

УДК 623.983

А.В. ДЕРЕПА, доктор технических наук,
старший научный сотрудник

И.В. АВЕРИЧЕВ, начальник научно-исследовательского отдела

(Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники Вооруженных Сил Украины, г. Киев)

О.Г. ЛЕЙКО, доктор технических наук,
профессор

Д.М. КИЗИМА, магистрант

(Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Сикорского», г. Киев)

А.О. СВЯТНЕНКО, начальник научно-исследовательского отдела

(Государственное предприятие «Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов», г. Киев)

Свойства цилиндрических гидроакустических преобразователей с внутренними податливыми экранами

Приведены аналитические соотношения и на их основе численными методами исследованы свойства механических полей цилиндрических пьезокерамических преобразователей с внутренними акустически мягкими экранами. Установлены в широком диапазоне частот закономерности поведения частотных и угловых зависимостей амплитуд и фаз колебательной скорости от размеров экрана и степени удаления его от центра пьезокерамической оболочки преобразователя.

Ключевые слова: цилиндрический пьезокерамический преобразователь, внутренний экран, излучение звука.

Приведені аналітичні співвідношення та на їх основі чисельними методами досліджені властивості механічних полів циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів з внутрішніми акустично м'якими екранами. Встановлені в широкому діапазоні частот закономірності поведінки частотних і кутових залежностей амплітуд і фаз коливної швидкості від розмірів екрану та віддаленості його від центру п'єзокерамічної оболонки перетворювача.

Ключові слова: циліндричний п'єзокерамічний перетворювач, внутрішній екран, випромінювання звуку.

Создание гидроакустических преобразователей представляет собой длительный технологический процесс, обусловленный сложностью доведения их параметров, в частности, резонансной частоты излучения, до заданных технических требований. Одним из кардинальных путей решения этой проблемы является переход к построению преобразователей с управляемыми параметрами. При этом управление этими параметрами может осуществляться как пассивными, так и активными методами. Применительно к цилиндрическим преобразователям идея пассивного управления их параметрами реализуется путем введения в их состав акустических экранов. Эти экраны могут располагаться как с внешней стороны пьезокерамической оболочки преобразователя, так и во внутренней полости ее, заполненной для этой цели упругой средой. В первом случае расчетное обеспечение проектирования таких преобразователей наиболее полно было разработано в работе [1]. Отдельные вопросы управления параметрами цилиндрических пьезокерамических преобразователей с помощью внешних экранов были предметом изучения в работах [2-4]. Серьезным недостатком рассматриваемого подхода является увеличение габаритных размеров преобразователя за счет наличия акустического экрана.

Этого недостатка лишены цилиндрические преобразователи с внутренними экранами. При их технической реализации возможны несколько подходов, связанных с выбором формы акустических экранов и способом их размещения внутри пьезокерамических оболочек [3]. Форма экранов может быть выполнена либо симметричной, в виде кругового цилиндра [5, 6], либо ассиметричной в виде сектора кругового цилиндра [3, 7]. По размещению экрана внутри пьезокерамической оболочки могут быть выбраны варианты совмещения [3, 5, 6] либо разнесения [3, 7] продольных осей оболочки и экрана. Из физических соображений ясно, что при совпадении продольных осей цилиндрической пьезокерамической оболочки и экрана, экранированный преобразователь имеет радиальную симметрию относительно своей продольной оси. В этом случае в нем может генерироваться при радиально симметричном электрическом возбуждении оболочки только нулевая мода ее колебаний. При этом изменяются частотные свойства преобразователя, но остается всестороннее излучение звука, как во внутреннюю, так и во внешнюю среды. Детальное изучение свойств таких преобразователей было выполнено в работах [5, 6, 8, 9]. В случаях выполнения экрана в виде сектора кругового цилиндра и разнесения в пространстве продольных осей пьезокерамической оболочки и экрана при любой его форме гидроакустический преобразователь теряет указанную выше радиальную симметрию колебаний оболочки. В преобразователе с нарушенной симметрией механической колебательной системы, при сохранении радиальной симметрии его электрического нагружения, генерируются последующие за нулевой моды колебаний [3, 10] с большой амплитудой. Естественным следствием их появления является изменение не только частотных, но и направленных свойств таких экранированных

