

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

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

В статье представлены результаты теоретических исследований по определению предельных параметров УЗ технологических аппаратов при реализации процессов в жидких средах на основе анализа модели кавитирующей среды, представленной в виде одиночного кавитационного пузырька. Проведенный анализ модели позволил установить связь акустических свойств жидких кавитирующих сред с параметрами первичного ультразвукового поля. На основе использованного математического аппарата предложена методика расчета предельных параметров ультразвуковых генераторов.

ВВЕДЕНИЕ

Большой интерес представляет применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для ускорения процессов в жидких средах, что обусловлено возникновением в них кавитации. Ультразвуковой аппарат, предназначенный для интенсификации технологических процессов, протекающих в жидких средах, должен иметь достаточный запас мощности, для реализации режима развитой кавитации, а так же 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.

ТЕОРИЯ

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.

С учетом этого, 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:

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

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 числом 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:

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

где $\Delta V_{C\Phi}$ - вытесненный из сферы объем жидкости,

$V_{C\Phi}$ - объем сферы, ограниченной радиусом R_{MAX} .

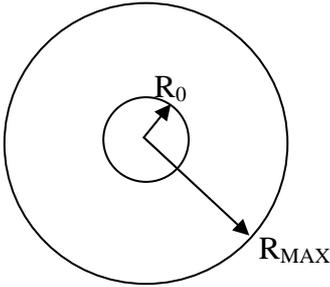


Рис. 1. Область жидкой среды с парогазовым пузырьком внутри

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

Из выражения (4) следует, что для определения индекса кавитации необходимо знать текущее значение радиуса газового пузырька R , его максимально возможный радиус R_{MAX} , а так же 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 [2 - 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:

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

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

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

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 разряжения.

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:

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

Сделав следующие замены:

$$(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0})R_0^3 = a; \quad 2\sigma = b;$$

$P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II} = c$, запишем выражение (10) в следующем виде:

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

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

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

где

$$p = -\frac{4\sigma^2}{3(P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II})^2};$$

$$q = \frac{16\sigma^3}{27(P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II})^3} - \frac{(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0})R_0^3}{P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II}}.$$

Максимальный размер парогазового 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} :

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

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 парогазового пузырька и выражение (12) для определения размера парогазового 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе предложенной модели кавитирующей среды разработана методика расчета предельных параметров электронных генераторов ультразвуковых техно-

логических аппаратов, таких как запас мощности и диапазон изменения частоты, для работы с жидкими средами, при условии реализации в них режима развитой кавитации.

Методика обеспечивает выбор параметров ультразвуковых генераторов, работающих в составе 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 для адаптации ее в случае использования рабочих инструментов другой геометрической формы.

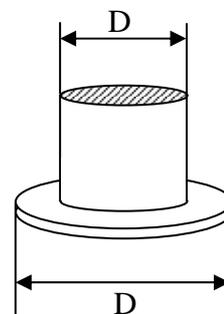


Рис. 2. Эскиз грибовидного рабочего инструмента ультразвуковых колебательных систем

Исходными данными для расчета основных параметров электронных ультразвуковых генераторов являются: плотность материала колебательной системы $\rho_{VЗКС}$; скорость звука в материале колебательной системы $c_{VЗКС}$; 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 парагазового пузырька принимается равной:

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

- индекс кавитации, при котором наступает режим развитой кавитации, составляет 0,2;

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

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

- 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):

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

- величина среднего звукового давления определяется из следующего выражения:

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

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]:

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

- 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 из выражения:

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

- 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 (на основании полученных экспериментальных результатов, принять равным 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, следующим шагом определяется поправочный коэффициент K_F , позволяющий скорректировать расчетное значение частоты УЗКС [7].

- выполняется корректировка частоты 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. Предложена и разработана методика определения предельных параметров УЗ технологических аппаратов при реализации процессов в жидких средах, подвергаемых ультразвуковому воздействию, основанная на

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

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.

Методика обеспечила определение диапазонов изменения резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы при работе ультразвукового аппарата в различных режимах (докавитационный режим, режим зарождения кавитации, режим развитой кавитации).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука. – Л.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
2. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. – М.: Металлургия, 1974. – 505 с.
3. Holtingk E. A., Neppiras E.A. Cavitation produced by ultrasonics. –Proc. Phys. Soc., 1051.–200 p.
4. Flynn H. G. Physics of acoustic cavitation in liquids // Физическая акустика. – М.:Мир, 1967. – 400 с.
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. – p.235–240.
7. Барсуков Р.В. Исследование процесса ультразвукового воздействия на технологические среды и повышение эффективности технологических аппаратов: Диссертация кандидата техн. наук: ГСП-3; –: Защищена 28.10.2005; Утв. 10.02.2006;– 135 с.