

УДК 621.9.048.6

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВАННЕ

Н.К. ТОЛОЧКО¹, А.Н. ЧЕЛЕДИНОВ², В.Л. ЛАНИН³

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, Республика Беларусь

²ОАО «Красносельскстройматериалы», Республика Беларусь

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 7 марта 2018

Аннотация. Экспериментально изучены особенности неравномерной очистки поверхности предметов в ультразвуковой ванне, обусловленной неоднородным распределением активности кавитации в объеме воды, заполняющей ванну.

Ключевые слова: ультразвуковая ванна, активность кавитации, очистка поверхности.

Abstract. The features of the non-uniform cleaning of the objects surface in an ultrasonic bath caused by the irregular distribution of cavitation activity in the volume of water filling the bath are studied experimentally.

Keywords: ultrasonic bath, cavitation activity, surface cleaning.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 113, No. 3, pp. 88-93

Regularities of distribution activity of cavitation in ultrasound bath

N.K. Tolochko, A.N. Cheledinov, V.L. Lanin

Введение

Ультразвуковые (УЗ) ванны широко применяются для удаления загрязнений с поверхности изделий электроники, оптических и ювелирных изделий, медицинских инструментов, деталей машин. Эффективность УЗ очистки повышается с активностью акустической кавитации a_k в жидких средах. На практике необходимо создавать такие условия воздействия ультразвука, при которых достигается равномерное удаление загрязнений с поверхности очищаемых предметов. Эффективность УЗ очистки зависит как от выбора частоты и интенсивности ультразвука, так и от однородного распределения a_k по всему объему моющей жидкости в УЗ ванне. Однако экспериментальные данные [1] показывают, что a_k распределяется по объему жидкости в рабочей полости УЗ ванны неоднородно, из-за чего поверхности очищаются неравномерно. Характер влияния объемной неоднородности a_k на равномерность УЗ очистки до сих пор исследован недостаточно. Данная статья посвящена экспериментальному изучению особенностей неравномерной очистки поверхности предметов в УЗ ванне, обусловленной неоднородным распределением a_k в объеме воды, заполняющей ванну.

Методика проведения исследований

Кинетика процесса очистки с учетом активности кавитации описывается уравнением [2]

$$\frac{\Delta m}{m} = 1 - e^{(-\alpha_k^{0.5})}, \quad (1)$$

где Δm и m – удаленная и исходная масса материала.

Энергетическую оценку активности действия кавитации можно дать с помощью безразмерного критерия эрозионной активности χ , представляющего отношение мощности, запасаемой кавитационным пузырьком в единичном объеме жидкости за единичное время при расширении полости к средней удельной мощности в фазе захлопывания. Выразив значения мощностей через параметры полости, получим [3]

$$\chi \approx \frac{R_{\max}^3}{R_{\min}^3 \Delta t f}, \quad (2)$$

где Δt – время захлопывания полости, f – частота ультразвуковых колебаний; R_{\min} , R_{\max} – минимальное и максимальное значения радиуса полости.

Однако ввиду нестационарного характера кавитации определение размеров захлопывающихся полостей затруднено, поэтому для оценки активности кавитации применяют косвенные методы. Значения a_k оценивали по среднему кавитационному давлению в локальной зоне с помощью кавитометра ИСА-4D-М (БГУИР). Прибор отличается высокой степенью локализации измеряемой зоны кавитации и измеряет в относительных единицах активность захлопывающихся и пульсирующих кавитационных пузырьков. Об уровне a_k судили по величине электрического напряжения, создаваемого в пьезоэлектрическом датчике, соединенном с погружным волноводом, которое указывалось на индикаторной шкале кавитометра.

Эксперименты выполняли на УЗ моечной установке типа УЗУ-0,25. УЗ генератор имел потребляемую и выходную мощность соответственно 450 и 250 Вт, рабочую частоту – 18 кГц. Ванна с размерами полости: длина 22 см, ширина 17 см, глубина 16 см и объемом 4,5 л была снабжена тремя пьезоэлектрическими преобразователями, встроенными в центральную часть ее дна. Ванну заполняли водой, высота столба воды составляла 12 см (рис. 1).