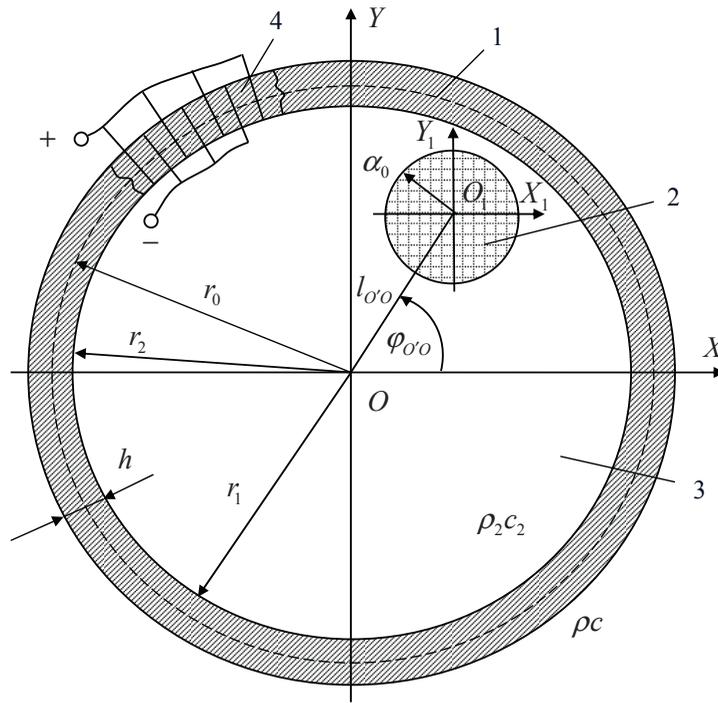


Рис. 1. Нормальное сечение цилиндрического преобразователя с внутренним экраном

цилиндрических преобразователей. Исследованию отдельных аспектов построения таких радиально несимметричных цилиндрических преобразователей были посвящены работы [1, 4, 7, 10, 11].

Целью данной работы является изучение изменений свойств механических полей цилиндрических пьезокерамических преобразователей с внутренними акустическими мягкими цилиндрическими экранами в зависимости от размеров экрана и условий его размещения.

Аналитические соотношения для расчета физических полей. Рассмотрим излучение звука цилиндрическим гидроакустическим преобразователем с несимметрично расположенным внутренним акустическим экраном (рис. 1).

Преобразователь состоит из цилиндрической пьезокерамической оболочки 1 средним радиусом r_0 толщиной h , цилиндрического акустического мягкого экрана 2 внешним радиусом α_0 и жидкости 3, заполняющей внутреннюю полость оболочки 1. Продольные оси оболочки и экрана разнесены на расстояние $l_{O'O}$. Пьезокерамическая оболочка 1 образована из M жестко склеенных между собой электрически параллельно включенных призм 4. На призмы подается гармоническое электрическое напряжение $\psi = \psi_0 e^{-i\omega t}$, где ω – циклическая частота, i – мнимая единица. Преобразователь расположен в среде с плотностью ρ и скоростью звука c , а его внутренняя полость заполнена средой с параметрами $\rho_2 c_2$.

Поставленная задача является частным случаем задачи об излучении звука плоской решеткой, образованной из цилиндрических пьезокерамических преобразователей с внутренними экранами [11]. Для этого случая расчетные формулы для определения физических полей преобразователя приобретают следующий вид.

Механическое поле рассчитывается согласно выражений:

$$u = \sum_n u_n e^{in\varphi}; \quad w = \sum_n w_n e^{in\varphi},$$

где u и w – окружная и радиальная составляющие вектора смещений точек срединной поверхности пьезокерамической оболочки преобразователя.

Для определения акустических полей вне и внутри преобразователя используются соответственно выражения:

$$\Phi_I(r, \varphi) = \sum_n A_n H_n^{(1)}(kr) e^{in\varphi};$$

$$\Phi_{II}(r, \varphi) = \sum_m \sum_n C_m J_{m-n}(k_2 l_{O'O}) e^{i(m-n)\varphi_{O'O}} e^{in\varphi} \left[J_n(k_2 r) - \frac{J_n(k_2 \alpha_0)}{N_n(k_2 \alpha_0)} N_n(k_2 r) \right].$$

Параметры электрического поля преобразователя рассчитываются по формулам:

$$\text{напряженность электрического поля: } E_\varphi = -\frac{\psi_0 M}{2\pi r_0};$$

