

ЭВОЛЮЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ ПРИ НАГРЕВЕ ЖИДКОСТИ

Красовский А.В., Гаврилюк Т.В., Котухов А.В., Дежунов Н.В.

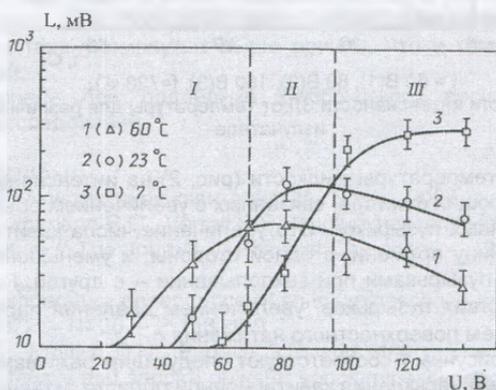
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Беларусь, E-mail: dnv@bsuir.by

Кавитационная природа воздействия мощного ультразвука на большинство физико-химических процессов в жидкостях в настоящее время не вызывает сомнений. Варьирование температуры жидкости – один из наиболее простых и доступных способов управления активностью кавитации. С изменением температуры меняется ряд параметров, сильно влияющих на размеры зародышей кавитации и динамику кавитационных полостей [1], а именно: газосодержание, упругость пара, поверхностное натяжение, а в некоторых случаях – и вязкость.

Однако известные данные о зависимости активности кавитации, оцениваемой, например, по интенсивности звуколюминесценции (ЗЛ) или по выходу звукохимической реакции от температуры противоречивы. Так, в работе [2] получены данные, указывающие на увеличение интенсивности звуколюминесценции с ростом температуры. Авторы [4] сообщают о наличии максимума на зависимости интенсивности ЗЛ от температуры. Большинство авторов указывают на уменьшение интенсивности ЗЛ с ростом температуры. Интенсивность эмиссии света одиночным пузырьком, согласно данным [5] и ряда других работ, также уменьшается с ростом температуры.

В данной работе эксперименты проводились в ВЧ и НЧ ультразвуковых полях на частотах соответственно 720 кГц и 36,4 кГц. Фокусирующий пьезокерамический излучатель диаметром 40 мм и резонансной частотой 720 кГц вмонтирован в днище ячейки. Для генерирования НЧ поля использовался плоский излучатель диаметром 50мм.

На рисунке 1 представлены зависимости интенсивности ЗЛ от напряжения на излучателе для различных температур жидкости. Видно, что при уменьшении температуры увеличивается порог ЗЛ. Однако при этом увеличивается также и наклон зависимости $L(U)$. В результате максимум интенсивности ЗЛ, достигаемый при варьировании напряжения на излучателе, увеличивается при уменьшении температуры. Изменяется также и положение кривых $L(U)$ относительно друг друга (сравн. участки I, II и III).



$t = 60^{\circ}\text{C}(1), 23^{\circ}\text{C}(2), 7^{\circ}\text{C}(3), f = 720 \text{ кГц}$.

Рисунок 1 – зависимости интенсивности ЗЛ от напряжения на излучателе для разных температур

Увеличение интенсивности ЗЛ на начальном участке зависимости $L(U)$ (рис. 1) обусловлено увеличением концентрации кавитационных полостей в единице объема жидкости и повышением скорости их захлопывания. Однако при слишком большой концентрации пузырьков вследствие усиления их взаимодействий эффективность преобразования энергии ультразвука в энергию ударных волн и тепловую снижается. Начиная с этой концентрации увеличение числа пузырьков в единице объема уже не вызывает увеличения интенсивности ЗЛ и мало влияет на поглощение ультразвука в кавитационной области. Интенсивность ЗЛ либо остаётся постоянной, либо уменьшается.

На рисунке 2 приведены характерные зависимости от температуры, полученные при различных напряжениях. Из представленных данных видно, что по характеру зависимости ЗЛ от температуры можно выделить три режима озвучивания. При интенсивностях порядка порога ЗЛ, интенсивность ЗЛ увеличивается с ростом температуры (кривая 1). При напряжении на излучателе, намного превышающем пороговое (кривая 3), интенсивность ЗЛ уменьшается с ростом температуры. При промежуточных интенсивностях возможен экстремальный характер зависимости $L(U)$. Из свойств жидкости на эффективность генерирования кавитационных эффектов при захлопывании пузырьков наибольшее влияние оказывают давление насыщенного пара P_v и поверхностное натяжение σ , демпфируя процесс сжатия пузырька. С другой стороны, при увеличении температуры снижается растворимость воздуха в жидкости, поэтому увеличивается интенсивность образования новых зародышей кавитации.

