

Оптимизация Процесса Ввода Интенсивных Акустических Колебаний в Обрабатываемую Среду

Г.В. Леонов, Хмелев В.Н., *IEEE Senior Member*, О.В. Лавриненко

Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Аннотация - В статье описывается базовая математическая модель для определения оптимальных режимных параметров процесса кавитации, площади и геометрии рабочего ультразвукового инструмента.

Ключевые слова - Ультразвуковые аппараты, акустические колебания, колебательная система.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ технологические аппараты предназначены для осуществления технологических процессов с использованием упругих механических колебаний ультразвуковой частоты, возбуждаемых и распространяющихся в среде и представляющих собой периодически чередующиеся сжатие и разрежение частиц этой среды.

Во всех ультразвуковых аппаратах основными элементами являются ультразвуковой излучатель (преобразователь электрической или другого вида энергии в энергию упругих механических колебаний ультразвуковой частоты) и генератор электрических колебаний ультразвуковой частоты [1].

Генерация акустических колебаний осуществляется следующим образом: выход генератора нагружен пьезокерамическими элементами преобразования электрических колебаний в механические. Механические колебания воспринимаются излучателем и через усилитель амплитуд передаются к поверхности ввода в рабочую среду. Поверхность ввода может быть сформирована насадками различной формы. Схема колебательной системы представлена на рисунке 3.

В процессе передачи механических колебаний жидкой фазе наблюдается колебание некоторого количества жидкости в

виде присоединенной массы к поверхности ввода; наблюдается действие сил упругости жидкости с возвратом энергии на колеблющийся торец; так же наблюдается вязкостное трение и передача энергии в виде волнового процесса. Последняя является полезной составляющей энергии, вводимой в обрабатываемую среду.

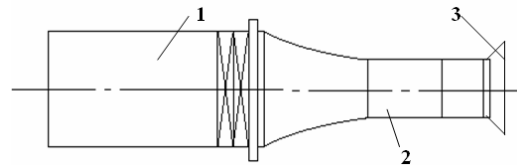


Рисунок 1 – Схема колебательной системы: 1 – преобразователь электрических колебаний; 2 - усилитель амплитуды; 3 - сменный рабочий инструмент

В соответствии с представленной картиной возникает задача оптимизации поверхности ввода. Известно что электро – механические колебательные системы, к которым относится инструмент преобразующий электрические колебания в механические и осуществляющий их ввод в среду, могут быть представлены в виде эквивалентной схемы (рисунок 4) [2].

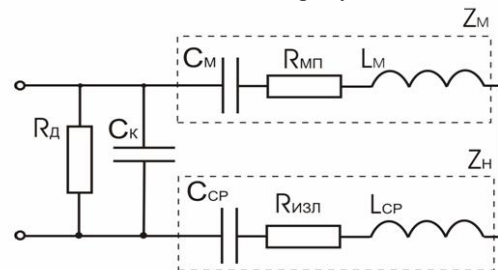


Рисунок 2 – Схема замещения пьезоэлектрического преобразователя, нагруженного на комплексное сопротивление среды: Z_m – комплексное механическое сопротивление среды; Z_n – комплексное механическое сопротивление инструмента

На этой схеме выделено две механических подсистемы: среды и излучателя. Такого рода представление базируется на принципе электромеханических аналогий.

Колебательные свойства механической системы преобразователя среды в зоне ввода, а так же интегрированная механическая система могут быть описаны следующим уравнением:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + K \frac{dx}{dt} + \frac{1}{F} x = P(t), \quad (1)$$

где h – коэффициент трения, k – коэффициент упругости, m – масса, $F(t)$ – приложенная сила.

Колебательные характеристики электрических схем замещения этих систем могут быть записаны аналогичным по форме уравнением (формула 2):

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C} Q = U(t), \quad (2)$$

Решение этих уравнений описывается следующими уравнениями:

$$I = I_m e^{-\beta t} (\cos \omega t + \frac{w}{g} \sin \omega t) + \frac{U_m w [(\frac{1}{C} - Lw^2) \cos \omega t + R w \sin \omega t]}{(\frac{1}{C} - Lw^2)^2 + R^2 w^2} \quad (3)$$

$$\text{где } w = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}; g = \frac{R}{2L}; Z = \sqrt{R^2 + (wL - \frac{1}{wC})^2}$$

$$x = x_m e^{-\beta t} \cos \omega t + \frac{kx_m [(k - mw^2) \sin \omega t - hw \cos \omega t]}{(k - mw^2)^2 + h^2 w^2} \quad (4)$$

$$\text{где } w = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{h^2}{4m^2}}; g = \frac{h}{2m}; Z = \sqrt{h^2 + (wm - \frac{k}{w})^2}$$

Решая уравнения (3) – (4) численными методами можно выразить механические параметры через электрические параметры.

