

УДК 534.3

А.Г. Лейко, д-р тех. наук, А.И. Нижник, Я.И. Старовойт

Государственное предприятие «Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов», ул. Сурикова, 3, г. Киев, 03035, Украина.

К вопросу об излучении звука цилиндрическими пьезокерамическими преобразователями различной конструкции

Методом эквивалентных электромеханических схем получено решение «сквозной задачи» об излучении звука цилиндрическими пьезокерамическими преобразователями силовой и компенсированной конструкций, при построении которых использованы и продольный, и поперечный пьезоэффекты. С использованием полученных соотношений выполнены расчеты численных характеристик звуковых полей таких преобразователей и на их основе произведен сопоставительный анализ акустических свойств преобразователей силовой и компенсированной конструкции в широком диапазоне частот в зависимости от типа использованного пьезоэффекта, величины механической добротности и геометрических размеров преобразователей, а также характеристик сред, заполняющих внутренние полости преобразователей.

Произведен также сопоставительный анализ акустических свойств цилиндрических пьезокерамических преобразователей рассматриваемых конструкций, звуковые поля которых рассчитаны методом связанных полей и методом эквивалентных электромеханических схем. Показано, что результаты расчетов практически совпадают только в том случае когда величина механической добротности преобразователей превышает значение $Q_m=80\div 100$. Библ. 7, рис. 10, табл. 1.

Ключевые слова: звуковые поля, цилиндрический пьезокерамический преобразователь, продольный и поперечный пьезоэффект, силовая и компенсированная конструкция.

Введение

В настоящее время при изучении вопроса об излучении звука цилиндрическим пьезокерамическим преобразователем используют представления о двух возможных расчетных моделях таких преобразователей. Согласно первой модели преобразователь представляется в виде эквивалентной электромеханической схемы. Эта модель является определенным упрощением реальной ситуации, оправдавшим себя в течение ряда десятилетий при выполнении кон-

кретных проектных работ. Вторая модель основывается на использовании всех математических соотношений, описывающих процессы преобразования в цилиндрическом пьезокерамическом преобразователе электрической энергии в акустическую. Обе модели позволяют решить задачу излучения звука в так называемой «сквозной» постановке, когда заданной величины электрического напряжения на электрическом входе преобразователя ставится в соответствие звуковое давление или колебательная скорость в любой точке среды, в которой работает преобразователь. Вполне прогнозируемо, что в зависимости от вида выбранной расчетной модели конечные результаты расчета будут отличаться между собой. К сожалению, в количественном отношении эти отличия не исследовались. Для их изучения необходимо получить аналитические соотношения для звукового поля цилиндрического пьезокерамического преобразователя при различном модельном представлении его, выполнить численные расчеты при одинаковых исходных данных и сопоставить их между собой.

Целью данной статьи является получение аналитических соотношений, описывающих звуковое поле кругового цилиндрического пьезокерамического излучателя при представлении его расчетной модели с использованием эквивалентной электромеханической схемы, и количественный анализ звуковых полей на их основе.

Вывод аналитических соотношений

Рассмотрим секционированный круговой цилиндрический преобразователь радиуса r_0 и толщиной h . Внутренняя полость преобразователя заполнена средой с плотностью ρ_2 и скоростью звука c_2 . Сам преобразователь располагается в жидкой среде с волновым сопротивлением $\rho_1 c_1$. На электрические выводы преобразователя подается напряжение $u = Ue^{-i\omega t}$. Преобразователь излучает во внутреннюю полость и во внешнее пространство звуковые волны. Будем полагать, что пьезокерамическая

оболочка преобразователя набрана из большого числа соосно расположенных идентичных пьезокерамических колец (рис.1). Кольца поляризованы в окружном направлении (рис.1,б). Поскольку ко всем призмам колец подводится одно и то же напряжение, то все части преобразователя будут двигаться синфазно с одинако-

вой амплитудой, т.е. совершать пульсирующие колебания. При этом с учетом того, что толщина и высота колец малы по сравнению с радиусом, толщинная и осевая деформации каждого кольца пренебрежимо малы, и преобразователь представляет собой колебательную систему с одной степенью свободы.

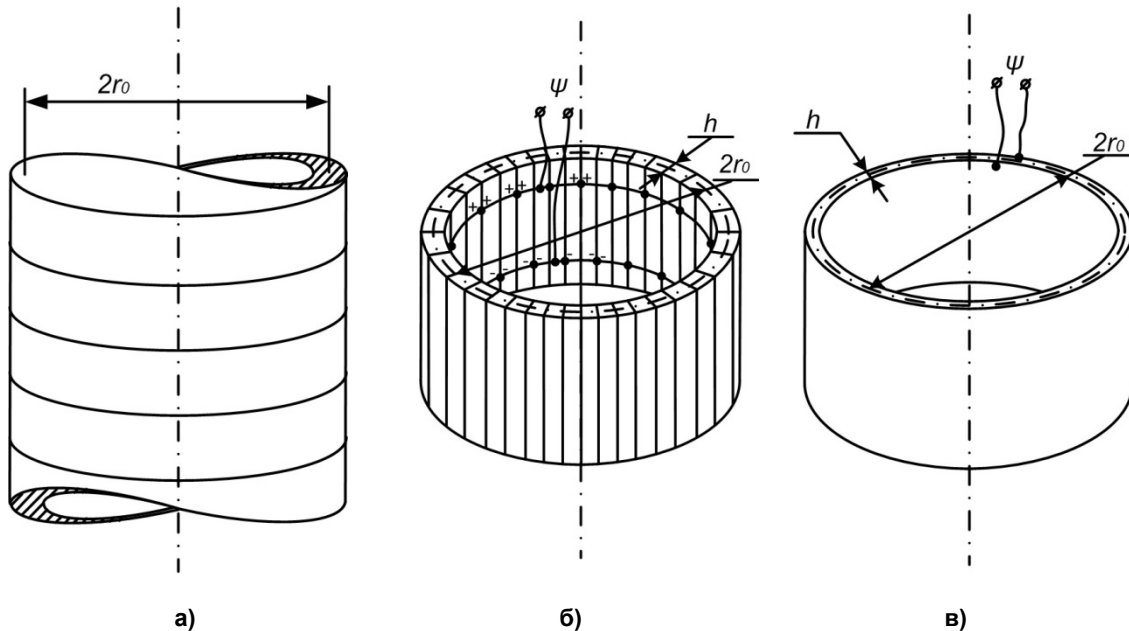


Рис. 1. Схематическое изображение построения цилиндрических пьезокерамических излучателей с продольным (б) и поперечным (в) пьезозффектом

В круговой цилиндрической системе координат уравнение движения бесконечной тонкой пьезокерамической оболочки с окружной поляризацией может быть представлено в виде линейного неоднородного дифференциального уравнения [1]:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \frac{1}{Q_M} \sqrt{\frac{1}{r_0^2 \rho_k S_{33}^E}} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{r_0^2 \rho_k S_{33}^E} \cdot \xi = \frac{d_{33}}{r_0 \rho_k S_{33}^E} \cdot E_3 + \Delta p \cdot \frac{1}{\rho_k h} \quad (1)$$

где ξ - смещение стенки оболочки; ρ_k, d_{33}, S_{33}^E - плотность, продольные пьезомодуль и модуль гибкости при нулевой электрической напряженности пьезокерамики преобразователя; $E_3 = -\frac{u}{t_n}$ - напряженность электрического поля; Q_M - механическая добротность преобразователя; $\Delta p = p_1 - p_2$ - разность давлений,

действующих на оболочку с обеих сторон; t_n - толщина по средней окружности.

