

# АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Т. XVIII  
1972  
Вып. 3

АКАДЕМИЯ  
НАУК  
СССР

Июль  
Август  
Сентябрь

Основан в 1955 г.

Выходит 4 раза в год

МОСКВА

УДК 534.8 : 681.89

## О МЕТОДАХ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ

Обзор

*Б. А. Агранат, Л. Б. Гутнова, Л. М. Лямшев*

Очистка является наиболее изученным и распространенным процессом ультразвуковой технологии. Подробные исследования механизма очистки позволили установить решающую роль кавитации в разрушении поверхностных пленок [1]. Кавитационные пузырьки размером от нескольких микрон до сотен микрон, пульсируя у основания мельчайших наслоений на загрязненной поверхности твердых тел приводят к эффективной очистке этих тел от загрязнений. Пульсации кавитационных пузырьков (полостей) в акустическом поле порождают значительные переменные давления, вызывающие появление трещин и очагов эрозии в пленке загрязнений. Некоторые кавитационные пузырьки, проникая под пленку, вызывают ее отслаивание [2]. Вихревые микропотоки, возникающие в результате пульсаций и деления кавитационных полостей, способствуют интенсификации процессов диффузии и массообмена в пограничном слое и ускоряют взаимодействие загрязнения с моющей жидкостью.

В последние годы наблюдался интенсивный рост производства установок ультразвуковой очистки в СССР и за рубежом: в США, Англии, ФРГ, Японии. По своей мощности и технологическим возможностям установки ультразвуковой очистки, выпускаемые в различных странах, существенно отличаются друг от друга. Выпускаются установки небольшой мощности (от нескольких *ватт* до 2 *квт*), предназначенные для удаления загрязнений слабо связанных с очищаемой поверхностью. В качестве источников ультразвуковых колебаний в этих установках используются преобразователи из пьезокерамики и ферритов [3—5]. Наряду с маломощными установками, предназначенными для очистки мелких деталей в электронной, радиотехнической и приборостроительной промышленности, широко применяются мощные (до нескольких десятков *квт*) установки и автоматизированные линии ультразвуковой очистки [6]. Источником ультразвука в мощных установках, применяемых в машиностроительной, металлургической и химической промышленности, служат магнитострикционные преобразователи с развитой излучающей поверхностью, активное звено которых выполняется из железокобальтового сплава — пермендюра. В мощных установках можно в широких пределах регулировать эрозионную активность сформировавшихся областей кавитации путем повышения до некоторых пределов статического давления [7]. По своим технологичес-

ким возможностям эти установки значительно превосходят маломощные устройства. Установки большой мощности можно использовать не только для снятия пленок со слабой адгезией к поверхности, но и для удаления пленок, прочно связанных с очищаемой поверхностью (окалина, нагар), очистки деталей сложной формы, удаления заусенцев с прецизионных деталей [8].

Многообразие выпускаемых установок ультразвуковой очистки диктует необходимость создания единых стандартных методов оценки их эффективности. Поскольку решающую роль в механизме ультразвуковой очистки играет кавитация, методика испытаний, по-видимому, должна предусматривать возможность оценки эффективности установок ультразвуковой очистки, главным образом, по двум основным характеристикам: по эрозионной активности области кавитации в объеме рабочей жидкости и по объему, занимаемому кавитационной областью в рабочей камере установки.

В этой связи рассмотрим прежде всего известные методы оценки эрозионной активности кавитационной области. Для оценки эрозионной активности кавитационной области применяются дифференциальные и интегральные методы. Дифференциальные методы предусматривают оценку эрозионной активности каждой отдельной кавитационной полости с помощью миниатюрных пьезодатчиков, радиометров [9] или термометров [10].

Дифференциальные методы широко используются при точных физических исследованиях, устанавливающих связь между результатами расчетов движения парогазового пузырька в звуковом поле и соответствующими экспериментальными данными [11]. Однако для оценки эффективности установок ультразвуковой очистки дифференциальные методы, по-видимому, не пригодны.

Интегральные методы оценки эрозионной активности кавитационной области основаны на регистрации физических эффектов, обусловленных кавитацией. За меру эрозионной активности могут быть приняты люминесценция, химические реакции, кавитационный шум, эрозия стандартных поверхностных пленок загрязнений и твердых тел в акустическом поле.