электрический ток возбуждения:

$$J = -i\omega S_{31} \left\{ \epsilon_{33}^0 \frac{\psi_0 M^2}{2\pi r_0} + \frac{e_{33}}{r_0} \sum_{j=1}^M \left[\sum_n i n u_n e^{\frac{i2\pi j}{M}} + \sum_n w_n e^{\frac{i2\pi j}{M}} \right] \right\}.$$

Неизвестные коэффициенты u_n, w_n, A_n, C_n определяются в результате решения бесконечной системы линейных алгебраических уравнений:

$$w_n = \frac{1}{i c_2} \sum_m C_m J_{m-n}(k_2 l_{O'O}) e^{i(m-n)\varphi_{O'O}} \Delta'_{nm}(k_2 r_2);$$

$$R_g w_g + \frac{\alpha}{h} i\omega \left[\rho A_g H_g(kr_1) - \rho_2 \sum_m C_m J_m(k l_{O'O}) e^{i(m-n)\varphi_{O'O}} \Delta_{gm}(k_2 r_2) \right] = \frac{e_{33}}{C_{33}^E} \frac{\psi_0 M}{4\pi^2} Q_g;$$

$$n = -\infty, u, \infty; \quad \vartheta = -\infty, \varphi, \infty.$$

$$\text{Здесь } \Delta_{nm} = J_n(k_2 r_2) - \frac{J_m(k_2 \alpha_0)}{N_m(k_2 \alpha_0)} N_m(k_2 r_2);$$

$$Q_\vartheta = \int_0^{2\pi} e^{i\vartheta\varphi} d\varphi;$$

„штрих” означает производную функций.

Анализ результатов расчетов механических полей.

Используя приведенные аналитические соотношения, изучим свойства механических полей цилиндрических пьезокерамических преобразователей с внутренними акустически мягкими экранами в зависимости от размеров экрана и степени удаленности его от центра преобразователя.

При этом обратим внимание на ряд физических обстоятельств, существенно влияющих на формирование механических полей исследуемого преобразователя.

Первое из них связано с тем, что при заданном способе электрического возбуждения преобразователя его электрическое поле является радиально симметричным. В этом случае в механическом поле пьезокерамической оболочки преобразователя возбуждается только одна собственная форма колебаний – нулевая и она имеет один собственный резонанс.

Второе обстоятельство обусловлено тем, что несоединенное размещение во внутренней полости пьезокерамической оболочки цилиндрического акустического экрана нарушает радиальную симметрию преобразователя. В системе с нарушенной симметрией появляются следующие моды, амплитуды колебательных скоростей которых сопоставимы с амплитудой скорости нулевой моды [3, 10]. Это свидетельствует о том, что энергия, «закачиваемая» в преобразователь на нулевой моде, в его механическом поле перераспределяется между всеми формами колебаний преобразователя и одномодовый преобразователь превращается в многомодовый.

Третье обстоятельство сопряжено с наличием упругой среды во внутренней полости пьезокерамической оболочки и наличием зазора между оболочкой и экраном. В этом случае звуковая энергия, излучаемая внутренней поверхностью пьезокерамической оболочки в зазор начинает играть существенную роль [3] в формировании механического поля преобразователя. Поскольку в рассматриваемом случае величина зазора между оболочкой и экраном непрерывно изменяется, то и ее роль в формировании этого поля на разных участках зазора будет разной. На участках с относительно малыми волновыми размерами зазора влияние зазора мало. Наиболее существенные изменения зазора происходит на тех его участках, где волновая ширина зазора $\frac{2(r_0 - h - \alpha_0)}{\lambda}$, близка к величине 0,25.

При этом на этих участках зазора возникает стоячая волна, которая является результатом взаимодействия прямой волны, излученной пьезокерамической оболочкой во внутреннюю полость, и волны, отраженной от экрана. Следствием этого является резкое повышение звукового давления на этом участке. Такое поведение соответствует резонансным явлениям, имеющим место

в своеобразном механическом контуре, образованном механическими параметрами зазора и присоединенной массы среды на внешней поверхности преобразователя [3]. Описанные явления должны найти отображения на частотных характеристиках амплитуд и фаз колебательной скорости основной возбуждающей моды – нулевой моды колебаний. Для подтверждения правильности этих качественных рассуждений выполним численные эксперименты и проведем анализ их результатов.

