УДК 531.3:534.1

МОДЕЛЬ ПЛОСКОГО МНОГОСЛОЙНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ЭКРАНА С АНИЗОТРОПНЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

В. Е. Болнокин, В. И. Сторожев, Минь Хай Зыонг

Федеральное Государственное Унитарное предприятие «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» Министерства промышленности и торговли РФ

Поступила в редакцию 09.03.2016 г.

Аннотация. Представлена теоретическая численно-аналитическая методика анализа модели функционирования и структурно-параметрической оптимизации рабочих характеристик плоских гидроакустических экранов произвольной многослойной структуры с анизотропными неоднородными по толщине функционально-градиентными вязкоупругими компонентами. В процессе исследования построено решение задачи о распространении волн деформаций по толщине окруженного жидкими средами многослойного экранирующего пакета при действии волнового гидроакустического давления на одну из его внешних поверхностей.
Ключевые слова: многослойные гидроакустические экраны, анизотропные функционально-градиентные вязкоупругие компоненты, численно-аналитическая методика анализа модели, схема структурно-параметрической оптимизации характеристик.
Annotation. The results of theoretical analysis of the model of functioning and of structural and parametric optimization of the performance of planar sonar screens arbitrary multilayer structures with anisotropic functionally graded viscoelastic components are presented. The solutions of the problem of elastic wave propagation along thickness of multi-layer sonar screens surrounded by fluid media under the wave sonar pressure on one of its external surfaces are obtained.
Keywords: multi-layered sonar screens, anisotropic functionally graded viscoelastic components, numerical-analytical technique of the analysis of model, the method of structural-parametric optimization of characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы разработки моделей гидроакустического экранирования виброизлучателей и гидроакустических антенн, несмотря на значительное число посвященных им исследований [1–3], представляют интерес для дальнейшего изучения в связи с перспективами использования в конструкциях этого типа новых классов низкосимметричных анизотропных функционально-градиентных материалов [4, 5]. В этой связи, в настоящей работе представлена методика анализа модели функционирования и структурно-параметрической оптимизации звукозащитных свойств плоских экранов произвольной многослойной структуры с анизотропными неоднородными по толщине функционально-градиентными вязкоупругими компонентами. Эффект рассеяния энергии акустического сигнала в конструкциях данного типа достигается в том числе и за счет генерирования в анизотропных слоях полей связанных продольно-сдвиговых волн деформаций под воздействием падающих гидроакустических волн давления. Рассматриваемая модель базируется на анализе процессов распространения волн деформаций по толщине окруженного жидкими средами экранирующего пакета при действии волнового гидроакустического давления на одну из его внешних поверхностей.

ПОСТАНОВОЧНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МОДЕЛИ

Рассматривается пластинчатая конструкция в виде пакета произвольного числа N плоскопараллельных слоев из вязкоупругих функционально-градиентных анизотропных материалов триклинной системы, занимающая координатную область

$$V_L = \bigcup_{q=1}^{N} V_q, \;\; V_q = \{(x_1, x_2) \in R^2,$$

$$x_3 \in [h_{q-1}, h_q]\}, \;\; h_0 = 0.$$

Физико-механические свойства материала для включаемого в пакет слоя с номером q характеризуются функцией плотности $\tilde{\rho}_q(x_3) = \rho_q \cdot \exp(\lambda_q x_3^{p_q})$ и комплексными компонентами функциональной матрицы характеристик упругих свойств $\tilde{c}_{mjq}(x_3) = c_{mjq} \cdot \exp(\lambda_q x_3^{p_q})$ $(p_q \geq 2)$, где, в свою очередь, $c_{mjq} = c_{mjq}^{(0)} \exp(-i\chi_{mjq})$, χ_{mjq} – углы потерь, λ_q, p_q – параметры неоднородности. Свойством материалов с такими характеристиками является постоянство фазовых скоростей объемных упругих волн по толщине V_q, а технологии их создания и перспективные области применения охарактеризованы, в частности, в публикациях [4–5].