Френцелем и Шульцесом [12], по-видимому, впервые была обнаружена способность осциллирующих пузырьков излучать слабый свет. Наиболее вероятной причиной, объясняющей свечение, излучаемое кавитационной областью, является нагрев содержащегося в кавитационных полостях газа при адиабатическом сжатии. Эта гипотеза была выдвинута Нолтингом и Непайросом [13] и подтверждена экспериментально Куттруфом, наблюдавшим люминесценцию при кавитации в ртути [14] и установившим, что импульс люминесценции излучается одновременно с ударной волной при пульсациях пузырька [15]. В ряде работ [16—18] предпринимались попытки связать эрозионную активность кавитационной области с интенсивностью ее свечения. В числе исследований последнего времени необходимо отметить работу Сиротюка [19], в которой показано, что световой поток, излучаемый кавитационной областью, зависит от количества содержащегося в кавитационных пузырьках газа и может изменяться во времени вследствие выпрямленной диффузии.

Явление звуколюминесценции вряд ли можно использовать для оценки эрозионной активности кавитационной области, в частности, из-за неустойчивости светового потока. Методика измерения светового потока также довольно сложна, требует применения чувствительных фотоэлектронных умножителей и постоянства оптических свойств среды в исследуемом объеме. Не представляется также возможным сравнивать технологические устройства с разными размерами излучателей и различными уровнями создаваемого ими звукового давления по эрозионной активности кавитационной области, поскольку интенсивность свечения зависит, в основном, от общего количества кавитационных пузырьков, а не от их эрозионной активности. При контроле интенсивности люминесценции неизвестными остаются также координаты кавитационной области в объеме камеры установки.

Воздействие кавитации на протекание химических реакций замечено давно. Еще в 1927 году Ричардсоном и Лумисом были проведены первые опыты [20] по озвучиванию водного раствора иодистого калия. Было установлено, что из раствора под действием кавитации выделяется свободный иод, который легко обнаруживался по посинению раствора при добавлении в него крахмала. В дальнейшем были проведены многочисленные исследования воздействия ультразвуковых колебаний и кавитации на химические растворы. Анализ этих исследований дан в работе [21]. Одной из наиболее вероятных причин ускорения химических реакций в акустическом поле является, по-видимому, значительный локальный нагрев жидкости при захлопывании кавитационного пузырька. В некоторых случаях наблюдалась корреляция между скоростью химических реакций и уровнем кавитационной эрозии в звуковом поле. В частности, в работе [22] показано, что под действием ультразвука в условиях кавитации скорости разложения фенола в водных растворах, образования фенола из бензола, а также перекиси водорода в воде достигают максимальных значений при статическом давлении 3,5—4 атм, в случае использования радиально колеблющегося магнитострикционного преобразователя ЦМС-18 [23]. При этих же значениях статического давления наблюдался максимум эрозии алюминиевых образцов, помещенных в кавитационную область, образующуюся в поле того же преобразователя.

Следует однако заметить, что скорость химических реакций сильно зависит от природы растворенного в жидкости газа и не определяет эрозионную активность. По скорости химических реакций нельзя установить различие в эрозионной активности различных областей кавитации и определить их расположение в рабочем объеме камеры. Перечисленные недостатки, наряду с высокой трудоемкостью экспериментов, не позволяют рассматривать этот метод оценки эрозионной активности кавитационной области в качестве основы методов испытаний установок ультразвуковой очистки.

Известно, что возникновение акустической кавитации сопровождается появлением характерного шума, обусловленного захлопываниями и пульсациями кавитационных областей. Спектр кавитационного шума наряду с основной частотой акустического поля и ее гармониками содержит и субгармонические составляющие. Основным источником кавитационного шума являются захлопывающиеся парогазовые полости, излучающие импульсы давления. Чем выше эрозионная активность кавитационной области, тем шире частотный спектр излучаемого шума и тем выше его интенсивность [24]. К сожалению, в настоящее время имеется лишь весьма ограниченное число работ, посвященных изучению спектральных характеристик кавитационного шума [25—27] и их связи с эрозионной активностью кавитационной области.

