

УДК 539.3:534.1

АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ЕДИНИЧНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПОЛОМ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

¹Болнокин В.Е., ¹Сторожев В.И., ²Чувиков Д.А., ¹Зыонг Минь Хай

¹ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования», Москва,
e-mail: vitybolnokin@yandex.ru, stvi@i.ua, hai.vnnavy@gmail.com;

²ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, e-mail: d.chuvikov@mivar.ru

Статья посвящена исследованию волновых полей в единичном цилиндрическом полом электроакустическом преобразователе гидроакустической антенны. В статье рассмотрены понятия гидроакустической антенны и элементов экранирования, а также проанализированы классы гидроакустических преобразователей и электроакустических преобразователей. Результатом исследований является теоретический алгоритм анализа волновых полей в единичных цилиндрических полых электроакустических преобразователях гидроакустических антенн с внутренними цилиндрическими экранами. Проведено исследование протяженной конструкции экранированного полого электроакустического преобразователя, а именно исследованы физические и механические свойства, а также линейные, вязкие и упругие свойства материала при деформации. В статье представлена методика расчета определенных характеристик волновых полей, которая основывается на подходе последовательного аналитического интегрирования систем. Рассмотрена перспектива использования полученных результатов.

Ключевые слова: экранирование, гидроакустическая антенна, гидроакустические преобразователи, электроакустические преобразователи, алгоритм, методика, анализ, волновые поля

THE ANALYSIS OF WAVE FIELDS IN A SINGLE CYLINDRICAL HOLLOW ELECTROACOUSTIC TRANSDUCER OF A HYDROACOUSTIC AERIAL

¹Bolnokin V.E., ¹Storozhev V.I., ²Chuvikov D.A., ¹Zyong Min Khay

¹Research and experimental institute of automotive electronic and electronic equipment of Russian Federation, Moscow, e-mail: vitybolnokin@yandex.ru, stvi@i.ua, hai.vnnavy@gmail.com;

²State Technical University – MADI, Moscow, e-mail: d.chuvikov@mivar.ru

The article is devoted to the investigation of wave fields in a single cylindrical hollow electroacoustic transducer of a hydroacoustic aerial. The concepts of a hydroacoustic aerial and screening elements are considered. Also classes of hydroacoustic transducers and electro-acoustic transducers are analyzed too. The result of the research is a theoretical algorithm for analysis of wave fields in single cylindrical hollow electroacoustic transducers of hydroacoustic antennas with internal cylindrical screens. The result of research is the theoretical analysis algorithm wave fields in single hollow cylindrical electroacoustic transducer hydroacoustic aerial with internal cylindrical screens. The research of an extended design of the screened hollow electro-acoustic converter is conducted. Physical, mechanical, linear, viscous and elastic properties of a material under deformation are investigated. The paper presents a method of calculating the specific characteristics of the wave fields, which approach is based on sequential integration of analytical systems. The prospect of using the obtained results is considered.

Keywords: shielding, hydroacoustic aerial, hydroacoustic transducers, electroacoustic transducers, algorithm, methods, analysis, wave fields

Гидроакустическая антенна – это устройство, обеспечивающее пространственно-избирательное излучение или прием звука в водной среде при совместной работе с передающим или приемным устройством. Элементы экранирования часто применяются в гидроакустических антеннах. Сам этот элемент необходим для ослабления электрических или магнитных и электромагнитных полей, при этом элемент экранирования позволяет значительно уменьшить воздействие других электромагнитных полей на конструктивные элементы

оборудования. Сами же гидроакустические антенны необходимы при получении или приеме гидроакустических сигналов, при помощи определенных гидроакустических преобразователей. Гидроакустический преобразователь является техническим устройством, у которого основное предназначение это – преобразование электрических колебаний в механические, или, наоборот. Также существует два основных класса гидроакустических преобразователей – это магнитострикционные и пьезоэлектрические. Принцип действия первых

