

УДК 532.528

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АКТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОСТИ

А.В. КОТУХОВ, А.В. КРАСОВСКИЙ, В.В. ШАПЛЫКО, Н.В. ДЕЖКУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 20 января 2015

Исследовалась активность кавитации в неоднородном ультразвуковом поле. Показано, что характер зависимости активности кавитации от температуры существенно зависит от того, в какой точке поля проводится измерение. В частности, вблизи поверхности излучателя и вблизи границы раздела жидкость–газ активность кавитации уменьшается с ростом температуры, а в объеме жидкости имеются точки, в которых зависимости активности кавитации от температуры имеют вид кривой с максимумом.

Ключевые слова: кавитация, ультразвук, активность кавитации, температура.

Введение

Ультразвук используется в настоящее время довольно широко для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях [1–3]. Ключевым фактором при этом, как правило, является кавитация – явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа в жидкости под действием переменного давления [4].

Активность кавитации, или другими словами степень ее воздействия на тот или иной процесс определяется концентрацией кавитационных полостей в жидкости и эффективностью, с которой они преобразуют энергию ультразвука в другие виды энергии, в частности, в энергию ударных волн, тепловую или энергию микроструй жидкости. Активность кавитации может оцениваться с использованием различных кавитационных эффектов. Наиболее широко применяется метод эрозионных тестов, когда измеряется убыль массы ΔG металлических тест-образцов, помещаемых на некоторое время в кавитационную область. Индикатором активности кавитации может служить также интенсивность свечения, генерируемого в кавитационной области – звуколюминесценции (ЗЛ).

Влияние температуры на активность кавитации исследовалось многими авторами. В работе [5] отмечалось, что интенсивность ЗЛ увеличивается с ростом температуры. Авторами [6] получены зависимости интенсивности ЗЛ от температуры в виде кривых с максимумом. Большинство авторов указывает на уменьшение интенсивности ЗЛ с ростом температуры [7–9]. В недавней работе [10] сравнивались температурные зависимости различных эффектов. Изменялась убыль массы эрозионных тестов, интенсивность ЗЛ и интенсивность субгармоники $\frac{1}{2}f_0$ в спектре кавитационного шума. При этом, однако, разброс измеренных величин был настолько большим, что однозначно выявить какую-либо тенденцию не удалось.

В данной работе впервые показано, что зависимости активности кавитации от температуры жидкости в неоднородном ультразвуковом поле существенно различаются для различных точек поля.

Установка и методика

Рабочая емкость использовавшейся установки представляет собой цилиндрический стакан из нержавеющей стали с толщиной стенок 0,5 мм. Высота стакана – 87 мм, диаметр – 80 мм. Пьезокерамический излучатель диаметром 50 мм прикреплен к днищу стакана с тыльной стороны клеем на эпоксидной основе. Резонансная частота излучателя – 34,45 кГц.

Уровень жидкости при проведении испытаний поддерживался равным 80 мм, что на 7 мм меньше длины волны в воде на частоте 34,4 кГц. Для измерений активности кавитации использовался кавитометр ИСА-3М. Прибор состоит из гидрофона и электронного блока. Приемная часть гидрофона, т.е. элемент волновода, контактирующий с жидкостью и принимающий акустический сигнал из кавитационной области, представляет собой цилиндр диаметром 3 мм и длиной 5 мм.

Принцип действия кавитометра основан на спектральном анализе акустического сигнала, генерируемого кавитационной областью. Этот сигнал называют обычно кавитационным шумом [4]. Кавитационный шум преобразуется пьезоэлементом гидрофона в электрический сигнал, который обрабатывается электронным блоком. Алгоритм обработки состоит в выделении и интегрировании непрерывной составляющей кавитационного шума в выбранном диапазоне частот.

Прибор, в частности, позволяет измерять полную активность кавитации $A_{\text{полн.}}$ и активность нестационарной кавитации $A_{\text{нест.}}$. Полная активность кавитации определяется как интегральная интенсивность кавитационного шума, генерируемого пульсирующими (стационарными) и захлопывающимися (нестационарными) кавитационными полостями. Активность нестационарной кавитации – интенсивность кавитационного шума, генерируемого захлопывающимися полостями.