Подобласти вне слоя $V_F^{(-)} = \{(x_1, x_2) \in R^2,$

$$x_3 \in (-\infty, h_0)\}, \;\; V_F^{(+)} = \{(x_1, x_2) \in R^2,$$

$x_3 \in (h_N, \infty)\}$ заполнены слабосжимаемыми идеальными жидкостями с параметрами плотности $\rho_0^{(-)}$, $\rho_0^{(+)}$ и модулями сжимаемости $\kappa^{(-)}$, $\kappa^{(+)}$. Система соотношений, описывающих волновые процессы в акустической среде, включает метагармонические уравнения относительно комплексных потенциалов $\varphi^{(\pm)}$ полей скоростей $\vec{v}^{(\pm)}$ волновых колебательных смещений частиц акустических сред и соотношения связи комплексных характеристик волновых акустических давлений $p^{(\pm)}$ с потенциалами $\varphi^{(\pm)}$. Полагается, что гидроакустическое поле у внешней поверхности пакета Γ_0 $(x_3 = 0)$ в области $V_F^{(-)}$ представлено нормально падающей и отраженной монохроматическими плоскими волнами, создающими гидроакустическое давление

$$p^{(-)} = -i\omega\rho_0^{(-)}(P_{01}^{(-)} \cdot \exp(-i(\omega t - k_F^{(-)} x_3)) +$$

$$+P_{02}^{(-)} \cdot \exp(-i(\omega t + k_F^{(-)} x_3))),$$

а в занимаемой жидкостью тыльной области $V_F^{(+)}$ генерируется преломленная гидроакустическая волна, создающая давление

$$p^{(+)} = -i\omega\rho_0^{(+)} P_0^{(+)} \cdot \exp(-i(\omega t - k_F^{(+)} x_3)).$$

Модель волнового деформирования экранирующего слоя включает систему уравнений движения деформируемой среды, систему соотношений связи малых деформаций $\hat{\varepsilon}_{qij}$ $(i, j = \overline{1,3})$ с волновыми деформационными перемещениями точек среды $\hat{u}_{qj}$, а также систему определяющих соотношений для рассматриваемого класса деформируемых анизотропных сред. Краевая задача о распространении стационарных упругих волн по толщине рассматриваемого экранирующего пакета сводится к определению комплексных характеристик $\tilde{u}_{qj}$ векторов упругих волновых перемещений в компонентах пакета из уравнений динамического деформирования материалов слоев, которые после введения представлений $\tilde{u}_{qj} = u_{qj\alpha}(x_3)\exp(-i\omega t)$ принимают вид

$$c_{55q}\partial_3^2 u_{q1\alpha} + c_{54q}\partial_3^2 u_{q2\alpha} + c_{53q}\partial_3^2 u_{q3\alpha} +$$

$$+c_{55q}\lambda_q p_q x_3^{p-1}\partial_3 u_{q1\alpha} + c_{54q}\lambda_q p_q x_3^{p-1}\partial_3 u_{q2\alpha} +$$

$$+c_{53q}\lambda_q p_q x_3^{p-1}\partial_3 u_{q3\alpha} + \rho_q\omega^2 u_{q1\alpha} = 0,$$

$$c_{q45}\partial_3^2 u_{q1\alpha} + c_{44q}\partial_3^2 u_{q2\alpha} + c_{43q}\partial_3^2 u_{q3\alpha} +$$

$$+c_{45q}\lambda_q p_q x_3^{p-1}\partial_3 u_{q1\alpha} + c_{44q}\lambda_q p_q x_3^{p-1}\partial_3 u_{q2\alpha} +$$

$$+c_{43q}\lambda_q p_q x_3^{p-1}\partial_3 u_{q3\alpha} + \rho_q\omega^2 u_{q2\alpha} = 0,$$

$$c_{35q}\partial_3^2 u_{q\alpha 1} + c_{34q}\partial_3^2 u_{q2\alpha} + c_{33q}\partial_3^2 u_{q3\alpha} +$$

$$+c_{35q}\lambda_q p_q x_3^{p-1}\partial_3 u_{q1\alpha} + c_{34q}\lambda_q p_q x_3^{p-1}\partial_3 u_{q2\alpha} +$$

$$+c_{33q}\lambda_q p_q x_3^{p-1}\partial_3 u_{q3\alpha} + \rho_q\omega^2 u_{q3\alpha} = 0,$$