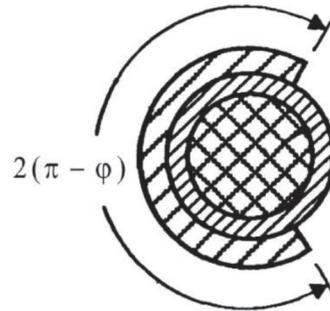
основан на эффекте магнитострикции, то есть изменении размеров, а также формы тела при его намагничивании. А принцип действия вторых основан на использовании прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта, то есть под действием механических сил, приложенных к кристаллам некоторых веществ, на поверхностях этих кристаллов появляются электрические заряды, величина которых пропорциональна степени деформации. При изготовлении антенн гидроакустических приборов чаще всего используют такой материал, как титан бария.

Рассмотрим класс электроакустических преобразователей. Это устройства, которые преобразуют электрическую энергию в акустическую и обратно. Электроакустические преобразователи, в зависимости от класса преобразования разделяют на приемники и излучатели, например, прием звука в технике связи, для приема и измерения упругих колебаний, гидролокации и тому подобное. Чаще всего электроакустические преобразователи имеют двойное преобразование энергии – электромеханическое. В результате часть, подводимая к преобразователю электрической энергии, переходит в энергию колебаний механической системы. Также существуют электроакустические преобразователи, которые не имеют механической колебательной системы, такого вида излучатели применяются весьма редко. Когда электроакустический преобразователь является излучателем, то на его вход задается электрическое напряжение и ток, определяющее его колебательную скорость и звуковое давление, соответственно в его поле. Подобный теоретический расчет электроакустического преобразователя должен предусматривать установленные связи между его входными и выходными параметрами.

Процессы разработки и расчета элементов экранирования гидроакустических антенн описаны в работах [3–5], а поставленные задачи и их решения, связанные с проблематикой звукоизоляции представлены в работах [1–2, 6–10, 13]. Проведенные исследования по заданной проблематике анализа волновых полей в единичном цилиндрическом полове электроакустического преобразователя гидроакустической антенны до сих пор являются перспективным направлением в науке. В данной статье рассматривается разработка численно-аналитической методики анализа волновых полей в цилиндрическом полове электроакустического преобразователя гидроакустической антенны.

Исследование протяженной конструкции экранированного полого электроакустического преобразователя

Исследуем протяженную конструкцию экранированного полого электроакустического преобразователя, который имеет составное поперечное сечение (рисунок). Стоит отметить, что рассматриваемый экранированный полой электроакустический преобразователь отнесен к нормированным цилиндрическим координатам $O\theta z$.



Конструкция экранированного полого электроакустического преобразователя с учетом составного поперечного сечения

Физические и механические свойства, а также линейные, вязкие и упругие свойства материала при деформации, характеризуются функциями плотности $\tilde{\rho}_\Pi(r) = \rho_\Pi \cdot \exp(\tau_\Pi r)$ и соответствующими матрицами:

$$\tilde{\lambda}_{\Pi\alpha\beta}(r) = \lambda_{\Pi\alpha\beta} \exp(\tau_\Pi r),$$

$$\tilde{\mu}_{\Pi\alpha\beta}(r) = \mu_{\Pi\alpha\beta} \exp(\tau_\Pi r),$$

$$(\alpha\beta = rr, \theta\theta, zz, \theta z, rz, r\theta; \Pi = I, E).$$

Здесь комплексными величинами являются постоянные $\lambda_{\Pi\alpha\beta} = \lambda_{\alpha\beta R}^{(\Pi)} \exp(-i\psi_{\alpha\beta\lambda}^{(\Pi)})$, $\mu_{\Pi\alpha\beta} = \mu_{\alpha\beta R}^{(\Pi)} \exp(-i\psi_{\alpha\beta\mu}^{(\Pi)})$, где $\psi_{ij\lambda}^{(\Pi)}$, $\psi_{ij\mu}^{(\Pi)}$ являются определенными углами потерь. Задача определения соответствующих характеристик полей исследуется в двумерной модели плоской динамической деформации. Стоит отметить, что исходные соотношения для внешних и внутренних экранирующих элементов включают определенные уравнения динамических упругих деформаций $\tilde{u}_r, \tilde{u}_\theta$:

$$\epsilon_{rr} = \partial_r \tilde{u}_r, \epsilon_{\theta\theta} = r^{-1} \tilde{u}_r + r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_\theta,$$

$$\epsilon_{r\theta} = r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_r + \partial_r \tilde{u}_\theta - r^{-1} \tilde{u}_\theta.$$

