

СВОЙСТВА МЕХАНИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЭКРАНИРОВАННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ КОМПЕНСИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ЭКРАНА

З. Т. ГУСАК

*Государственное предприятие
«Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов»*

Рассмотрен гидроакустический излучатель, состоящий из цилиндрического пьезокерамического излучателя с окружной поляризацией, помещенного в акустически мягкий экран. При этом считается, что тип конструктивного исполнения излучателя - компенсированный. Методами связанных полей и частичных областей решена задача и получены аналитические выражения, описывающие физические поля указанного излучателя. Выполнен численный анализ свойств механических полей таких излучателей. Сопоставительный анализ частотных свойств излучателей позволил выявить ряд тонких эффектов в формировании механических полей этих излучателей в зависимости от типа компенсированного исполнения конструкции и параметров их экранов.

ВВЕДЕНИЕ

Гидроакустические цилиндрические пьезокерамические преобразователи нашли широкое применение в подводной электроакустической аппаратуре [1, 2]. Обладая рядом достоинств, они имеют один существенный недостаток, который состоит в том, что для придания преобразователям свойства одностороннего излучения или приёма их конструкции должны быть снабжены акустическими экранами [3]. Естественно, что образуя единую колебательную систему в преобразователях с экранами, последние, наряду с другими конструктивными элементами и особенностями этих устройств, такими как тип исполнения конструкции (силовая или компенсированная), состав пьезокерамики и тип её поляризации, диаметр преобразователя и толщина его пьезокерамической оболочки, оказывают существенное влияние на формирование физических полей устройствами такого типа.

В связи с этим целью данного доклада является получение решения в общем виде задачи излучения цилиндрическим преобразователем с окружной поляризацией компенсированного типа, размещенного в акустически мягком экране, и исследование свойств механических полей указанных излучателей в зависимости от характеристик входящих в их состав экранов.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Определим физические поля антенны (рис. 1), источником звука в которой является круговой цилиндрический пьезокерамический излучатель 1 с окружной поляризацией компенсированной конструкции, размещенной в акустически мягком экране 2. При этом внутренняя полость пьезокерамической оболочки излучателя заполнена жидкостью с плотностью ρ_1 и скоростью звука c_1 . К электродам призм подводится гармонически изменяющееся во времени t электрическое напряжение $\psi = \psi_0 e^{-i\omega t}$ частотой ω . Акустический экран 2 представляет собой незамкнутый

кольцевой слой толщиной $r_3 - r_2$, высотой h_1 с углом раскрыва $2\varphi_0$, который выполнен из акустически мягкого материала. Антенна располагается в среде с плотностью ρ и скоростью звука c .

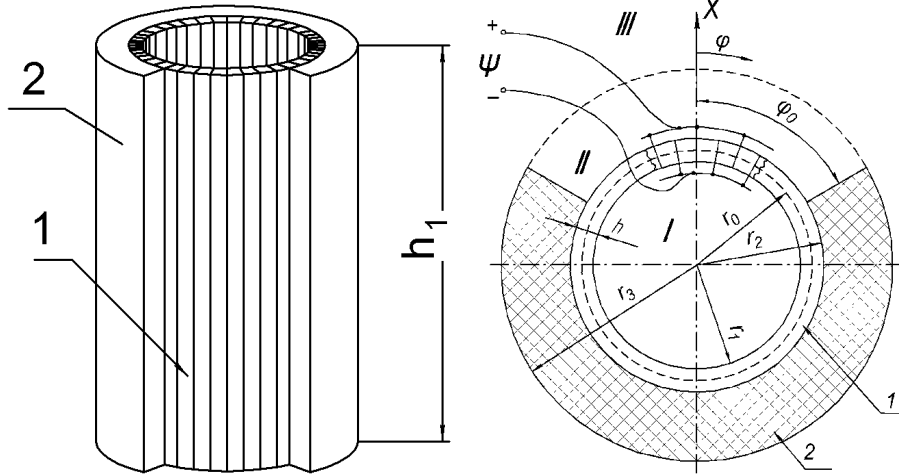


Рис. 1.

Рис. 2.

Считаем, что высота h_1 антенны является бесконечно большой, распределение колебательной скорости по высоте антенны однородно, а акустически мягкий материал идеален. В техническом плане такая идеализация физически обоснована [1].

