

УДК 621.7.022.6:621.81

Ю.М. Дудзинский, канд. техн. наук,
О.А. Назаренко, канд. физ.-мат. наук,
Н.В. Маничева, инженер,
Одес. нац. политехн. ун-т

КАВИТАЦИОННАЯ ЭРОЗИЯ ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ СТАТИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ

Ю.М. Дудзінський, О.А. Назаренко, Н.В. Маничева. **Кавітаційна ерозія з надмірним статичним тиском.** Псдаються результати експериментальних досліджень ерозійних характеристик осесиметричних гідродинамічних випромінювачів в умовах надмірного статичного тиску.

Yu.M. Dudzinsky, O.A. Nazarenko, N.V. Manicheva. **Cavitation erosion under the static overpressure.** The results of the experimental research of axially symmetric hydrodynamic radiator erosion characteristics under the static overpressure are presented

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 поверхностей металлов, их сплавов и окисных пленок под воздействием кавитации в мощных акустических полях широко применяется в различных технологических процессах и аппаратах: диспергирование твердых присадок технических масел, очистка поверхностей от нагара, окалины, ржавчины, абразивных частиц притирочных паст [1] и др., интенсификация технологических процессов и т.д. При этом многие технологические процессы протекают в химически активных средах при высокой температуре, а при необходимости — в условиях избыточного статического давления.

Поскольку кавитационному разрушению подвержены твердые вещества с различными физико-механическими, электрическими, химическими свойствами, то можно выделить несколько механизмов эрозии поверхности тел [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 при схлопывании каверн на твердой поверхности (известен факт, что кавитационное 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, вырывать из него микрочастицы);

— химическое воздействие кавитации (на поверхности медных и алюминиевых сплавов, например, приводит к быстрому их разрушению в водных растворах);

— тепловое воздействие кавитации (при схлопывании кавитационной каверны генерируются импульсы высокой температуры, однако теплота может аккумулироваться только в неметаллических телах с низкой теплопроводностью).

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 и акустического поля и др. факторов, один из описанных механизмов является решающим, а воздействие остальных — несущественно.

В 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 мощных акустических полей только усиливает эти механизмы. Поэтому в ультразвуковых методах очистки прослеживаются 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 кавитационных пузырьков, например, создавая избыточное статическое давление в рабочей емкости и одновременно увеличивая интенсивность акустического поля.

Ранее проведенные исследования показали, что осесимметричные гидродинамические излучатели (ГДИ) могут генерировать мощные акустические колебания как при атмосферном, так и при избыточном статическом давлении [4]. Последнее позволяет плавно регулировать в широком диапазоне частоту основного тона сигнала и увеличить на порядок уровень звука. Результаты экспериментов свидетельствуют также о высокой эффективности использования данных излучающих систем при тонкой очистке деталей машин от притирочных паст в рабочей емкости открытого типа [1], а по экологическим показателям ГДИ предпочтительнее, чем магнитострикционные и пьезоэлектрические излучатели.

Экспериментальные исследования работы осесимметричных ГДИ обнаружили вторичную вихревую тороидальную область развитой кавитации (рис. 1), образующуюся в результате выброса содержимого первичной области в окружающее пространство [5]. При этом повышение гидростатического давления в рабочей емкости в диапазоне $\Delta P_{ст} = 0...2,4$ МПа позволило увеличить интенсивность акустического поля вблизи зоны гидродинамического звукообразования более, чем на порядок: $I = 1,6...40$ Вт/см². Следует отметить, что с увеличением $\Delta P_{ст}$ необходимо подбирать оптимальные значения геометрических и гидродинамических характеристик осесимметричного ГДИ [6]. Это дает возможность, в частности, увеличить КПД излучающей системы.

Представляет интерес оценка эффективности кавитационной эрозии (ее ударное воздействие) вблизи зоны звукообразования осесимметричного ГДИ, исследование ее зависимости от избыточного статического давления в рабочей емкости.

