

УДК 539.3:534.1

©2018. В.Е.Болнокин, Е.И.Митрушкин, З.Минь Хай, С.В.Сторожев

НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН С ПЛОСКИМ ВЯЗКОУПРУГИМ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫМ ЭКРАНОМ

Разработан и апробирован теоретический алгоритм анализа учета факторов неопределенности в модели гидроакустического экрана в виде вязкоупругого трансверсально-изотропного деформируемого слоя, контактирующего по граням с массивами идеальной слабосжимаемой жидкости. Представляемая нечетко-множественная методика ориентирована на учет разбросов для значений неконтрастных экспериментальных параметров геометрических и физико-механических свойств экрана и разделяемых экраном жидкостей. В основу синтезируемого алгоритма положено использование аналитических результатов исследования четкого детерминированного варианта рассматриваемой модели и последующее применение альфа-уровневой модификации эвристического принципа обобщения для перехода к нечетким представлениям экзогенных параметров.

Ключевые слова: модели плоских гидроакустических экранов, трансверсально-изотропные вязкоупругие материалы, разброс значений физико-механических и геометрических параметров, нечетко-множественное оценивание характеристик эффективности экранирования, применение модифицированного эвристического принципа обобщения, анализ случая нечетко-интервальных экзогенных параметров.

Введение и постановка задачи. Дальнейшие исследования в области развития подходов к синтезу, анализу и структурно-параметрической оптимизации новых эффективных моделей систем гидроакустического экранирования [1, 2] в качестве одного из актуальных аспектов предполагают совершенствование алгоритмов корректного учета факторов неопределенности в задании параметров указанных моделей. При этом, наряду с возможностями применения для решения этой проблемы методов стохастического анализа [3, 4], учет неконтрастности значений физико-механических и структурно-геометрических параметров для конструкций гидроакустических экранов может быть альтернативно реализован на базе теории нечетких вычислений (методов теории нечетких множеств) [5–13]. В этой связи целью исследований, представленных в настоящей работе, является разработка и применение нечетко-множественной методики оценивания факторов разброса эндогенных характеристик в модели однослойного плоского гидроакустического экрана из поперечно-анизотропного вязкоупругого материала с неконтрастными физико-механическими параметрами. Представляемый подход связан с использованием модифицированного эвристического принципа обобщения [8–13] при переходе к нечетким аргументам в получаемых классических четких аналитических расчетных соотношениях для анализируемых величин.

Рассматривается модель плоского конструкционного элемента для экранирования виброизлучений в жидкой среде в виде деформируемого слоя толщины h , занимающего в пространстве нормированных прямоугольных декартовых координат $Ox_1x_2x_3$ область $V_L = \{(x_1, x_2) \in R^2, x_3 \in$

$\in [0, h]\}$. Полагается, что материалом слоя является линейно-вязкоупругий трансверсально-изотропный [14, 15] материал с ориентированной вдоль Ox_3 осью изотропии, для которого определяющие соотношения могут быть записаны в виде

$$\vec{\sigma} = \|c_{ij}\| \vec{\varepsilon},$$

где $\vec{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \sigma_{13}, \sigma_{12})$ – компоненты нормированного комплексного тензора механических напряжений; $\vec{\varepsilon} = (\partial_1 u_1, \partial_2 u_2, \partial_3 u_3, \partial_2 u_3 + \partial_3 u_2, \partial_1 u_3 + \partial_3 u_1, \partial_1 u_2 + \partial_2 u_1)$, $\partial_j = \partial/\partial x_j$; u_j ($j = \overline{1, 3}$) – компоненты нормированного вектора динамических упругих перемещений; $c_{ij}(\omega) = c_{ij}^*(\omega) + i c_{ij}^{**}(\omega)$ – компоненты комплексного тензора нормированных частотно-зависимых модулей упругости вязкоупругой трансверсально-изотропной среды; ω – циклическая частота исследуемого волнового процесса. В качестве нормирующих параметров при переходе к безразмерным характеристикам для величин линейной размерности используется параметр h_* , для характеристик плотности – параметр ρ_* , а для величин с размерностями механических напряжений – параметр c_* .