Эрозионная активность кавитационной области может быть определена по степени снятия эталонных загрязнений. Метод эталонного загрязнения удобно использовать также для изучения механизма и динамики разрушений различных поверхностных пленок в акустическом поле, и для подбора моющих сред и технологических режимов ультразвуковой очистки. Полнота удаления загрязнения приближенно может оцениваться весовым способом, т. е. по убыли веса загрязнения [28—29], нанесенного на образец и с более высокой степенью точности — радиометрическим методом по нарастанию радиоактивности моющего раствора при удалении загрязнения с добавкой радиоактивных веществ [30]. Недостатком метода эталонных загрязнений может явиться некоторая трудоемкость процесса испытаний: образцы должны иметь строго определенный класс обработки, их поверхность должна быть тщательно очищена перед нанесением эталонного загрязнения, определенное время должно затрачиваться на сушку образцов после очистки и их повторное взвешивание. На результаты испытаний могут влиять неравномерность слоя покрытия и неоднородности микро рельефа образца и т. п.

Тем не менее метод эталонных загрязнений может оказаться перспективным для оценки эрозионной активности кавитационной области и оценки эффективности маломощных установок ультразвуковой очистки. Метод сравнительно несложен и не требует какого-либо специального лабораторного оборудования.

Удобным для оценки эрозионной активности кавитационной области и стандартизации методики испытаний установок ультразвуковой очистки может, по-видимому, явиться метод эрозионных тестов. Сущность его состоит в том, что образец, изготовленный из материала с низкой эрозионной стойкостью, помещается в область кавитации на непродолжительное время, после чего определяется убыль веса образца из-за эрозии. Если размер, форма и материал образца постоянны, то уменьшение его веса за определенный промежуток времени может служить мерой эрозионной активности кавитационной области. Метод эрозионных тестов был описан в работе [31] и применен для оценки влияния температуры, газосодержания и других параметров на эрозионную активность области кавитации и в дальнейшем успешно применялся [32—34]. Недостатком метода эрозионных тестов является его трудоемкость и малая точность. Погрешность измерений в зависимости от интенсивности кавитации колеблется от 15% до 100%.

Для оценки эрозионной активности кавитационной области в установках ультразвуковой очистки использовалась тонкая алюминиевая фольга [35—38], которая помещалась в заполненную жидкостью ванну ультразвуковой очистки, параллельно или перпендикулярно поверхности излучателя. По точечным пробоям и вмятинам, образующимся в фольге после кратковременной работы установки, определялись границы области кавитации в дальнем и ближнем поле и оценивалась ее эрозионная активность. Авторами работы [38] для определения площади фольги, разрушенной под действием кавитации, был использован фотоэлемент для регистрации светового потока, проходящего через отверстия, образовавшиеся в фольге. Было установлено, что при кратковременной выдержке фольги (1—3 мин) в кавитационной области со слабой эрозионной активностью величина фототока линейно связана с амплитудой колебаний излучателя. Авторы уже упомянутой работы [38] рекомендуют для количественной оценки эрозионной активности кавитационной области использовать алюминиевую фольгу толщиной 20 мкм. Предлагалось для оценки эрозионной активности помещать в область кавитации кружок фольги постоянного размера, а эрозионную активность оценивать по формуле

$$C = \frac{Ak}{t},$$

где  $C$  — мера эрозионной активности;  $A$  — отношение площади, разрушенной части образца фольги к полной площади образца;  $t$  — время выдержки фольги в кавитационной области;  $k$  — некоторая постоянная, зависящая от толщины и марки фольги.

Метод оценки эрозионной активности области кавитации с помощью фольги может, по-видимому, оказаться перспективным для разработки стандартной методики испытаний установок ультразвуковой очистки. Метод прост, общедоступен, позволяет быстро и наглядно оценивать не только эрозионную активность, но и геометрию кавитационной области в рабочем объеме установки.

Как бы ни велика была эрозионная активность кавитационной области, этот признак все же недостаточен для оценки эффективности установок ультразвуковой очистки. Не менее важно, какой объем занимает кавитационная область или области кавитации и как они распределяются в конкретных установках. Известны три метода оценки объема, занимаемого кавитационной областью.

Простой и оригинальный способ был предложен авторами работы [39].