При этом уравнения теории упругости [3], которые связывают напряжение

и деформацию упругой среды по обобщенному закону Гука для исследуемого типа в противоположность изотропии функционально-градиентных материалов [11–12, 14], будет следующего вида:

$$\sigma_{rr} = (\tilde{\lambda}_{rr} \partial_r + \tilde{\lambda}_{r\theta} r^{-1}) \tilde{u}_r + \tilde{\lambda}_{r\theta} r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_\theta,$$

$$\sigma_{\theta\theta} = (\tilde{\lambda}_{r\theta} \partial_r + \tilde{\lambda}_{\theta\theta} r^{-1}) \tilde{u}_r + \tilde{\lambda}_{\theta\theta} r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_\theta,$$

$$\sigma_{zz} = (\tilde{\lambda}_{rz} \partial_r + \tilde{\lambda}_{\theta z} r^{-1}) \tilde{u}_r + \tilde{\lambda}_{\theta z} r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_\theta,$$

$$\sigma_{r\theta} = \tilde{\mu}_{r\theta} (r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_r + \partial_r \tilde{u}_\theta - r^{-1} \tilde{u}_\theta).$$

Далее рассмотрим уравнения двумерного упругого волнового деформирования [3]:

$$\partial_r \sigma_{rr} + r^{-1} \partial_\theta \sigma_{r\theta} + r^{-1} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) - \tilde{\rho} \partial_t^2 \tilde{u}_r = 0,$$

$$\partial_r \sigma_{r\theta} + r^{-1} \partial_\theta \sigma_{\theta\theta} + 2r^{-1} \sigma_{r\theta} - \tilde{\rho} \partial_t^2 \tilde{u}_\theta = 0,$$

$$\begin{aligned} & [\lambda_{\Pi rr} \partial_r^2 + \lambda_{\Pi r\theta} r^{-1} \partial_r - \lambda_{\Pi\theta\theta} r^{-2} - \mu_{\Pi r\theta} \alpha_{\Pi n}^2 r^{-2} + \tau_{\Pi} \lambda_{\Pi rr} \partial_r + \tau_{\Pi} \lambda_{\Pi r\theta} r^{-1} + \Omega_{\Pi}^2] u_{\Pi r}^{(n)} + [-(\lambda_{\Pi r\theta} + \\ & + \mu_{\Pi r\theta}) r^{-1} \alpha_{\Pi n} \partial_r + (\lambda_{\Pi\theta\theta} + \mu_{\Pi r\theta}) \alpha_{\Pi n} r^{-2} - \tau_{\Pi} \lambda_{\Pi r\theta} \alpha_{\Pi n} r^{-1}] u_{\Pi\theta}^{(n)} = 0, \\ & [(\lambda_{\Pi r\theta} + \mu_{\Pi r\theta}) \alpha_{\Pi n} r^{-1} \partial_r + (\lambda_{\Pi\theta\theta} + \mu_{\Pi r\theta}) \alpha_{\Pi n} r^{-2} + \tau_{\Pi} \mu_{\Pi r\theta} \alpha_{\Pi n} r^{-1}] u_{\Pi r}^{(n)} + \\ & + [\mu_{\Pi r\theta} \partial_r^2 + \mu_{\Pi r\theta} r^{-1} \partial_r - \mu_{\Pi\theta\theta} r^{-2} - \lambda_{\Pi\theta\theta} \alpha_{\Pi n}^2 r^{-2} + \tau_{\Pi} \mu_{\Pi r\theta} \partial_r - \tau_{\Pi} \mu_{\Pi r\theta} r^{-1} + \Omega_{\Pi}^2] u_{\Pi\theta}^{(n)} = 0. \end{aligned}$$

