

В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, М. В. Хмелев

*Бийский Технологический институт ГОУ ВПО АлтГТУ,
лаборатория акустических процессов и аппаратов,
г. Бийск, 659305, ул. Трофимова, 27, <http://www.u-sonic.ru/>*

Определение диапазонов необходимой перестройки ультразвуковых генераторов при реализации технологических процессов в кавитирующих средах

Получена 10.10.2006, опубликована 18.10.2006

Для определения предельных параметров электронных генераторов ультразвуковых технологических аппаратов рассмотрена модель кавитирующей технологической среды, представленной в виде одиночного парогазового пузырька. Проведенные теоретические исследования позволили установить связь акустических свойств жидких кавитирующих сред с параметрами первичного ультразвукового поля. На основе анализа модели предложена методика расчета необходимой и достаточной мощности и диапазона изменения рабочей частоты электронных генераторов при реализации различных технологических процессов в жидких средах.

ВВЕДЕНИЕ

Большой интерес представляет применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для ускорения процессов в жидких средах. Это обусловлено возникновением в них кавитационных процессов. Ультразвуковой аппарат, предназначенный для интенсификации технологических процессов, протекающих в жидких средах, должен иметь достаточный запас мощности для реализации режима развитой кавитации, а также достаточный диапазон перестройки рабочей частоты электронного генератора системой автоматической подстройки частоты. На выбор этих параметров влияют как свойства обрабатываемых кавитирующих жидких сред, так и параметры ультразвуковых колебательных систем.

1. ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛИ КАВИТИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ

В подавляющем большинстве случаев, за исключением высоких мегагерцовых частот, на которых кавитация обычно не наблюдается, размеры отдельных кавитационных пузырьков и их скоплений оказываются существенно меньше длины волны первичного звукового поля. Это позволяет рассматривать жидкость вместе с имеющимися в ней газовыми вкраплениями как некую новую среду с эквивалентными акустическими характеристиками, отличными от акустических характеристик капельной жидкости.

Средние за период значения основных акустических характеристик эквивалентной среды, ее плотность и сжимаемость, могут быть записаны в виде [1]:

$$\rho_K = \rho_{\text{ж}}(1 - \bar{K}) + \rho_{\text{г}}\bar{K}, \quad (1)$$

$$\beta_K = \beta_{\text{ж}}(1 - \bar{K}) + \beta_{\text{г}}\bar{K}, \quad (2)$$

где ρ_K — плотность кавитирующей среды, β_K — сжимаемость кавитирующей среды, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, $\beta_{\text{ж}}$ — сжимаемость жидкости, $\rho_{\text{г}}$ — плотность газа, $\beta_{\text{г}}$ — сжимаемость газа, \bar{K} — средний индекс кавитации.

Среднее во времени волновое сопротивление эквивалентной среды можно записать в виде:

$$\rho_K c_K = \rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}} \left(\frac{(1 - \bar{K}) + \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \bar{K}}{(1 - \bar{K}) + \frac{\beta_{\text{г}}}{\beta_{\text{ж}}} \bar{K}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Средний индекс кавитации \bar{K} [2] определяется как отношение объема кавитационных пузырьков ΔV к объему жидкости V . Параметр ΔV определяется средним размером образующихся кавитационных пузырьков и их количеством. Количество кавитационных пузырьков зависит от многих факторов и не является постоянным, поэтому практическое использование формулы (3) затруднено. В связи с этим предлагается для определения индекса кавитации воспользоваться следующей моделью.

Выделим сферическую область жидкой среды с радиусом R_{MAX} с расположенным в центре газовым пузырьком радиусом R_0 , как показано на рисунке 1. Пусть R_{MAX} соответствует максимальному значению радиуса, к которому стремится парогазовый пузырек при его росте в фазе разряжения. В этом случае индекс кавитации можно записать в следующем виде:

$$K = \frac{\Delta V_{\text{сф}}}{V_{\text{сф}}} = \frac{\frac{4}{3}\pi(R^3 - R_0^3)}{\frac{4}{3}\pi(R_{\text{MAX}}^3 - R_0^3)} = \frac{R^3 - R_0^3}{R_{\text{MAX}}^3 - R_0^3}, \quad (4)$$

где $\Delta V_{\text{сф}}$ — вытесненный из сферы объем жидкости, $V_{\text{сф}}$ — объем сферы, ограниченной радиусом R_{MAX} .