Для режима установившихся гармонических колебаний решение уравнения (1) можно записать в виде:

$$\xi = \frac{\frac{d_{33}h}{r_0 S_{33}^E t_n} \cdot u + \Delta p}{j\omega[r_{mn} + j(\omega m - \frac{1}{\omega C_M})]} = \frac{\frac{d_{33}h}{r_0 S_{33}^E t_n} \cdot u + \Delta p}{j\omega Z_{об}} \quad (2)$$

где $Z_{об} = -\frac{p}{v}|_S = r_{mn} + j(\omega m - \frac{1}{\omega C_M})$ - локальный

механический импеданс оболочки; $m = \rho_k h$ -

масса оболочки, приведенная к единице ее поверхности; $C_M = \frac{1}{S} = \frac{r_0^2 S_{33}^E}{h}$ - упругость на единицу поверхности; $r_{mn} = \frac{\rho_k h}{Q_M} \sqrt{\frac{1}{r_0^2 \rho_k S_{33}^E}}$ - механи-

ческое сопротивление единицы поверхности, обусловленное вязкоупругим трением. Тогда колебательная скорость поверхности преобразователя равна:

$$v_0 = \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\frac{d_{33}h}{r_0^2 S_{33}^E t_n} + \Delta p}{Z_{об}} \quad (3)$$

Из соотношения (3) следует, что для определения колебательной скорости преобразователя необходимо определить звуковые давления, создаваемые преобразователем внутри и вне преобразователя. При этом давление должно удовлетворять уравнению Гельмгольца

$$\Delta p(r) + k^2 p(r) = 0,$$

где Δ - оператор Лапласа, $k = \frac{\omega}{c}$ - волновое число среды, в которой распространяется звуковая волна, и ряду условий сопряжения.

$$p_1|_{r=r_0} - p_2|_{r=r_0} + v_0 Z_{об} = n_T u \quad (4)$$

$$v_1|_{r=r_1} = v_2|_{r=r_2} = v_0,$$

где $n_T = \frac{d_{33}h}{r_0 S_{33}^E t_n}$ - коэффициент электромеханической трансформации и колебательная скорость точки приведения в эквивалентной электромеханической схеме преобразователя[3].

Решение уравнения Гельмгольца будем ис-

$$p_1 = -j\rho_1 c_1 \frac{n_T U}{[-j\rho_1 c_1 \frac{H_0^{(1)}(k_1 r_1)}{H_1^{(1)}(k_1 r_1)} + j\rho_2 c_2 \frac{J_0(k_2 r_2)}{J_1(k_2 r_2)} + Z_{об}] \frac{H_0^{(1)}(k_1 r_1)}{H_1^{(1)}(k_1 r_1)}} \quad (7)$$

$$p_2 = -j\rho_2 c_2 \frac{n_T U}{[-j\rho_1 c_1 \frac{H_0^{(1)}(k_1 r_1)}{H_1^{(1)}(k_1 r_1)} + j\rho_2 c_2 \frac{J_0(k_2 r_2)}{J_1(k_2 r_2)} + Z_{об}] \frac{J_0(k_2 r_2)}{J_1(k_2 r_2)}} \quad (8)$$

Можно показать что в случае радиальной поляризации пьезокерамической оболочки преобразователя (рис.1в) соотношения (7) и (8) для описания звуковых полей во внешности преобразователя и во внутренней полости его будут иметь такой же вид, но отличаться только записью выражений для коэффициента электромеханической трансформации n_T и составляющих C_m и r_{mn} локального механического импеданса пьезокерамической оболочки преобразователя:

$$n_T = \frac{d_{31}}{r_0 S_{11}^E}; \quad r_{mn} = \frac{\rho_K h}{Q_m} \sqrt{\frac{1}{r_0^2 \rho_K S_{11}^E}}; \quad C_m = \frac{1}{S} = \frac{r_0^2 S_{11}^E}{h},$$

где d_{31}, S_{31}^E - поперечный пьезомодуль и модуль гибкости при нулевой электрической напряженности пьезокерамики преобразователя.

вать в круговой цилиндрической системе координат с учетом того, что и внешнее (область I) и внутреннее (область II) поля не зависят от координаты z и являются радиально симметричными. Тогда с учетом условия излучения на бесконечности поля давления и колебательной скорости в области I имеют вид:

$$p_1 = -j\omega\rho_1 A_0 H_0^{(1)}(k_1 r), \quad (5)$$

$$v_1 = k_1 A_0 H_0^{(1)}(k_1 r),$$

а поля в области II:

$$p_2 = -j\omega\rho_2 B_0 J_0(k_2 r), \quad (6)$$

$$v_2 = k_2 B_0 J_0(k_2 r),$$

где A_0 и B_0 - неизвестные коэффициенты, а $H_0^{(1)}(kr)$ и $J_0(kr)$ цилиндрические функции.

Подставим в условие (4) соответствующие выражения из (5) и (6) и определим неизвестные коэффициенты A_0 и B_0 . В результате получим:

Результаты исследований

Применим полученные соотношения для сравнительной численной оценки зависимостей амплитуд давления излучаемого сигнала от частоты при различном конструктивном исполнении цилиндрических преобразователей. Расчеты производились для преобразователей, построенных с использованием продольного (количество призм $n=48$) и поперечного пьезоэффектов, для трех составов пьезокерамики (ЦТБС-3, ЦТС-19, ТБК-3), трех толщин пьезокерамических оболочек ($h=0,008м; 0,01м; 0,012м$), трех радиусов срединной поверхности ($r_0 = 0,068 м; 0,1 м; 0,12 м$) и возбуждающем электрическом напряжении $u=200В$.

Параметры указанных составов пьезокерамики приведены в табл.1 [3].

Табл. 1. Параметры состава пьезокерамики

Параметр		Состав пьезокерамики		
		ЦТБС-3	ЦТС-19	ТБК-3
Плотность	$\rho_k, \text{кг/м}^3$	7210	7740	5400
Пьезомодуль	$d_{31}/d_{33} \cdot 10^{-12}, \text{Кл/Н}$	134/286	125/304	49/121
Модуль гибкости	$C_{11}^E/C_{33}^E \cdot 10^{10}, \text{Н/м}^2$	15,1/13,6	10,9/9,3	15,7/15,3

Сопоставление расчетных соотношений, полученных для описания полей круговых цилиндрических преобразователей силовой и компенсированной конструкций [4] методом связанных полей [5] и рассматриваемым в работе методом эквивалентных электромеханических схем, показывает, что их отличие состоит в

появлении в соотношениях, полученных вторым методом, такого параметра как механическая добротность Q_m . В связи с этим естественно возникает вопрос о характере зависимости количественных характеристик звукового поля от величины этого параметра. Ответ на этот вопрос дают результаты исследований, представленные на рис. 2 и 3.