Соотношения рассматриваемой модели включают [14] уравнения электростатики, записываемые с использованием векторов напряженности E_α , индукции D_α , а также потенциала Φ : $(\partial_r + r^{-1}) D_r + r^{-1} \partial_\theta D_\theta = 0$, $E_r = -\partial_r \Phi$, $E_\theta = -r^{-1} \partial_\theta \Phi$. Таким образом, определяющие соотношения приобретут следующий вид:

$$\sigma_{Trr} = (c_{11} \partial_r + c_{13} r^{-1}) \tilde{u}_{Tr} + c_{13} r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_{T\theta},$$

$$\sigma_{T\theta\theta} = (c_{13} \partial_r + c_{33} r^{-1}) \tilde{u}_{Tr} + c_{33} r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_{T\theta},$$

$$\sigma_{T r\theta} = c_{55} (r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_{Tr} + \partial_r \tilde{u}_{T\theta} - r^{-1} \tilde{u}_{T\theta}) + e_{15} \partial_r \Phi,$$

$$D_r = e_{15} (r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_{Tr} + \partial_r \tilde{u}_{T\theta} - r^{-1} \tilde{u}_{T\theta}) - \varepsilon_{11} \partial_r \Phi,$$

$$D_\theta = e_{13} \partial_r \tilde{u}_{Tr} + e_{33} (r^{-1} \tilde{u}_{Tr} + r^{-1} \partial_\theta \tilde{u}_{T\theta}) - \varepsilon_{33} r^{-1} \partial_\theta \Phi.$$

Здесь c_{ij} является содержащим модули упругости, e_{ij} является параметрами, харак-

теризующими свойства пьезоэлектрика как электромеханической колебательной системы, а ε_{ij} является диэлектрическими проницаемостями.

$$\tilde{u}_{\Pi r}(r, \theta, t) = u_{\Pi r}^{(n)}(r) \exp(i\alpha_{\Pi n} \theta) \exp(-i\omega t),$$

$$\tilde{u}_{\Pi\theta}(r, \theta, t) = i \cdot u_{\Pi\theta}^{(n)}(r) \exp(i\alpha_{\Pi n} \theta) \exp(-i\omega t).$$

Использование обобщенных исходных комплексных представлений для полей волновых упругих перемещений при учете экранирующих составляющих элементов и при учете уравнения связи динамических упругих деформаций с учетом вектора упругих волновых перемещений $\tilde{u}_r, \tilde{u}_\theta$ и преобразованного уравнения обобщенного закона Гука для рассматриваемой задачи, позволит привести к следующему виду:

теризующими свойства пьезоэлектрика как электромеханической колебательной системы, а ε_{ij} является диэлектрическими проницаемостями.

Методика расчета определенных характеристик волновых полей

Представленная методика основывается на подходе последовательного аналитического интегрирования систем. Формирование представлений для волновых полей осуществляется в следующих областях: S_r , S_T и S_E . Системы амплитудных уравнений волнового деформирования цилиндрически ортотропных материалов, состоящих из твердых зерен карбидов, нитридов и боридов переходных металлов, образующих прочный непрерывный каркас, и металлическую связку, элементов экранирования, может записаться в следующей форме:

$$[M_{1\Pi n} r^2 \partial_r^2 + M_{2\Pi n} r \partial_r + M_{3\Pi n} + M_{4\Pi n} r^2 \partial_r + M_{5\Pi n} r + M_{\Pi\Omega} r^2] u_{\Pi}^{(n)} = 0,$$