В случае, когда радиус пузырька равен радиусу равновесного пузырька R_0 , индекс кавитации равен нулю. В случае, когда радиус пузырька удовлетворяет неравенству $R_0 < R < R_{\text{MAX}}$, значение индекса кавитации лежит в пределах $0 < K < 1$. В случае, когда R стремится к R_{MAX} , значение индекса кавитации стремится к единице.

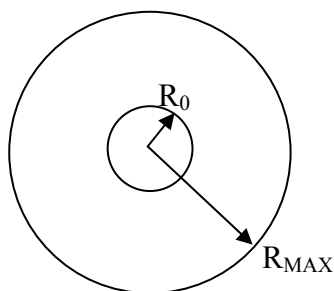


Рис. 1. Область жидкой среды с парогазовым пузырьком внутри

Из выражения (4) следует, что для определения индекса кавитации необходимо знать текущее значение радиуса газового пузырька R , его максимально возможный радиус R_{MAX} , а также начальный радиус парогазового пузырька R_0 .

В равновесном состоянии давление пара P_{II} и газа P_I внутри пузырька уравновешено гидростатическим давлением P_0 и силами поверхностного натяжения P_S [3 – 6]:

$$P_{II} + P_I = P_0 + P_S. \quad (5)$$

Давление создаваемое силами поверхностного натяжения определяется выражением

$$P_S = \frac{2\sigma}{R}. \quad (6)$$

Давление газа при изменении размера пузырька под действием внешних сил изменяется следующим образом:

$$P_I = \left(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3. \quad (7)$$

Внешнее давление, уравнивающее давление парогазовой смеси в пузырьке радиуса R , определяется выражением

$$P_B(t) = P_{II} + \left(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R}. \quad (8)$$

С другой стороны внешнее давление создаваемое, источником колебаний, определяется выражением

$$P_B(t) = -P_M \sin \omega t + P_0. \quad (9)$$

Знак минус в выражении (9) означает, что в момент времени $t = 0$ начинается полупериод разрежения.

Из выражения (8) можно получить зависимость радиуса R от величины давления, создаваемого внешним источником колебаний. Сделав подстановку выражения (9) в (8), перепишем выражение (8) следующим образом:

$$\left(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0}\right) \frac{R_0^3}{R^3} - \frac{2\sigma}{R} = P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II}. \quad (10)$$

Сделав следующие замены: $(P_0 - P_{II} + 2\sigma/R_0)R_0^3 = a$; $2\sigma = b$; $P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II} = c$, запишем выражение (10) в виде

$$R^3 c + R^2 b - a = 0. \quad (11)$$

Решение кубического уравнения (11) позволило получить выражение зависимости радиуса парагазового пузырька как от параметров звукового поля, так и от других условий (поверхностное натяжение жидкости, давление насыщенных паров и газа, растворенного в жидкости, гидростатическое давление):

$$R = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} - \frac{b}{3c}, \quad (12)$$

$$\text{где } p = -\frac{4\sigma^2}{3(P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II})^2}; q = \frac{16\sigma^3}{27(P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II})^3} - \frac{\left(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0}\right)R_0^3}{P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II}}.$$

Максимальный размер парагазового пузырька R_{MAX} , при котором он начинает пульсировать, мало изменяя свои размеры, называется резонансным.

Резонансный размер пузырька может быть вычислен из следующего выражения [2]:

$$f = \frac{1}{2\pi R_{MAX}} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho_{ж}} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_{MAX}}\right)}. \quad (13)$$

Из выражения (13) было получено выражение для определения резонансного радиуса пузырька R_{MAX} :

$$R_{MAX} = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}, \quad (14)$$

$$\text{где } p = -\frac{P_0 3\gamma}{4\pi^2 \rho_{ж} f^2}, q = -\frac{3\gamma\sigma}{2\pi^2 \rho_{ж} f^2}.$$

Таким образом, получено выражение (14) для определения максимального размера парагазового пузырька и выражение (12) для определения размера парагазового пузырька при различных значениях звукового давления.

