

ВЛИЯНИЕ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛНОВОДА - ИНСТРУМЕНТА НА ИМПЕДАНС ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРИ РАБОТЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ЖИДКИЕ СРЕДЫ

Определен характер влияния на входной иммитанс акустического тракта ультразвукового пьезокерамического излучателя глубины погружения волновода-инструмента в жидкую технологическую среду. Установлено, что влияние, оказываемое боковой поверхностью волновода-инструмента на активную составляющую импеданса нагрузки, необходимо учитывать, начиная с относительной глубины погружения $h/\lambda \geq 0,1$, (где λ - длина волны в материале волновода-инструмента), а при глубинах погружения волновода-инструмента $h/\lambda \geq 0,25$ величина, вносимая боковой поверхностью волновода-инструмента в импеданс нагрузки, становится определяющей.

Специфика применения контактного ультразвука в том, что работы по «чистой» поверхности являются частным и довольно редко встречающимся случаем. В основном, ультразвуковое воздействие осуществляется на какой-то глубине в используемой акустической среде. В ряде медицинских применений эта глубина может быть значительна и сравнима с длиной волны в используемых волноводах-инструментах. Поэтому для длинных и тонких волноводов-инструментов, используемых для работы на определенных уровнях погружения в акустическую среду, важным фактором, при определении импеданса излучения, является оценка соотношения амплитуд радиальной и осевой (продольной) компонент.

При рассмотрении однородного стержня, совершающего продольные колебания, несложно получить выражение для осевой составляющей смещения на основании закона Гука и уравнения продольных колебаний [1].

Очевидно, что при прохождении по стержню акустической волны, он претерпевает растяжения и сжатия, приводящие к изменению его длины. В соответствии с коэффициентом Пуассона μ при этом происходят и изменения его диаметра, формируя радиальную составляющую колебаний стержня.

Как показано на рис.1. пространственные изменения радиальной составляющей соответствуют пространственному распределению уровня напряжений в стержне; таким образом, радиальная составляющая амплитуд колебаний сдвинута относительно осевой на четверть длины волны:

$$A_{\text{рад}} = A_m \mu \sin \frac{\omega}{c} h$$

При колебании боковой поверхности волновода-инструмента, во время расширения диаметра волновода, жидкость отбрасывается боковой поверхностью на расстояние $A_{\text{рад}}$ и затем возвращается со скоростью, определяемой столбом жидкости над уровнем

затекания, $V_{\text{зам}} = \sqrt{gh}$. Боковая поверхность при этом возвращается со скоростью $V = A_{\text{рад}} \omega \sin \omega t$.

Для малых и даже средних значений амплитуд колебаний рабочего торца волновода-инструмента, скорость возврата жидкости выше скорости радиального движения боковой поверхности, поэтому можно считать, что активная составляющая импеданса, обусловленная боковой поверхностью оценивается

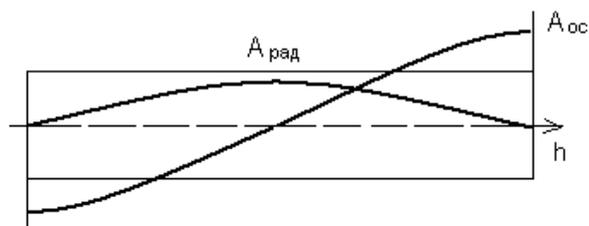


Рис. 1. Распределение радиальной и осевой составляющих амплитуд колебаний стержня

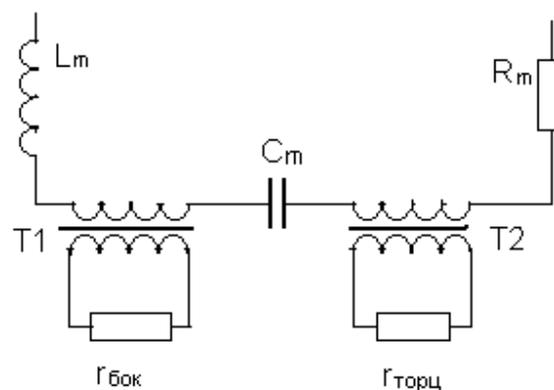


Рис. 2. Схема эквивалентной полной нагрузки акустической системы с учетом боковой поверхности волновода-инструмента

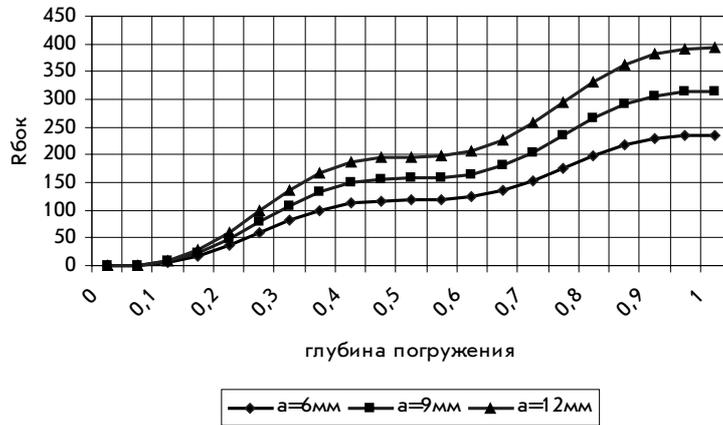


Рис. 3. Зависимость эквивалентной нагрузки боковой поверхности волновода инструмента от глубины погружения при разных значениях диаметров