Использовались два способа варьирования температуры. В первом разогретую до кипения воду заливали в рабочую емкость (ультразвуковую ванну), а охлаждение происходило за счет теплообмена с окружающей средой. Во втором – ванну заполняли жидкостью при комнатной температуре, а разогрев осуществлялся под действием ультразвука за счет преобразования энергии ультразвука в тепло. Температура рабочей жидкости измерялась хромель-копелевой термопарой и поддерживалась в ходе измерения точно не ниже $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости от температуры полного выходного сигнала гидрофона N активности стационарной кавитации – 1 и нестационарной кавитации – 2. Гидрофон во всех случаях размещался на оси излучателя. Данные на рисунке 1, *а* получены при медленном нагреве жидкости (вследствие преобразования энергии ультразвука в тепловую энергию). Расстояние от излучателя до приемного элемента гидрофона – 40 мм. Графики, представленные на рис. 1, *б–г* получены при охлаждении жидкости для точек на расстоянии от излучателя соответственно 70, 40 и 10 мм.

Сравнение данных на рисунках 1, *а* и 1, *в* позволяет сделать вывод, что способ нагрева не влияет существенно на характер зависимости полного выходного сигнала гидрофона (1) и активности кавитации (2, 3) от температуры. Далее, как видно из представленных данных, (рис. 1, *б* и *г*), температурные зависимости активности кавитации для разных точек поля имеют различный характер. На расстоянии 70 мм от излучателя, т.е. вблизи поверхности жидкости, $A_{\text{полн}}$ и $A_{\text{нест}}$ монотонно уменьшаются с ростом температуры, а на расстоянии 40 мм от излучателя вначале растут, достигают некоторого максимального значения и затем начинают уменьшаться. Отметим, что при нагреве жидкости в диапазоне температур 30...40 °С (рис. 1, *а*) активность кавитации меняется незначительно.

