

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И КАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВАННЕ С ВОДОЙ

В.С. Корко,

доцент каф. электротехнологий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Рассмотрены свойства и технологические действия ультразвука, приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований акустических полей и кавитационных процессов при распространении ультразвуковых колебаний в ванне с водой.

Ключевые слова: ультразвуковая ванна, эффекты ультразвука, технологические действия, кавитация, акустическое поле.

The properties and technological actions of ultrasound are considered, the results of analytical and experimental studies of acoustic fields and cavitation processes during the propagation of ultrasonic vibrations in a bath with water are presented in the article.

Keywords: ultrasonic bath, ultrasonic effects, technological actions, cavitation, acoustic field.

Введение

Ультразвук представляет собой волнообразно распространяющееся колебательное движение частиц среды, возбуждаемое излучателем, и характеризуется рядом специфических особенностей. В ультразвуковом диапазоне частот сравнительно легко получить направленное излучение; ультразвуковые колебания хорошо поддаются фокусировке, в результате чего повышается их интенсивность в определенных зонах воздействия. При распространении в газах, жидкостях и твердых телах ультразвук порождает уникальные явления, многие из которых нашли практическое применение в различных областях науки и техники [1-3].

Действие ультразвука на вещества связано в первую очередь с деформациями, вызванными в среде чередованиями сжатий и разрежений одинаковой амплитуды, которые соответствуют частоте колебаний. При вынужденном колебательном движении частицы создают переменное давление в среде, амплитуда которого изменяется в зависимости от плотности среды, скорости распространения волн и частоты колебания частиц среды. В момент растяжения образуется пониженное давление, из-за чего жидкость может разорваться и в ней могут образоваться микрополости, заполненные парами жидкости. Происходящие в жидкости процессы кавитации, ультразвукового ветра, переменного давления, наряду с другими эффектами ультразвука, используются в различных технологических процессах очистки, мойки, стерилизации и др. [1, 2].

Цель настоящей работы – исследование закономерностей формирования акустических полей и кавитационных процессов при распространении ультразвуковых колебаний в ванне с водой.

Основная часть

Создаваемые ультразвуковым излучателем в жидкой среде упругие напряжения сжатия и разрежения возбуждают механические колебания частиц среды около положения равновесия – звуковые волны, которые при распространении подчиняются законам акустики [4, 5].

Ультразвуковое поле характеризуется колебательной скоростью частиц, их ускорением, давлением, интенсивностью и другими параметрами [3].

Давление (Па), создаваемое ультразвуковыми колебаниями в среде с плотностью ρ (кг/м³) и скоростью ультразвука c (м/с),

$$p = v\rho c = \omega\rho B \cos \omega(\tau - x/c), \quad (1)$$

где v – амплитуда скорости распространения звуковой волны, м/с;

B – амплитуда смещения частицы, м;

ω – угловая частота колебаний, с⁻¹;

τ – текущее значение времени, с;

x – текущая координата частицы, м.

Действующее значение интенсивности ультразвука выражается зависимостью

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} = \frac{pv}{2} = \frac{v^2\rho c}{2} = \frac{p^2}{2z_a}, \quad (2)$$

где z_a – удельное акустическое сопротивление среды, Па·с/м.

Среда, в которой происходит распространение колебаний, поглощает часть их энергии, которая переходит в тепловую энергию, а также расходуется на изменение структуры вещества. При этом поглощение всегда растет с увеличением частоты колебаний [2, 3].

Затухание амплитуды смещения в плоской волне

$$B = B_0 e^{-\alpha h}, \quad (3)$$

где α – коэффициент затухания, зависящий от свойств среды, m^{-1} ;

h – расстояние, пройденное волной, м.