Вычисления параметров полей производились для следующих параметров преобразователей: $r_0 = 0,068 \text{ м}$; $h_0 = 0,008 \text{ м}$; $M = 48$; $\alpha_0 = 0,2 r_0, 0,5 r_0, 0,9 r_0$; $\varphi_{00} = 30^\circ$; $\psi_0 = 200 \text{ В}$; $\rho c = \rho_2 c_2 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$; $r_0 - \alpha_0 - l_{00} = 0,003 \text{ м}$.

Расчеты частотных зависимостей амплитуд и фаз колебательной скорости выполнялись в точке с координатами (0,072 м; 30°). При этом минимальное расстояние между внешней поверхностью экрана и внутренней поверхностью пьезокерамической оболочки сохранялось постоянным.

Анализ кривых рис. 2 позволяет установить следующее. Во-первых, амплитуды колебательных скоростей некоторых из вновь генерируемых мод сравнимы с амплитудой скорости нулевой моды.

Поскольку при радиальной симметрии электрического нагружения преобразователя электрическая энергия в цилиндрическом пьезокерамическом преобразователе преобразуется в механическую только на нулевой моде его колебаний, это значит, что идет ее эффективное перераспределение между последующими модами колебаний преобразователя. Во-вторых, количество мод, эффективно «отсасывающих» энергию из нулевой моды, и распределение амплитуд их колебательных скоростей по частотам зависят от размеров экрана и степени удаленности его от центра пьезокерамической оболочки. При малых размерах экрана $\alpha_0 = 0,2 r_0$ и больших расстояний l_{00} (рис. 2 а) количество вновь генерируемых мод наибольшее, амплитуды их колебательных скоростей сравнимы или существенно превышают амплитуду скорости нулевой моды. При этом большинство механических резонансов, генерируемых этими модами, сосредотачивается в низкочастотной области, а значения их частот в (2-3) раза меньше основной резонансной частоты пьезокерамической оболочки преобразователя. Нулевая мода сохраняет неизменной свою резонансную частоту, а на ее зависимости. На этой зависимости в области низких частот появляется новый дополнительный резонансный выброс. Этот выброс возникает в области частот, для которых размер зазора близок к 0,25 соответствующей им длины волны в среде, заполняющей внутреннюю полость преобразователя.

Очевидно, он обусловлен взаимодействием прямых волн, излученных в области этих частот внутренней поверхностью пьезокерамической оболочки преобразователя, и волн, отраженных на этих частотах внутренним экраном.

Этот вывод подтверждается тем, что при $\alpha_0 = 0,3 r_0$ дополнительный резонанс нулевой моды перемещается в область частот, близких к 6,5 кГц, а при дальнейшем увеличении $\alpha_0 = 0,5 r_0$ – в область частот 11-12 кГц.