и могут быть записаны в матрично-векторной форме

$$[M_{Cq}\partial_3^2 + \lambda_q p_q M_{Cq} x_3^{p_q-1}\partial_3 + M_{\Omega_q}]\vec{u}_{q\alpha}(x_3) = 0,$$

$$\partial_3 = \partial / \partial x_3; \qquad (1)$$

$$M_{Cq} = \begin{pmatrix} c_{55q} & c_{54q} & c_{53q} \\ c_{45q} & c_{44q} & c_{43} \\ c_{35q} & c_{34q} & c_{33q} \end{pmatrix},$$

$$M_{\Omega q}=\begin{pmatrix}\Omega_q^2 & 0 & 0\\ 0 & \Omega_q^2 & 0\\ 0 & 0 & \Omega_q^2\end{pmatrix}.$$

Представленные соотношения дополняются краевыми условиями идеального механического контакта составляющих пакета, а также условиями на внешних контактирующих с жидкостями гранях

$$(\tilde{\sigma}_{331}+p^{(-)})_{x_3=0}=0,\ (\tilde{\sigma}_{33N}+p^{(+)})_{x_3=h_N}=0, \quad (2)$$
$$(\partial_t\tilde{u}_{13}-v_3^{(-)})_{x_3=0}=0,\ (\partial_t\tilde{u}_{N3}-v_3^{(+)})_{x_3=h_N}=0,$$
$$(\tilde{\sigma}_{311})_{x_3=0}=(\tilde{\sigma}_{321})_{x_3=0}=(\tilde{\sigma}_{31N})_{x_3=h_N}=$$
$$=(\tilde{\sigma}_{32N})_{x_3=h_N}=0,$$
$$(\tilde{u}_{q,j})_{x_3=h_q}=(\tilde{u}_{q+1,j})_{x_3=h_q},$$
$$(\tilde{\sigma}_{q,3j})_{x_3=h_q}=(\tilde{\sigma}_{q+1,3j})_{x_3=h_q}\quad (j=\overline{1,3};\ q=\overline{1,N-1}),$$

в которых $v_3^{(\pm)}$ – компоненты векторов скоростей волновых смещений частиц акустических сред; $k_F^{(\pm)}=\omega/c_0^{(\pm)}$ $c_0^{(\pm)}=(\kappa^{(\pm)}\rho_0^{(\pm)})^{-1/2}$ – фазовые скорости бездисперсных акустических волн.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА МОДЕЛИ

Решения систем дифференциальных уравнений (1) при анализе рассматриваемой задачи представляются в виде комбинаций частных решений $F_{qsmj}(x_3)$ с неопределенными коэффициентами A_{qsm}

$$u_{qj\alpha}(x_3)=\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3}A_{qsm}F_{qsmj}(x_3), \quad (3)$$

а базисные решения (3), в свою очередь, построены в сходящихся векторно-степенных рядах вида

$$\vec{F}_{qsm}(x_3)=\{F_{qsm1}(x_3),F_{qsm2}(x_3),F_{qsm3}(x_3)\}=$$
$$=\sum_{n=s}^{\infty}\vec{D}_n^{(qsm)}x_3^n. \quad (4)$$

