

Методика Выбора Предельных Параметров Ультразвуковых Электронных Генераторов

Хмелев В.Н., к.т.н., *Senior Member, IEEE*, Барсуков Р.В, к.т.н., Цыганок С.Н., к.т.н., Хмелев М.В., *Member, IEEE*

Бийский технологический институт (филиал) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова»

Аннотация—В статье рассматривается модель кавитирующей среды, представленная в виде одиночного кавитационного пузырька. Представлен математический аппарат, связывающий акустические свойства жидких кавитирующих сред с их исходными свойствами, параметрами первичного звукового поля. На основе разработанного математического аппарата предложена методика расчета предельных параметров ультразвуковых генераторов.

I. ВВЕДЕНИЕ

Большой интерес представляет применение ультразвука для интенсификации процессов в жидких средах, что обусловлено возникновением в них кавитации. Электронный ультразвуковой генератор, 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 генератора системой автоматической подстройки частоты. На выбор этих параметров влияют как свойства обрабатываемых жидких сред, так и параметры ультразвуковых колебательных систем.

II. 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.

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

$$r_K = r_{Ж}(1 - \bar{K}) + r_{Г}\bar{K}; \quad (1)$$

$$b_K = b_{Ж}(1 - \bar{K}) + b_{Г}\bar{K}, \quad (2)$$

где r_K - плотность кавитирующей среды,

b_K - сжимаемость кавитирующей среды,

$r_{Ж}$ - плотность жидкости,

$b_{Ж}$ - сжимаемость жидкости,

$r_{Г}$ - плотность газа,

$b_{Г}$ - сжимаемость газа,

\bar{K} - индекс кавитации.

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

$$r_K c_K = r_{Ж} c_{Ж} \left(\frac{(1 - \bar{K}) + r_{Г} / r_{Ж} \bar{K}}{(1 - \bar{K}) + b_{Г} / b_{Ж} \bar{K}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

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:

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

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

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

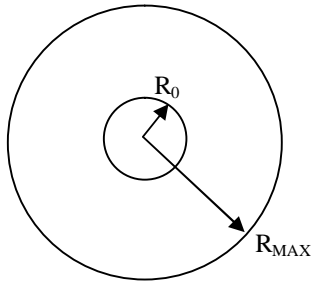


Рисунок 1 – Область жидкой среды с парогазовым пузырьком внутри

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 $P_{Г}$ внутри пузырька уравновешено гидростатическим

давлением P_0 и силами поверхностного натяжения P_S [2 - 6]:

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

Давление создаваемое силами поверхностного натяжения определяется выражением:

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

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

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

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

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

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:

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

Сделав следующие замены: $\left(P_0 - P_{II} + \frac{2S}{R_0}\right)R_0^3 = a$;

$2S = b$; $P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II} = c$, 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):

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

где

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

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

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]:

$$f = \frac{1}{2pR_{MAX}} \sqrt{\frac{3g}{r_{Ж}} \left(P_0 + \frac{2S}{R_{MAX}} \right)}. \quad (13)$$

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 $p = -\frac{P_0 3g}{4p^2 r_{Ж} f^2}$, $q = -\frac{3gs}{2p^2 r_{Ж} f^2}$.

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.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе предложенной модели кавитирующей среды разработана методика расчета предельных параметров ультразвуковых электронных генераторов, таких как запас

мощности и диапазон удержания 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.

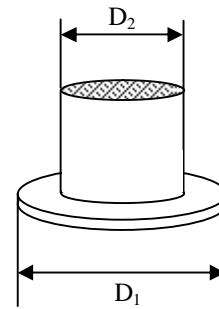


Рисунок 2 – Эскиз грибовидного рабочего инструмента ультразвуковых колебательных систем

Исходными данными для расчета основных параметров электронных ультразвуковых генераторов являются: плотность материала колебательной системы $\Gamma_{VЗКС}$; скорость звука в материале колебательной системы $C_{VЗКС}$; плотность обрабатываемой среды $\Gamma_{Ж}$; 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 S .

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} парагазового 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 $R_0 \ll R$):

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

- производится расчет давления ультразвукового поля P_M при помощи выражения (10), принимая $wt = p$ (фаза максимального разрежения) и $R_0 = 0$ (в виду малого радиуса):

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

- 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]:

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

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

$$P_{AK} = I \left(\frac{pD_1^2}{2} - \frac{pD_2^2}{4} \right). \quad (20)$$

Далее производится расчет электрической мощности, подводимой к пьезоэлектрическому преобразователю:

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

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:

$$m = \left(\frac{pD_1^2}{2} - \frac{pD_2^2}{4} \right) h r_{ж}, \quad (23)$$

где h - толщина присоединенного слоя жидкости (на основании полученных экспериментальных результатов, принять равным 0,013м);

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

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

- 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. Сопоставляя расчетные зависимости резонансной частоты от площади излучения с данными, полученными практическим путем, был выведен поправочный коэффициент K_F , позволяющий скорректировать расчетное значение частоты УЗКС (смотри рисунок 3).

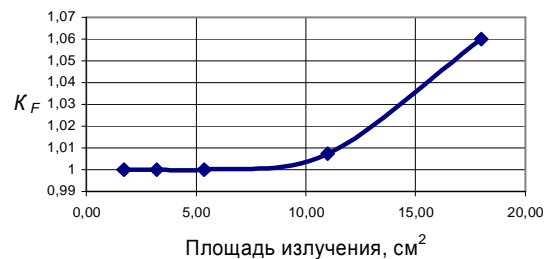


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента K_F от площади поверхности излучения

- таким образом, следующим шагом выполняется корректировка частоты расчетной частоты f_1 :

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

Диапазон изменения резонансной частоты колебательной системы определяется по следующей формуле:

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

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель, описывающая свойства жидких технологических сред, подвергаемых ультразвуковому воздействию. Модель позволяет выполнять расчет волнового сопротивления технологических сред в зависимости от величины звукового давления и свойств обрабатываемой среды.

На основе теоретической модели кавитирующей среды предложена методика определения основных параметров УЗ технологических аппаратов. Методика позволяет осуществлять расчет акустической и электрической мощности электронного генератора, необходимой и достаточной для реализации в жидкой технологической среде режима развитой кавитации. Методика так же позволяет определять диапазон изменения резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы при работе ультразвукового аппарата в различных режимах (докавитационный режим, режим зарождения кавитации, режим развитой кавитации), что является важным при проектировании систем автоматической подстройки частоты электронных ультразвуковых генераторов. Методика может быть использована не только разработчиками УЗ оборудования, но и технологами, а так же специалистами в различных отраслях промышленности при выборе существующего УЗ оборудования.

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.
-