На крышке герметического сосуда полностью заполненного жидкостью, в которую помещается источник ультразвуковых колебаний, устанавливается градуированный капилляр, сообщающийся с атмосферой. При образовании области кавитации часть жидкости вытесняется в капилляр. Увеличение объема жидкости в капилляре соответствует объему, занимаемому всеми кавитационными пузырьками, образовавшимися в сосуде. Этот метод удобно использовать для определения так называемого среднего индекса кавитации [40]. Недостаток метода состоит в том, что он не позволяет определять расположение областей кавитации.

Для определения размеров, формы и места расположения областей кавитации можно использовать фото- и киносъемку [41—42]. Фотографируя области кавитации в нескольких проекциях путем численного интегрирования можно с высокой степенью точности определить их объем. Недостатком этого метода является необходимость создания прозрачных окон в технологическом устройстве, что не всегда возможно.

Как уже отмечалось выше, удобным для определения объема и расположения кавитационной области может, по-видимому, явиться метод, основанный на использовании алюминиевой фольги. Помещая фольгу в ванну и ориентируя ее в различных плоскостях по отношению к поверхности ультразвукового излучателя, можно не только визуализировать области кавитации, но точно рассчитать их объем и координаты.

Из изложенного выше, как нам кажется, вытекает, что для разработки стандартной процедуры испытаний и оценки эффективности установок ультразвуковой очистки перспективными могут оказаться два метода: метод, основанный на исследовании стандартных образцов с эталонным загрязнением и метод эрозионных тестов фольги. Оба они являются прямыми, а не косвенными методами, позволяющими разработать критерии оценки эффективности установок ультразвуковой очистки по эрозионной активности и по величине ее относительного объема и геометрии в рабочем объеме установки. В качестве стандартной рабочей жидкости, как нам представляется, может быть использована дегазированная вода без каких-либо примесей химических моющих добавок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский. «Физические основы ультразвуковой технологии» М., 1970, изд. «Наука», ч. 3, 165—253.
2. Л. О. Макаров, Л. Д. Розенберг. «О механизме ультразвуковой очистки», 3.
3. O. Bradford. Ultrasonic Transducers, 1970, 9. Акуст. ж., 1957, 4, 374.
4. А. Н. Гальперина. «Пакетные пьезокерамические преобразователи». Сб. «Прогрессивные методы ультразвуковой очистки изделий в химическом и нефтяном машиностроении», М., 1967, 25.
5. И. П. Голямина. Магнестрикционные излучатели из ферритов. «Источники мощного ультразвука», М., 1970, изд. «Наука», ч. II, 140—146.
6. Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. В. Кошелев. Ультразвуковая очистка полосы трансформаторной стали в потоке. Ультразвуковая техника. 1967, 5, 28.
7. Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский. Использование избыточного статического давления для управления процессом ультразвуковой кавитации. Ультразвуковая техника. 1966, 1, 1.
8. Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, А. П. Чернов. Выбор оптимальных технологических режимов снятия заусенцев при воздействии ультразвука. Сб. «Промышленное применение ультразвука». М., 1967, 17.
9. Е. В. Романенко. Приемники ультразвука и методы их градуировки. Источники мощного ультразвука. М., Изд. «Наука», ч. VII, 1967.
10. M. E. Veloz, W. I. Nom. Distribution of ultrasonic cavitation intensification in liquids system. Canadian chemical engineering. 1967, 45, 4, 238—240.
11. А. В. Кортнев. Исследование воздействия ультразвука на процессы в гетерогенных системах. Докт. дисс. 1968 г. Одесса, Политехнический институт.
12. H. Frezel, H. Schultes. Luminescen in Ultraschallebeschieken Wasser. Z. Phys. chem. 1934, 27, 5—6, 421—424.
13. B. E. Nolting, E. A. Neppiras. Cavitation produced by Ultrasonic. Proc. Phys. Soc., 1950, 63B, 674—685.