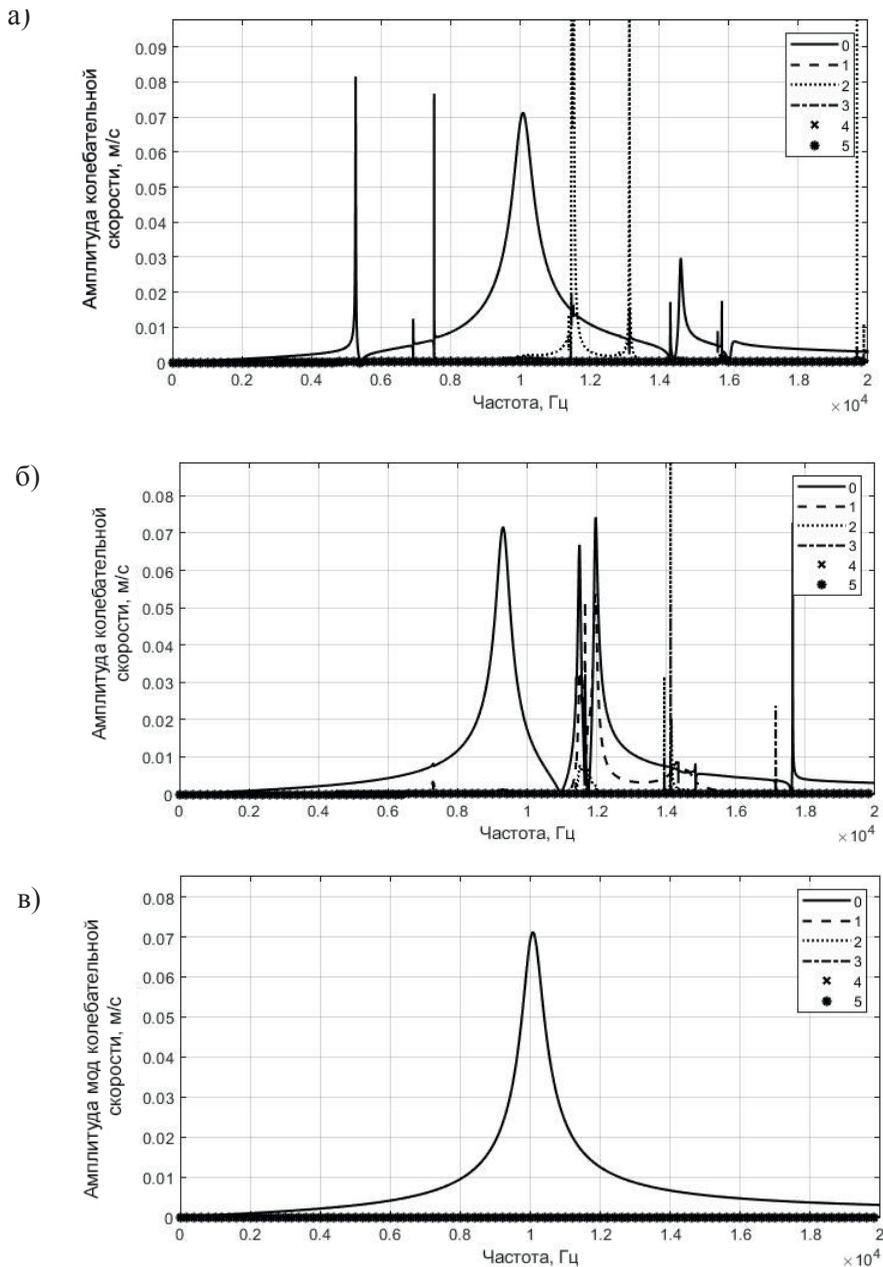


Рис. 2. Частотные зависимости амплитуд колебательных скоростей преобразователя для размеров экрана $\alpha_0 = 0,2 r_0$ (а); $\alpha_0 = 0,5 r_0$ (б); $\alpha_0 = 0,9 r_0$ (в)

Увеличение размеров экрана до величины $\alpha_0 = 0,5 r_0$ существенно (рис. 2 б) изменяет установленные выше закономерности. Моды, формирующие механические резонансы в низкочастотной области, исчезают. Дополнительные механические резонансы сосредотачиваются в резонансной (8-14 кГц) и высокочастотной (14-20 кГц) областях, а амплитуды их колебательных скоростей сравниваются с амплитудой скорости нулевой моды. При этом частотная зависимость амплитуды колебательной скорости нулевой моды в резонансной области существенным образом изменяет свою форму. Ее собственная резонансная частота снижается. Это обусловлено тем, что при акустически мягком экране и

слабом проявлении упругих свойств жидкости в зазоре изменение объема жидкости в нем происходит за счет перемещения слоя жидкости практически как единого целого [3]. Следствием этого является массовый характер реакции жидкости в слое на движение пьезокерамической оболочки, что является причиной некоторого снижения ее собственной резонансной частоты. Это демонстрирует резонансная кривая на рис. 2 б. О физических причинах появления новых резонансных частот нулевой моды колебаний пьезокерамической оболочки говорилось выше. Кроме механических резонансов нулевой моды колебаний в резонансной и высокочастотной областях возникают механические резонансы,