Исследования проводили как в незагруженной, так и в загруженной ванне. В качестве загружаемых в ванну объектов использовали модельные образцы, выполненные в виде дисков из плотной резины диаметром 6 см и толщиной 2 см. Требуемое положение горизонтально ориентированных дисков в объеме воды обеспечивали с помощью проволочных держателей. Диски загружали двумя способами. В первом варианте загрузки диски размещали в два слоя, по четыре диска в каждом слое. Во втором варианте загрузки диски размещали в три слоя, по три диска в верхнем и нижнем слоях и шесть дисков в среднем слое. В пределах каждого слоя диски располагали над излучателями в центральной части полости ванны. Диски, находящиеся в соседних слоях, частично перекрывали друг друга. Расстояние между соседними слоями, а также между нижним слоем и дном ванны составляло 2 см.

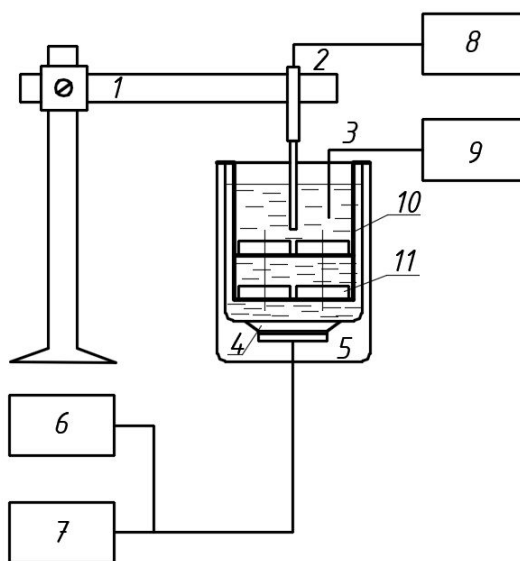


Рис. 1. Схема измерений активности кавитации: 1 – штатив, 2 – датчик, 3 – температурный датчик, 4 – пьезоэлектрический излучатель, 5 – УЗ ванна, 6 – частотомер, 7 – УЗ генератор, 8 – кавитометр, 9 – электронный термометр, 10 – проволочный держатель, 11 – образцы

При проведении измерений a_k вертикально расположенный щуп кавитометра погружали в воду, заполняющую ванну, так что его концевая часть (гидрофон) размещалась в полости ванны над центральным участком дна (где располагались излучатели) на разном расстоянии H от излучателей, т. е. от дна ванны (минимальная величина H составляла 2–3 мм). В загруженной ванне щуп кавитометра погружали в воду в зазорах между дисками.

Результаты исследований и их обсуждение

При распространении УЗ волны в жидкой среде происходят необратимые потери энергии, обусловленные внутренним трением (вязкостью) жидкости и теплопроводностью жидкой среды. В результате этих потерь интенсивность УЗ колебаний снижается по экспоненциальному закону:

$$I = I_0^{-\alpha x}, \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность колебаний при $x = 0$, α – коэффициент поглощения.

Коэффициент поглощения складывается из двух составляющих, обусловленных вязкостью жидкости и ее теплопроводностью: $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$.

Коэффициент поглощения, обусловленный вязкостью, прямо пропорционален вязкости η и квадрату частоты f и обратно пропорционален плотности жидкости ρ и квадрату скорости звука c [3]:

$$\alpha_1 = \frac{4\pi\eta f^2}{3\rho c^2}. \quad (4)$$

Для воды на частоте 18 кГц этот коэффициент составляет $(0,65-0,7) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$. Коэффициент поглощения, обусловленный теплопроводностью жидкости, определяется как

$$\alpha_2 = \frac{2\pi^2 K}{\lambda^2 \rho_c C_p} \left(\frac{C_p}{C_v} - 1 \right), \quad (5)$$

где K – коэффициент теплопроводности, λ – длина УЗ волны, ρ_c – акустическое сопротивление, C_v, C_p – удельные теплоемкости при постоянном объеме и давлении.

Для водных сред очистки коэффициент поглощения, обусловленный теплопроводностью среды, составляет $(0,072-0,08) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$.

На рис. 2 представлены типичные кривые зависимости $a_k(H)$. Кривая 1 получена для незагруженной ванны, кривые 2 и 3 – для ванны, загруженной дисками (для двух разных вариантов загрузки соответственно).