14. H. Kuttruff. Über den Zusammenhang zwischen der Sonolumineszenz und der Schwingungskavitation in Flüssigkeiten. *Akustica*, 1962, 12, 231—235.
15. H. Kuttruff. Sonolumineszenz in Quecksilber IV Inter. Congr. Acoust., 1962, Rep. 124.
16. E. A. Neppiras. Conference on Acoustic cavitation Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 1962.
17. H. G. Flynn. Conference on Acoustic cavitation. Harvard University Cambridge, Massachusetts, 1962.
18. R. Hickling. Effects of thermal conductivity in sonoluminescence. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1963, 35, 7, 967—974.
19. М. Г. Сиротюк. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации. Мощные ультразвуковые поля. Изд. «Наука», М., 1968, ч. V.
20. W. T. Richard, A. L. Loomis. The chemical effects of high frequency sound waves. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1927, 49, 3086—3088.
21. И. Е. Эльпинер. «Ультразвук». Физико-химическое и биологическое действие. М., Госиздат, физико-математическая литература, 1969.
22. Г. А. Зильберт, А. Н. Иткинд. Действие ультразвукового поля на водные растворы бензола и фенола. Труды МИТХТ (кафедра общей химической технологии). М., 1969, 201—215.
23. Г. Ф. Кузьмин, Б. И. Михайлов и др. Образование и развитие кавитации в цилиндрических магнитострикционных излучателях. Сб. «Ультразвуковая техника», 1967, 3, 15—22.
24. А. Д. Перник. «Кавитационный шум». Труды Акустического института, 1969, вып. 7, 87.
25. Ю. Л. Левковский. Энергетический спектр кавитационного шума. Труды Акустического института, вып. 7, стр. 104.
26. Ю. Я. Богуславский, А. И. Иоффе, К. А. Наугольных. Изучение звука кавитирующей области. Труды Акустического института, 1969, вып. 7, 127.
27. Л. М. Лямшев. К теории гидродинамического кавитационного шума. *Акуст. ж.*, 1969, 4, 15, 4, 1969.
28. В. И. Образцов, В. Ф. Ноздрев. Динамика снятия жировых пленок под действием ультразвука. В сб. «Применение ультразвука к исследованию вещества», М., 1963, Изд. МОПИ, 15, 151.
29. В. И. Башкиров, М. А. Веденеева и др. Влияние ультразвука на травление окиси углеродистой стали. Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов. М., 1970, Изд. «Металлургия», 234—240.
30. Ф. И. Кукоз, Б. Н. Поддубный. К вопросу влияния некоторых физических и химических факторов на динамику ультразвуковой очистки. VI Всесоюзная акустическая конференция, М., 1968, РП8.
31. А. С. Бебчук. К вопросу о кавитационном разрушении твердых тел. *Акуст. ж.*, 1957, 3, 1, 90—91.
32. М. Г. Сиротюк. Протекание процессов ультразвуковой кавитации при повышенных гидростатических давлениях. *Акуст. ж.*, 1966, 12, 2, 231.
33. В. И. Башкиров, Н. Д. Качеровская. Выбор растворов для ультразвуковой очистки от загрязнений, прочно связанных с очищаемой поверхностью. *Ультразвуковая техника*. 1964, 4, 28.
34. В. И. Егоров. Исследование стойкости диафрагм магнитострикционных преобразователей. Канд. дисс. 1968, Минск, Физ.-техн. ин-т АН БССР.
35. O. A. Antony. Technical aspects of ultrasonic cleaning — *ultrasonics*, 1964, 2, 1, 194—196.
36. Б. А. Агранат, В. И. Башкиров. Влияние статического давления на акустические свойства кавитирующей жидкости. *Акуст. ж.*, 1969, 15, 4, 605—607.
37. A. E. Crawford. The measurement of cavitation. *Ultrasonics*, 1964, 2, 2, 120—123.
38. Ф. И. Кукоз, Б. П. Поддубный, Э. Г. Щаренская. Применение алюминиевой фольги для исследования энергетических параметров и объемного распределения поля ультразвуковой кавитации. VI Всесоюз. акуст. конф., М., 1968, Д17.
39. И. Г. Михайлов, В. А. Шутилов. О простом способе обнаружения кавитации в жидкости. *Акуст. ж.*, 1959, 5, 3, 376.
40. Л. Д. Розенберг. Кавитационная область. Мощные ультразвуковые поля. М., 1968, изд. «Наука», ч. VI, 221.
41. H. I. Qollmick, K. Tesser. Reinigung mit Ultraschall unter verwendung magnetostriktiver Metalloberfläche Hefts, 1956, 2, 233—237.
42. Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский. Кавитационное разрушение поверхностных пленок в акустическом поле при повышенном статическом давлении. *Акуст. ж.*, 1967, 13, 2, 283—285.