

# О ВЛИЯНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ В ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЪЕМАХ НА ИМПЕДАНС ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А. Г. ЛЕЙКО, Ю. З. ШЛИПЧЕНКО

Государственный НИИ гидроприборов, Киев

Получено 15.12.97

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния кавитации на электрический импеданс электроакустических преобразователей, возбуждающих ультразвуковые колебания в водной среде при наличии отражающих поверхностей. Рассмотрены особенности изменения импеданса на различных стадиях развития кавитационного процесса в ультразвуковом поле стоячей волны. Получены зависимости вертикального распределения акустического давления в докавитационном и кавитационном режимах. Показано, что изменение импеданса электроакустических преобразователей обусловлено явлением разрушения стоячей волны вследствие рассеяния звука в кавитирующей среде.

## ВВЕДЕНИЕ

Принцип работы ряда ультразвуковых устройств различного назначения основан на возбуждении кавитации в жидкой среде, заполняющей некоторый объем ограниченных размеров. На этом принципе построены устройства для ультразвуковой очистки изделий в машиностроении, производстве электронных и оптических приборов, медицине, а также технологические устройства для деаэрации жидкостей, диспергирования аэрозолей и т. п.

Известно [1], что наличие кавитационных пузырьков в жидкости существенно изменяет ее физические свойства и тем самым приводит к изменению импеданса излучения электроакустических преобразователей, возбуждающих в среде ультразвуковые колебания. В безграничной среде [2] кавитационные явления сопровождаются значительным уменьшением (в 3–5 раз) сопротивления излучения по сравнению с соответствующим значением при отсутствии кавитации. При наличии в среде отражающих границ на изменения импеданса, порожденные кавитацией, должны также накладываться еще и соответствующие изменения, вызванные возникновением стоячих волн и обусловленные известной зависимостью акустической нагрузки преобразователей от расстояния до отражающих поверхностей.

Решение этой задачи в аналитической форме является достаточно сложной проблемой. Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию ультразвуковой кавитации (например, обзоры [3–6]), теория кавитационных процессов даже в безграничной среде до настоящего времени разработана очень слабо. Еще в меньшей степени изучены кавитационные явления

при распространении акустических волн конечной амплитуды в среде с учетом отражений [7, 8]. В связи с изложенным расчет акустической нагрузки ультразвуковых преобразователей часто производится путем соответствующей экстраполяции данных, измеренных в докавитационном режиме [9], либо на основе предположений о снижении волнового сопротивления среды при кавитации [10].

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы на основе экспериментальных исследований получить количественную оценку влияния кавитационных процессов на импеданс электроакустических преобразователей, возбуждающих ультразвуковые колебания в водной среде при наличии отражающих поверхностей.

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследований использовалась ванна для ультразвуковой очистки объемом 20 литров, к днищу которой были приклеены 8 пьезоэлектрических стержневых преобразователей. Преобразователи электрически соединялись параллельно и подключались к выходу мощного генератора через согласующее устройство (рис. 1). Электрический импеданс системы преобразователей определялся фазометрическим методом путем измерения: напряжения возбуждения  $U_g$ , тока  $I$ , протекающего через нагрузку генератора, и угла сдвига фаз  $\varphi$  между величинами  $I$  и  $U_g$ . Модуль электрического импеданса  $Z$ , его активная  $R_W$  и реактивная  $X$  составляющие в параллельной схеме замещения, а также электрическая потребляемая мощность  $W_e$  вычислялись по известным формулам:

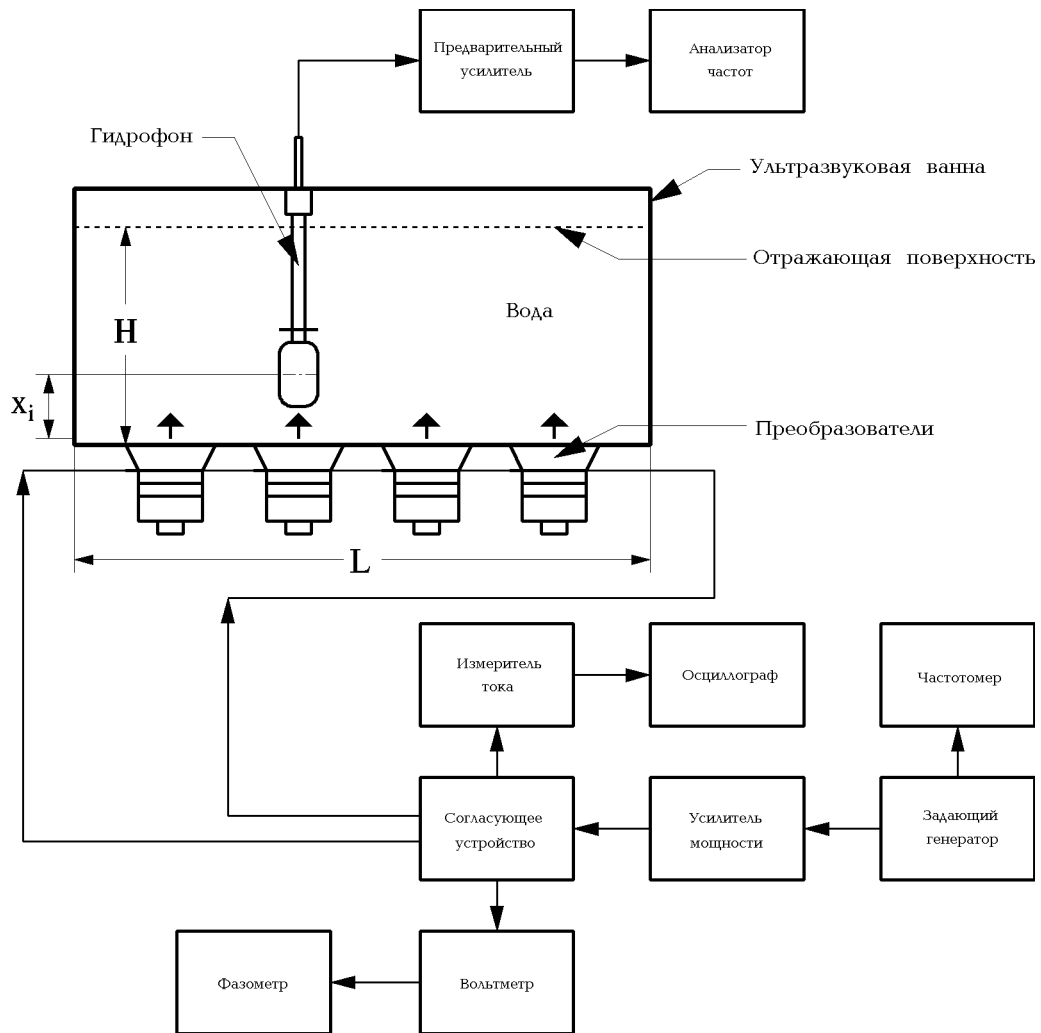


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

$$Z = \frac{U_g}{I}, \quad R_W = \frac{Z}{\cos(\varphi)},$$

$$X = \frac{Z}{\sin(\varphi)}, \quad W_e = U_g I \cos(\varphi).$$

Для определения резонансной частоты и параметров сопротивления системы преобразователей в воздушной среде перед заполнением ванны водой производилось измерение частотных характеристик  $R_{W_0}$  и  $W_{e0}$ . Затем ванна заполнялась чистой водопроводной водой до рабочего уровня  $H = 145$  мм и проводилась дегазация воды путем возбуждения в ней кавитации в течение 15–20 минут. После отстоя воды в течение 1.5–2 часов и удаления налипших на стенки ванны пузырьков проводились измерения зависимостей электрического импеданса системы преобразователей на дискрет-

ных частотах от напряжения возбуждения  $U_g$ , эффективное значение которого дискретно изменялось ступенями в пределах от 10 до 250 В. Пределы изменения напряжения выбирались из условия обеспечения возможности исследования процесса возбуждения кавитации от начала ее зарождения до ее развитой стадии. Дискретные значения частоты выбирались в резонансном промежутке системы преобразователей. В процессе выполнения работ осуществлялся контроль линейности тракта излучения путем измерения зависимости тока в цепи генератора от напряжения возбуждения. Установлено, что в диапазоне изменения напряжения возбуждения  $U_g$  форма тока  $I$  через преобразователи оставалась синусоидальной, причем, нелинейность тракта при максимальных значениях  $U_g$  не превышала  $\pm 2.5\%$ .