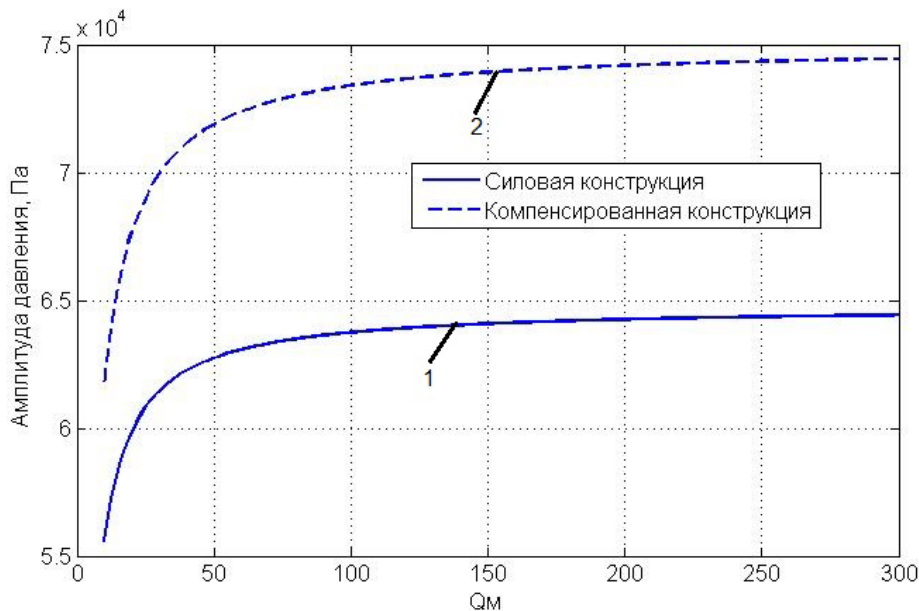


Рис. 2. Графики зависимости амплитуды звукового давления на внешней поверхности излучателя силовой (кривая 1) и компенсированной (кривая 2) конструкций от величины механической добротности Q_m при продольном пьезоэффекте, $r_0 = 0,068 \text{ м}$, $h = 0,008 \text{ м}$, $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 0$ (кривая 1), 1 (кривая 2), для пьезокерамики состава ЦТБС-3

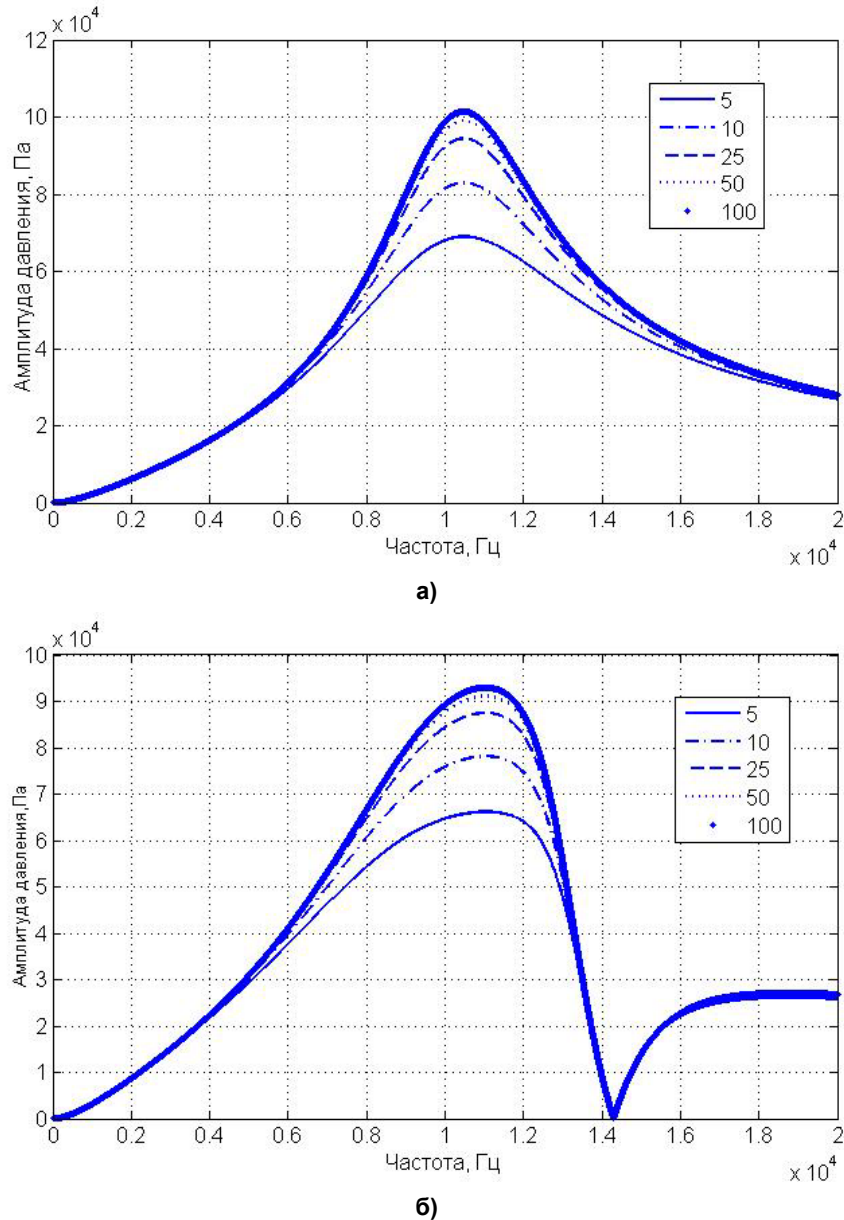


Рис. 3. Графики зависимости амплитуды звукового давления на поверхности излучателя силовой (а) и компенсированной (б) конструкции от частоты для разных значений механической добротности при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м, $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 0$ (а), 1 (б) для пьезокерамики состава ЦТБС-3

Их анализ показывает, что при возрастании механической добротности преобразователя до значений $Q_m = 50 \div 100$ ее величина оказывает существенное влияние не только на максимальное значение амплитуд излученного поля, но и на ширину полосы частот резонансного излучения преобразователей как силовой, так и компенсированной конструкции. Поскольку при значениях механической добротности $Q_m > 100$, как следует из рис. 2 и 3, амплитуда давления звукового поля практически не изменяется и близка к значениям, полученным методом связанных полей [7], в дальнейшем при расчетах будем принимать величину механической добротности $Q_m = 100$.