В силу того, что $R_0 \ll R_{MAX}$ можно воспользоваться выражением (4) для определения индекса кавитации K и, следовательно, выражением (3) для определения волнового сопротивления кавитирующей среды для любого значения величины звукового давления. Таким образом, разработан математический аппарат, связывающий свойства кавитирующей среды с ее исходными свойствами и параметрами первичного звукового поля.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

На основе предложенной модели кавитирующей среды разработана методика расчета предельных параметров электронных генераторов ультразвуковых технологических аппаратов (запас мощности и диапазон изменения частоты) для работы с жидкими средами при условии реализации в них режима развитой кавитации.

Далее, в качестве примера, рассмотрена методика расчета предельных параметров электронных генераторов, предназначенных для работы с полуволновыми пьезоэлектрическими стержневыми колебательными системами с грибовидными рабочими инструментами, форма которых представлена на рисунке 2.

Вместе с тем предлагаемая методика расчета может быть использована как базовая в случае использования рабочих инструментов другой геометрической формы.



Рис. 2. Грибовидные рабочие инструменты ультразвуковых колебательных систем
а – эскиз, б – внешний вид

Исходными данными для расчета основных параметров электронных ультразвуковых генераторов являются: плотность материала колебательной системы $\rho_{УЗКС}$; скорость звука в материале колебательной системы $c_{УЗКС}$; плотность обрабатываемой среды $\rho_{ж}$; скорость звука в обрабатываемой среде $c_{ж}$; частота ультразвуковых колебаний f ; диаметр излучающей поверхности инструмента D_1 ; диаметр сечения волновода колебательной системы, к которому присоединяется рабочий инструмент D_2 ; гидростатическое давление P_0 ; давление насыщенных паров P_{II} ; коэффициент поверхностного натяжения обрабатываемой среды σ .

На следующем этапе реализации методики осуществляется расчет давления ультразвукового поля P_M , при котором достигается режим развитой кавитации. Для этого:

– определяется значение максимального размера R_{MAX} парогазового пузырька, используя выражение (14);

– средняя величина максимального радиуса парогазового пузырька принимается равной:

$$\overline{R}_{MAX} = \frac{R_{MAX}}{2}; \quad (15)$$

– индекс кавитации, при котором наступает режим развитой кавитации, составляет 0.2;

– радиус кавитационного пузырька определяется из выражения (4), приняв $R_0 = 0$ (так как $R_0 \ll R$):

$$R = \sqrt[3]{K \overline{R}_{MAX}^3}; \quad (16)$$

– производится расчет давления ультразвукового поля P_M при помощи выражения (10), принимая $\omega t = \pi$ (фаза максимального разрежения) и $R_0 = 0$ (в виду малого радиуса):

$$P_M = P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R} - \left(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \frac{R_0^3}{R^3}; \quad (17)$$

– величина среднего звукового давления определяется из следующего выражения:

$$\overline{P}_M = \frac{P_M}{\sqrt{2}}. \quad (18)$$

На третьем этапе производится расчет мощности ультразвуковых колебаний при заданных параметрах поверхности излучения и величины звукового давления P_M . Для этого:

– выполняется расчет интенсивности ультразвуковых колебаний по следующей формуле [2]:

$$I = \frac{\overline{P}_M^2}{2\rho_{ж}c_{ж}}; \quad (19)$$

– выполняется расчет акустической мощности, с учетом двухстороннего излучения используемого рабочего инструмента:

$$P_{AK} = I \left(\frac{\pi D_1^2}{2} - \frac{\pi D_2^2}{4} \right). \quad (20)$$

Далее производится расчет электрической мощности, подводимой к пьезоэлектрическому преобразователю:

$$P_{ЭЛ} = P_{AK} \eta_{ЭА}. \quad (21)$$

На основании полученных исходных данных и предварительных расчетов производится расчет возможного диапазона изменения резонансной частоты колебательной системы при реализации режима развитой кавитации. Для этого:

- определяется резонансный размер ультразвуковой колебательной системы:

$$l_1 = \frac{c_{УЗКС}}{2f}; \quad (22)$$

- определяется масса присоединенной жидкости к излучающей поверхности колебательной системы:

$$m = \left(\frac{\pi D_1^2}{2} - \frac{\pi D_2^2}{4} \right) h \rho_{ж}, \quad (23)$$

где h — толщина присоединенного слоя жидкости (максимальная толщина слоя жидкости h , образующего присоединенную массу, была определена экспериментально и составила 0,013 м);

- определяется длина эквивалента присоединенной массы из материала колебательной системы, соответствующего присоединенной массе жидкой среды:

$$\Delta l = \frac{4m}{\rho_{УЗКС} \pi D_2^2}; \quad (24)$$

- определяется частота колебательной системы с эквивалентной присоединенной массой:

$$f_1 = \frac{c_{УЗКС}}{2(l + \Delta l)}. \quad (25)$$

Практические исследования показали, что с увеличением площади излучения замедляется уменьшение резонансной частоты УЗКС. Это связано с тем, что с увеличением диаметра грибовидный рабочий инструмент не может совершать поршневые движения, возникают изгибные колебания и, как следствие, появляются кольцевые участки с нулевой амплитудой колебаний. Таким образом, на следующих этапах

- определяется поправочный коэффициент K_F , позволяющий скорректировать расчетное значение частоты УЗКС [7];

- выполняется коррективировка расчетной частоты f_1 :

$$\bar{f}_1 = K_F \frac{c_{УЗКС}}{2(l + \Delta l)}; \quad (26)$$

- диапазон изменения резонансной частоты колебательной системы определяется по следующей формуле:

$$\Delta f = f - \bar{f}_1. \quad (27)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика определения предельных параметров УЗ технологических аппаратов при реализации процессов в жидких средах, подвергаемых ультразвуковому воздействию, основанная на анализе модели кавитирующей среды, представленной в виде одиночного кавитационного пузырька и позволяющая установить связь акустических свойств жидких кавитирующих сред с параметрами первичного ультразвукового поля.

2. Использование методики позволило осуществлять расчет акустической и электрической мощности электронного генератора, необходимой и достаточной для реализации в жидкой технологической среде режима развитой кавитации.

3. Методика обеспечила определение возможных диапазонов изменения резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы при реализации процессов в различных режимах (докавитационный режим, режим зарождения кавитации, режим развитой кавитации) для установления необходимого диапазона изменения рабочей частоты ультразвукового аппарата.

Методика была проверена при разработке ряда ультразвуковых технологических аппаратов [8], предназначенных для работы в жидких средах в режиме развитой кавитации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. Л.: Машиностроение, 1988.
2. Ультразвуковая технология. Под ред. Б. А. Аграната. М.: Металлургия, 1974.
3. Holtingk E. A., Neppiras E. A. Cavitation produced by ultrasonics. Proc. Phys. Soc., 1051.
4. Flynn H. G. Physics of acoustic cavitation in liquids. Физическая акустика. М.: Мир, 1967.
5. Воротникова М. И., Солоухин Р. И. Расчет пульсаций газовых пузырьков в несжимаемой жидкости под действием периодически изменяющегося давления. Акустический журнал, 1964, №10, с. 34–36.
6. Minnaret M. On musical air-bubbles and the sounds of running water. Philos. Mag., 1933, V. 16, pp. 235–240.
7. Леонов Г. В., Хмелев В. Н., Барсуков Р. В., Хмелев М. В., Цыганок С. Н. Исследование изменений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем в процессе ультразвукового воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды. Электронный журнал «Исследовано в России», 2005, 135, с. 1359–1367.
<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/135.pdf>.
8. Оборудование для проточной обработки жидких сред. Официальный сайт Лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института: <http://www.u-sonic.ru/apparats/liquid.shtml>.