Значение коэффициента затухания может быть определено по формуле

$$\alpha = \frac{1}{h_2 - h_1} \ln \frac{B_1}{B_2}, \quad (4)$$

где B_1 и B_2 – амплитуды колебаний соответственно на расстояниях h_1 и h_2 до излучателя, м;

Так как интенсивность колебаний зависит от квадрата скорости смещения частиц и, следовательно, от квадрата амплитуды смещения, затухание интенсивности может быть выражено зависимостью

$$I = I_0 e^{-2\alpha h}. \quad (5)$$

Для проведения экспериментов использовали две ультразвуковые установки: прибор «ULTRASONIC CLEANER» (модель 900S) с потребляемой мощностью 35 Вт, частотой 42 кГц и ванной с одним пьезоэлектрическим преобразователем, установку УЗУ-0,25 с выходной мощностью 250 Вт, рабочей частотой 18 кГц и ванной с тремя пьезоэлектрическими преобразователями. Основные размеры, схемы расположения пьезоэлектрических преобразователей в днищах ванн и точек измерения активности кавитации приведены на рисунке 1.

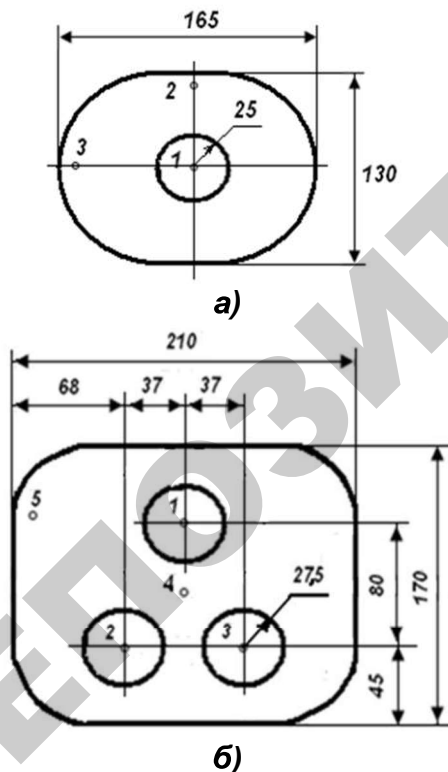


Рисунок 1. Схемы расположения пьезоэлектрических преобразователей (а) и характерных контрольных точек измерения активности кавитации (б) в ваннах установок 900S (а) и УЗУ-0,25 (б)

Для измерения активности кавитации в ультразвуковых ваннах использовали кавитометр ICA – 6D (производства БГУИР), состоящий из электронного блока и широкополосного первичного преобразователя с волноводом. Так как в мощном ультразвуковом поле кавитационная область состоит из двух типов пузырьков – стабильно пульсирующих и захлопывающихся (нестационарных), то прибор имеет 2 режима измерений: полной активности кавитации (Total) и активности нестандартной кавитации (Transient).

Полная активность кавитации определяется прибором как интеграл кавитационного шума, генерируемого всеми пузырьками кавитационной зоны в спектральном диапазоне 0,01...10 МГц. Нестационарные пузырьки при захлопывании генерируют ударные волны, высокие температуры и давления, которыми определяется воздействие кавитации на физико-химические процессы в жидкостях. Чем сильнее ударная волна, тем более высокие частоты включает ряд Фурье, описывающий эту волну. Активность нестационарной кавитации определяется прибором как интеграл кавитационного шума в соответствующем спектральном диапазоне.

В использованных для экспериментов установках длина ультразвуковой волны составляет:

$$\text{для установки 900S } \lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{1500}{42000} = 0,036 \text{ м};$$

$$\text{для УЗУ-0,25 } \lambda_2 = \frac{c}{f_2} = \frac{1500}{18000} = 0,083 \text{ м},$$

где c – скорость распространения УЗ-волны в воде при температуре 20°C;

f_1, f_2 – соответствующая частота ультразвука в установках, c^{-1} .

Если размеры излучателей, изображенных на рисунке 1, длина волны ультразвуковых колебаний в установке сравнимы с размерами обрабатываемых объектов, то в таких условиях в однородной жидкости при одностороннем излучении единичного излучателя акустическое поле в некотором приближении можно представить в виде направленного пучка (рис. 2а).