Для излучателей силовой конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектами результаты расчетов звуковых полей представлены на рис. 4 и 5. Анализ приведенных результатов позволяет установить ряд особенностей в частотных зависимостях амплитуд давления звуковых полей таких излучателей. В случае вакуумирования внутренней полости цилиндрического излучателя силовой конструкции (рис.4а) частотная зависимость амплитуды его звукового поля во внешней области представляет собой гладкую кривую резонансного типа. Особо следует отметить, что кривая охватывает всю частотную область, включая и нулевую частоту. Заполнение внутренней полости излучателя га-

зом обуславливает возникновение в ней внутренних узкополосных резонансов (рис.4б), разнесенных между собой по шкале частот на одно и то же расстояние, но имеющих на разных частотах разную амплитуду давления звукового поля на внутренней поверхности цилиндрического излучателя. При этом состав пьезокерамики, из которой изготовлена оболочка излучателя, никакого влияния на величины частот резонансов не оказывает.

Естественным следствием появления резо-

нансов во внутренней полости излучателя силовой конструкции является их проявление и в частотной зависимости амплитуд давления звукового поля во внешней области (рис.5). При этом частотная характеристика газозаполненного цилиндрического излучателя силовой конструкции становится многорезонансной и характеризуется появлением множества узкополосных локальных резонансов, проявляющихся в виде всплесков амплитуд на гладкой резонансной кривой, соответствующей случаю вакуумирования этого излучателя (рис. 4а).

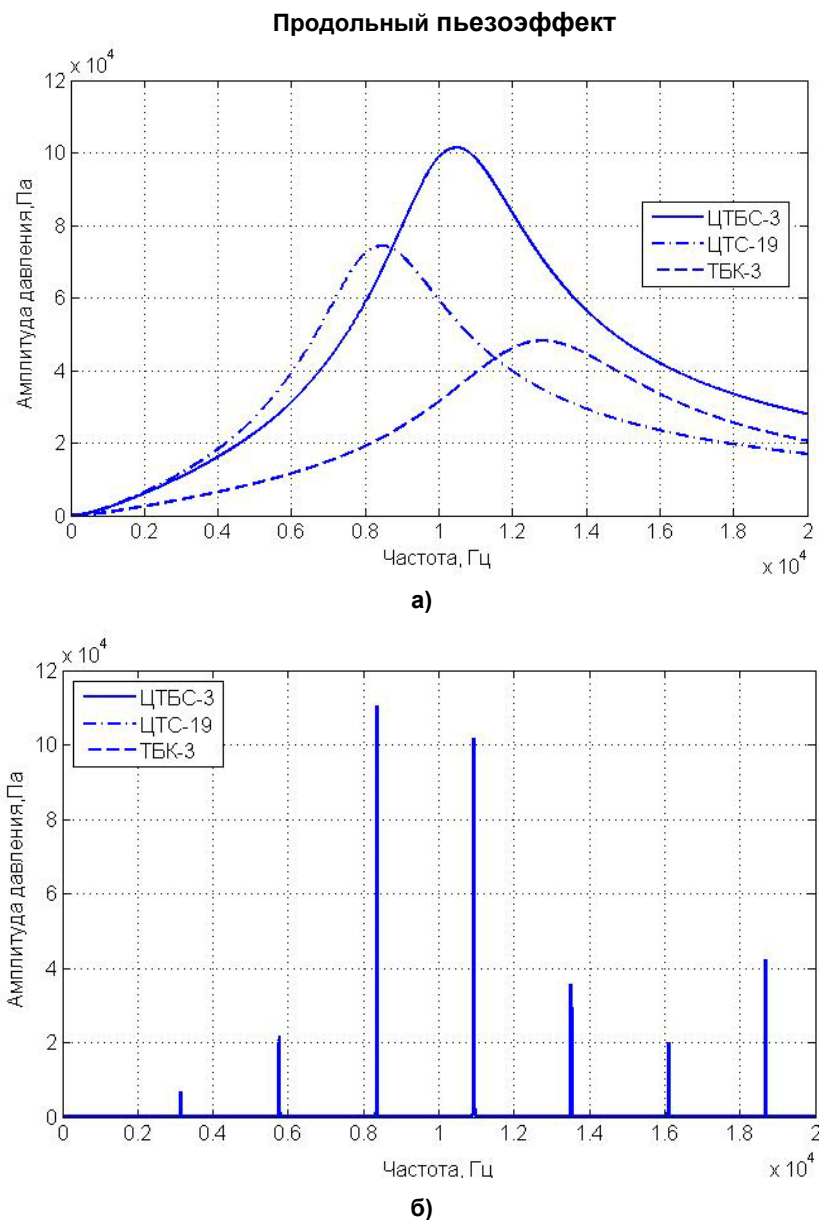


Рис. 4. Графики частотной зависимости амплитуд давления на внешней (а) и на внутренней (б) поверхностях излучателя силовой конструкции при $r_0 = 0,068$ м, $h=0,008$ м и вакуумировании его внутренней полости (а) или заполнении ее воздухом (б)

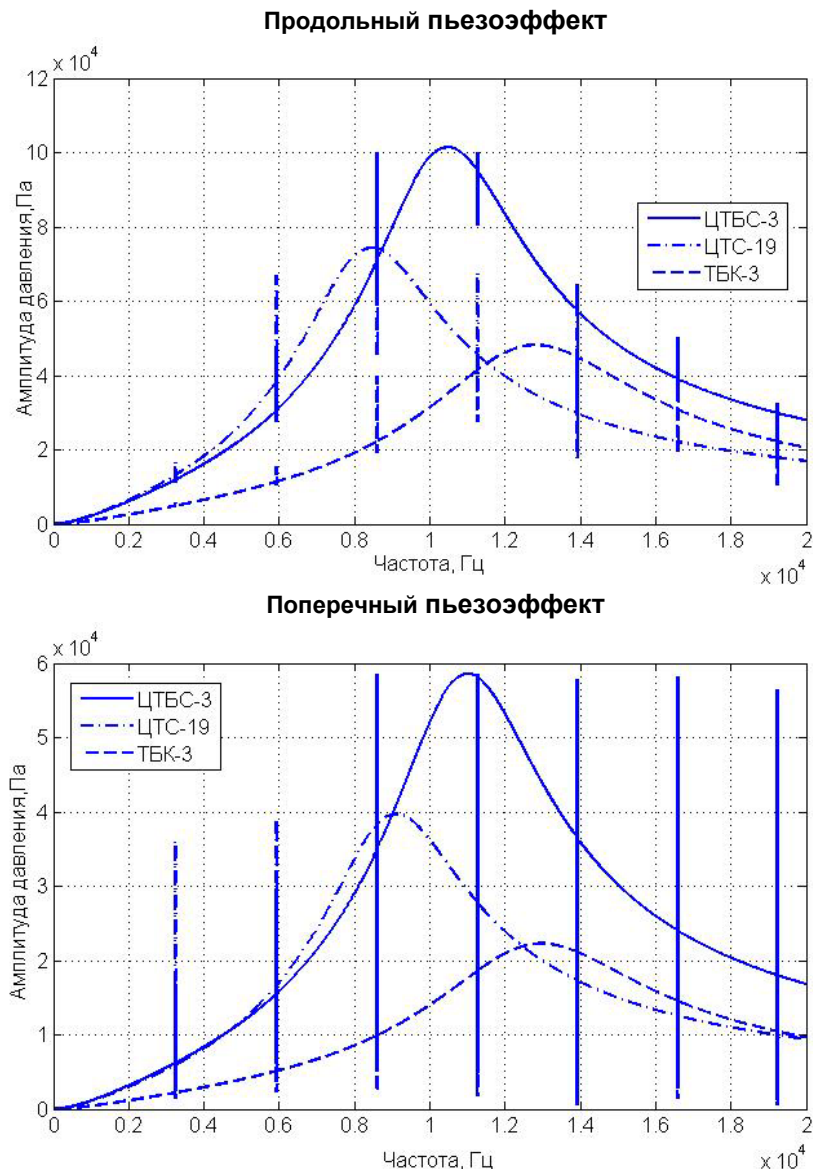


Рис. 5. Графики зависимости амплитуд звукового давления на внешней поверхности излучателя силовой конструкции от частоты для разных составов пьезокерамики при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м