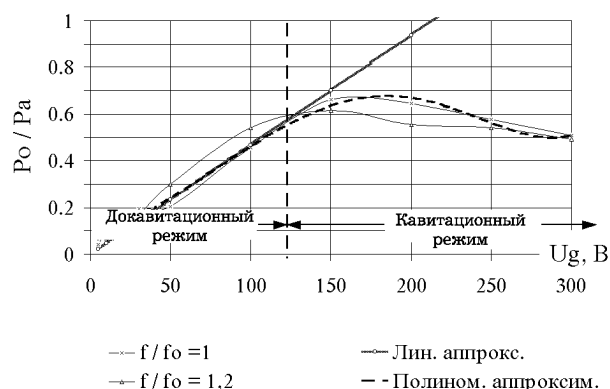


Рис. 2. Зависимость акустического давления у поверхности преобразователей от напряжения возбуждения

Для изучения структуры поля в ванне использовался сферический гидрофон ГИР-1 диаметром  $d=5$  мм, отградуированный метрологической организацией со средней квадратической погрешностью  $s = \pm 0.5$  дБ, чувствительность гидрофона  $g=62-64$  мкВ/Па в диапазоне от 30 до 40 кГц. Для устранения влияния продуктов нелинейных искажений (субгармоники порядка  $1/2$ , гармоник порядка  $3/2$ ,  $2$ ,  $3$  и т. д., а также шумовой составляющей спектра), вызванных кавитацией, на результат измерения основной гармоники акустического давления, сигнал с выхода гидрофона подавался на анализатор частот. Анализатор настраивался на среднюю геометрическую частоту  $f_0 = 31.5$  кГц при полосе  $1/3$  октавы, что обеспечивало с учетом коррекции достаточную частотную избирательность и чувствительность тракта при измерении.

Методика измерения зависимости распределения акустического давления  $P_{j,q}$  от глубины погружения гидрофона  $h_j$  при дискретных значениях напряжения возбуждения  $U_{g,q}$  заключалась в следующем:

- генератор настраивался на требуемую частоту;
- устанавливалось заданное дискретное значение напряжения возбуждения  $U_{g,q}$  на системе преобразователей;
- с помощью координатного устройства гидрофон размещался вблизи излучающей поверхности ультразвуковой ванны;
- проводилось измерение эффективного значения основной гармоники акустического давления, соответствующее этому положению гидрофона;

- затем глубина погружения гидрофона изменялась с дискретностью  $\Delta h = 5$  мм и при заданном напряжении  $U_{g,q} = \text{const}$  проводилось измерение зависимости акустического давления от глубины  $h_j$ ;
- аналогично измерялись зависимости основной гармоники акустического давления от глубины при других  $n$  дискретных значениях напряжения возбуждения.

Таким образом получали матрицу значений  $P_{j,q}$  размером  $m \times n$ , характеризующих вертикальное распределение акустического давления  $P(h)$  от глубины погружения  $h$  в заданном диапазоне изменения напряжения возбуждения  $U_g$ . Дискретные значения  $P_{j,q}$  для каждого  $h_j$  при  $U_{g,q} = \text{const}$  нормировались относительно среднего

$$P_{c p q} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_{j,q},$$

а затем определялось отношение

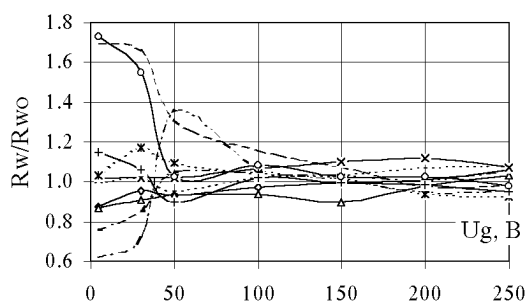
$$\delta P_{j,q} = \frac{P_{j,q}}{P_{c p q}},$$

характеризующее распределение акустического давления по высоте ультразвуковой ванны.