Алгоритм определения условий оптимальности режимных параметров и геометрии рабочего ультразвукового аппарата заключается в решении уравнений приведенных ниже.

Реактивная мощность идет на преодоление сил инерции и сил упругости (формула 5):

$$W_m = m \frac{d^2 x}{dt^2} \frac{dx}{dt}; W_m = W_L = L \frac{dI}{dt} I = I^2 R_L$$

$$W_y = \frac{ES}{x_m} x \frac{dx}{dt}; W_y = W_c = \frac{1}{C} I \int Idt = I^2 R_c$$

$$W_p = I^2 (R_L + R_c) = I^2 R_p \quad (5)$$

Реактивная мощность должна быть сведена к минимуму.

Сила упругости связана прямой зависимостью с площадью:

$$F_{yup} = S S = \frac{ES}{x_m} x \quad (6)$$

Для определения оптимальных размеров рабочего инструмента необходимо поставить дополнительные эксперименты с целью определения зависимости присоединенной массы от частот, площади, перемещения и геометрии излучателя:

$$m = m(w, S, x_m, \Gamma) \quad (7)$$

Активная мощность (мощность сопротивления) тратится на излучение и на преодоление трения:

$$W_c = W_u + W_{mp} \quad (8)$$

$$W_c = F_c J \quad (9)$$

Сила сопротивления состоит из силы излучения и сила вязкостного трения:

$$F_c = F_u + F_{mp} \quad (10)$$

$$F_u = p_u S = R_m JS = \frac{k}{p} r c JS = \frac{w}{p} r JS \quad (11)$$

где R_m – волновое сопротивление среды малого поршня; P_u – давление на излучающей поверхности; k – волновое число

$$k = \frac{2p}{l} = \frac{2pw}{c2p} = \frac{w}{c} \quad (12)$$

Сила вязкостного трения для малого поршня [3] определяется по формуле:

$$F_{mp} = S J \sqrt{w r m} \quad (13)$$

Из уравнений (11) и (13) определяется выражение для силы сопротивления:

$$F_c = h \frac{dx}{dt} = \left(\frac{rw}{p} + \sqrt{w r m} \right) S J \quad (14)$$

Тогда

$$W_c = \left(\frac{rw}{p} + \sqrt{w r m} \right) S \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = I_2 R \quad (15)$$

Как видно из уравнения (15), при увеличении частоты увеличивается доля энергии излучаемой в среду, которая больше доли затрачиваемой на преодоление вязкостного трения.

Увеличение частоты не приводит к нужному результату (оптимизации), так как,

во-первых, требуется ввод дополнительной энергии, а во-вторых, при больших значениях частот, зародыш пузырька не успевает образоваться в период разряжения.

Для оптимизации режимных параметров и геометрии рабочего инструмента необходимо подобрать такой план $y^* = y^*(W^*, S^*, x_m^*, \Gamma^*)$ при заданной мощности излучения, чтобы КПД был максимальным:

$$h = \frac{W_u}{W_u + W_{mp} + W_y + W_m} \quad (16)$$

Таким образом, создана базовая математическая модель для определения оптимальных режимных параметров процесса кавитации, а так же площади и геометрии

рабочего ультразвукового инструмента на основе математического и натурного моделирования процесса ввода акустической энергии в кавитируемую среду.

ССЫЛКИ

- [1] Хмелев В.Н., Попова О.В., “Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве”, Барнаул: АлтГТУ, 1997, 160 с.
- [2] Левшина Е.С., Новицкий П.В., “Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи)”, Л.: Энергоатомиздат, 1983, 320 с.
- [3] Голямин И.П. Ультразвук “Маленькая энциклопедия”, М.: «Советская энциклопедия», 1979, 400 с.