Частоты этих локальных резонансов (рис. 5) соответствуют частотам резонансов внутренней наполненной газом полости этого излучателя (рис. 4 б). Выбор типа пьезоэффекта при построении цилиндрического пьезокерамического излучателя силового типа проявляется только в уровне эффективности излучателя (рис.5), которая, как и следовало ожидать, анализируя расчетные соотношения, существенно выше для продольного пьезоэффекта. Кроме того, имеет место некоторые изменения резонансной частоты пьезокерамической оболочки, обусловленные различием в модулях упругости различных составов пьезокерамики при продольном и поперечном пьезоэффектах.

В целом сопоставляя между собой акустические свойства одиночных цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой конструкции, рассчитанные методом связанных полей [6, 7] и методом эквивалентных электромеханических схем, можно сделать вывод о том, что при уровне механической добротности $Q_m \geq 100$ имеет место практически полное совпадение численных значений параметров звуковых полей излучателей. Этот вывод расходится с установившимся мнением о том, что метод эквивалентных схем может быть использован для расчета цилиндрических преобразователей только в областях резонансных частот. В то же время при выборе $Q_m < 100$ численные результаты, полученные с использованием указанных

методов, начинают различаться и тем в большей мере, чем меньше величина механической добротности Q_m .

Для излучателей компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектами результаты расчетов звуковых полей представлены на рис.6÷10. Анализ этих графиков и сопоставление их с данными рис. 4÷5 показывает, что переход от излучателя си-

ловой конструкции к излучателю компенсированной конструкции сопровождается существенным изменением характеристик его звукового поля. Заполнение внутренней полости излучателя средой с большим волновым сопротивлением, чем газ обуславливает возникновение в ней звукового поля не на отдельных частотах (рис.4б), а во всей частотной области (рис.6).

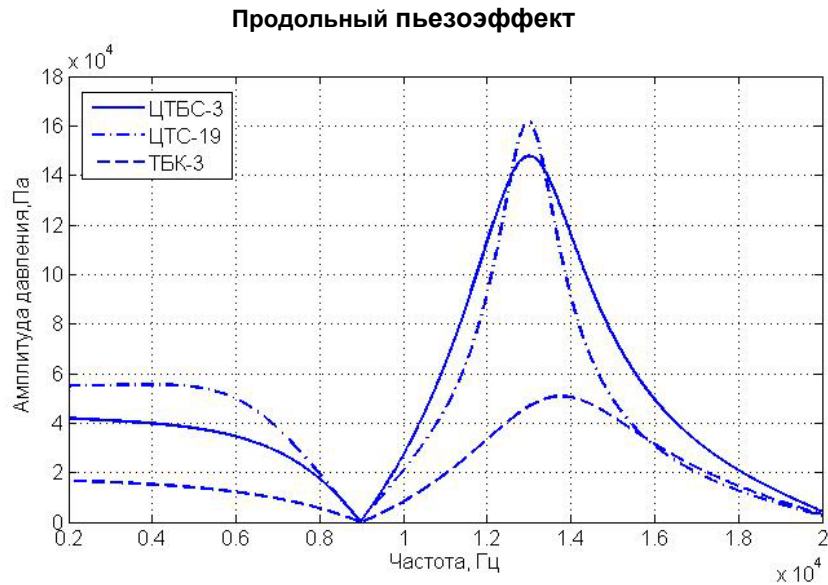
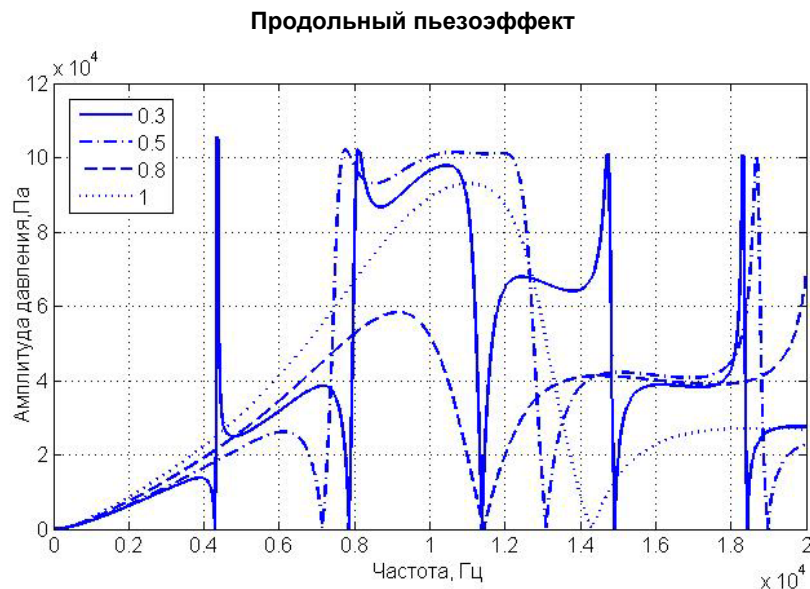


Рис. 6. Графики частотной зависимости амплитуды давления на внутренней поверхности излучателя компенсированной конструкции при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м, $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$ и разных составах пьезокерамики



а)