## 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе экспериментальных исследований изучались зависимости акустического давления вблизи излучающей поверхности от напряжения возбуждения и определялись соответствующие импедансные характеристики системы преобразователей. Кроме того, производилось исследование вертикального распределения акустического давления в ультразвуковой ванне на различных стадиях возбуждения кавитации. Результаты этих исследований представлены на графиках рис. 2–6.

Анализ зависимостей акустического давления  $P_0$  от напряжения возбуждения  $U_g$  у излучающей поверхности системы преобразователей (рис. 2), измеренных на расстоянии 5 мм от дна ванны на частотах  $f_1 = 34.4$  кГц и  $f_2 = 35.5$  кГц вдоль продольной оси какого-либо из преобразователей и нормированных относительно значения  $P_a = 101.35$  кПа (физическая атмосфера), показывает, что как и в случае безграничных сред [2] возбуждение кавитации может быть охарактеризовано явно выраженной нелинейной зависимостью акустического давления от напряжения, приложенного к излучателю, причем:



На графике приведены значения сопротивлений для относительных частот

—○— 0.991    —△— 0.995    ..... 0.997    —x— 1  
 ...x... 1.012    -.-.- 1.025    —+— 1.032    —○— 1.035  
 -.-.- 1.041    -.-.- 1.047

Рис. 3. Зависимость активной составляющей электрического импеданса системы преобразователей от напряжения возбуждения ( $R_{W_0}$  – среднее значение сопротивления при напряжении возбуждения  $U_g = 250$  В)

- в докавитационном режиме изменение относительного значения основной гармоники акустического давления соответствует изменению напряжения возбуждения;
- при возникновении кавитации в жидкости основная компонента спектра акустического давления практически не зависит от напряжения и частоты возбуждения;
- пороги кавитации соответствуют относительному давлению  $\delta P = P_0/P_a \approx 0.55 \div 0.6$ .

Однако на этом сходство явлений кавитации в безграничной среде [2] и в условиях ограниченного объема оканчивается.

Прежде всего обращает на себя внимание существенное отличие зависимостей электрического импеданса системы преобразователей от напряжения возбуждения (рис. 3) на различных стадиях развития кавитации. Как и следовало ожидать, в ограниченных объемах при отсутствии кавитации нагрузка системы преобразователей на среду, в которой возбуждены стоячие волны, значительно изменяет их частотные характеристики вплоть до подавления резонансов при изменении высоты столба жидкости в ванне. В докавитационном режиме при малых значениях напряжения возбуждения ( $U_g \leq 30$  В) сопротивление излучения практически не изменяется. Затем, по мере увеличения напряжения возбуждения и возникновения в среде газовых пузырьков (при  $50 \text{ В} \leq U_g \leq 120 \text{ В}$ ), электрический импеданс системы преобразователей приобретает резко выраженный нестабильный характер. При дальнейшем увеличении напряжения возбуждения и развитии кавитации в среде

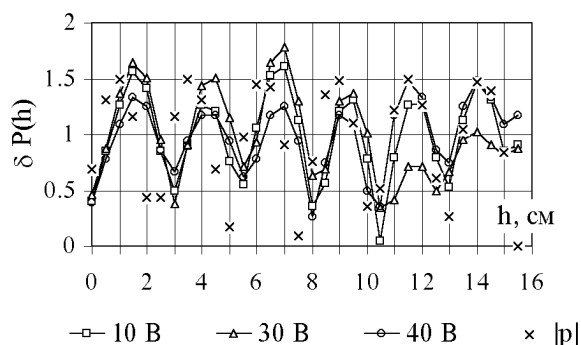


Рис. 4. Вертикальное распределение акустического давления в ультразвуковой ванне в докавитационном режиме возбуждения ( $|p|$  – модуль относительного давления в плоской стоячей волне)