Подобласти вне слоя

$$V_F^{(-)} = \{(x_1, x_2) \in R^2, x_3 \in (-\infty, 0)\}, \quad V_F^{(+)} = \{(x_1, x_2) \in R^2, x_3 \in (h, \infty)\}$$

полагаются заполненными слабосжимаемой идеальной жидкостью, которая, соответственно, характеризуется параметрами плотности в невозмущенном состоянии $\rho_0^{(-)}$, $\rho_0^{(+)}$ и адиабатическими модулями сжимаемости $\kappa^{(-)}$, $\kappa^{(+)}$. В исследуемом случае рассматривается нормальное падение из глубины области $V_F^{(-)}$ на поверхность раздела $\Gamma_- = \{(x_1, x_2) \in R^2, x_3 = 0\}$ плоской монохроматической волны давления с циклической частотой ω . Комплексный потенциал падающей гидроакустической волны имеет представление $\Phi_{01}^{(-)} = \varphi_{01}^{(-)} \exp(-i(\omega t - k_F^{(-)} x_3))$, в котором $\varphi_{01}^{(-)}$ – исходный амплитудный параметр, $k_F^{(-)}$ – волновое число гидроакустической волны в среде, заполняющей область $V_F^{(-)}$. При этом в $V_F^{(-)}$ генерируется отраженная от Γ_- гидроакустическая волна с комплексным потенциалом $\Phi_{02}^{(-)} = \varphi_{02}^{(-)} \exp(-i(\omega t + k_F^{(-)} x_3))$; в слое V_L формируется поле волновых упругих колебаний с комплексными функциями перемещений вида $u_1 = u_2 = 0$, $u_3 = u_{3a}(x_3) \exp(-i\omega t)$, а на поверхности $\Gamma_+ = \{(x_1, x_2) \in R^2, x_3 = h\}$ в заполненном жидкостью полупространстве $V_F^{(+)}$ возбуждается прошедшая экран гидроакустическая волна с комплексным представлением волнового потенциала $\Phi^{(+)} = \varphi_0^{(+)} \exp(-i(\omega t - k_F^{(+)} x_3))$.

Система математических соотношений модели волновых процессов в рассматриваемой структуре включает:

– уравнения для акустических сред в областях $V_F^{(-)}$ и $V_F^{(+)}$

$$\partial_3^2 \Phi^{(\pm)} = (c_0^{(\pm)})^{-2} \partial_t^2 \Phi^{(\pm)}, \quad (1)$$

где $c_0^{(\pm)} = (\kappa^{(\pm)} \rho_0^{(\pm)})^{-1/2}$ – фазовые скорости бездисперсных гидроакустических волн;

– соотношения связи потенциалов гидроакустических волн с комплексными характеристиками векторов скоростей $\mathbf{v}^{(\pm)}$ волновых смещений частиц и давлений $P^{(\pm)}$ в соответствующих акустических средах

$$\mathbf{v}^{(\pm)} = -\text{grad } \Phi^{(\pm)}, \quad P^{(\pm)} = \rho_0^{(\pm)} \partial_t \Phi^{(\pm)}, \quad \partial_t = \partial/\partial t; \quad (2)$$

– уравнения для колебательных перемещений u_{c3} в линейно-вязкоупругом трансверсально-изотропном материале экранирующего слоя

$$c_{33} \partial_3^2 u_{c3} - \rho \partial_t^2 u_{c3} = 0; \quad (3)$$

– краевые условия на поверхностях Γ_- , Γ_+ :

$$\begin{aligned} (\sigma_{c33})_{\Gamma_-} &= (-P^{(-)})_{\Gamma_-}, \quad (\partial_t u_{c3})_{\Gamma_-} = (v_{c3}^{(-)})_{\Gamma_-}, \\ (\sigma_{c33})_{\Gamma_+} &= (-P^{(+)})_{\Gamma_+}, \quad (\partial_t u_{c3})_{\Gamma_+} = (v_{c3}^{(+)})_{\Gamma_+}. \end{aligned} \quad (4)$$

1. Алгоритм формирования нечетких оценок для показателей эффективности экранирования. Оценке на основе исследования описанной модели гидроакустического экрана подлежат соотношения давлений в падающей и отраженной, а также в падающей и возбуждаемой за экраном гидроакустических волнах при учете разбросов в значениях задаваемых физико-механических параметров.