С учетом принятых допущений поле излучения Φ рассматриваемого излучателя может быть определено через совместное решение:

- уравнения Гельмгольца, описывающего движение упругих сред (газа или жидкости) внутри и вне излучателя:

$$\Delta\Phi + k_f^2\Phi = 0; \quad (1)$$

- уравнений движения [4] тонких оболочек с окружной поляризацией в перемещениях:

$$(1 + \beta) \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{\partial \varphi} - \beta \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} = \alpha \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \quad (2)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial \varphi} + \beta \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) - w - \frac{e_{33}}{C_{33}^E} r_0 \frac{n}{2\pi} \frac{\psi_0}{r_0} + \frac{\alpha}{h} q_r = \alpha \gamma \frac{\partial^2 w}{\partial t^2};$$

- уравнений вынужденной электростатики для пьезокерамики:

$$\vec{E} = -\text{grad}\psi; \quad \text{div}\vec{D} = 0. \quad (3)$$

Граничные условия задачи формулируются в виде:

- на внутренних стенках экрана

$$\Phi = 0; \quad |\varphi| = \varphi_0; \quad r_2 \leq r \leq r_3; \quad (4)$$

- на тыльной стороне экране излучателя

$$\Phi = 0; \quad \varphi_0 \leq \varphi \leq \pi; \quad r = r_3; \quad (6)$$

- электрические условия сводятся к заданию напряженности электрического поля в материале оболочки

$$E_{\varphi} = -\frac{\psi_0 n}{2\pi r_0} \quad (7)$$

Эти условия дополняются условиями излучения на бесконечности.

Таким образом, с учетом принятых допущений задача определения физических полей цилиндрического излучателя с экраном сводится к решению плоской краевой задачи.

Решение задачи строилось с использованием разложений искомых величин радиальной и тангенциальной колебательных скоростей в ряды по собственным формам колебаний оболочки в вакууме. Решение уравнения Гельмгольца осуществлялось методом частичных областей. Потенциалы скорости были представлены в виде разложений по волновым цилиндрическим функциям в каждой из частичных областей (рис. 2).

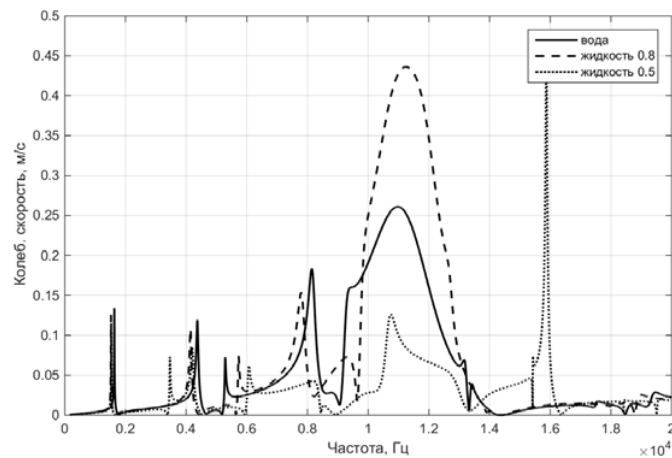
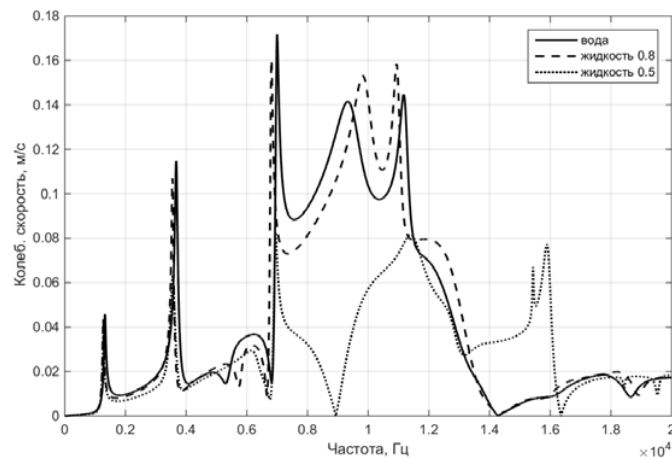
Так была получена бесконечная система линейных алгебраических уравнений вида:

$$\left\{ \begin{aligned} & w_n \left(R_n + \frac{\alpha \omega \rho_1 c_1}{h} \frac{J_n(k_1 r_1)}{J_n'(k_1 r_1)} \right) N_n - i \omega \frac{\alpha}{h} \rho_2 \sum_{q=0}^{\infty} \left[A_q J_{m_q}(k_2 r_2) + B_q N_{m_q}(k_2 r_2) \right] N_{nq} = \\ & = -\frac{e_{33}}{C_{33}^E} \frac{n \psi_0}{2\pi} b_n; \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \\ & \left[A_q J_{m_q}'(k_2 r_2) + B_q N_{m_q}'(k_2 r_2) \right] N_q - i c_2 \sum_{n=0}^{\infty} w_n N_{nq} = 0; \quad q = 0, 1, 2, 3, \dots \\ & F_s H_s^{(1)}(k_2 r_3) N_s - \sum_{q=0}^{\infty} \left[A_q J_{m_q}(k_2 r_3) + B_q N_{m_q}(k_2 r_3) \right] N_{sq} = 0; \quad s = 0, 1, 2, 3, \dots \\ & \left[A_q J_{m_q}'(k_2 r_3) + B_q N_{m_q}'(k_2 r_3) \right] N_q - \sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)'}(k_2 r_3) N_{sq} = 0; \quad q = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Решение данной системы позволяет получить количественные данные на основании выражений, описывающих механическое поле такого излучателя. В качестве исследуемых характеристик были приняты частотные зависимости амплитуд радиальных колебательных скоростей центральных незранированных поверхностей излучателей с экранами и спектральный состав их мод колебаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расчеты характеристик проводились с учетом следующих исходных данных (рис. 2): пьезокерамика – ЦТБС-3 с параметрами: плотность $\rho_K = 7210 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, пьезомодуль $d_{33} = 286 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}$, модуль упругости $C_{33}^E = 13,6 \times 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$; оболочка излучателя – $r_0 = 0,068 \text{ м}$, $h = 0,008 \text{ м}$, количество призм $N = 48$; акустический экран – $r_3 - r_2 = 0,05 \text{ м}$; $\varphi_0 = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$; рабочая среда – вода с $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $c = 1500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; жидкость, заполняющая внутреннюю полость преобразователя – вода, жидкости с волновым сопротивлением $\rho_1 c_1 = 0,8 \rho c$ и $\rho_1 c_1 = 0,5 \rho c$ от волнового сопротивления воды. Электрическое напряжение возбуждения принималось $\psi_0 = 200 \text{ В}$.


 Рис. 3. АЧХ колебательной скорости излучателя с углом раскрыва экрана $2\varphi_0 = 60^\circ$

 Рис. 4. АЧХ колебательной скорости излучателя с углом раскрыва экрана $2\varphi_0 = 300^\circ$

Анализ частотных зависимостей амплитуд радиальных колебательных скоростей экранированного излучателя при разных углах экранирования (рис. 3, 4) позволяет сделать следующие выводы. В низкочастотной области (ниже 7 – 8 кГц) колебательные скорости излучателей с разными углами экранирования достаточно быстро убывают с понижением частоты и характеризуются двумя существенными особенностями. Первая особенность состоит в том, что колебательные скорости начинают мало отличаться между собой для разных излучателей. Вторая особенность связана с появлением ряда новых узкополосных резонансных пиков, собственные частоты и амплитуды которых определяются углом раскрыва акустически мягкого экрана излучателей. При этом частоты резонансных пиков не слишком сильно отличаются между собой, но имеют тенденцию к снижению по мере увеличения угла раскрыва экрана.

Установленные спектральные свойства излучателей в низкочастотной области имеют довольно четкое физическое объяснение. В случае акустически мягких стенок, ограничивающих раскрыв акустического экрана излучателя, изменение объема жидкости между ними на относительно низких частотах происходит за счёт перемещения слоя жидкости практически как единого целого. Поэтому реакция слоя жидкости,

заполняющего пространство между стенками экрана, на движение пьезокерамической оболочки излучателя несет чисто массовый характер и, следовательно, новые собственные частоты экранированного излучателя снижаются. При этом оказывается, что описанный эффект может иметь довольно существенное значение при рассмотрении колебаний пьезокерамических оболочек в воде.

На высоких частотах (выше 13 кГц) уменьшение колебательных скоростей с ростом частоты также обусловлено увеличением собственного механического импеданса пьезокерамической оболочки излучателя, который в этой зоне имеет инерционный характер. Здесь также имеет место тенденция к выравниванию радиальных колебательных скоростей излучателей с разными углами раскрытия экранов. Однако это выравнивание не является таким быстрым, как в низкочастотной области. Это обусловлено тем, что действительная часть импеданса излучателя растет с частотой.

В резонансной области собственный механический импеданс пьезокерамической оболочки излучателей сравним с их импедансами излучения. Кроме того здесь существенную роль начинает играть реакция окружающей среды. В этой области механические характеристики излучателей с разными углами экранирования существенно отличаются между собой. В частности, амплитуды колебательных скоростей на одной и той же частоте могут отличаться в 2-4 раз.