( $U_g \geq 120$  В) импеданс нагрузки преобразователей стабилизируется и становится слабо зависящим от высоты столба жидкости в ванне. Эта особенность поведения импеданса в кавитационном режиме может быть связана с изменением характеристик акустического поля, а именно – с изменением вертикального распределения давления в ультразвуковой ванне. С целью проверки этого предположения были выполнены исследования структуры поля в ванне, результаты которого приведены на рис. 4, 5.

Из полученных данных следует, что в докавитационном режиме возбуждения распределение давлений по высоте ультразвуковой ванны (см. рис. 4) соответствует стоячей волне, связанной с отражением от свободной поверхности жидкости. Искажения структуры стоячей волны, как известно [11], обусловлены несколькими возможными причинами:

- отклонением нормали к свободной поверхности жидкости относительно нормали к излучающей поверхности системы преобразователей;
- дифракционными явлениями вблизи излучающей поверхности;
- отклонением скорости распространения ультразвука вдоль вертикальной оси ванны от фазовой скорости распространения в безграничной среде.

По мере увеличения напряжения возбуждения  $U_g$  на системе преобразователей в ультразвуковой ванне постепенно устанавливается кавитационный режим, при котором структура стоячей

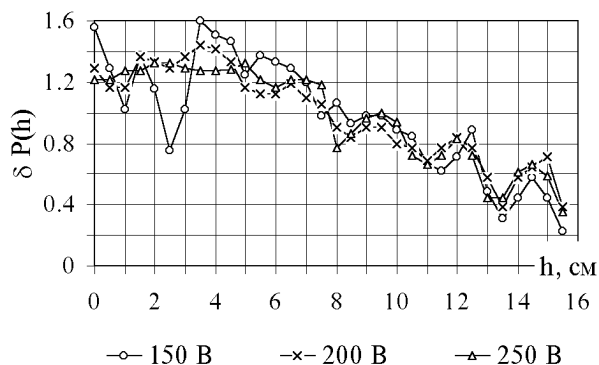


Рис. 5. Вертикальное распределение акустического давления в ультразвуковой ванне при кавитационном режиме возбуждения

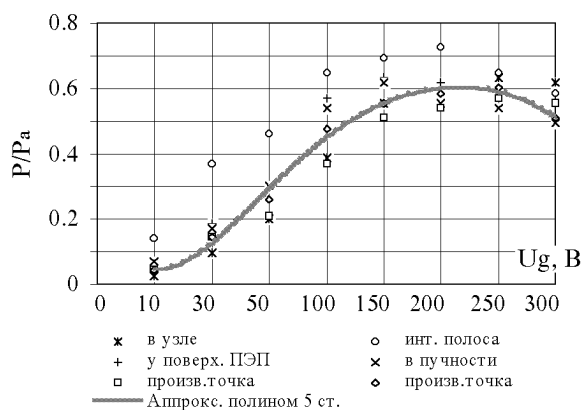


Рис. 6. Зависимость относительного значения акустического давления в различных точках поля от напряжения возбуждения

волны начинает разрушаться. При развитой стадии кавитации (см. рис. 5) узлы и пучности стоячей волны практически исчезают и резко увеличивается затухание ультразвука в жидкости вдоль вертикальной оси ванны (затухание по давлению составляет 6–10 дБ по длине  $h = 0.15$  м). В процессе выполнения работ установлено, что при возбуждении ультразвуковой кавитации в ванне результаты измерения акустического давления мало зависят от места положения измерительного гидрофона (в узле или пучности) из-за разрушения структуры стоячей волны (см. рис. 6). Кроме того, поскольку подавляющая часть акустической энергии сосредоточена на частоте основной гармоники акустического давления, зависимость от

напряжения возбуждения  $U_g$  эффективного значения акустического давления в широкой полосе (в полосе тракта от 20 Гц до 40 кГц) практически не отличается от соответствующей зависимости для основной гармоники давления.