При этом различают ближнюю к излучателю зону 3 луча, в которой до некоторого расстояния R_0 интенсивность поля практически неизменна, и дальнюю зону 5 в виде расходящегося усеченного конуса [4, 6].

Вычислим размер ближней зоны немонотонного изменения акустического поля (зоны дифракции Френеля) одного излучателя [4]:

$$\text{для установки 900S } h_{01} = \frac{d_1^2}{4\lambda_1} = \frac{0,05^2}{4 \cdot 0,036} = 0,017 \text{ м};$$

$$\text{для УЗУ-0,25 } h_{02} = \frac{d_2^2}{4\lambda_2} = \frac{0,055^2}{4 \cdot 0,083} = 0,0091 \text{ м}.$$

Как следует из рисунка 2б и приведенного расчета, акустическое поле на расстоянии h_0 от излучателя в сечениях поперек оси распространения УЗ-волны представляет собой чередующиеся кольцевые зоны минимумов и максимумов вследствие дифракции волн,

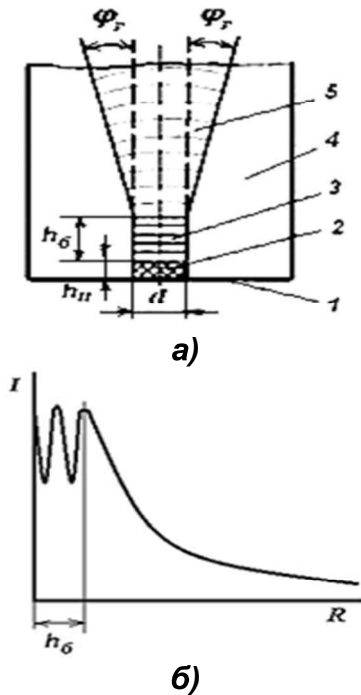


Рисунок 2. Схема формирования акустического поля пьезоэлектрического излучателя в УЗ-ванне (а) и график распределения интенсивности ультразвука по оси распространения луча (б): 1 – корпус ванны; 2 – излучатель; 3 и 5 соответственно ближняя и дальняя зона акустического поля; 4 – жидкая среда; и соответственно высота и диаметр излучателя; – размер ближней зоны акустического поля

и имеет практически максимальную интенсивность, что подтверждают литературные источники [4, 6].

С началом дальней зоны луч начинает расходиться, и вследствие поглощения энергии средой, интенсивность ультразвукового поля монотонно убывает по мере удаления от излучателя. Таким образом, акустическую кавитацию можно отнести к числу нелинейных явлений, возникающих в ультразвуковом поле.

Затухание акустических колебаний, обусловленное рассеянием и поглощением, описывается экспоненциальным законом убывания амплитуды с расстоянием в соответствии с уравнением (3), а интенсивность в отличие от степенного закона убывания амплитуды при расхождении волны – в соответствии с уравнением (5).

Основными факторами поглощения ультразвука являются вязкость и теплопроводность среды, взаимодействие волны с различными молекулярными процессами вещества, с тепловыми колебаниями кристаллической решетки и др. [1-3].

Угол расхождения луча от вертикали (рис. 2а) можно определить по формуле Фраунгофера [6]:

$$\varphi_p = \frac{\lambda}{d} \arcsin 0,61,$$

в соответствии с которой для установки 900S $\varphi_{p1} = 27^\circ$, а для УЗГ-0,25. $\varphi_{p2} = 56^\circ$

Как показывают расчеты, ультразвуковое поле, образованное единичным излучателем в однородной жидкой среде, имеет в дальней зоне форму усеченного конуса и определяется длиной волны и размерами излучателя. При этом с увеличением частоты луч становится более узконаправленным и с большим размером ближней зоны. Значит, в дальней зоне излучения степень рассеяния единичного луча в установке УЗУ-0,25 должна быть большей, чем в ванне 900S.

Замеры уровней активности кавитации в ультразвуковых ваннах с водой производились в указанных на рис. 1 точках на разных высотах от пьезоэлектрических преобразователей (рис. 3, 4) в пятикратной повторности. Нежирными линиями на зависимостях I показаны линии тренда.