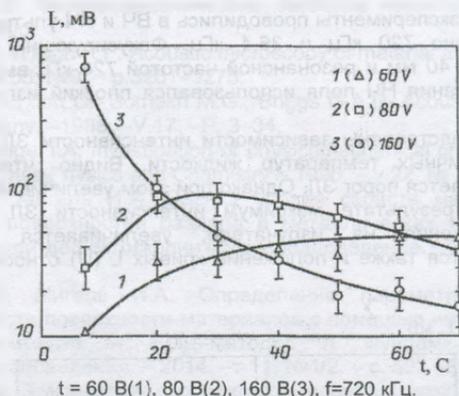


Рисунок 2 – Зависимости интенсивности ЗЛ от температуры для различных напряжений на излучателе

При увеличении температуры жидкости (рис. 2) на интенсивность ЗЛ оказывают влияние два конкурирующих фактора, связанных с увеличением объемной плотности и количества кавитационных пузырьков. Это увеличение числа кавитационных событий (захлопываний) в единицу времени, с одной стороны, и уменьшение эффективности концентрации энергии пузырьками при захлопывании – с другой. Последнее вызвано усилением взаимодействия пузырьков, увеличением давления парогазовой смеси P_v внутри них, уменьшением поверхностного натяжения σ .

Участки I, II и III рисунка 1 соответствуют следующим режимам, различающимся, по-видимому, по степени насыщения кавитационной области активными пузырьками.

1) При низких интенсивностях ультразвука число кавитирующих пузырьков невелико. Интенсивность ЗЛ незначительна. Увеличение температуры в этом режиме приводит к увеличению числа коллапсирующих пузырьков и соответственно – к увеличению интенсивности ЗЛ, несмотря на возможное уменьшение интенсивности коллапсов вследствие уменьшения σ и P_v . В этом диапазоне интенсивностей

ультразвука преваляющим фактором является увеличение числа кавитационных событий в единицу времени.

II) Промежуточные интенсивности соответствуют началу процесса лавинообразного размножения пузырьков. С увеличением температуры число пузырьков быстро увеличивается и достигает состояния насыщения. Поэтому температурная зависимость имеет экстремальный характер.

III) При больших интенсивностях ультразвука кавитационная область насыщена пузырьками уже при низкой температуре и поэтому дальнейшее увеличение числа пузырьков при увеличении температуры может приводить лишь к уменьшению интенсивности ЗЛ.

В НЧ поле при наличии выраженной компоненты поля в виде стоячей волны температурные зависимости активности кавитации существенно различаются не только для разных интенсивностей ультразвука, но и для различных точек поля. В максимумах звукового давления при достаточно большой интенсивности ультразвука активность кавитации уменьшается с ростом температуры, в минимумах – имеет вид кривой с максимумом.

Очевидно, что в максимумах звукового давления концентрация пузырьков более высокая, чем в других участках звукового поля. Кроме того, как известно, что пузырьки размером меньше или порядка резонансного под действием радиационного давления перемещаются в места максимального давления. Это обстоятельство является другим фактором увеличения концентрации коллапсирующих пузырьков в данных точках поля. Можно ожидать, что в этих точках концентрация пузырьков может быть более близко к предельной, после которой наступает состояние перенасыщения, когда дальнейшее увеличение числа полостей в единице объёма жидкости 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.

В областях минимумов давления концентрация коллапсирующих пузырьков существенно ниже и, следовательно, здесь 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 полученных в данной работе зависимостей позволяет считать, что при низких температурах ($\leq 60^\circ\text{C}$) преобладающим является первый фактор и активность кавитации в этом диапазоне растёт с ростом температуры. При высоких температурах все большую роль играет уменьшение эффективности захлопывания вследствие упомянутых выше причин, что и приводит к уменьшению активности кавитации.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы:

1. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация. М., Наука, 2008.
2. Sehgal C., Sutherland R.G., Verrall R.E. Sonoluminescence intensity as a function of bulk solution temperature. // The Journal of Physical Chemistry. – 1980. – № 84. – P.525–528.
3. Iernetti G. Temperature dependence of sonoluminescence and cavitation erosion in water. // Acustica. – 1972. – № 26. – P.168–169.
4. Didenko Y.T., Nastich D.N., Pugach S.P. and others. The effect of bulk solution temperature on the intensity and spectra of water sonoluminescence. // Ultrasonics. – 1994. – №32(1). – P.71–76.
5. Barber B.P., Wu C.C., Paul H.R., and others. Sensitivity of sonoluminescence to experimental parameters. // Physical Review Letters. – 1994. – №72. – P.1380–1383.