Для получения аналитических расчетных соотношений четкой детерминистической версии модели (1)–(4) используются представления

$$\begin{aligned} \Phi^{(-)} &= \varphi_{01}^{(-)} \exp(-i(\omega t - k_F^{(-)} x_3)) + \varphi_{02}^{(-)} \exp(-i(\omega t + k_F^{(-)} x_3)), \\ \Phi^{(+)} &= \varphi_0^{(+)} \exp(-i(\omega t - k_F^{(+)} x_3)), \\ u_3 &= (u_-(\alpha/\omega) \exp(-i\alpha x_3) + u_+(\alpha/\omega) \exp(i\alpha x_3)) \exp(-i\omega t), \\ \partial_t u_3 &= (-i\alpha)(u_- \exp(-i\alpha x_3) + u_+ \exp(i\alpha x_3)) \exp(-i\omega t), \\ \sigma_{33} &= (c_{33}/\omega)((-i\alpha^2)u_- \exp((-i\alpha)x_3) + (i\alpha^2)u_+ \exp((i\alpha)x_3)) \exp(-i\omega t), \\ P^{(-)} &= (-i\omega \rho_0^{(-)})(\varphi_{01}^{(-)} \exp(-i(\omega t - k_F^{(-)} x_3)) + \varphi_{02}^{(-)} \exp(-i(\omega t + k_F^{(-)} x_3))) = \\ &= P_1^{(-)} + P_2^{(-)}, \\ P^{(+)} &= (-i\omega \rho_0^{(+)})\varphi_0^{(+)} \exp(-i(\omega t - k_F^{(+)} x_3)), \\ v_3^{(-)} &= ik_F^{(-)}(-\varphi_{01}^{(-)} \exp(-i(\omega t - k_F^{(-)} x_3)) + \varphi_{02}^{(-)} \exp(-i(\omega t + k_F^{(-)} x_3))), \\ v_3^{(+)} &= -ik_F^{(+)}\varphi_0^{(+)} \exp(-i(\omega t - k_F^{(+)} x_3)), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\alpha = (\rho \omega^2 h_*^2 c_{33}^{-1})^{1/2}, \quad k_F^{(\pm)} = \omega/c_0^{(\pm)}.$$

При использовании представлений (5) граничные условия (4) трансформируются в систему линейных алгебраических уравнений четвертого порядка $\|\Delta_{ij}\| X = |\varsigma_j|$ относительно компонентов вектора неопределенных коэффициентов $X = \{\varphi_{02}^{(-)}, u_+, u_-, \varphi_0^{(+)}\}$, для которой ненулевые элементы матрицы $\|\Delta_{ij}\|$ ($i, j = \overline{1, 4}$) и столбца правых частей $\|\varsigma_j\|$ ($j = \overline{1, 4}$) имеют вид:

$$\begin{aligned}\Delta_{11} &= -i\omega\rho_0^{(-)}, \quad \Delta_{12} = (c_{33}/\omega)(i\alpha^2), \quad \Delta_{13} = (c_{33}/\omega)(-i\alpha^2), \\ \Delta_{21} &= -ik_F^{(-)}, \quad \Delta_{22} = -i\alpha, \quad \Delta_{23} = -i\alpha, \\ \Delta_{32} &= (c_{33}/\omega)(i\alpha^2)\exp((-i\alpha)h), \quad \Delta_{33} = (c_{33}/\omega)(-i\alpha^2)\exp((i\alpha)h), \\ \Delta_{34} &= -i\omega\rho_0^{(+)}\exp(ik_F^{(+)}h), \quad \Delta_{42} = (-i\alpha)\exp(-i\alpha h), \\ \Delta_{43} &= (-i\alpha)\exp(i\alpha h), \quad \Delta_{44} = ik_F^{(+)}\exp(ik_F^{(+)}h), \\ \varsigma_1 &= i\omega\rho_0^{(-)}\varphi_{01}^{(-)}, \quad \varsigma_2 = -ik_F^{(-)}\varphi_{01}^{(-)}.\end{aligned}$$

Решения данной системы имеют аналитические представления:

$$\begin{aligned}\varphi_{02}^{(-)} &= (-\varsigma_1(\Delta_{22}(\Delta_{34}\Delta_{43} - \Delta_{33}\Delta_{44}) + \Delta_{23}(\Delta_{32}\Delta_{44} - \Delta_{34}\Delta_{42})) - \\ &\quad - \varsigma_2(\Delta_{13}(\Delta_{34}\Delta_{42} - \Delta_{32}\Delta_{44}) + \Delta_{12}(\Delta_{33}\Delta_{44} - \Delta_{34}\Delta_{43})))\vartheta^{-1}, \\ u_- &= -(\varsigma_2\Delta_{11} - \varsigma_1\Delta_{21})(\Delta_{34}\Delta_{43} - \Delta_{33}\Delta_{44})\vartheta^{-1}, \\ u_+ &= (\varsigma_2\Delta_{11} - \varsigma_1\Delta_{21})(\Delta_{34}\Delta_{42} - \Delta_{32}\Delta_{44})\vartheta^{-1}, \\ \varphi_0^{(+)} &= -(\varsigma_2\Delta_{11} - \varsigma_1\Delta_{21})(\Delta_{32}\Delta_{43} - \Delta_{33}\Delta_{42})\vartheta^{-1},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vartheta &= -\Delta_{13}\Delta_{21}\Delta_{34}\Delta_{42} + \Delta_{11}\Delta_{23}\Delta_{34}\Delta_{42} + \Delta_{12}\Delta_{21}\Delta_{34}\Delta_{43} - \Delta_{11}\Delta_{22}\Delta_{34}\Delta_{43} - \\ &\quad - \Delta_{11}\Delta_{23}\Delta_{32}\Delta_{44} + \Delta_{13}\Delta_{21}\Delta_{32}\Delta_{44} - \Delta_{12}\Delta_{21}\Delta_{33}\Delta_{44} + \Delta_{11}\Delta_{22}\Delta_{33}\Delta_{44},\end{aligned}$$

что, в свою очередь, позволяет записать аналитические выражения для характеристик эффективности экранирования в виде амплитудных соотношений давлений

$$\begin{aligned}g_1(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}\rho, h, \omega) &= \left| P_2^{(-)} / P_1^{(-)} \right| = \left| \varphi_{02}^{(-)} / \varphi_{01}^{(-)} \right|, \\ g_2(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}\rho, h, \omega) &= \left| P^{(+)} / P_1^{(-)} \right| = \left| \varphi_0^{(+)} / \varphi_{01}^{(-)} \right|,\end{aligned}\tag{6}$$

а также соотношения для их квадратов, характеризующие энергетику рассматриваемого процесса.

Построенное аналитическое решение может быть использовано для формирования оценок влияния разбросов (неконтрастности) в задании значений параметров $\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}\rho, h, \omega$ на показатели эффективности экранирования $g_j(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}\rho, h, \omega)$, $g_j^2(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}\rho, h, \omega)$.