Учитывая сложность переходных процессов, происходящих во время кавитации, а также явления дифракции, интерференции нескольких волн, получить точное фиксированное значение измеряемых параметров относительно сложно. Полученные данные имеют усредненное значение, но позволяют определить распределение активности кавитации в ультразвуковой ванне и провести сравнительный анализ значений кавитации в различных точках.

Необходимо отметить, что в режиме измерения нестационарной кавитации, показания кавитометра

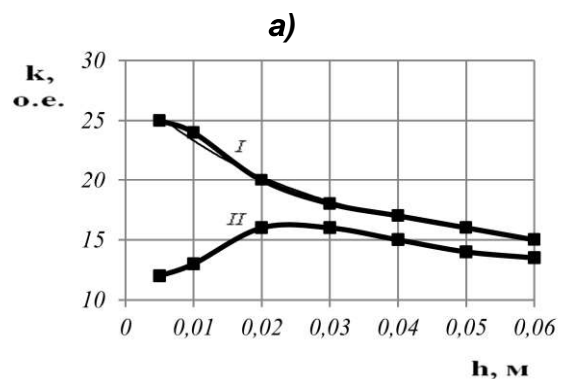
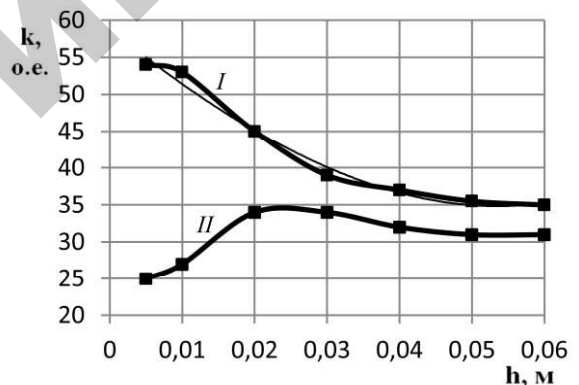
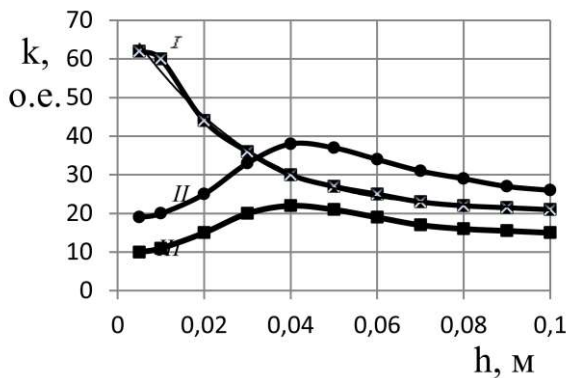
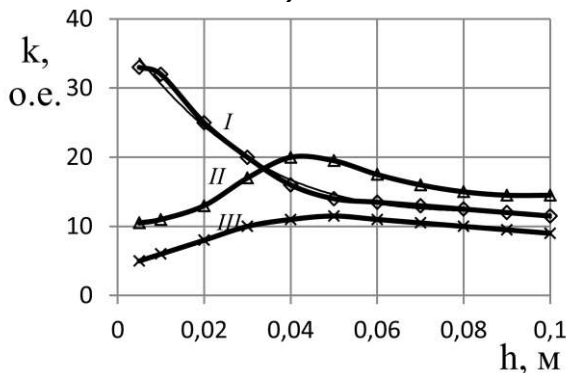


Рисунок 3. Зависимость уровня полной (а) и нестандартной (б) кавитации от расстояния до излучателя в ванне установки 900S:

I – в точке 1 над излучателем; II – усредненная в точках 2 и 3 между корпусом и излучателем



а)



б)

Рисунок 4. Зависимость уровня полной (а) и нестандартной (б) кавитации от расстояния до излучателя в ванне установки УЗУ – 0,25:

I – усредненная в точках 1...3 над излучателями; II – в точке 4 в центре между излучателями; III – в точке 5 между корпусом и двумя излучателями

более устойчивые, чем в режиме измерения полной кавитации.