Отмеченные особенности акустического поля в ультразвуковой ванне, в которой возбуждена кавитация, достаточно хорошо объясняют механизм стабилизации электрического импеданса системы преобразователей. Как следует из результатов проведенных исследований эффект стабилизации сопротивления неразрывно связан с изменением свойств среды, разрушением структуры стоячей волны и увеличением затухания ультразвука в кавитирующей жидкости, что приводит к существенному снижению влияния отражений от свободной поверхности жидкости на импеданс излучения системы преобразователей.

В заключение следует подчеркнуть, что приведенные в настоящей работе эффекты, связанные с излучением ультразвука в кавитирующую жидкость, описывают характерные особенности ультразвуковой кавитации в усредненном виде. Это вызвано, прежде всего, нестабильностью термодинамического состояния жидкости в процессе зарождения и развития кавитации, а также изменением концентрации воздуха в жидкости в процессе работы. Однако полученные в результате настоящих исследований закономерности позволяют более осмысленно проводить оценку импеданса излучения большинства реальных ультразвуковых устройств различного назначения, в которых используется явление кавитации.

## ВЫВОДЫ

1. В ходе выполнения экспериментальных исследований обнаружено отличие зависимостей электрического импеданса электроакустических преобразователей от напряжения возбуждения на различных стадиях развития кавитации. В докавитационном режиме нагрузка преобразователей на среду, в которой возбуждены стоячие волны, существенно зависит от частоты и высоты столба жидкости в ванне. По мере увеличения напряжения возбуждения и возникновения в среде газовых пузырьков импеданс электроакустических преобразователей становится нестабильным во времени и все менее зависящим от частоты и высоты столба жидкости в ультразвуковой ванне. При развитой кавитации в среде импеданс преобразователей стремится к некоторому устойчивому значению, практически

- независящему от высоты столба жидкости в ванне.
2. В результате исследований установлено, что изменение электрического импеданса электроакустических преобразователей от напряжения возбуждения на различных стадиях развития кавитации обусловлено изменением вертикального распределения акустического давления по высоте ванны. Показано, что в докавитационном режиме вертикальное распределение акустического давления соответствует стоячей волне, связанной с отражением от свободной поверхности жидкости. При увеличении напряжения возбуждения электроакустических преобразователей структура стоячей волны в ванне постепенно разрушается вследствие увеличения рассеивания в среде, связанного с возникновением газовых пузырьков и кавитационных каверн при развитой кавитации.
  1. Розенберг Л. Д., Сиротюк М. Г. Об излучении звука в жидкость при наличии кавитации // Акуст. журн.– 1960.– 4.– С. 478–481.
  2. Фукусима К., Санаеси Д., Кикучи Е. Характеристики звукового поля, связанные с работой ультразвуковых преобразователей // Ультразвуковые преобразователи.– М.: Мир, 1972.– С. 353–399.
  3. Рой Н. А. Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации // Акуст. журн.– 1957.– 3.– С. 13–18.
  4. Сиротюк М. Г. Ультразвуковая кавитация // Акуст ж.– 1962.– 8, N 3.– С. 255–272.
  5. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // Физическая акустика / Ред. У. Мэзона. Т. 1, часть Б.– М.: Мир, 1967.– С. 7–186.
  6. Г. тер Хаар Биофизика ультразвуковых эффектов и их применение // Применение ультразвука в медицине. Физические основы / Ред. К. Хилла.– М.: Мир, 1989.– С. 433–496.
  7. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику.– М.: Наука, 1966.– 519 с.
  8. Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики.– М.: Наука, 1975.
  9. Попилов Л. Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов.– М.-Л.: Машгиз, 1963.
  10. Келлер О. К. и др. Ультразвуковая очистка.– Л.: Машиностроение, 1972.
  11. Кожевников А. Е. Ультразвуковые измерения.– М.: Изд-во стандартов, 1982.