где

$$u_{\Pi}^{(n)} = (u_{\Pi r}^{(n)}, u_{\Pi\theta}^{(n)}), \quad M_{1\Pi n} = \begin{pmatrix} \lambda_{\Pi rr} & 0 \\ 0 & \mu_{\Pi r\theta} \end{pmatrix}, \quad M_{2\Pi n} = \begin{pmatrix} \lambda_{\Pi r\theta} & -(\lambda_{\Pi r\theta} + \mu_{\Pi r\theta}) \alpha_{\Pi n} \\ (\lambda_{\Pi r\theta} + \mu_{\Pi r\theta}) \alpha_{\Pi n} & \mu_{\Pi r\theta} \end{pmatrix},$$

$$M_{3\Pi n} = \begin{pmatrix} -(\lambda_{\Pi\theta\theta} + \mu_{\Pi r\theta} \alpha_{\Pi n}^2) & (\lambda_{\Pi\theta\theta} + \mu_{\Pi r\theta}) \alpha_{\Pi n} \\ (\lambda_{\Pi\theta\theta} + \mu_{\Pi r\theta}) \alpha_{\Pi n} & -(\lambda_{\Pi\theta\theta} \alpha_{\Pi n}^2 + \mu_{\Pi r\theta}) \end{pmatrix}, M_{4\Pi n} = \begin{pmatrix} \tau_{\Pi} \lambda_{\Pi r r} & -\tau_{\Pi} \lambda_{\Pi r \theta} \\ 0 & \tau_{\Pi} \mu_{\Pi r \theta} \end{pmatrix},$$

$$M_{5\Pi n} = \begin{pmatrix} \tau_{\Pi} \lambda_{\Pi r \theta} & \tau_{\Pi} \lambda_{\Pi r \theta} \alpha_{\Pi n} \\ \tau_{\Pi} \mu_{\Pi r \theta} \alpha_{\Pi n} & -\tau_{\Pi} \mu_{\Pi r \theta} \end{pmatrix}, M_{\Pi\Omega} = \begin{pmatrix} \Omega_{\Pi}^2 & 0 \\ 0 & \Omega_{\Pi}^2 \end{pmatrix}.$$

Далее проводится интегрирование в степенных рядах следующего вида

$$u_{\Pi}^{(n)} = \sum_{m=0}^{\infty} B_m^{(\Pi, n)} r^{m+v}.$$

Векторные коэффициенты этих рядов из систем рекуррентных соотношений будут $B_{q,m}^{(\Pi, n)} = -((v_q + m)(v_q + m - 1)M_{1\Pi n} + (v_q + m)M_{2\Pi n} + M_{3\Pi n})^{-1} \cdot (((v_q + m - 1)M_{4\Pi n} + M_{5\Pi n})B_{q,m-1}^{(\Pi, n)} + M_{\Pi\Omega} B_{q,m-2}^{(\Pi, n)})$ ($m = \overline{2, \infty}$; $q = 1, 2$);

$$B_{q,1}^{(\Pi, n)} = -((v_q + 1)v_q M_{1\Pi n} + (v_q + 1)M_{2\Pi n} + M_{3\Pi n})^{-1} \cdot (v_q M_{4\Pi n} + M_{5\Pi n}) B_{q,0}^{(\Pi, n)},$$

где v_q является корнями следующего полиномиального уравнения:

$$\det M_{\Pi n} = 0,$$

$$M_{\Pi n} = v_q(v_q - 1)M_{1\Pi n} + v_q M_{2\Pi n} + M_{3\Pi n},$$

$B_{q,0}^{(\Pi, n)}$ является соответствующими значениями v_q , которые определены с точностью до произвольного постоянного множителя систем уравнений $M_{\Pi n} = B_{q,0}^{(\Pi, n)} = 0$.