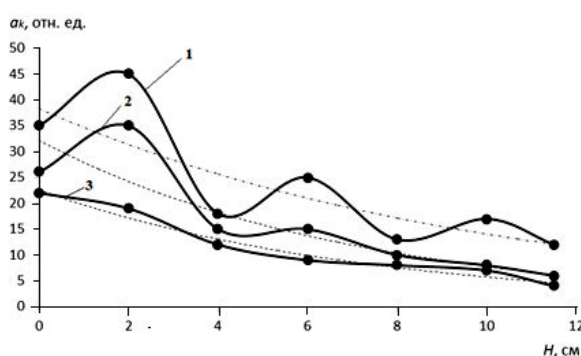


Рис. 2. Зависимости активности кавитации a_k от расстояния H от излучателей в УЗ ванне:

1 – незагруженная ванна; 2 и 3 – ванна загружена дисками (первый и второй варианты загрузки соответственно)

Кривая 1 имеет вид нисходящего синусоидального затухающего тренда. Нисходящий характер кривой, т. е. уменьшение a_k с удалением от излучателей обусловлено затуханием УЗ волн в результате их поглощения водой. В свою очередь, синусоидальный характер кривой свидетельствует о наличии стоячей УЗ волны. Выявление синусоидальной формы кривой является следствием высокой локальности измерений, осуществляемых кавитометром, благодаря чему он воспринимает изменения a_k , соответствующие чередованиям областей

разрежения и сжатия. Эти чередования следуют вдоль направления распространения УЗ волны через полуволновые периоды $\lambda/2 \approx 4$ см (длина волны в воде $\lambda = v/f \approx 8$ см, скорость звука в воде $v = 1480$ м/с, частота колебаний $f = 18$ кГц).

Кривая 2 имеет вид нисходящего синусоидального затухающего тренда подобно кривой 1, но при этом у нее есть ряд отличий от кривой 1. Во-первых, кривая 2 расположена ниже кривой 1 и, кроме того, амплитуда синусоиды у кривой 2 меньше, чем у кривой 1. Это означает, что загрузка ванны в целом приводит к снижению a_k . Во-вторых, кривая 2 идет менее круто, чем кривая 1. Казалось бы, это должно приводить к уменьшению различий в значениях a_k вблизи излучателей и у водной поверхности – $a_{к.из}$ и $a_{к.вп}$, соответственно. Однако на самом деле имеет место обратная картина: загрузка ванны приводит к увеличению различий в указанных значениях, что объясняется их общим снижением. Действительно, о степени влияния загрузки ванны на уменьшение a_k по высоте столба воды можно судить по величине соотношения $\gamma_{з1}/\gamma_{нз}$, где $\gamma_{з1} = (a_{к.из}/a_{к.вп})_{з1}$ соответствует загруженной ванне (первый вариант загрузки) и $\gamma_{нз} = (a_{к.из}/a_{к.вп})_{нз}$ – незагруженной ванне. Для того чтобы более точно оценить значения $a_{к.из}$ и $a_{к.вп}$, т. е. общее уменьшение a_k по высоте столба воды в ванне – от излучателей до водной поверхности, предпочтительно рассматривать вместо экспериментальных кривых синусоидальной формы соответствующие им срединные кривые (на рис. 2 изображены пунктиром). С учетом усредненных результатов ряда измерений, выполненных кавитометром, получаем (для срединных кривых): $\gamma_{з1} \approx 4,6$ и $\gamma_{нз} \approx 3,1$ и, соответственно, $\gamma_{з1}/\gamma_{нз} \approx 1,5$. Таким образом, уменьшение a_k по высоте столба воды для ванны, загруженной по варианту 1, в 1,5 раза больше, чем для незагруженной ванны.

Отмеченные выше отличия кривой 2 от кривой 1 свидетельствуют о влиянии загрузки ванны дисками на характер распределения a_k по объему воды в ванне. Это влияние обусловлено тем, что диски представляют собой препятствия распространению УЗ волн, вызывающие их многократные рассеяния.

Влияние загрузки ванны на характер распределения a_k усиливается с увеличением количества загружаемых дисков, о чем свидетельствует вид кривой 3. Во-первых, кривая 3 расположена ниже кривой 2 и, кроме того, амплитуда синусоиды у кривой 3 меньше, чем у кривой 2. Практически кривая 3 теряет свой синусоидальный характер и становится близкой по своему виду к нисходящей срединной кривой. Во-вторых, кривая 3 идет менее круто, чем кривая 2. При этом степень влияния загрузки ванны на уменьшение a_k по высоте столба воды характеризуется соотношением $\gamma_{з2}/\gamma_{нз} \approx 1,6$ (здесь $\gamma_{з1} \approx 5,0$).