Для выяснения физических причин описанного поведения экранированных излучателей обратимся к рис. 5, 6. Анализ приведенных кривых говорит о том, что нарушение радиальной симметрии круговой цилиндрической пьезокерамической оболочки путем введения в состав излучателя акустически мягкого экрана в виде незамкнутого кольцевого слоя конечной толщины даже при выбранном однородном способе электрического возбуждения оболочки приводит к появлению ряда последующих мод колебаний, амплитуды колебательных скоростей которых сравнимы с амплитудой скорости колебаний пульсирующей моды.

ВЫВОДЫ

Методом связанных полей в «сквозной» постановке решена задача излучения звука антенной, которая состоит из излучателя, помещенного в экран. Излучателем выступает цилиндрический пьезокерамический преобразователь с окружной поляризацией компенсированной конструкции. Решение сведено к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений. На основе полученных соотношений были рассчитаны параметры механических полей. Численный анализ свойств механических полей цилиндрических экранированных излучателей компенсированной конструкции позволил выявить ряд практически интересных эффектов.

Наиболее важными из них являются возможности существенного расширения и обогащения спектра собственных частот излучателей рассматриваемого типа. Основной причиной этих возможностей является нарушение радиальной симметрии излучения, обусловленное введением в состав излучателей акустически мягких экранов в виде незамкнутого кольцевого слоя конечной толщины. Благодаря ей в излучателе, кроме собственной формы колебаний пьезокерамической оболочки, появляются последующие энергетически эффективные моды, возникающие благодаря перераспределению энергии, «закачиваемой» в излучатель на пульсирующей моде, между последующими формами колебаний. Различия в частотных полосах всех резонансов определяются конфигурацией и размерами акустических экранов и величинами импедансов внешней и внутренней сред.

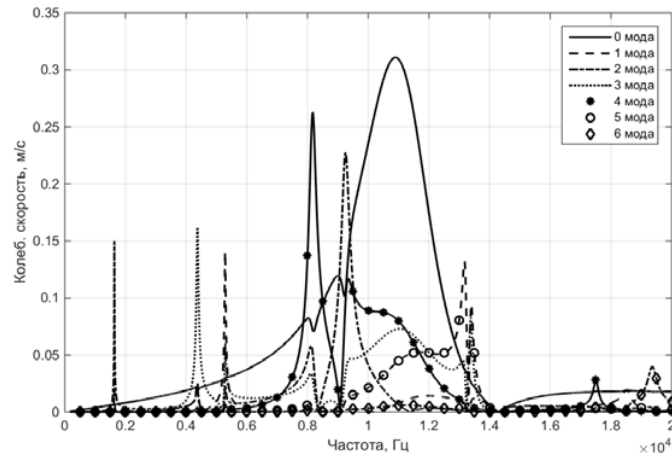


Рис. 5. АЧХ мод колебательной скорости излучателя с углом раскрыва экрана $2\varphi_0 = 60^\circ$

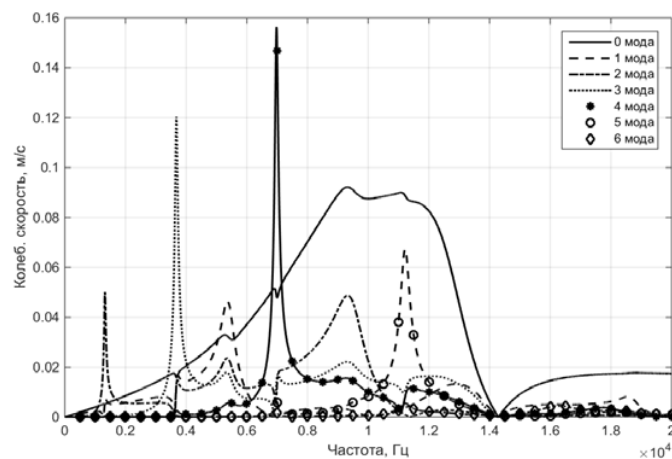


Рис. 6. АЧХ мод колебательной скорости излучателя с углом раскрыва экрана $2\varphi_0 = 300^\circ$

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лейко А. Г., Шамарин Ю. Е., Ткаченко В. П.* Подводные акустические антенны. – К.: Аванпостприм, 2000 – 320 с.
2. *Подводные электроакустические преобразователи (расчет и проектирование): справочник /под ред. В.В. Богородского.* – Л.: Судостроение, 1983 – 248 с.
3. *Гринченко В. Т., Вовк И. В., Мацыпура В. Т.* Волновые задачи акустики. К.: Интерсервис, 2013. – 571 с.
4. *Савин В. Г., Дидусенко Ю. А.* Уравнения движения тонкостенных цилиндрических пьезокерамических преобразователей с окружной поляризацией // Сб. тр. акуст. симпоз. КОНСОНАНС-2011. . – К: ИГМ НАНУ, 2011. – с. 230–235.