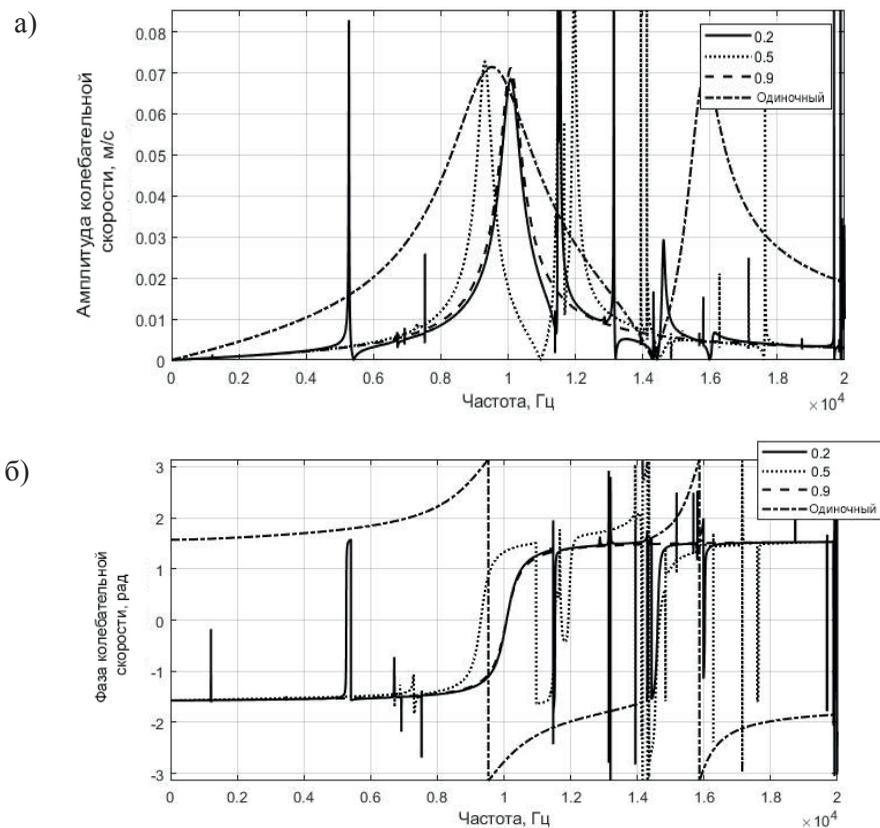


Рис. 3. Частотные зависимости амплитуд (а) и фаз (б) колебательных скоростей с экранами разных размеров $\alpha_0 = 0,2 r_0$; $\alpha_0 = 0,5 r_0$; $\alpha_0 = 0,9 r_0$ и без экрана

обусловленные вновь генерируемыми модами колебаний, следующими за нулевой модой.

Дальнейшее увеличение размеров акустического экрана до $\alpha_0 = 0,9 r_0$ и выше сопровождается (рис. 2 в) потерей как дополнительных резонансов нулевой моды пьезокерамической оболочки, так и генерации новых более высоких мод колебаний. При этом влияние зазора падает, а упругие свойства жидкости в нем начинают проявляться, что сопровождается небольшим повышением собственной резонансной частоты пьезокерамической оболочки и преобразователя в целом.

Приведенные выше результаты по частотным зависимостям колебательных скоростей модовых составляющих механического поля естественным образом определяют и частотную зависимость полной колебательной скорости преобразователя.

Анализ графиков рис. 3 позволяет установить следующие закономерности. В отсутствие экрана частная зависимость колебательной скорости преобразователя представляет собой двухрезонансную кривую. Ее первый резонанс определяется собственным резонансом керамической оболочки, второй – резонансом объема жидкости во внутренней полости оболочки.

Введение в состав преобразователя акустически мягкого несимметрично расположенного цилиндрического экрана полностью изменяет описанные выше частные зависимости амплитуд и фаз преобразователя.

При этом принципиально важную роль приобретают размеры экрана и степень удаления его от центра преобразователя. При малых размерах экрана ($\alpha_0 = 0,2 r_0$) и максимально возможном удалении его от центра преобразователя спектр собственных частот преобразователя существенно обогащается и сильно расширяется как в область низких, так и высоких частот. О том, что все эти частоты относятся к резонансным, свидетельствует фазочастотная характеристика (рис. 3 б) преобразователя. Особенно интересным для практики является генерация механических резонансов преобразователя без изменения его размеров в низкочастотной области со значениями частот, в 2-8 раз меньше значения собственной резонансной частоты пьезокерамической оболочки. При этом амплитуды колебательных скоростей преобразователя на этих вновь генерируемых резонансах сравнимы, а в ряде случаев превышают амплитуду скорости колебаний на собственном резонансе оболочки, хотя области их резонансных частот значительно сужаются по сравнению с последней.