Активность кавитации изменяется пропорционально интенсивности УЗ волн, которая уменьшается по экспоненциальному закону с увеличением расстояния H от излучателя в результате поглощения УЗ волн водой [4]. Соответственно, с увеличением H по такому же закону уменьшается и активность кавитации.

Таким образом, зависимость $a_k(H)$, представленная нисходящей срединной кривой для незагруженной ванны (рис. 2), имеет вид

$$a_k = a_{к0} e^{-kH}, \quad (6)$$

где $a_{к0}$ – активность кавитации у поверхности излучателя ($H = 0$), k – коэффициент поглощения УЗ волн водой: чем больше k , тем сильнее снижается a_k .

При уменьшении a_k в e раз показатель степени $kH = 1$, откуда следует, что $k = 1/H$. Таким образом, коэффициент поглощения k обратно пропорционален расстоянию распространения УЗ волны, на котором уровень кавитации убывает в e раз.

Уравнение (6) приблизительно описывает срединную кривую 1 на рис. 2 при $a_{к0} = 38,35$ и $k = 0,1$ и имеет вид

$$a_k = 38,35 e^{-0,1H}. \quad (7)$$

Зависимость $a_k(H)$ для незагруженной ванны, представленная на рис. 2 нисходящей затухающей синусоидальной кривой 1, описывается эмпирическим уравнением

$$a_k = [a_{к0} + n \sin(mH)] e^{-kH}, \quad (8)$$

где n и m – амплитуда и частота синусоидальной кривой [5]. При $n \rightarrow 0$ и/или $m \rightarrow 0$ затухающая синусоидальная кривая вырождается в нисходящую срединную кривую.

С учетом полученных экспериментальных результатов зависимость $a_k(H)$ как для незагруженной, так и для загруженной ванны может быть описана в общем виде следующим эмпирическим уравнением:

$$a_k = Q [a_{ko} + p \sin(mH)] e^{-qkH}, \quad (9)$$

где Q , q и p – безразмерные коэффициенты.

Коэффициент Q ($Q \leq 1$) определяет снижение положения затухающей синусоидальной кривой $a_k(H)$, коэффициент p ($p \leq 1$) – уменьшение амплитуды синусоиды, а коэффициент q ($q \leq 1$) – уменьшение крутизны этой кривой в результате загрузки ванны объектами.

При $Q_1 = 1$, $p_1 = 1$ и $q_1 = 1$ уравнение (9) сводится к уравнению (6), описывающему зависимость $a_k(H)$ для незагруженной ванны (кривая 1 на рис. 2).

При $Q < 1$, $p < 1$ и $q < 1$ уравнение (9) описывает зависимость $a_k(H)$ для загруженной ванны. По мере увеличения количества загружаемых объектов значения Q , p и q уменьшаются. Соответственно, кривая $a_k(H)$ смещается вниз, а амплитуда синусоиды и крутизна этой кривой уменьшаются.

Для описания с помощью уравнения (9) зависимостей $a_k(H)$ для загруженной ванны, представленных на рис. 2, следует ввести, соответственно, коэффициенты Q_2 , q_2 и p_2 – для кривой 2 и коэффициенты Q_3 , q_3 и p_3 – для кривой 3.

Между всеми этими коэффициентами имеют место следующие соотношения: $Q_1 > Q_2 > Q_3$, $q_1 > q_2 > q_3$, $p_1 > p_2 > p_3$.

Следует заметить, что значения Q , p и q могут зависеть как от степени загрузки ванны объектами, т. е. от относительного объема, занимаемого объектами в ванне, так и от характера загрузки, т. е. от количества, размеров и формы объектов, а также от их расположения в ванне. Поэтому весьма сложно определять экспериментальным путем значения Q , p и q для каждого конкретного варианта загрузки ванны с учетом всех указанных факторов.