Экспериментальное исследование кавитационной эрозии образцов в условиях избыточного статического давления проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 2. 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, осесимметричная излучающая система 5, насос 8 и соединительные трубопроводы

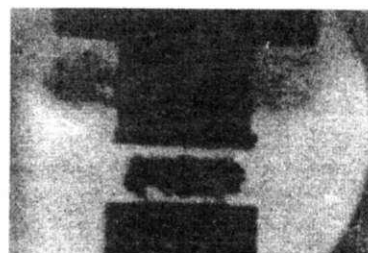


Рис. 1. Гидродинамический излучатель

представляют собой замкнутую систему, так что внутри рабочей емкости, на входе насоса и на выходе сопла действует одинаковое гидростатическое давление $\Delta P_{ст}$, которое 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 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 осциллограф 18, вольтметр 19 и спектроанализатор звуковых и ультразвуковых частот 20.

Эрозионное действие осесимметричного ГДИ оценивалось по разрушению свинцовых образцов весовым методом. Образцы представляли собой пластинки с размерами 15×12×1 мм (рис. 3) и располагались вблизи первичного и вторичного торoidalных вихрей развитой кавитации [5] — активной зоны гидродинамического звукообразования (см. рисунок 1). Уменьшение массы образцов измерялось с помощью аналитических весов, имеющих цену деления 10^{-5} г. При этом время озвучивания не превышало 15 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.

Временные зависимости эрозии свинцовых образцов в мощных акустических полях при различных гидростатических давлениях $\Delta P_{ст}$ представлены на рис. 4. В диапазоне избыточных давлений $\Delta P_{ст} = 0...0,48$ МПа время озвучивания составляло $\Delta t = 5...15$ мин (рис. 4, а). С увеличением давления в рабочей емкости приходилось уменьшать временные интервалы кавитационной обработки пластин с 15 мин до 30 с. Связано это с тем, что в диапазоне $\Delta P_{ст} = 0...2,4$ МПа уровень акустического сигнала увеличивается приблизительно на порядок [4], а поскольку при этом существенно растет частота основного тона, то на два порядка возрастает интенсивность поля вблизи зоны звукообразования [5]. Соответственно должна существенно возрастать и эрозионная 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 $\Delta P_{ст} = 0,64...1,36$ МПа выбран временной интервал $\Delta t = 0,5...2$ мин (рис. 4, б). С дальнейшим увеличением $\Delta P_{ст}$ эрозионная активность настолько возрастает, что возможно 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 $\Delta t = 20...60$ с (рис. 4, в).

Во всех описанных экспериментах осесимметричная гидродинамическая излучающая система при заданном избыточном статическом давлении настраивалась на максимальное звучание путем соответствующего выбора скорости истечения жидкости из сопла $v(\Delta P_{ст})$, а в случае необходимости повышения акусто-гидродинамического КПД системы возможен выбор оптимального соотношения наружного и внутреннего диаметров сопла $(D/d)_{опт}$ [6]. Анализ

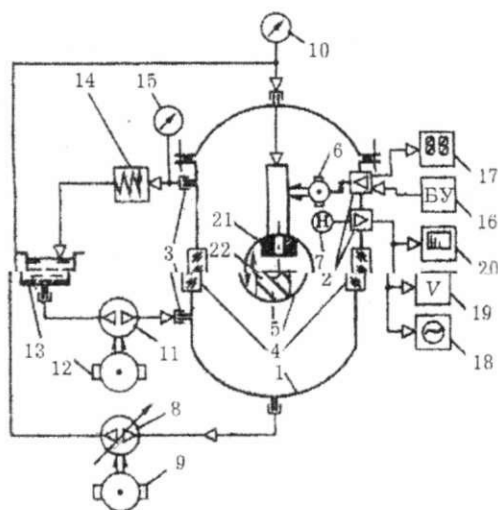


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

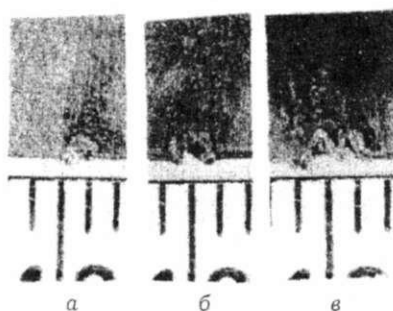


Рис. 3. Образцы после кавитационного воздействия

временных зависимостей эрозионной активности ГДИ показывает линейный рост $\Delta m(\Delta t)_{\Delta P}$ во всем исследованном диапазоне статических давлений $\Delta P_{ст} = 0 \dots 2,4$ МПа. Это можно считать еще одним подтверждением ранее установленного факта [6], что в этом диапазоне избыточных давлений в рабочей емкости, подбирая оптимальное значение скорости струи на выходе сопла, можно добиться линейного роста интенсивности акустического сигнала вблизи зоны звукообразования ГДИ.