При разработке алгоритма получения нечетких оценок для показателей эффективности экранирования g_j в рамках нечетко-множественного подхода к анализу влияния разброса в значениях геометрических и физико-механических параметров для экрана и окружающих акустических сред на амплитудные показатели $g_j(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}, \rho, h, \omega)$ вводится предположение о возможности эффективного описания неконтрастных значений параметров $\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}, \rho, h, \omega$ трапецидальными нормальными нечеткими интервалами $\tilde{\kappa}^{(\pm)}, \tilde{\rho}_0^{(\pm)}, \tilde{c}_{33}^*, \tilde{c}_{33}^{**}, \tilde{\rho}, \tilde{h}, \tilde{\omega}$, характеризуемыми кортежами реперных точек

$$\begin{aligned}\tilde{\kappa}^{(\pm)} &: (\kappa_{\pm}^{(1)}, \kappa_{\pm}^{(2)}, \kappa_{\pm}^{(3)}, \kappa_{\pm}^{(4)}), \\ \tilde{\rho}_0^{(\pm)} &: (\rho_{0\pm}^{(1)}, \rho_{0\pm}^{(2)}, \rho_{0\pm}^{(3)}, \rho_{0\pm}^{(4)}), \\ \tilde{c}_{33}^* &: (c_{33}^{(1)}, c_{33}^{(2)}, c_{33}^{(3)}, c_{33}^{(4)}), \\ \tilde{c}_{33}^{**} &: (s_{33}^{(1)}, s_{33}^{(2)}, s_{33}^{(3)}, s_{33}^{(4)}), \\ \tilde{\rho} &: (\rho_{\pm}^{(1)}, \rho_{\pm}^{(2)}, \rho_{\pm}^{(3)}, \rho_{\pm}^{(4)}), \\ \tilde{h} &: (h^{(1)}, h^{(2)}, h^{(3)}, h^{(4)}), \\ \tilde{\omega} &: (\omega^{(1)}, \omega^{(2)}, \omega^{(3)}, \omega^{(4)})\end{aligned}$$

и функциями принадлежности $\mu_{\tilde{\kappa}^{(\pm)}}$, $\mu_{\tilde{\rho}_0^{(\pm)}}$, $\mu_{\tilde{c}_{33}^*}$, $\mu_{\tilde{c}_{33}^{**}}$, $\mu_{\tilde{\rho}}$, $\mu_{\tilde{h}}$, $\mu_{\tilde{\omega}}$. Нечеткие оценки $\tilde{g}_j$ для значений g_j формируются путем расширения областей определения аргументов для функциональных зависимостей (6) на нечеткие множества с применением эвристического принципа обобщения в α -уровневой форме [8 – 13]. При этом в рассматриваемых диапазонах изменения неконтрастных, имеющих разбросы экспериментальных значений, параметров модели вводятся представления нечетко-интервальных величин $\tilde{\kappa}^{(\pm)}$, $\tilde{\rho}_0^{(\pm)}$, $\tilde{c}_{33}^*$, $\tilde{c}_{33}^{**}$, $\tilde{\rho}$, $\tilde{h}$, $\tilde{\omega}$ суперпозициями множеств α -срезов [8–13]:

$$\begin{aligned}\tilde{\kappa}^{(\pm)} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{\kappa}_{\pm\alpha}, \overline{\kappa}_{\pm\alpha}) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1-\alpha)\kappa_{\pm}^{(1)} + \alpha\kappa_{\pm}^{(2)}, \alpha\kappa_{\pm}^{(3)} + (1-\alpha)\kappa_{\pm}^{(4)}), \\ \tilde{\rho}_0^{(\pm)} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{\rho}_{\pm\alpha}, \overline{\rho}_{\pm\alpha}) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1-\alpha)\rho_{\pm}^{(1)} + \alpha\rho_{\pm}^{(2)}, \alpha\rho_{\pm}^{(3)} + (1-\alpha)\rho_{\pm}^{(4)}), \\ \tilde{c}_{33}^* &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{c}_{33\alpha}, \overline{c}_{33\alpha}) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1-\alpha)c_{33}^{(1)} + \alpha c_{33}^{(2)}, \alpha c_{33}^{(3)} + (1-\alpha)c_{33}^{(4)}), \\ \tilde{c}_{33}^{**} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{s}_{33\alpha}, \overline{s}_{33\alpha}) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1-\alpha)s_{33}^{(1)} + \alpha s_{33}^{(2)}, \alpha s_{33}^{(3)} + (1-\alpha)s_{33}^{(4)}), \\ \tilde{\rho} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{\rho}_{\alpha}, \overline{\rho}_{\alpha}) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1-\alpha)\rho^{(1)} + \alpha\rho^{(2)}, \alpha\rho^{(3)} + (1-\alpha)\rho^{(4)}),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{h} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{h}_\alpha, \overline{h}_\alpha) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1-\alpha)h^{(1)} + \alpha h^{(2)}, \alpha h^{(3)} + (1-\alpha)h^{(4)}), \\ \tilde{\omega} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{\omega}_\alpha, \overline{\omega}_\alpha) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} ((1-\alpha)\omega^{(1)} + \alpha\omega^{(2)}, \alpha\omega^{(3)} + (1-\alpha)\omega^{(4)}).\end{aligned}$$

Искомые нечеткие оценки $\tilde{g}_j$ также формируются в виде суперпозиций по множествам α -уровня

$$\tilde{g}_j = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} (\underline{g}_{j\alpha}, \overline{g}_{j\alpha}).$$

При этом характеристики $\underline{g}_{j\alpha}$, $\overline{g}_{j\alpha}$ имеют представления

$$\begin{aligned}\underline{g}_{j\alpha} &= \inf_{\substack{\kappa^{(\pm)} \in (\underline{\kappa}_{\pm\alpha}, \overline{\kappa}_{\pm\alpha}) \\ \rho_0^{(\pm)} \in (\underline{\rho}_0 \pm \alpha, \overline{\rho}_0 \pm \alpha) \\ c_{33}^* \in (\underline{c}_{33\alpha}, \overline{c}_{33\alpha}) \\ c_{33}^{**} \in (\underline{s}_{33\alpha}, \overline{s}_{33\alpha}) \\ \rho \in (\underline{\rho}_\alpha, \overline{\rho}_\alpha) \\ h \in (\underline{h}_\alpha, \overline{h}_\alpha) \\ \omega \in (\underline{\omega}_\alpha, \overline{\omega}_\alpha)}} g_j(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}, \rho, h, \omega), \\ \overline{g}_{j\alpha} &= \sup_{\substack{\kappa^{(\pm)} \in (\underline{\kappa}_{\pm\alpha}, \overline{\kappa}_{\pm\alpha}) \\ \rho_0^{(\pm)} \in (\underline{\rho}_0 \pm \alpha, \overline{\rho}_0 \pm \alpha) \\ c_{33}^* \in (\underline{c}_{33\alpha}, \overline{c}_{33\alpha}) \\ c_{33}^{**} \in (\underline{s}_{33\alpha}, \overline{s}_{33\alpha}) \\ \rho \in (\underline{\rho}_\alpha, \overline{\rho}_\alpha) \\ h \in (\underline{h}_\alpha, \overline{h}_\alpha) \\ \omega \in (\underline{\omega}_\alpha, \overline{\omega}_\alpha)}} g_j(\kappa^{(\pm)}, \rho_0^{(\pm)}, c_{33}^*, c_{33}^{**}, \rho, h, \omega).\end{aligned}\tag{7}$$

Полученные представления (7) используются в вычислительном алгоритме с заданием схем варьирования значений $\kappa^{(\pm)}$, $\rho_0^{(\pm)}$, c_{33}^* , c_{33}^{**} , ρ , h , ω в соответствующих пределах на каждом из α -срезов, а число срезов выбирается из соображений достижения необходимой точности вычислений в описании функций принадлежности для нечетко-множественных оценок $\tilde{g}_j$. При реализации конкретных вариантов представленного алгоритма из множеств варьируемых параметров в соотношениях (7) исключаются те, которые полагаются заданными контрастно.