В упрощенном случае о влиянии загрузки ванны на зависимость $a_k(H)$ можно судить по виду соответствующей нисходящей серединной кривой, описываемой выражением

$$a_k = Q a_{ko} e^{-qkH}. \quad (10)$$

Уравнение (10) приблизительно описывает серединные кривые 2 и 3 на рис. 2 при $Q a_{ko} = 32,18$ и $qk = 0,14$ (кривая 2) и $Q a_{ko} = 22,59$ и $qk = 0,13$ (кривая 3) и имеет вид

$$a_k = 32,18 e^{-0,14H} \text{ (кривая 2)} \quad (11)$$

и

$$a_k = 22,59 e^{-0,13H} \text{ (кривая 3)}. \quad (12)$$

Заключение

Результаты исследований показывают, что в объеме моющей жидкости, заполняющей УЗ ванну, оснащенную донными излучателями, активность кавитации распределяется весьма неоднородно, что обусловлено затуханием УЗ волн вследствие их поглощения жидкостью, наличием чередующихся областей разрежения и сжатия вдоль направления распространения волн, рассеянием волн на погруженных в ванну объектах. Это может приводить к существенно-неравномерному удалению загрязнений с поверхности разных объектов, одновременно погруженных в ванну, а также с разных участков поверхности одного и того же объекта, что следует учитывать на практике при выборе оптимальных условий процесса очистки деталей в УЗ ваннах.

Для повышения равномерности активности кавитации в объеме ванны и соответственно увеличения качества очистки изделий в загруженных изделиями ваннах рекомендуется применять частотную девиацию УЗ сигнала [6]. Это позволяет периодически изменять длину волны УЗ и смещать во времени области разряжения и сжатия, усредняя тем самым активность кавитации в объеме ванны.

Список литературы

1. Томаль В.С., Ланин В.Л. Ультразвуковая очистка микрорельефных поверхностей оптоэлектронных изделий // Фотоника. 2007. № 4. С. 35–40.

2. Новицкий В.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. 191 с.
3. Агранат Б.А. Основы физики и техники ультразвука. М: Высшая школа, 1987. 352 с.
4. Голых Р.Н. Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в гетерогенных системах с несущей высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой: дис. канд. тех. наук: 05.17.08. Барнаул, 2014.
5. Факторы неравномерной очистки деталей машин в ультразвуковых ваннах / Н.К. Толочко [и др.] // Вест. машиностроения. 2017. № 4. С. 82–85.
6. Lanin V.L., Tomal V.S. Increase ultrasonic cleaning efficiency of electronics modules // Engineering. 2013. № 5. P. 191–195.

References

1. Tomal' V.S., Lanin V.L. Ul'trazvukovaja ochistka mikrorel'efnyh poverhnostej optoelektronnyh izdelij // Fotonika. 2007. № 4. S. 35–40. (in Russ.)
2. Novickij V.G. Primenenie akusticheskikh kolebanij v himiko-tehnologicheskikh processah. M.: Himija, 1983. 191 s. (in Russ.)
3. Agranat B.A. Osnovy fiziki i tehniki ul'trazvuka. M: Vysshaja shkola, 1987. 352 s. (in Russ.)
4. Golyh R.N. Povyshenie jeffektivnosti ul'trazvukovogo kavitacionnogo vozdejstvija na himiko-tehnologicheskije processy v geterogennyh sistemah s nesushhej vysokovjazkoj ili nen'jutonovskoj zhidkoj fazoj: dis. kand. teh. nauk: 05.17.08. Barnaul, 2014. (in Russ.)
5. Faktory neravnomernoj ochistki detalej mashin v ul'trazvukovyh vannah / N.K. Tolochko [i dr.] // Vest. mashinostroenija. 2017. № 4. S. 82–85. (in Russ.)
6. Lanin V.L., Tomal V.S. Increase ultrasonic cleaning efficiency of electronics modules // Engineering. 2013. № 5. P. 191–195.

Сведения об авторах

Толочко Н.К., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры технологии металлов Белорусского государственного аграрного технического университета.

Челединов А.Н., инженер ОАО «Красносельск-стройматериалы».

Ланин В.Л., д.т.н., профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220023, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 99/2,
Белорусский государственный аграрный
технический университет
тел. +375-29-710-48-26;
e-mail: n.tolochko@hotmail.com
Толочко Николай Константинович

Information about the authors

Tolochko N.K., D.Sci., professor, professor of metal technology department of Belarusian state agrarian technical university.

Cheledinov A.N., engineer of OJSC «Krasnoselsk-stroimaterialy».

Lanin V.L. D.Sci, professor, professor of electronic technique and technology department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220023, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 99/2,
Belarusian state agrarian
technical university
tel. +375-29-710-48-26;
e-mail: n.tolochko@hotmail.com
Tolochko Nikolay Konstantinovich