Будем считать, что $\alpha_{ln} = \overline{n\pi(-\infty, \infty)}$ полагается для области внутреннего экрана S_p , следовательно, полученная векторная комплексная характеристика волнового поля, которая является также амплитудной, имеет представление в виде ряда по базисному множеству частных решений с неопределенными коэффициентами:

$$u_l = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{q=1}^2 C_{nq}^{(l)} F_{nq}^{(l)}(r) \exp(i\alpha_{ln} \theta).$$

Таким образом, сечение внешнего незамкнутого экрана для области S_E будет иметь следующую структуру:

$$u_E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{q=1}^2 C_{nq}^{(Er)} F_{nq}^{(Er)}(r) \exp(i\alpha_{En}^{(r)}) +$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{q=1}^2 C_{nq}^{(E\theta)} F_{nq}^{(E\theta)}(r) \exp(i\alpha_{En}^{(\theta)}).$$

Для области S_p в задаваемых в сходной форме получим

$$\tilde{u}_{Tr}(r, \theta, t) = u_{Tr}^{(n)}(r) \exp(i\alpha_{Tn} \theta) \exp(-i\omega t),$$

$$\tilde{u}_{T\theta}(r, \theta, t) = i \cdot u_{T\theta}^{(n)}(r) \exp(i\alpha_{Tn} \theta) \exp(-i\omega t),$$

$$\Phi(r, \theta, t) = i \cdot \Phi^{(n)}(r) \exp(i\alpha_{Tn} \theta) \exp(-i\omega t).$$

При этом используются ряды записываемые в векторной форме относительно $u_T^{(n)} = (u_{Tr}^{(n)}(r), u_{T\theta}^{(n)}(r), \Phi^{(n)}(r))$ систем дифференциальных уравнений:

$$[M_{1Tn} r^2 \partial_r^2 + M_{2Tn} r \partial_r + M_{3Tn} + M_{T\Omega} r^2] u_T^{(n)} = 0,$$

где

$$M_{1Tn} = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{55} & e_{15} \\ 0 & e_{15} & -\epsilon_{11} \end{pmatrix}, M_{2Tn} = \begin{pmatrix} 2(c_{11} - c_{13}) & -\alpha_{Tn}(c_{13} + c_{55}) & -\alpha_{Tn} e_{15} \\ \alpha_{Tn}(c_{13} + c_{55}) & c_{55} & 2e_{15} \\ \alpha_{Tn}(e_{13} + e_{15}) & 0 & -\epsilon_{11} \end{pmatrix},$$

$$M_{3Tn} = \begin{pmatrix} c_{13} - c_{11} - c_{33} - \alpha_{Tn}^2 c_{55} & \alpha_{Tn}(c_{33} + c_{55}) & 0 \\ \alpha_{Tn}(c_{33} + c_{55}) & -(c_{55} - \alpha_{Tn}^2 c_{33}) & 0 \\ \alpha_{Tn} e_{33} & -\alpha_{Tn}^2 e_{33} & \alpha_{Tn}^2 \epsilon_{33} \end{pmatrix}, M_{T\Omega} = \begin{pmatrix} \Omega_T^2 & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_T^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Также учитывается, что $\alpha_{Tn} = n\pi \left(n = \overline{-\infty, \infty} \right)$, следовательно, получаем уравнения следующего вида:

$$u_T^{(n)} = \sum_{m=0}^{\infty} B_m^{(T,n)} r^{m+v},$$

при этом векторные коэффициенты определяются из соответствующих систем рекуррентных соотношений, таких как

$$B_{q,m}^{(T,n)} = -((v_q + m)(v_q + m - 1)M_{1Tn} + (v_q + m)M_{2Tn} + M_{3Tn})^{-1} \cdot M_{\Pi\Omega} B_{q,m-2}^{(\Pi,n)} \quad (m = \overline{2, \infty}; q = 1, 4),$$

где v_q является корнями полиномиального уравнения

$$\det M_{Tn} = 0, \quad M_{Tn} = v_q(v_q - 1)M_{1Tn} + v_q M_{2Tn} + M_{3Tn},$$

а $B_{q,0}^{(T,n)}$ является соответствующими значениями v_q , которые определены с точностью до произвольного постоянного множителя, при этом решения систем однородных алгебраических уравнений будут $M_{Tn} = B_{q,0}^{(T,n)} = 0$.