Векторные коэффициенты в представлениях (4) определяются системой рекуррентных соотношений:

$$\vec{D}_{n+2}^{(q,s,m)}=-((n+2)(n+1))^{-1}M_{Cq}^{-1}[M_{\Omega q}\vec{D}_n^{(q,s,m)}+$$
$$+\lambda_q p_q(n+2-p_q)\vec{D}_{n+2-p_q}^{(q,s,m)}]$$
$$(p_q\ge 2;\ s=\overline{0,1};\ m=\overline{1,3};\ n=\overline{s,\infty});$$
$$\vec{D}_n^{(q,0,m)}=0\ (n<0);\ \ \vec{D}_n^{(q,1,m)}=0\ (n<1);$$
$$\vec{D}_0^{(q,0,1)}=\vec{D}_1^{(q,1,1)}=\begin{pmatrix}1\\0\\0\end{pmatrix},$$
$$\vec{D}_0^{(q,0,2)}=\vec{D}_1^{(q,1,2)}=\begin{pmatrix}0\\1\\0\end{pmatrix},\ \ \vec{D}_0^{(q,0,3)}=\vec{D}_1^{(q,1,3)}=\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix}.$$

Соответствующие данным представлениям $\tilde{u}_{qj}$ выражения для комплексных амплитудных характеристик напряжений $\tilde{\sigma}_{q3j}$ имеют структуру

$$\sigma_{q3j}=\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3}A_{qsm}(c_{6-j,5,q}F'_{qsm1}(x_3)+$$
$$+c_{6-j,4,q}F'_{qsm2}(x_3)+c_{6-j,3,q}F'_{qsm3}(x_3))\exp(\lambda_q x_3^{p_q})$$

Для неопределенных параметров $P_{02}^{(-)}$, $P_0^{(+)}$, A_{qsm} во введенных представлениях из краевых условий (2) следует система линейных алгебраических уравнений порядка $6\cdot N+2$ с матрицей блочно-ленточной структуры, после решения которой доступны расчету все характеристики исследуемого волнового процесса:

$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3}A_{1sm}(c_{351}F'_{1sm1}(0)+c_{341}F'_{1sm2}(0)+c_{331}F'_{1sm3}(0))-$$
$$-i\omega\rho_0^{(-)}P_{02}^{(-)}=i\omega\rho_0^{(-)}P_{01}^{(-)}, \quad (5)$$
$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3}A_{Nsm}(c_{35N}F'_{Nsm1}(h_N)+c_{34N}F'_{Nsm2}(h_N)+$$
$$+c_{33N}F'_{Nsm3}(h_N))e^{\lambda_q h_N^{p_q}}-$$
$$-i\omega\rho_0^{(+)}P_0^{(+)}e^{ik_F^{(+)}h_N}=0,$$
$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3}A_{sm}\omega F_{smj}(0)+k_F^{(-)}P_{02}^{(-)}=k_F^{(-)}P_{01}^{(-)},$$
$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3}A_{sm}\omega F_{smj}(h_N)-k_F^{(+)}P_0^{(+)}e^{ik_F^{(+)}h_N}=0,$$
$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3}A_{1sm}(c_{551}F'_{1sm1}(0)+c_{541}F'_{1sm2}(0)+$$
$$+c_{531}F'_{1sm3}(0))=0,$$
$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3}A_{1sm}(c_{451}F'_{1sm1}(0)+c_{441}F'_{1sm2}(0)+$$

$$+c_{431}F'_{1sm3}(0)) = 0,$$

$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3} A_{Nsm}(c_{55N}F'_{Nsm1}(h_N) + c_{54N}F'_{Nsm2}(h_N) +$$
$$+c_{53N}F'_{Nsm3}(h_N)) = 0,$$

$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3} A_{Nsm}(c_{45N}F'_{Nsm1}(h_N) + c_{44N}F'_{Nsm2}(h_N) +$$
$$+c_{43N}F'_{Nsm3}(h_N)) = 0,$$

$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3} A_{qsm}F_{qsmj}(h_q) = \sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3} A_{q+1,sm}F_{q+1,smj}(h_q)$$
$$(j = \overline{1,3};\ q = \overline{1, N-1}),$$