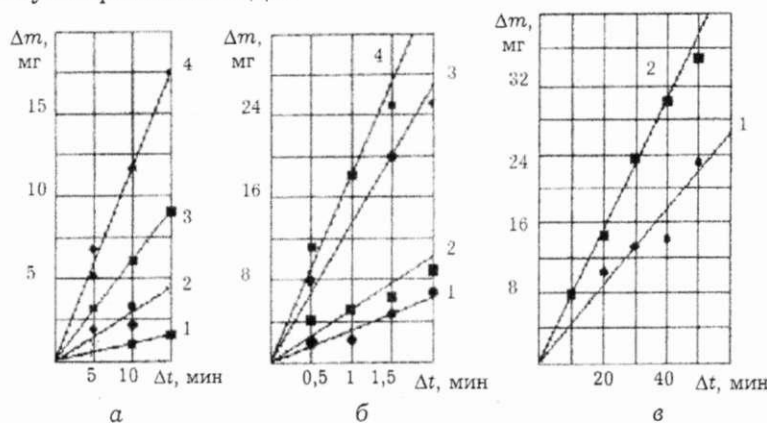


Рис. 4. Уменьшение массы образцов при ΔP (МПа): а) 1 — 0; 2 — 0,16; 3 — 0,32; 4 — 0,48; б) 1 — 0,64; 2 — 0,8; 3 — 1,2; 4 — 1,36; в) 1 — 1,6; 2 — 2,24

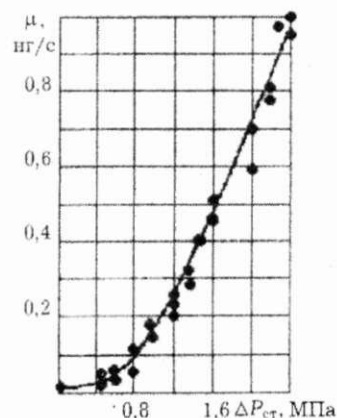


Рис. 5. Зависимость скорости эрозии от статического давления

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 получение зависимости скорости эрозии (условно за 1 с озвучивания) от избыточного давления в рабочей емкости

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

Зависимость $\mu(\Delta P_{ст})$ приведена на рис. 5. Анализ показал, что эта зависимость может быть описана функцией вида

$$\mu = K_{1,2}(\Delta P_{ст})^2,$$

где $K_1 = 9,375 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2\text{с}^2/\text{кг}$ для диапазона $\Delta P_{ст} = 0 \dots 0,8$ МПа;

$K_2 = 1,590 \cdot 10^{-22} \text{ м}^2\text{с}^2/\text{кг}$ для диапазона $\Delta P_{ст} = 0,8 \dots 2,4$ МПа.

Исходя из изложенного, можно сделать 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 осесимметричные гидродинамические излучатели, которые по экономическим показателям и с точки зрения техники безопасности имеют существенное преимущество в сравнении с электроакустическими преобразователями.

Литература

1. Дудзинский Ю.М., Сухарьков О.В. Гидродинамические излучатели акустических волн и проблема очистки деталей машин // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2000. — Вып. 2(11). — С. 23 — 26.

2. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация: Пер. с англ. — М.: Мир, 1974. — С. 380 — 421.
3. Petracchi G. Investigations of Cavitation Corrosion // Engineering Digest. — 1949. — Vol. 10, № 9. — 314 p.
4. Дудзинский Ю.М., Назаренко А.Ф. Эффективность работы осесимметричных гидродинамических излучателей в условиях избыточного статического давления // Акуст. журн. РАН. — 1996. — Т. 42, № 4. — С. 569 — 572.
5. Дудзинский Ю.М., Назаренко А.А. Энергетические характеристики вторичной вихревой области осесимметричного гидродинамического излучателя // Акуст. вісн. — 2000. — Т. 3, № 1. — С. 36 — 41.
6. Дудзинский Ю.М., Маничева Н.В., Назаренко О.А. Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений // Акуст. вісн. — 2001. — Т. 4, № 2. — С. 38 — 46.

Поступила в редакцию 11 сентября 2001 г.