.

### Выводы

Подводя итог, можно сделать следующие выводы.

- Эксперименты в диэлектрической, химически нейтральной жидкости показали, что для разрушения металлов механическое микроударное воздействие кавитации играет главенствующую роль.
- Реально достигнутое увеличение скорости эрозии на два порядка дает возможность проведения технологических операций по ультразвуковой очистке деталей машин из алюминиевых и магниевых сплавов от различных загрязнителей (нагар, окалина, абразивные частицы притирочных паст и др.) в химически нейтральных жидкостях (минеральные масла, толуол и др.), создавая необходимое избыточное давление в рабочей емкости.

- В задачах кавитационной очистки деталей машин в условиях статического давления могут успешно применяться струйные гидродинамические излучатели, которые по экономическим показателям и с точки зрения техники безопасности имеют существенное преимущество по сравнению с электроакустическими преобразователями пьезоэлектрического или магнитоэлектрического типа.

### Литература

1. *Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.* Кавитация. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – С. 380–421.
2. *Mettin R., Luther S., Ohi C.-D., Lauterborn W.* Acoustic Cavitation Structures and Simulations by a Particle Model // *Ultrason. Sonochem.* – 1999. – 6, Pp. 25–29.
3. *Petracchi G.* Investigations of Cavitation Corrosion // *Engineering Digest.* – 1949. – 10, № 9. – 314 p.
4. *Shimada M., Kobayashi T., and Matsumoto Y.* Dynamics of Cloud Cavitation and Cavitation Erosion (ASME FEDSM99 – 6775, 1999).
5. *Guan J., Matula T.J.* Time-Dependence of Alcohol Quenching in SBSL // 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics. – Moscow, August 19 – 23, 2002. – Pp. 947–950.
6. *Вітков В.В., Дудзінський Ю.М., Макарова Т.В.* Оптимизация энергетических характеристик струйных гидродинамических излучателей // *Электроника и связь.* – 2010. – № 6 (Часть 2). – С. 147–151.
7. *Вітков В.В., Дудзінський Ю.М., Жукова А.В.* Амплитудно-частотные характеристики затопленных струйных оболочек // II Международный науч.-техн. конф. “Актуальные проблемы прикладной механики и прочности конструкций”, 4 – 7 июня 2010 г.: Материалы конференции: сб. трудов. – Ялта, 2010. – С. 96–103.

УДК 534. 222.2

## Ерозійна активність у ближнім полі струминного гідродинамічного випромінювача

**О.А. Бондар**, канд. техн. наук, **В.В. Вітков**, **Ю.М. Дудзінський**, д-р фіз.-мат. наук, **Н.В. Манічева**  
Одеський національний політехнічний університет,  
пр. Шевченка, 1, Одеса-44, 65044, Україна.

Представлено результати дослідження ближнього поля струминного гідродинамічного випромінювача при наявності гідростатичного тиску в герметичній ємності. Експеримен-

тально досліджена кавітаційна активність у ближнім полі випромінювача по ерозії свинцевих зразків. Показано, що з ростом надлишкового статичного тиску в геометричній прогресії збільшуються питомі характеристики ерозії: в одиницю часу й за один період коливань. Проведено порівняння теоретичних і експериментальних результатів. Результати досліджень дозволяють розробити практичні рекомендації з використання даних джерел звуку в різних звукових технологіях: очищення деталей машин від технологічних і експлуатаційних забруднень, емульгування нерозчинних рідин, диспергування твердих частинок у рідинах". Бібл. 7, рис. 5.

**Ключові слова:** струминний гідродинамічний випромінювач, ближнє поле, ерозія.

UDC 534. 222.2

## Erosive activity in a near field of a jet hydrodynamic radiator

**A.A. Bondar**, Ph.D., **V.V. Vitkov**, **Yu.M. Dudzinski**, Dr.Sc., **N.V. Manecheva**

Odesa national polytechnic university,

pr. Shevchenko, 1, Odesa-44, 65044, Ukraine.

Results of research of a near field jet's hydrodynamic radiator are submitted at presence of hydrostatic pressure in hermetic capacity. It is experimentally investigated cavity activity in a near field of a radiator on erosion of lead samples. It is shown, that with growth of superfluous static pressure in geometrical progression specific characteristics of erosion increase: in unit of time and for one period of fluctuations. Comparison of theoretical and experimental results is carried out. The results of researches will allow to work out practical recommendations on the use of these sources of sound in different acoustic technologies: cleaning of details of machines from technological and operating contaminations, emulating of insoluble liquids, disparaging of solid particles in liquids. Reference 7, figures 5.

**Keywords:** jet hydrodynamic radiator, near field, erosion.

### References

1. Knapp R.-T., Daily J.-W., Hammitt F.-G. (1970), [Cavitation]. NEW YORK: McGRAW-HILL, P. 688.
2. Mettin R., Luther S., Ohl C.-D., Lauterborn W. (1999), [Acoustic Cavitation Structures and Simulations by a Particle Model]. Ultrason. Sonochem. Vol. 6, Pp. 25–29.
3. Petracchi G. (1949), [Investigations of Cavitation Corrosion]. Engineering Digest. Vol. 10, no 9. P. 314.
4. Shimada M., Kobayashi T., and Matsumoto Y. (1999), [Dynamics of Cloud Cavitation and Cavitation Erosion] (ASME FEDSM99 – 6775).
5. Guan J., Matula T.J. (2002), [Time-Dependence of Alcohol Quenching in SBSL]. 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics. Moscow, August 19 – 23. Pp. 947–950.
6. Vitkov V.V., Dudzinski Yu.M., Makarova T.V. (2010), [Optimization of power characteristics of stream hydrodynamic radiators]. Electronics and communications. no 6 (part 2). Pp. 147–151 (Rus).
7. Vitkov V.V., Dudzinski Yu.M., Zukova A.V. (2010), [Amplitude-frequency characteristics of the flooded jet's shells]. II Intern. Science and Tech. Conf. "Actual problems of the applied mechanics and durability of constructions". Yalta, June 4 – 7, – Pp. 96–103 (Rus).

Поступила в редакцію 09 января 2013 г.