$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3} A_{qsm}(c_{55q}F'_{qsm1}(h_q) + c_{54q}F'_{qsm2}(h_q) +$$
$$+c_{53q}F'_{qsm3}(h_q))e^{\lambda_q h_q^{p_q}} =$$
$$= \sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3} A_{q+1,sm}(c_{55,q+1}F'_{q+1,sm1}(h_q) +$$
$$+c_{54,q+1}F'_{q+1,sm2}(h_q) + c_{53,q+1}F'_{q+1,sm3}(h_q))e^{\lambda_{q+1} h_q^{p_{q+1}}}$$
$$(q = \overline{1, N-1}),$$

$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3} A_{qsm}(c_{45q}F'_{qsm1}(h_q) + c_{44q}F'_{qsm2}(h_q) +$$
$$+c_{43q}F'_{qsm3}(h_q))e^{\lambda_q h_q^{p_q}} =$$
$$= \sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3} A_{q+1,sm}(c_{45,q+1}F'_{q+1,sm1}(h_q) +$$
$$+c_{44,q+1}F'_{q+1,sm2}(h_q) + c_{43,q+1}F'_{q+1,sm3}(h_q))e^{\lambda_{q+1} h_q^{p_{q+1}}}$$
$$(q = \overline{1, N-1}),$$

$$\sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3} A_{qsm}(c_{35q}F'_{qsm1}(h_q) +$$
$$+c_{34q}F'_{qsm2}(h_q) + c_{33q}F'_{qsm3}(h_q))e^{\lambda_q h_q^{p_q}} =$$
$$= \sum_{s=0}^{1}\sum_{m=1}^{3} A_{q+1,sm}(c_{35,q+1}F'_{q+1,sm1}(h_q) +$$
$$+c_{34,q+1}F'_{q+1,sm2}(h_q) + c_{33,q+1}F'_{q+1,sm3}(h_q))e^{\lambda_{q+1} h_q^{p_{q+1}}}$$
$$(q = \overline{1, N-1}).$$

Решение системы уравнений (5) позволяет выразить характеристики всех рассматриваемых волновых полей через заданный исходный параметр $P_{01}^{(-)}$ в представлении акустической волны, падающей на границу Γ_-. При этом для амплитудных характеристик $P_{02}^{(-)}$, $P_0^{(+)}$, определяющих звукорассеивающие и звукоотражающие свойства рассматриваемого экранирующего элемента, получены специальные удобные для исследования представления с использованием элементов обратной матрицы

$$\left\| \vartheta_{ij} \right\| = [M_N(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)]^{-1}$$

$(i, j = \overline{1, 6N+2})$ для блочно-ленточной матрицы $M_N(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)]$ системы уравнений (5) с размерностью $6 \cdot N + 2$. В случае представления (5) в матрично-векторной форме

$$M_N(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)]F_E = F_I,$$

$$F_E = (P_{02}^{(-)}, P_0^{(+)}, A_{111}, A_{112}, A_{113}, A_{121}, A_{122}, A_{123}, \ldots,$$
$$A_{q11}, A_{q12}, A_{q13}, A_{q21}, A_{q22}, A_{q23}, \ldots,$$
$$A_{6N+2,11}, A_{6N+2,12}, A_{6N+2,13}, A_{6N+2,21}, A_{6N+2,22}, A_{6N+2,23}),$$
$$F_I = (i\omega\rho_0^{(-)}, 0, k_F^{(-)}, 0, \ldots, 0)P_{01}^{(-)},$$

и записи ее решения виде

$$F_E = [M_N(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)]^{-1} \cdot F_I$$

представляющие интерес для оценки функциональных свойств рассматриваемого экранирующего элемента характеристики $P_{02}^{(-)}$, $P_0^{(+)}$ имеют выражения

$$P_{02}^{(-)} = \Delta_o(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)] \cdot P_{01}^{(-)},$$
$$P_0^{(+)} = \Delta_p(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)] \cdot P_{01}^{(-)}$$

где

$$\Delta_o(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)] =$$
$$i\omega\rho_0^{(-)}\vartheta_{11} + k_F^{(-)}\vartheta_{13}, \qquad (6)$$
$$\Delta_p(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)] =$$
$$= i\omega\rho_0^{(-)}\vartheta_{21} + k_F^{(-)}\vartheta_{23}. \qquad (7)$$