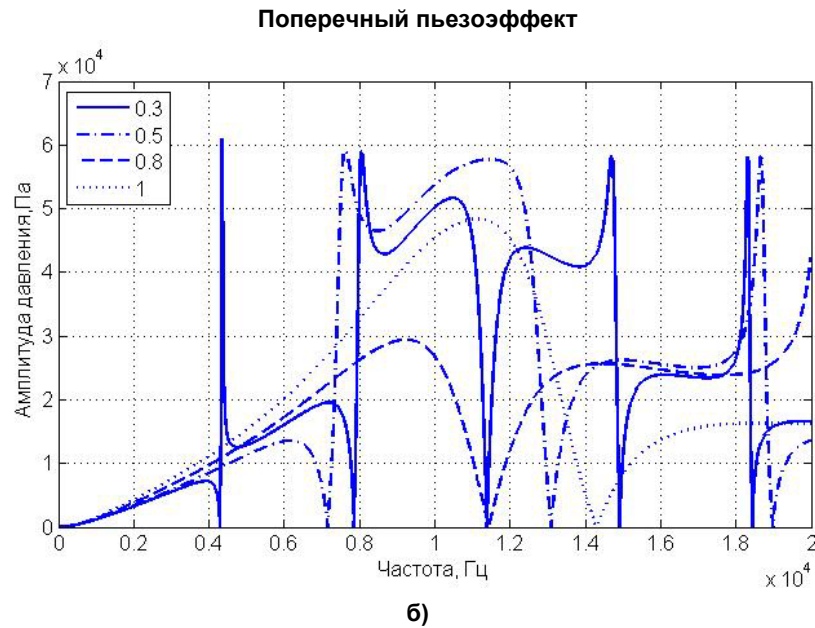
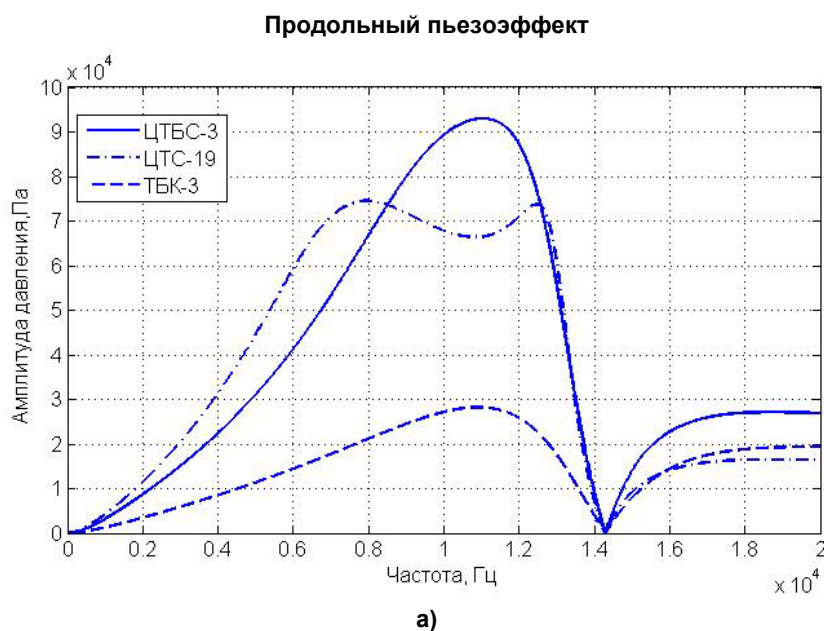


Рис. 7. Графики зависимости амплитуды звукового давления излучателя компенсированной конструкции на его внешней поверхности от частоты при заполнении его жидкостями с разным относительным удельным волновым сопротивлением $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$ при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м и составе пьезокерамики ЦТБС-3

Таким же существенным образом изменяется звуковое поле и во внешней области (рис. 7÷8), причем характер частотного поведения поля в значительной мере определяется величиной соотношения удельных волновых сопротивлений сред внутри и вне излучателя (рис. 7). Увеличение волнового сопротивления среды

внутри излучателя обуславливает появление сложной частотной зависимости изменения амплитуды его внешнего звукового поля (рис. 7) – от расширения диапазонов частот резонансного излучения, в том числе и в область более низких частот, и до превращения излучателя в рассматриваемом диапазоне частот в многорезонансный.



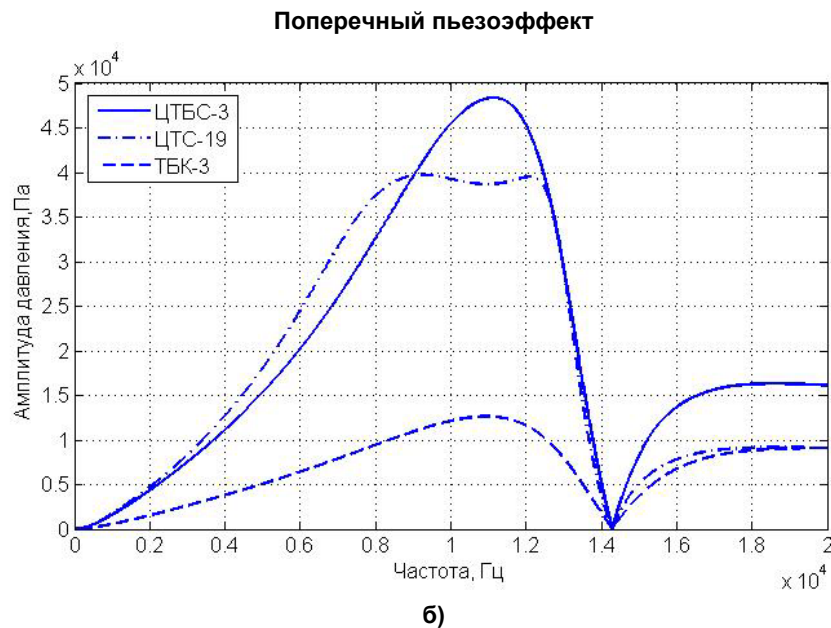
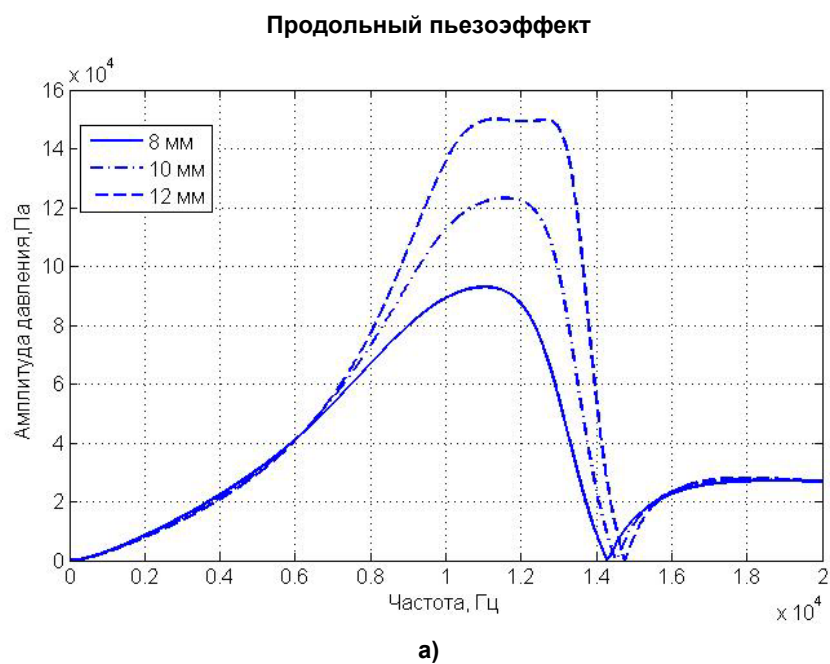


Рис. 8. Графики зависимости амплитуды звукового давления излучателя компенсированной конструкции на его внешней поверхности от частоты для разных составов пьезокерамики при $r_0 = 0,068$ м, $h = 0,008$ м, $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$