Таким образом, векторную комплексную амплитудную характеристику электроупругого волнового поля представим в виде ряда по базисному множеству частных решений с неопределенными коэффициентами $u_T = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{q=1}^4 C_{nq}^{(\Gamma)} F_{nq}^{(\Gamma)}(r) \exp(i\alpha_{Tn} \theta)$. Подчинение характеристик волновых полей осуществляется на основе приема квадратичной минимизации:

$$\begin{aligned} H(C_{nq}^{(\Gamma)}, C_{nq}^{(T)}, C_{nq}^{(E)}, \Phi_I, \Phi_E) = & \int_0^{2\pi} |(\tilde{u}_{Ir})_{\Gamma_I} - (\tilde{u}_{Tr})_{\Gamma_I}|^2 d\theta + \int_0^{2\pi} |(\tilde{u}_{I\theta})_{\Gamma_I} - (\tilde{u}_{T\theta})_{\Gamma_I}|^2 d\theta + \int_0^{2\pi} |(\tilde{\sigma}_{Ir})_{\Gamma_I} - (\tilde{\sigma}_{Tr})_{\Gamma_I}|^2 d\theta + \\ & + \int_0^{2\pi} |(\tilde{\sigma}_{I\theta})_{\Gamma_I} - (\tilde{\sigma}_{T\theta})_{\Gamma_I}|^2 d\theta + \int_{\phi}^{2\pi-\phi} |(\tilde{u}_{Er})_{\Gamma_{TE}} - (\tilde{u}_{Tr})_{\Gamma_{TE}}|^2 d\theta + \int_{\phi}^{2\pi-\phi} |(\tilde{u}_{E\theta})_{\Gamma_{TE}} - (\tilde{u}_{T\theta})_{\Gamma_{TE}}|^2 d\theta + \int_{\phi}^{2\pi-\phi} |(\tilde{\sigma}_{Err})_{\Gamma_{TE}} - (\tilde{\sigma}_{Trr})_{\Gamma_{TE}}|^2 d\theta + \\ & + \int_{\phi}^{2\pi-\phi} |(\tilde{\sigma}_{Er\theta})_{\Gamma_{TE}} - (\tilde{\sigma}_{Tr\theta})_{\Gamma_{TE}}|^2 d\theta + \int_{\phi}^{2\pi-\phi} |(\tilde{\sigma}_{Err})_{\Gamma_E} - (p_0)_{\Gamma_E}|^2 d\theta + \int_{\phi}^{2\pi-\phi} |(\tilde{\sigma}_{Er\theta})_{\Gamma_E}|^2 d\theta + \int_{R_r}^{R_E} |(\tilde{\sigma}_{E\theta\theta})_{\Gamma_{E^{(+)}}} - (p_0)_{\Gamma_{E^{(+)}}}|^2 d\theta + \\ & + \int_{R_r}^{R_E} |(\tilde{\sigma}_{Er\theta})_{\Gamma_{E^{(+)}}}|^2 d\theta + \int_{R_r}^{R_E} |(\tilde{\sigma}_{E\theta\theta})_{\Gamma_{E^{(-)}}} - (p_0)_{\Gamma_{E^{(-)}}}|^2 d\theta + \int_{R_r}^{R_E} |(\tilde{\sigma}_{Er\theta})_{\Gamma_{E^{(-)}}}|^2 d\theta + \int_{-\phi}^{\phi} |(\tilde{\sigma}_{Trr})_{\Gamma_{TF}} - (p_0)_{\Gamma_{TF}}|^2 d\theta + \\ & + \int_{-\phi}^{\phi} |(\tilde{\sigma}_{Tr\theta})_{\Gamma_{TF}}|^2 d\theta + \int_0^{2\pi} |(\Phi)_{r=R_I} - \Phi_I|^2 d\theta + \int_0^{2\pi} |(\Phi)_{r=R_T} - \Phi_E|^2 d\theta. \end{aligned}$$

Искомые неизвестные характеристики для конкретных совокупностей определяются соответствующими уравнениями, условия которых

$$\partial H(C_{nq}^{(I)}, C_{nq}^{(E)}, C_{nq}^{(T)}, \Phi_I, \Phi_E) / \partial C_{nq}^{(\Pi)} = 0,$$

$$\partial H(C_{nq}^{(I)}, C_{nq}^{(E)}, C_{nq}^{(T)}, \Phi_I, \Phi_E) / \partial \Phi_{\Pi} = 0 \quad [3].$$

Рекомендуется на участках границ областей S_{Π} использовать разложения функций в ряды Якоби – Ангера, для более эффективного вычисления интегралов от характеристик падающей гидроакустической волны.