СХЕМА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Во всех случаях, для оценки функциональных свойств гидроакустических экранов рассматриваемых типов, выполняющих роль пассивных отражающих или поглощающих конструкций, системному анализу подлежат соотношения интенсивностей падающего на экран сигнала, отраженного сигнала и сигнала в области за элементом экранирования. В качестве параметров управления используются количество, физико-механические и геометрические характеристики анизотропных упругих слоев экранирующего пакета при нескольких типах ограничений. Схемы определения оптимизированных технологических параметров систем гидроакустического экранирования с использованием полученных результатов зависят от функционального назначения акустических экранов. Задача определения оптимизированных параметров системы гидроакустического экранирования привязывается к определенному оговоренному частотному диапазону, определенному спектральному составу входных сигналов. В общем случае постановки, проблема оптимизации характеристик многослойного плоского гидроакустического экрана является многокритериальной, в которой помимо соотношений интенсивностей входного, выходного и отраженного сигналов критериями качества могут являться параметры механических свойств и плотности материалов, параметры толщин и числа составляющих слоев пакета. На практике варьируемые параметры c_{ijq}, ρ_q, λ_q, p_q, h_q для экранирующих конструкций рассмотренных выше типов должны изменяться в пределах задаваемых диапазонов $c_{ijq} \in [\underline{c}_{ijq}, \overline{c}_{ijq}]$, $\rho_q \in [\underline{\rho}_q, \overline{\rho}_q]$, $h_q \in [\underline{h}_q, \overline{h}_q]$. Схема варьирования 15 различных значений величин c_{ijq} для триклинного анизотропного материала экрана, фигурирующих в соотношениях рассмотренных моделей, может иметь, по меньшей мере, два варианта. Первый вариант основывается на предположении о том, что материал покрытия представляет собой сложный срез композитного материала орторомбической системы (например, волокнистого композита с двунаправленным или трехнаправленным ортогональным армированием), характеризуемый тремя угловыми параметрами. В этом случае, используемые в моделях матричные модули упругости c_{ijq} для любого среза указанного типа определяются соответствующими тензорными характеристиками c_{ijksq}, получаемыми в результате пересчета значений тензора упругих постоянных ортотропного композита $\tilde{c}_{mnprq}$ по формулам $c_{ijksq} = \tilde{c}_{mnprq} l_{im} l_{jn} l_{kp} l_{sr}$ с использованием направляющих косинусов для осей рассматриваемых координатных систем. Определяемые данными соотношениями величины c_{ijq} зависят при этом от трех угловых параметров рассматриваемого среза, используемыми как управляющие параметры алгоритма оптимизации. Второй вариант предполагает задание трех связей в каждой из групп пятнадцати характеристик c_{ijq}, включенных в модель экрана и удовлетворяющих системам соответствующих энергетических ограничений, а также нахождение остающихся двенадцати независимых параметров в группах из задачи экстремума по основному критерию качества. По определяемым таким образом множествам значений c_{ijq} в результате применения специального алгоритма могут быть, в частности, найдены упругие постоянные соответствующего ортотропного материала и углы его среза для получения слоя с искомыми экранирующими свойствами.

Как отмечено выше, основные критерии качества в рассматриваемых задачах оптимизации формируются исходя из необходимости обеспечения минимального уровня прохождения внешних волновых сигналов в зону за экранирующим покрытием в конструкциях помехозащитных экранов, либо максимального уровня отраженных сигналов в конструкциях экранов-концентраторов. В первом случае критерием качества выступает минимизация соотношения интенсивностей падающих на экран и генерируемых на его противоположной поверхности акустических сигналов. Во втором случае критерием качества выступает максимизация соотношения интенсивностей падающих на экран и отражаемых экраном волновых сигналов. Таким образом, для помехозащитных экранов из функционально-градиентных анизотропных материалов с экспоненциально-степенной толщинной неоднородностью соответственно формулируются задачи поиска минимумов для соотношений интенсивностей волновых давлений в выходном и входном волновых сигналах

$$\min(\rho_0^{(+)} P_0^{(+)} / \rho_0^{(-)} P_{01}^{(-)}) =$$

$$= \min\{(\rho_0^{(+)} / \rho_0^{(-)})\Delta_p(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)\},$$

где функция $\Delta_p(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)$ имеет вид (7).