Изменение состава пьезокерамики компенсированного излучателя (рис.8) сопровождается

изменением частотных характеристик звукового поля



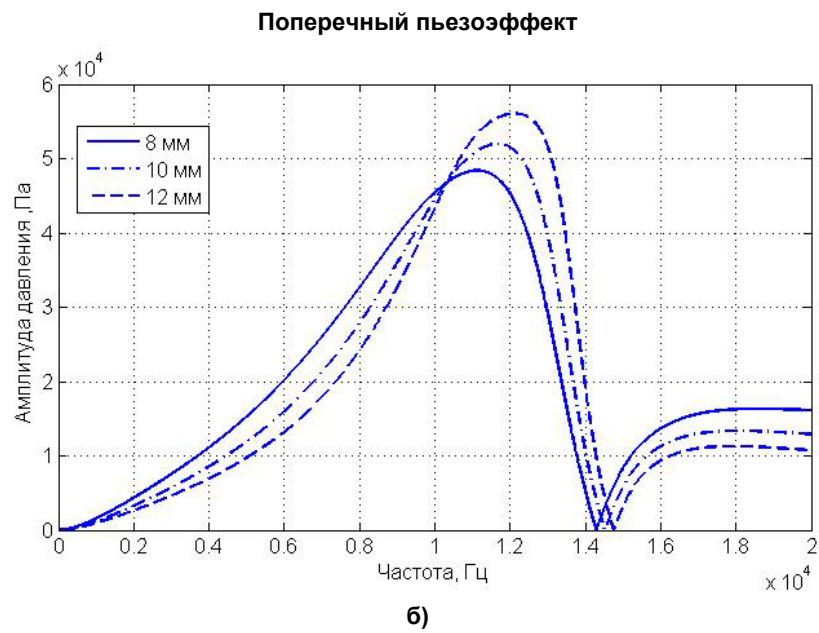
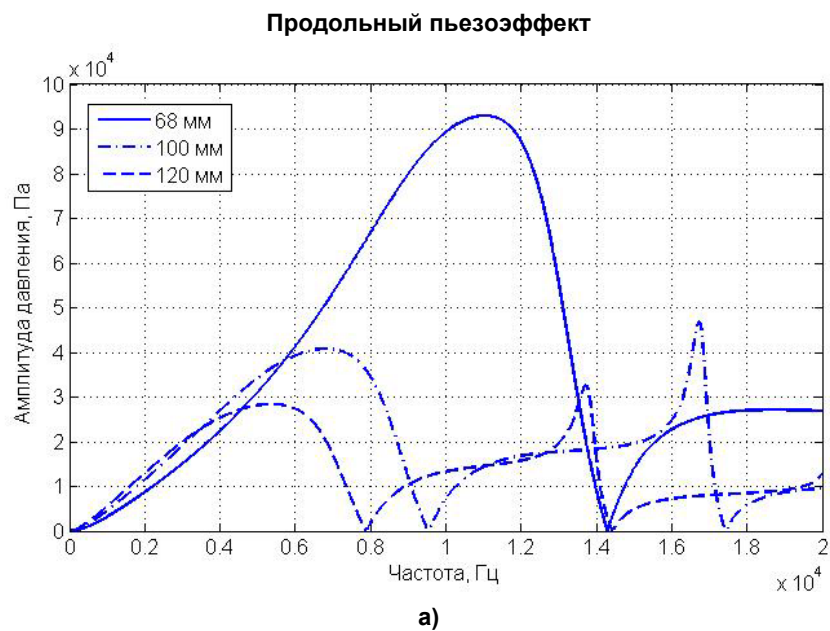


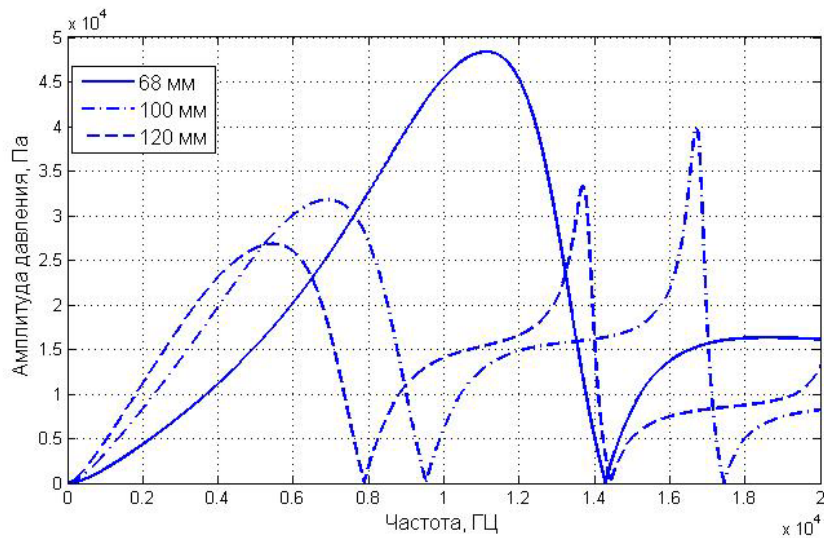
Рис. 9. Графики зависимости амплитуды звукового давления излучателя компенсированной конструкции на его внешней поверхности от частоты для разных толщин пьезокерамической оболочки состава ЦТБС-3 при $g_0 = 0,068$ м, $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$

Изменение толщины пьезокерамической оболочки (рис.9) сопровождается возрастанием эффективности излучателя компенсированной конструкции, причем значительно более существенным образом при использовании продольного пьезоэффекта (рис.9а).

Изменение толщины пьезокерамической оболочки (рис.9) сопровождается возрастанием эффективности излучателя компенсированной конструкции, причем значительно более существенным образом при использовании продольного пьезоэффекта (рис.9а).



Поперечный пьезоэффект



б)

Рис. 10. Графики зависимости амплитуды звукового давления излучателя компенсированной конструкции на его внешней поверхности от частоты для разных радиусов пьезокерамической оболочки состава ЦТБС-3 при $h=0,008\text{м}$, $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 = 1$

Изменение радиуса пьезокерамической оболочки компенсированного излучателя (рис.10) при неизменных условиях его электрического возбуждения и количества призм при использовании продольного пьезоэффекта сопровождается снижением эффективности излучателя. При этом излучатели с продольным пьезоэффектом характеризуются большим падением эффективности (рис.10а). Физические причины описанного выше поведения звуковых полей описаны в работе [7].

В целом сопоставляя полученные результаты с данными работы [7], можно утверждать, что в качественном отношении для одиночного цилиндрического пьезокерамического излучателя компенсированной конструкции результаты расчетов звуковых полей, выполненные методами связанных полей и эквивалентных электромеханических схем, практически совпадают, если механические добротности преобразователей $Q_m \geq 100$.

Выводы

Проведены два сопоставительных анализа акустических свойств цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкций, при построении которых используются продольный и поперечный пьезоэффекты. При первом анализе сравниваются между собой акустические свойства цилиндри-

ческих излучателей, отличающихся между собой как по типу конструктивного исполнения – силовая и компенсированная конструкции, так и по типу использованного пьезоэффекта – продольный и поперечный. При этом расчеты звуковых полей выполнялись с использованием метода эквивалентных электромеханических схем.