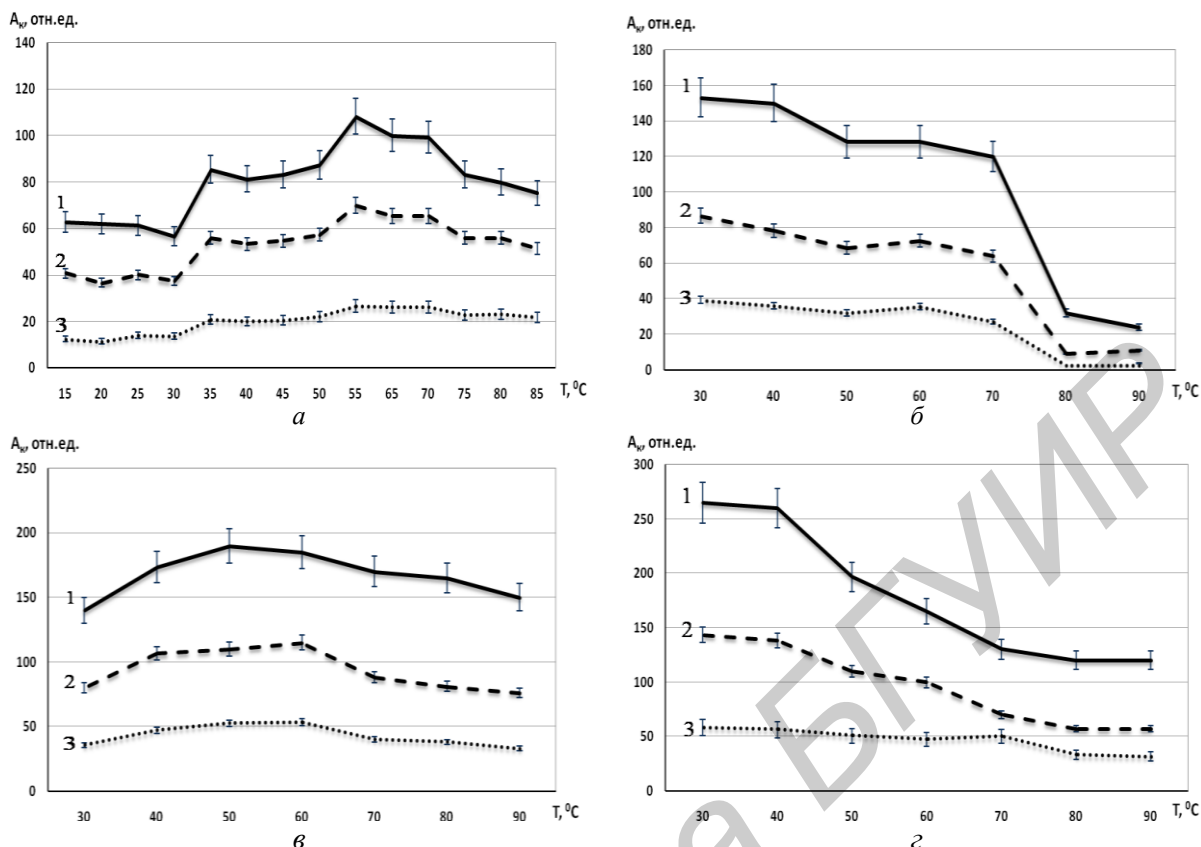


Рис. 1. Зависимость активности кавитации от температуры рабочей жидкости для различных расстояний от датчика до излучателя:
 а – 40 мм; б – 70 мм; в – 40 мм; з – 10 мм (1 – режим «Н», 2 – режим «1», 3 – режим «2»)

Для объяснения полученных зависимостей обратимся к уравнению, описывающему динамику кавитационной полости в ультразвуковом поле [11]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[P_{\infty} - P_{п} - P_a + P_{кав} + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} - \left(P_{\infty} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0,$$

где R – текущий радиус пузырька, ρ – плотность жидкости, σ – поверхностное натяжение, $P_{п}$ – давление насыщенного пара, μ – вязкость жидкости, R_0 – начальный радиус пузырька – давление ультразвукового поля, P_{∞} – гидростатическое давление в жидкости.

При увеличении температуры воды от 23 °C до 80 °C плотность и вязкость изменяются соответственно: плотность уменьшается на 3,5 % а вязкость – в 2 раза. В соответствии с [11], изменения ρ и μ в таких диапазонах не может сколько-нибудь существенно повлиять на динамику и захлопывание кавитационной полости.

Поверхностное натяжение в указанном выше диапазоне температур уменьшается на 14 %, а давление насыщенного пара увеличивается в 20 раз. При прочих равных условиях оба эти фактора воздействуют на захлопывание пузырька в одном направлении, уменьшая скорость сжатия пузырька, что должно приводить к уменьшению эффективности концентрации энергии ультразвука и преобразованию ее в другие виды энергии. Это, в свою очередь, будет вызывать уменьшение интенсивности ударных волн, генерируемых при захлопывании пузырька, а следовательно – и уменьшение активности кавитации.

Точки на расстоянии 70 и 10 мм от излучателя находятся вблизи максимумов переменного давления в стоячей волне. Очевидно, вследствие только этого концентрация пузырьков здесь будет более высокой, чем в других участках звукового поля. Кроме того, как известно [12], пузырьки размером меньше или порядка резонансного под действием радиационного давления (сила Бьеркнесса) перемещаются в места максимального давления. Это обстоятельство является еще одним фактором увеличения концентрации C пузырьков в данных точках поля. Можно ожидать, что в этих точках концентрация пузырьков близка к

предельной, после которой наступает состояние перенасыщения [12], когда дальнейшее увеличение C приводит уже не к увеличению, а к уменьшению активности кавитации. В результате все три фактора в данных точках поля при увеличении температуры действуют в одном направлении, приводя к уменьшению активности кавитации с ростом температуры.

Далее следует отметить, что кроме упомянутых выше свойств жидкости, с ростом температуры уменьшается растворимость газов (в данном случае – воздуха). Растворимость непосредственно не влияет на динамику пузырька, однако свойства кавитационной области при этом могут изменяться существенно. Происходит это за счет увеличения концентрации зародышей кавитации и их размеров в рабочей жидкости, а также за счет уменьшения скорости роста пузырьков в ультразвуковом поле. Вследствие уменьшения растворимости по мере нагрева жидкости газ (в данном случае воздух) будет выделяться в виде микропузырьков, увеличивая таким образом концентрацию зародышей кавитации, а следовательно – и плотность пузырьков в кавитационной области. Ясно, что в точках, близких к максимуму давления в стоячей волне (10 мм и 70 мм) концентрация пузырьков близка к максимальной. Поэтому в таких местах все упомянутые выше факторы действуют в одном направлении, а именно – способствуют снижению активности кавитации. Уменьшение σ и увеличение P_n способствует уменьшению скорости захлопывания пузырьков. Увеличение концентрации пузырьков приводит к усилению интенсивности их взаимодействий и уменьшению в результате этого эффективности преобразования и концентрации энергии ультразвука, т.е. к перенасыщению кавитационной области пузырьками. В результате этого активность кавитации уменьшается довольно быстро с ростом температуры.