Наиболее высокие уровни полной и нестандартной кавитации наблюдаются в ближней зоне ультразвукового поля непосредственно над излучателями по направлению распространения волны. Датчик кавитометра не допускает физического контакта с излучателем, поэтому зафиксировать уровень кавитации ближе 0,005 м затруднительно. В других точках ближней зоны в стороне от излучателей интенсивность падает, но, очевидно вследствие жесткой связи днища с излучателями это снижение не превышает 25...30%.

В дальней зоне вследствие расхождения луча, поглощения энергии, дифракции и интерференции волн уровни кавитации уменьшаются по закону, близкому к экспоненциальному, что с определенными допущениями соответствует уравнению (5). При этом в горизонтальной плоскости с увеличением h картина поля постепенно выравнивается и разброс показаний кавитометра на удалении 0,1 м находится в пределах 10...12%.

Представим уравнения линий трендов, наиболее близко аппроксимирующие зависимости I, в виде полиномов третьей степени:

а) на рисунке 3

– полной кавитации
 $k_{нк} = 58,8 - 787h + 4283h^2 - 38183h^3$;

– нестандартной кавитации
 $k_{нк} = 27,8 - 521h + 8304h^2 - 52534h^3$;

б) на рисунке 4
– полной кавитации
 $k_{нк} = 72 - 1720h + 20406h^2 - 83238h^3$;

– нестандартной кавитации
 $k_{нк} = 38,5 - 887h + 10204h^2 - 40096h^3$.

Если сравнивать конфигурации полей (рис. 3, 4) в исследуемых ваннах в горизонтальной плоскости, то заметно, что в ванне с тремя излучателями с увеличением h наблюдается несколько больший разброс уровней активности кавитации, так как ванна имеет большие размеры и больший угол расхождения луча $\varphi_{p2} = 56^\circ$.

Определим радиус окружности поля излучателя ультразвуковой установки на расстояниях $h_1 = 0,02$ м и $h_1 = 0,05$ м от начала дальней зоны по рисунку 2:

$$R_1 = \frac{d}{2} + h_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_p = \frac{0,055}{2} + 0,02 \cdot \operatorname{tg} 56^\circ = 0,057 \text{ м};$$

$$R_2 = \frac{d}{2} + h_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_p = \frac{0,055}{2} + 0,05 \cdot \operatorname{tg} 56^\circ = 0,102 \text{ м}.$$

Расчеты показывают, что в ванне с тремя излучателями вследствие расхождения пучков излучения в дальней зоне в определенных точках горизонтального сечения, особенно в центре между излучателями, происходит наложение всех волн, что существенно изменяет картину поля в сторону его большей равномерности в горизонтальной плоскости, что подтверждается изображением конфигурации полей трех излучателей и результатами исследований активности кавитации. Для указанных размеров ванны при $h_1 > 0,05$ м будет наблюдаться суперпозиция волн двух излучателей даже в наиболее удаленной от них точке 5 (рис. 1 б), чего еще не происходит при $h_1 > 0,02$ м (рис. 5).

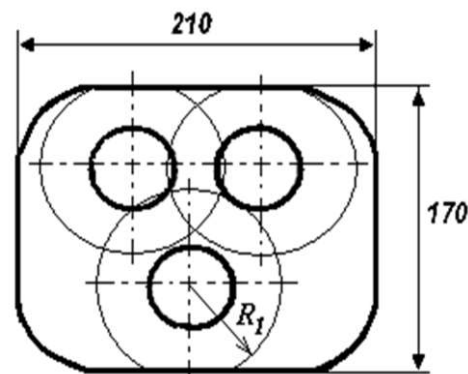


Рисунок 5. Иллюстрация конфигурации полей трех излучателей в ванне УЗУ-0,25 в горизонтальной плоскости на расстоянии 0,02 м от начала дальней зоны

Приведенные на рисунке 5 графические построения подтверждают результаты исследований и объясняют большее значение активности кавитации в

центре ванны на расстоянии около 0,04 м (рис. 4) при наличии трех излучателей, чем непосредственно над излучателями. Учитывая значительный угол отклонения луча $\varphi_{p2} = 56^\circ$, в центре ванны в ванне установки УЗУ-0,25 уже на расстоянии 0,02 м наблюдаются наложения волн от всех излучателей, значит, происходит их интерференция и усиление колебаний. С увеличением расстояния h эти явления распространяются по всему объему ванны.