Заключение

Представленные в работе исследования являются весьма актуальными. Результатом исследований является теоретический алго-

ритм анализа волновых полей в единичных цилиндрических полых электроакустических преобразователях гидроакустических антенн с внутренними цилиндрическими экранами. Проведено исследование протяженной конструкции экранированного полого электроакустического преобразователя, а также исследована методика расчета определенных характеристик волновых полей. Даны рекомендации использования разложения функций в ряды Якоби – Ангера.

Данные исследования уже используются в научно-исследовательских работах Технического института военно-морского флота Вьетнама, а также в опытно-конструкторских работах компаний судостроительного сектора Вьетнама. Перспектива данного исследования заключается в том, что полученные результаты в статье можно применить в исследовании

ях, например, методов уменьшения гидроакустической активности приборов подводных транспортных средств, а также в моделях функционирования гидроакустических экранов и покрытий для конструкций и приборов подводных транспортных средств.

Список литературы

1. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Компьютерное моделирование и анализ излучения цилиндрических гидроакустических антенн [Текст] // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. – 2012. – № 25. – С. 36–49.
2. Беляковский Н.Г. Конструктивная амортизация механизмов, приборов и аппаратуры на судах [Текст] / Н.Г. Беляковский. – Ленинград: Судостроение, 1965. – 523 с.
3. Болнокин В.Е., Сторожев В.И. Модель оптимизации системы элементов экранирования для цилиндрических гидроакустических антенн [Текст] // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – Т. 62, № 4. – С. 61–66.
4. Глазанов В.Е. Акустические экраны для подводных преобразователей и антенн. Теория и расчет [Текст] / В.Е. Глазанов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 176 с.
5. Глазанов В.Е. Экранирование гидроакустических преобразователей [Текст] / В.Е. Глазанов, А.В. Михайлов. – СПб.: Элмор, 2004. – 256 с.
6. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом [Текст] / Н.И. Иванов. – М.: Логос, 2008. – 426 с.
7. Кириченко И.А., Котов В.Ю., Лонкин П.В., Слущкий Д.С. Оценка влияния конструктивных характеристик на направленность гидроакустических антенн [Текст] // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 39, № 4–2. – С. 33–49.
8. Клюкин И.И. Акустические измерения в судостроении [Текст] / И.И. Клюкин, А.Е. Колесников. – Л.: Судостроение, 1982. – 256 с.
9. Никифоров А.С. Вибропоглощение на судах [Текст] / А.С. Никифоров. – Ленинград: Судостроение, 1979. – 184 с.
10. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики [Текст] / Е.Л. Шендеров. – Л.: Судостроение, 1972. – 348 с.
11. Fang X.-Q. Multiple scattering of electro-elastic waves from a buried cavity in a functionally graded piezoelectric material layer. *Int. J. Solids Struct.* – 2008. – Vol. 45. – P. 5716–5729.
12. Fang X.-Q., Liu J.-X., Wang X.-H. Dynamic stress from a cylindrical inclusion buried in a functionally graded piezoelectric material layer under electro-elastic waves. *Compos. Sci. Technol.* – 2009. – Vol. 69. – P. 1115–1123.
13. Maekawa Z. *Environmental and architectural acoustics*. UK, London: E&FN spon., 1994. – P. 37–40.
14. Storozhev V.I. Propagation of Electroelastic Waves in Multilayer Piezoelectric Cylinders with a Sector Notch. *International applied mechanics.* – 2013. – Vol.49. Iss. 2. – P. 194–202.