Как известно [4], зародыши с размером меньше резонансного или равным резонансному, т.е., реально кавитирующие с образованием ударных волн, перемещаются из области меньшего давления в область более высокого давления под действием радиационного давления (сила Бьеркнеса). Поэтому в области минимального давления стоячей волны концентрация зародышей будет существенно ниже предельной по двум причинам: собственно из-за низкого давления пузырьки вырастают медленнее и, во-вторых, они мигрируют в область повышенного давления. Поэтому дополнительное выделение пузырьков при нагреве будет вызывать повышение активности кавитации по крайней мере на начальном этапе нагрева, несмотря на уменьшение эффективности захлопывания вследствие повышения давления насыщенного пара и уменьшения поверхностного натяжения. По мере роста температуры концентрация полостей стремится к предельной, а уменьшение σ и увеличение P_n вносят все более существенный вклад. Поэтому, начиная с некоторой температуры эти факторы могут стать преобладающими и тогда активность кавитации будет уменьшаться.

Таким образом в областях вблизи минимумов звукового давления на активность кавитации оказывают воздействие два конкурирующих фактора: увеличение концентрации кавитационных полостей, с одной стороны и уменьшение эффективности их захлопывания вследствие снижения поверхностного натяжения жидкости и повышения давления насыщенного пара. Характер зависимостей, представленных на рис. 1, а, в позволяет предположить, что при низких температурах (≤ 60 °С) преобладающим является первый фактор и активность кавитации в этом диапазоне растет с ростом температуры. При высоких температурах все большую роль играет уменьшение скорости захлопывания пузырьков, что приводит к уменьшению активности кавитации.

Заключение

Установлено, что зависимости активности кавитации от температуры жидкости хорошо коррелируют с полным выходным сигналом гидрофона во всем исследованном диапазоне температур. Показано, что характер зависимости активности кавитации от температуры существенно зависит от того, в какой точке поля проводится измерение. В частности, вблизи поверхности излучателя и вблизи границы раздела жидкость–газ активность кавитации уменьшается с ростом температуры, а в объеме жидкости имеются точки, в которых зависимость активности кавитации от температуры имеют вид кривой с максимумом.

Анализ изменения свойств жидкости, влияющих на динамику кавитационных полостей, позволяет сделать вывод, что основными факторами, определяющими характер зависимости

активности кавитации от температуры, является увеличение давления насыщенного пара, уменьшение поверхностного натяжения жидкости и уменьшение растворимости газа в жидкости с ростом температуры. Полученные в работе результаты объяснены исходя из закономерностей влияния упомянутых выше свойств жидкостей на захлопывание полостей и их миграцию в кавитационной области.

STUDY INTO DEPENDENCE OF CAVITATION ACTIVITY ON LIQUID TEMPERATURE

A.V. KOTUKHOV, A.V. KRASOVSKIY, V.V. SHAPLYKA, N.V. DEZHKUNOV

Abstract

Cavitation activity in non-homogeneous ultrasonic field have been studied. It has been shown that the character of temperature dependencies of cavitation activity is different for different points of the field. For example, cavitation activity at the surface of the radiator and at the liquid – gas surface decreases with temperature. There are points in the volume of the liquid where temperature dependencies are curves with maximum, i.e. it grows with temperature, achieves maximal value and then decreases.

Список литературы

1. Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. М., 1977.
2. Абрамов В.О., Абрамов О.В., Артемьев В.В. и др. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. М., 2006.
3. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. М., 1986.
4. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация. М., 2008.
5. Iernetti G. // Temperature dependence of sonoluminescence and cavitation erosion in water. *Acustica*. 1972. № 26. P.168–169.
6. Sehgal C., Sutherland R.G., Verrall R.E. // *The Journal of Physical Chemistry*. 1980. № 84 (5). P. 525–528.
7. Verral R.E., Sehgal C.M., Suslick K. // Sonoluminescence. *Ultrasound: Its chemical, physical and biological effects*. 1988. P. 227–286.
8. Hiller R., Putterman S.J., Barber B.P. // Spectrum of synchronous picosecond sonoluminescence. *Physical Review Letters*. 24 August 1992. № 69. P. 1182–1184.
9. Barber B.P., Wu C.C., Paul H.R. et.al. Sensitivity of sonoluminescence to experimental parameters. *Physical Review Letters*. 28 February 1994. № 72. P. 1380–1383.
10. Jäschke M., Koch C. // Model processes and cavitation indicators for a quantitative description of an ultrasonic cleaning vessel: Part I: Experimental results. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2012. № 19. C. 787–795.
11. Акулчев В.А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М., 1978.
12. Dezhkunov N.V. // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2002. № 2. P. 103–106.