выражением $r_{бок} = \rho c S_{бок}$. (То есть имеется полный акустический контакт.). В то же время для излучателя боковая поверхность волновода-инструмента, также как и его торцевая поверхность является параметром, определяющим импеданс нагрузки с учетом коэффициентов передачи (трансформации) амплитуды колебаний от излучателя до торцевой или боковой поверхности волновода-инструмента соответственно. Для боковой поверхности этот коэффициент будет определяться как отношение:

$$n = \frac{A_{бок}}{A_m} = \mu \text{Sin} \frac{\omega}{c} h = \mu \text{Sin} \frac{2\pi}{\lambda} h$$

В соответствии с предложенной в [2] эквивалентной схемой волновода, для импеданса полной нагрузки волновода инструмента (с учетом как торцевой, так и боковой поверхности) она примет вид (рис. 2).

И тогда приведенная к входному торцу волновода-инструмента активная составляющая импеданса боковой поверхности будет определяться как:

$$\bar{r}_{бок} = \int_0^h n^2(z) r_{бок}(z) dz = \int_0^h \rho c \pi a \mu^2 \text{Sin}^2 \frac{2\pi z}{\lambda} dz = \rho c \mu^2 a \int_0^h \text{Sin}^2 \frac{2\pi z}{\lambda} dz. \quad (1)$$

Полученное выражение, при соответствующей замене переменных ($u = \frac{2\pi z}{\lambda}$, $du = \frac{2\pi}{\lambda} dz$), сводится к табличному интегралу [3]:

$$\bar{r}_{бок} = \rho c \mu^2 a \int_0^{\frac{2\pi h}{\lambda}} \text{Sin}^2 u du = \rho c \mu^2 \frac{a\lambda}{\pi} \left(\frac{1}{2} u - \frac{1}{4} \text{Sin} 2u \right) = \rho c \mu^2 \frac{a\lambda}{\pi} \left(\frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{1}{2} \text{Sin} \frac{4\pi z}{\lambda} \right)$$

После подстановки пределов интегрирования получаем:

$$\bar{r}_{бок} = \rho c \mu^2 \frac{a\lambda}{\pi} \left(\frac{2\pi h}{\lambda} - \frac{1}{2} \text{Sin} \frac{4\pi h}{\lambda} \right). \quad (2)$$

Полученная зависимость для разных диаметров волновода-инструмента приведена на рис.3.

Для оценки влияния глубины погружения волновода-инструмента в технологическую среду полученное

выражение для активной составляющей импеданса боковой поверхности необходимо сопоставить с другими составляющими импеданса волновода-инструмента и излучателя. К таким составляющим относятся кинетическое сопротивление потерь излучателя r_m , сопротивление потерь волновода-инструмента $r_{тв-и}$ и активная составляющая импеданса торцевой поверхности волновода-инструмента $r_{торц}$. При постоянном значении частоты и амплитуды колебаний излучателя, величины сопротивлений потерь, как излучателя, так и волновода-инструмента, можно считать постоянными [4]. Для проверки правильности предложенной модели влияния глубины погружения волновода-инструмента на импеданс пьезокерамического излучателя был разработан и проведен эксперимент, позволивший исключить влияние торцевой поверхности волновода-инструмента, с одной стороны, и с другой стороны, оценить величину кинетического сопротивления потерь волновода и пьезокерамического излучателя в целом (см. рис. 4).

Торцевая поверхность волновода-инструмента была закрыта резиновым коллаком, не пропускающим вовнутрь жидкую среду, причем стягивающие усилия в этом случае приложены в таком месте боковой поверхности волновода-инструмента, где они вызывают минимальные изменения импеданса.

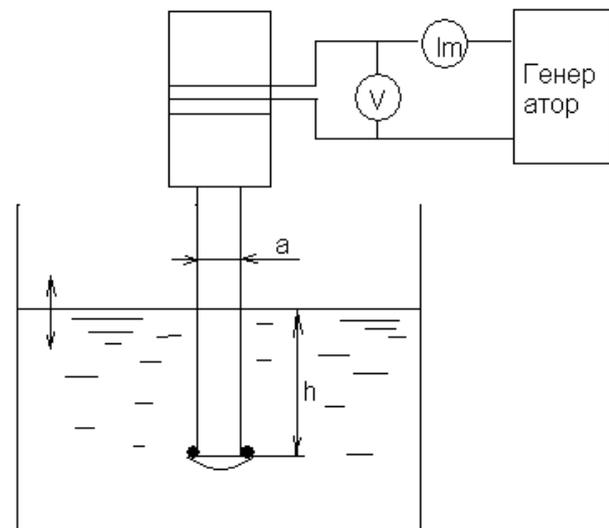


Рис. 4. Схема проведения эксперимента для определения влияния боковой поверхности на величину эквивалентного сопротивления нагрузки