Заключение

Закономерности формирования акустических полей и кавитационных процессов при распространении ультразвуковых колебаний в жидких средах имеют многофакторный характер. При этом ультразвуковые волны в ванне с водой по-разному представлены в ближнем (на расстоянии менее длины волны) и дальнем (на расстоянии более длины волны ультразвука) акустическом поле, создаваемом одним излучателем или группой излучателей.

Большая направленность излучения наблюдается в случае, когда диаметр излучателя больше или сопоставим с длиной волны излучаемого ультразвука. В горизонтальной плоскости, параллельной ультразвуковым излучателям, на расстоянии, не превышающем размер ближней зоны поля, имеет место наибольшая неравномерность уровня кавитации – максимальная непосредственно над излучателем и минимальная за ее пределами.

В дальней зоне поля кавитационные процессы ослабевают обратно пропорционально расстоянию от источника излучения вследствие поглощения и рассеяния энергии в жидкости. При этом процессы распространения ультразвуковых колебаний, создаваемых одним или группой излучателей в жидкости, определяются законами геометрической акустики.

С учетом неравномерности распространения ультразвукового поля по объему ванны при одностороннем расположении излучателей в днище, нелинейного характера зависимости уровней активности кавитации от расстояния, результаты исследований позволяют определить в данных установках наиболее оптимальные размеры и зоны взаимного расположения излучателей и обрабатываемых объектов для более интенсивной их обработки, а также уровни активности кавитационных процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ланин, В.Л. Физические эффекты ультразвука в жидких средах и их применение в технике / В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – №2. – С. 10-15.
2. Шияев, А.С. Физические основы применения ультразвука в медицине и экологии: учебно-методич. пособие / А.С. Шияев, С.П. Кундас, А.С. Стукин; под общ. ред. профессора С.П. Кундаса. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2009. – 110 с.
3. Электротехнологии: пособие / И.Б. Дубодел [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2014. – 252 с.
4. Агранат, Б.А. Основы физики и техники ультразвука: учебное пособие / Б.А. Агранат [и др.] – Москва: Высшая школа, 1987. – 352 с.
5. Зацепин, А.Ф. Методы и средства измерений и контроля: дефектоскопы: учебное пособие / А.Ф. Зацепин, Д.Ю. Бирюков; под науч. ред. В.Н. Костина. – Москва: Юрайт, 2018. – 120 с.
6. Ландау, Л.Д. Теория поля. Теоретическая физика / Л.Д. Ландау. – 7-е изд. испр. – Москва: Наука, 1988. – Т. 2. – 512 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 02.06.2020

Малогабаритная система очистки рабочих жидкостей гидравлических систем

Предназначена для профилактической очистки рабочих жидкостей гидравлических приводов мобильной сельскохозяйственной техники.



Основные технические данные

Производительность	Не менее 24 л/мин
Давление на входе в блок центрифугирования	0,8 МПа
Давление на входе в блок фильтрации	0,2-0,3 МПа
Давление на выходе из блока фильтрации	0,15 МПа
Тонкость очистки	15-40 мкм

Применение системы позволяет при обкатке двигателей расходовать масло без остатка, не снижать качество повторно используемого моторного масла, постоянно добавляя в него свежее товарное масло (гомогенизировать), полностью устранить расход электроэнергии, необходимой для подогрева масла, отказаться от необходимости хранения и утилизации масла. Она может применяться на ремонтно-обслуживающих предприятиях, а также непосредственно в хозяйствах для технического обслуживания машинно-тракторного парка.