Увеличение размеров экрана ($\alpha_0 = 0,5 r_0$) и сопряженное с ним уменьшение степени нарушения радиальной симметрии преобразователя сопровождается вначале резким сокращением количества вновь генерируемых механических резонансов в низкочастотной области и увеличением их количества в резонансной и высокочастотной областях. При дальнейшем увеличении

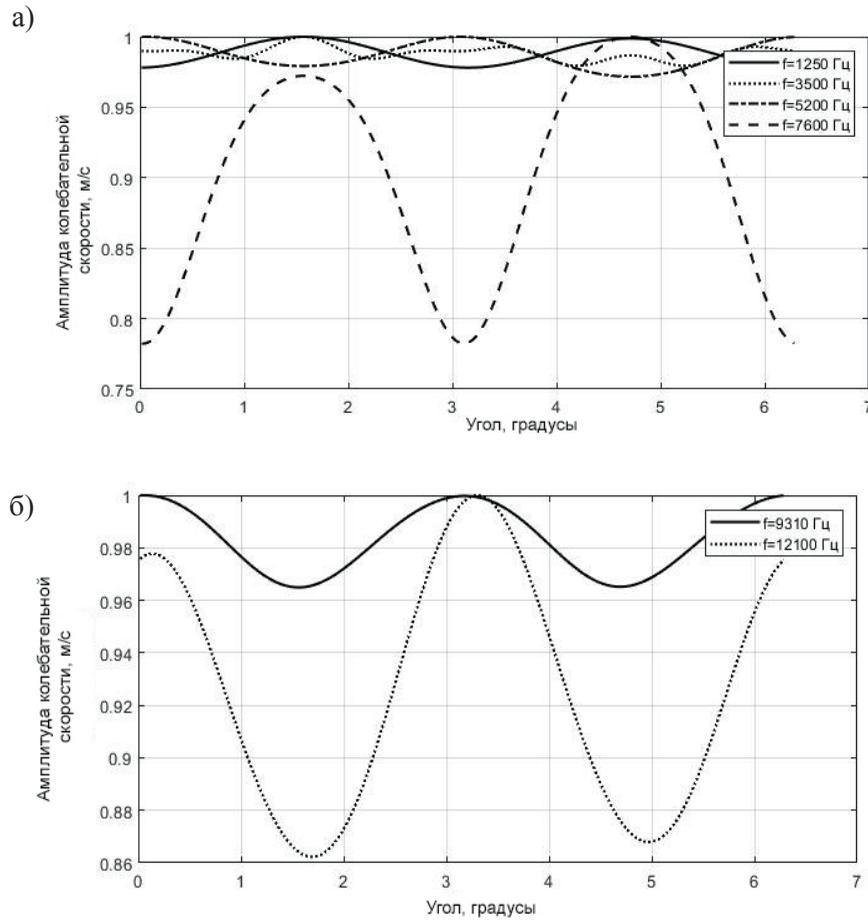


Рис. 3. Угловые распределения амплитуд колебательной скорости преобразователя с внутренним экраном разных размеров с экранами разных размеров $\alpha_0 = 0,2 r_0$ (а); $\alpha_0 = 0,5 r_0$ (б) на разных частотах

размеров экрана ($\alpha_0 = 0,9 r_0$) преобразователь с внутренним экраном теряет способность генерирования дополнительных механических резонансов, а его частотные характеристики приближаются к частотным характеристикам пьезокерамической оболочки преобразователя в вакууме.

Сопоставление между собой графиков рис. 2 и 3 позволяет сделать вывод, что резонансы полной колебательной скорости преобразователя с экраном образованы механическими резонансами как нулевой моды колебаний его пьезокерамической оболочки, так и вновь генерируемых мод. При этом эффективность преобразователя с экраном в резонансной области 8-12 кГц практически не зависит от размеров экрана.

Определим теперь особенности углового распределения колебательной скорости на поверхности преобразователя с внутренним экраном. Прежде всего заметим, что при радиальной симметрии электрического возбуждения и схемы построения преобразователя с экраном распределение амплитуд и фаз его колебательной скорости по поверхности преобразователя является однородным, поскольку в нем возбуждается только нулевая мода колебаний. Нарушение симметрии построения преобразователя, приводящее к генерации последующих

за нулевой моды колебаний и появление на отдельных участках внутреннего объема преобразователя стоячих волн, создает физические причины возникновения неоднородности углового распределения колебательных скоростей. При этом в разных частотных диапазонах эта неоднородность будет разной, поскольку она зависит от степени потери радиальной симметрии схемой построения преобразователя. Последняя определяется размерами внутреннего экрана и его удалением от центра симметрии пьезокерамической оболочки. Анализ кривых рис. 4 показывает, что наибольшей угловой неоднородностью распределения колебательной скорости характеризуются преобразователи с малыми экранами и большим их удалением от центра преобразователя (рис. 4 а). Причем эта неоднородность сохраняется во всем исследуемом частотном диапазоне. По мере увеличения размеров экрана и уменьшения расстояния между продольными осями экрана и оболочки (рис. 4 б), неоднородность углового распределения колебательной скорости в низкочастотной области практически исчезает, перемещаясь в резонансный и высокочастотный диапазоны.