При втором сопоставительном анализе производится сравнение акустических свойств указанных излучателей при условии, что их расчеты производились для одних и тех же исходных данных, но разными методами – методом связанных полей и методом эквивалентных электромеханических схем.

Результаты анализа свидетельствуют о том, что при механической добротности одиночных цилиндрических пьезокерамических излучателей, превышающей величину $Q_m = 80 \div 100$, оба метода позволяют получить практически одинаковые данные.

В тоже время можно утверждать, что при выполнении проектных работ по созданию одиночных цилиндрических пьезокерамических преобразователей предпочтение следует отдавать методу эквивалентных схем, поскольку при его использовании величина Q_m , обычно вытекающая из требований проектного задания, закладывается в расчеты непосредственно и ей можно придавать любое нужное значение. Метод связанных полей таких возможностей не

имеет, поскольку присутствующая в нем опосредствовано величина Q_m жестко связана только с параметрами пьезокерамики, использованной при построении преобразователей.

Список использованных источников

1. Борисейко В.А., Мартыненко В.С., Улитко А.Ф. К теории колебаний пьезокерамических оболочек//Математическая физика. – 1977, 21. – с.71-76.
2. Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях// Физическая акустика. – М.:Мир, 1966. – т.1, ч.А. – с.204-326.
3. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Електроакустичні п'єзokerамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). – Кіровоград: «Умекс-ЛТД», 2006. – 448с.
4. Дідковський В.С., Порошин С.М., Лейко О.Г., Лейко А.О., Дрозденко О.І. Конструювання електроакустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій. – Харків: 2013. – 390с.
5. Коржик А.В., Петрищев О.Н., Филиппова Н.Ю. Осесимметричные колебания цилиндрической пьезокерамической оболочки конечной высоты// Электроника и связь. – 2011. – №6. – с.58-64.
6. Лейко А.Г., Нижник А.И., Старовойт Я.И. Звуковые поля пьезокерамических излучателей с различным пьезоэффектом// Electronics and communications. – 2013. – №5. – с.50-55.
7. Лейко А.Г., Нижник А.И., Старовойт Я.И. Акустические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектом// Electronics and communications. – 2013. – №6. – с. 62-73.

Поступила в редакцию 30 декабря 2013 г.

УДК 534.3

О.Г. Лейко, д-р. тех. наук, **О.І. Нижник**, **Я.І. Старовойт**

Державне підприємство «Київський науково-дослідний інститут гідропріладів»,
вул. Сурикова, 3, м. Київ, 03035, Україна.

Щодо питання про випромінювання звуку циліндричними п'єзokerамічними перетворювачами різної конструкції

Методом еквівалентних електромеханічних схем отримано рішення «наскрізної» задачі про випромінювання звуку циліндричними п'єзokerамічними перетворювачами силової і компенсованої конструкцій, при побудові яких використаний як поздовжній, так і поперечний п'єзоэффекти. Використовуючи отримані співвідношення, були проведені розрахунки чисельних характеристик звукових полів таких перетворювачів і на їх основі проведений порівняльний аналіз акустичних властивостей перетворювачів силової і компенсованої конструкцій в широкому діапазоні частот в залежності від типу використовуваного п'єзоэффекту, величини механічної добротності, геометричних розмірів перетворювачів, а також характеристик середовищ, що заповнюють внутрішній об'єм перетворювачів.

Також проведений порівняльний аналіз акустичних властивостей циліндричних п'єзokerамічних перетворювачів конструкцій, що розглядалися, звукові поля яких розраховані методом зв'язаних полів і методом еквівалентних схем. Показано, що результати розрахунків майже співпадають тільки в тому випадку, коли величина механічної добротності перетворювача перевищує значення $Q_m=80\div 100$. Бібл. 7, рис 10, табл. 1.

Ключові слова: звукові поля, циліндричний п'єзokerамічний перетворювач, поздовжній і поперечний п'єзоэффект, силова і компенсована конструкція.

UDC 534.3

A.G. Leiko, Dr.Sc., A.I. Nyzhnyk, Y.I. Starovoit

State Enterprise Kiyv Scientific Research Institute of Hydrodevices,
st. Surikova, 3, Kiev, 03035, Ukraine.

To the question about radiation of acoustic fields by the cylindrical piezoceramic transducers of different constructions

Using the method of equivalent electromechanical circuits were obtained solution of "pervasive" problem of sound radiation by cylindrical piezoceramic transducers of non-compensated and compensated power structures, in the construction of which is used longitudinal and transverse piezoelectric effect. Using these correlation were calculated numerical characteristics of sound fields of such transducers and made comparative analysis of acoustic properties of non-compensated and compensated designs in a wide frequency range depending on the type of piezoelectric, mechanical quality factor values, geometrical sizes of transducers and characteristics of the medium filling the internal volume of transducers.

Also, the comparative analysis of the acoustic properties of cylindrical piezoceramic transducer of such design calculated by related fields and by equivalent circuits. It is shown that the results of the calculation is almost equivalent only when the magnitude of the mechanical quality factor is higher than $Q_M=80\div 100$. References 7, figures 10, table 1.

Keywords: sound fields, cylindrical piezoelectric transducer, the longitudinal and transverse piezoelectric effect, power and compensated design.

References

1. *Boriseiko V.A., Martynenko V.S., Ulitko A.F.*(1977), "To the theory about vibrations of piezoceramic shells". Mathematical physics. Vol.21, pp. 71-76. (Rus)
2. *Berlinkur D., Kerran D., Jaffe G.*(1966), "Piezoelectric and piezomagnetic materials and their application in the transducers". Physical acoustics. Moscow, Mir. Vol.21, no.A, pp. 204-326.(Rus)
3. *Didkovskij V.S., Lejko O.G., Savin V.G.* (2006), "Electroacoustic piezoceramic transducers (calculation, design, construction). Education manual". Kirovograd, "Imex-LTD". P.448 (Ukr)
4. *Didkovskij V. S., Poroshin S. M., Lejko O. G., Lejko A. O., Drozdenko O.I.* (2013) "Construction of electroacoustic instruments and systems for multimedia acoustic technology". Kharkov. P. 390. (Ukr)
5. *Korzhik A.V., Petrishchev O.N., Fillipova N.U.*(2011), "Axisymmetric oscillations of a cylindrical piezoceramic shell of the finite height". Electronics and communications. Vol.6, pp. 58-64. (Rus)
6. *Leiko A.G., Nyzhnyk A.I., Starovoit Y.I.* (2013), "Sound fields of piezoceramic emitters with different piezoelectric effect". Electronics and communications. Vol.5, pp. 50-55.(Rus)
7. *Leiko A.G., Nyzhnyk A.I., Starovoit Y.I.* (2013), "Acoustic properties of the cylindrical piezoceramic emitters of the compensated and non-compensated design with longitudinal and transverse piezoelectric effect." Electronics and communications. Vol.6, pp. 62-73.(Rus)