Для концентрирующих экранов с компонентами из функционально-градиентных анизотропных материалов с экспоненциально-степенной толщинной неоднородностью соответственно формулируются задачи поиска максимума для соотношения интенсивностей волновых давлений в отраженной волне и исходной волне, нормально падающей на лицевую поверхность плоского элемента экранирования

$$\max(P_{02}^{(+)} / P_{01}^{(-)}) =$$
$$= \max\{\Delta_o(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)\},$$

где функция $\Delta_0(c_{ijq}, p_q, \lambda_q, \rho_q, \kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, \omega, h_q)$ имеет вид (6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом представленных в работе исследований являются формулировка и теоретический анализ модели функционирования плоского многослойного элемента для систем гидроакустической защиты и экранирования, составленного из высокотехнологичных функционально-градиентных низкосимметричных вязкоупругих анизотропных материалов с экспоненциально-степенной толщинной неоднородностью. Получены также соотношения задач нелинейной структурно-параметрической оптимизации для определения физико-механических и структурно-геометрических технологических параметров составляющих пакета анизотропных слоев триклинной системы из функционально-градиентных материалов с экспоненциально-степенной толщинной неоднородностью, обеспечивающих оптимизированные эффекты функционирования звукопоглощающих и звукоотражающих концентрирующих гидроакустических экранов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Глазанов В. Е.* Экранирование гидроакустических антенн / В. Е. Глазанов – Л. : Судостроение, 1986. – 148 с.

2. *Глазанов В. Е.* Экранирование гидроакустических преобразователей / В. Е. Глазанов, А. В. Михайлов. – СПб. : Элмор, 2004. – 256 с.

3. *Корякин Ю. А.* Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы / Ю. А. Корякин, С. А. Смирнов, Г. В. Яковлев. – СПб. : Наука, 2004. – 410 с.

4. *Birman V.* Modeling and Analysis of Functionally Graded Materials and Structures / V. Birman , L.W. Byrd // Appl. Mech. Rev. – 2007. – Vol. 60, N 5. – P. 195–216.

5. FGM: Design, processing and applications / Y. Miyamoto, W. A. Kaysser, B. H. Rabin et al. – Dordrecht: Kluwer Academic, 1999. – 434 p.

Болнокин В. Е. – д. т. н., профессор, советник директора по научной работе, Федеральное Государственное Унитарное предприятие «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» Министерства промышленности и торговли РФ.
Тел.: +7 929-965-83-15
E-mail: vitalybolnokin@yandex.ru

Bolnokin V. E. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Adviser of Scientific Research and Experimental Institute of Automotive Electronics and Electrical Equipment of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation.
Tel.: +7 929-965-83-15
E-mail: vitalybolnokin@yandex.ru

Сторожев В. И. – д. т. н., профессор, научный консультант, Федеральное Государственное Унитарное предприятие «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» Министерства промышленности и торговли РФ.
Тел.: +7 929-965-83-15
E-mail: stvi@i.ua

Storozhev V. I. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Consultant of Scientific Research and Experimental Institute of Automotive Electronics and Electrical Equipment of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation.
Tel.: +7 929-965-83-15
E-mail: stvi@i.ua

Зыонг Минь Хай – аспирант, Федеральное Государственное Унитарное предприятие «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» Министерства промышленности и торговли РФ.
Тел. +7 929-965-83-15
E-mail: hai.vnnavy@gmail.com

Duong Minh Hai – Post-graduate of Scientific Research and Experimental Institute of Automotive Electronics and Electrical Equipment of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation.
Tel.: +7 929-965-83-15
E-mail: hai.vnnavy@gmail.com