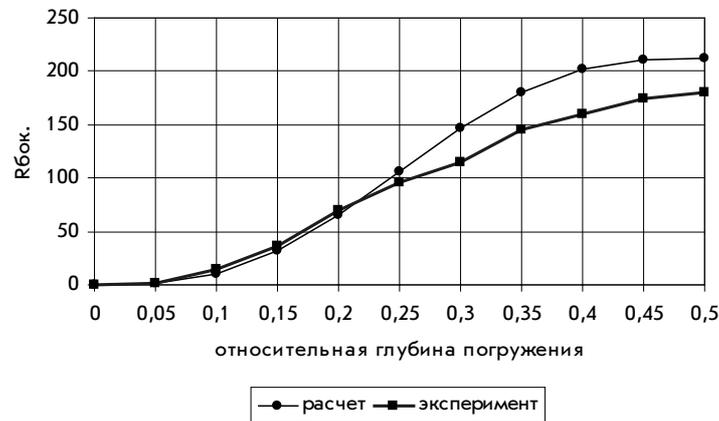


Рис. 5. Кривые изменения эквивалентного сопротивления нагрузки от глубины погружения волновода - инструмента

В этой ситуации показания приборов позволяют оценить импеданс боковой поверхности волновода-инструмента при его погружении в технологическую среду и добавленное к нему кинетическое сопротивление потерь излучателя и волновода-инструмента. При извлечении инструмента из жидкой среды показания приборов дают информацию о величине кинетического сопротивления потерь излучателя и волновода-инструмента при заданной частоте и амплитуде колебаний рабочего торца. Очевидно, что для получения экспериментального значения импеданса боковой поверхности волновода-инструмента, достаточно из первых измерений вычесть полученные кинетические потери. Результат для однородного прямого цилиндрического полуволнового волновода инструмента, выполненного из дюралюминия марки Д16Т, диаметром 17 мм на частоту 42,7 кГц, с амплитудой колебаний рабочего торца 6мкм, приведен на рис. 5. Отдельно были проведены измерения

импеданса на малых глубинах погружения ($\frac{h}{\lambda} = 0,20$)

при снятом защитном резиновом колпаке с рабочей торцевой поверхности волновода-инструмента. Эти измерения, вместе с предыдущими измерениями, позволили определить величину импеданса нагрузки торцевой поверхности волновода-инструмента. Для указанных выше условий (частота, амплитуда и диаметр рабочего торца), она составила величину в 18-24 Ома, причем при увеличении амплитуды колебаний до 10 мкм импеданс нагрузки приближается к нижней границе указанного выше диапазона, а при уменьшении амплитуды колебаний до 5-6 мкм импеданс приближается к верхней границе. Точность проведенных измерений ограничивалась, с одной стороны, точностью применяемого измерительного оборудования (3-5%), а с другой стороны наличием низкочастотной сетевой пульсации в выходном сигнале генератора, возрастающей по мере повышения мощности выходного сигнала при погружении волновода-инструмента (еще 5-7%).

На основании проведенных исследований и экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Влияние, оказываемое боковой поверхностью волновода-инструмента на активную составляющую

импеданса нагрузки необходимо учитывать, начиная с относительной глубины погружения $\frac{h}{\lambda} \geq 0,1$, (где λ - длина волны в материале волновода-инструмента).

2. При значительных глубинах погружения волновода-инструмента $\frac{h}{\lambda} \geq 0,25$ величина, вносимая боковой поверхностью волновода-инструмента в импеданс нагрузки, становится определяющей и в несколько раз превышает величину, вносимую в импеданс нагрузки торцевой поверхностью волновода-инструмента.

3. В тех случаях, когда технологический процесс локализован областью, примыкающей к рабочему торцу волновода-инструмента, при значительных глубинах погружения последнего в технологическую среду (это технологии: эндопротезирования, липосакции, операции на позвоночнике и т.п.) целесообразно использовать тонкие цилиндрические защитные экраны, препятствующие доступу технологической среды к боковой поверхности волновода-инструмента.

Библиографический список

1. Теумин, И.И. Ультразвуковые колебательные системы. - М.: Машгиз, 1959. - 332 с.
2. Prokic, M. Piezoelectric transducers modeling and characterization // MP Interconsulting. Le Locle, Switzerland. - 2004. - 186 p.
3. Диткин, В.А., Прудников, А.Т. Интегральные преобразования и операционное исчисление. Госиздат, 1961.
4. Новиков, А.А., Шустер, Я.Б. Внутренние потери в пьезокерамическом ультразвуковом излучателе и оценка теплового режима его работы // Тезисы докладов Международной конференции «Образование через науку». - Москва: МГТУ им. Баумана, 2005. - С.354.

НОВИКОВ Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

Дата поступления статьи в редакцию: 29.04.2008 г.

© Новиков А.А.