При больших размерах экрана ($\alpha_0 = 0,9 r_0$) распределение колебательной скорости по поверхности

преобразователя с экраном становится практически однородным во всем исследуемом частном диапазоне.

Выводы.

Установлено, что несимметричное размещение акустически мягкого экрана во внутренней полости гидроакустического цилиндрического пьезокерамического преобразователя с целью уменьшения его габаритных размеров и учета связанности физических полей преобразователя при излучении звука, является причиной возникновения ряда физических эффектов. К ним относятся генерация последующих за нулевой мод колебаний и возникновение на отдельных участках внутреннего объема преобразователя с экраном стоячих волн. Выполнен большой объем численных экспериментов и произведен анализ количественной оценки влияния этих эффектов на свойства механических полей исследуемых преобразователей. Установлено, что размер экрана и степень удаления его от центра преобразователя по-разному влияют на частотные и угловые характеристики колебательной скорости преобразователя в различных частотных диапазонах. При малых волновых размерах экрана и больших удалениях экрана от центра преобразователя спектр его собственных резонансных частот существенно расширяется и, что особенно интересно, в основном в сторону низких частот, более чем в 3 раза ниже собственной резонансной частоты пьезокерамической оболочки преобразователя. Увеличение волновых размеров экрана сопровождается сначала исчезновением собственных дополнительных механических резонансов в низкочастотной области и перемещением их в резонансную и высокочастотную области, а при размерах, близких к внутреннему размеру пьезокерамической оболочки - полной потерей многомодовости преобразователя. Установленные эффекты свидетельствуют о возможностях управления параметрами гидроакустических цилиндрических пьезокерамических преобразователей при их создании с помощью выбора внутренних экранов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусак З. Т. Излучение гидроакустических сигналов цилиндрическими пьезокерамическими преобразователями с экранами: дис. канд. техн. наук : 05.09.08 / З. Т. Гусак. – К., 2017. – 270 с.

2. Лейко А. Г. Подводные акустическая аппаратура и устройства. Т.1. Подводные акустические антенны / А. Г. Лейко, Ю. Е. Шамарин, В. П. Ткаченко. – К. : Аванпостприм, 2000. – 320 с.
3. Гринченко В. Т. Волновые задачи акустики: монография / В. Т. Гринченко, И. В. Вовк, В. Т. Мацыпура. – К. : Интерсервис, 2013. – 572 с.
4. Гринченко В. Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках / В. Т. Гринченко, И. В. Вовк. – К. : Наукова думка, 1986. – 240 с.
5. Меленко Ю.Я. Об одном подходе к построению круговых цилиндрических пьезокерамических преобразователей // Электроника и связь. 2012 – №2 – С.36-40.
6. Меленко Ю.Я. Об одном из путей управления резонансной частотой круговых цилиндрических преобразователей // Электроника и связь. 2013 – №2 – С.63-68.
7. Вовк И. В. Излучение звука заполненной жидкостью пьезокерамической оболочкой с несимметричной внутренней вставкой / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко // Акустический журнал. – 1994 – Т.40 – №2 – С. 220-224.
8. Меленко Ю.Я. Свойства цилиндрического пьезокерамического излучателя с упругой цилиндрической оболочкой во внутренней полости // Электроника и связь. 2013 – №1 – С.59-64.
9. Меленко Ю.Я. Акустические свойства цилиндрического пьезокерамического излучателя разгруженной конструкции // Электроника и связь. 2014 – №3 – С.101-105.
10. Гусак З. Т. О частотных характеристиках электрических полей цилиндрической пьезокерамической антенны с экраном в виде незамкнутого кольцевого слоя / З. Т. Гусак, А. Г. Лейко // Журнал нанотехнологической физики. – 2016. – Т.8. №1, 01029 – с. 1-6.
11. Лейко А. Г. Физические поля направленных гидроакустических антенн на основе цилиндрических излучателей с внутренними экранами / А. Г. Лейко, А. О. Святненко // Электроника и связь, 2017 – №6 – С. 62-73.

Стаття надійшла до редакції 19.10.2018 р.

Рецензент О. В. Коржик, д-р техн. наук, проф.
(Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Сікорського»)