2. Реализация алгоритма оценивания в случае нечеткости параметров толщины и комплексного модуля упругости. В качестве примера реализации описываемой методики представлено получение нечетких оценок для характеристик $\tilde{g}_j$ в рамках предположения о том, что существенно неконтрастными параметрами модели являются нормированные величины $c_{33}^* \cdot 10^{-10} [Pa]$, $c_{33}^{**} \cdot 10^{-10} [Pa]$ и $h \cdot 10^{-2} [m]$, рассматриваемые как нечетко-интервальные экзогенные параметры

$$\tilde{h} : (0.96, 0.99, 1.01, 1.04); \quad \tilde{c}_{33}^* : (0.75, 0.79, 0.84, 0.88);$$

$$\tilde{c}_{33}^{**} : (0.132, 0.139, 0.148, 0.155)$$

с функциями принадлежности, представленными на рис. 1 – 3.

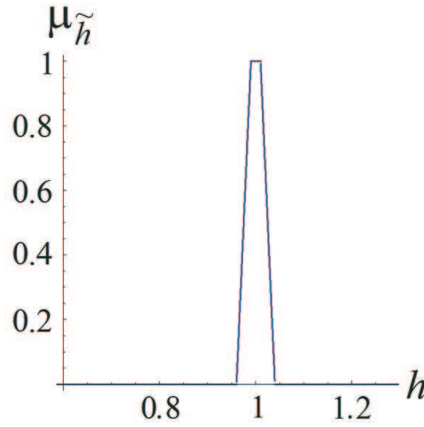


Рис. 1. Функция принадлежности для нечетко-множественной характеристики $\tilde{h}$.

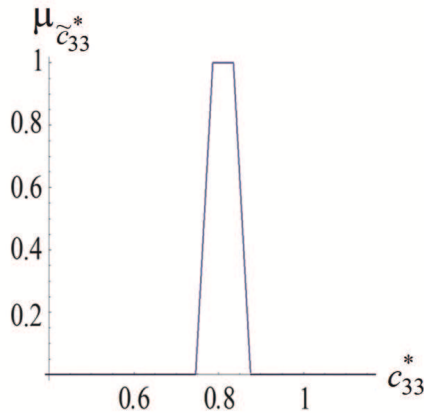


Рис. 2. Функция принадлежности для нечетко-множественной характеристики $\tilde{c}_{33}^*$.

Остальные параметры полагаются в достаточной мере контрастными величинами и имеют при $c_* = 10^{10}[Pa]$, $h_* = 10^{-2}[m]$, $\rho_* = 10^3[kg/m^3]$ следующие приведенные значения: $\kappa^{(-)} = \kappa^{(+)} = 2.993$, $\rho_0^{(-)} = \rho_0^{(+)} = 1.0$, $\rho = 2.0$, $\omega = 1.0$.

Результаты расчета функций принадлежности для нечетко-множественных эндогенных характеристик, характеризующих относительные амплитудные уровни отраженной и прошедшей экран гидроакустических волн и полученных с использованием соответствующей версии соотношений (7), приве-

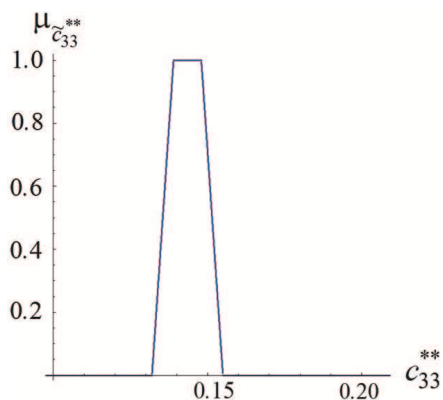


Рис. 3. Функция принадлежности для нечетко-множественной характеристики $\tilde{c}_{33}^{**}$.

дены на рис. 4, 5. Соответствующие результаты расчетов для нечетких квадратичных характеристик указанных волновых движений даны на рис. 6, 7.

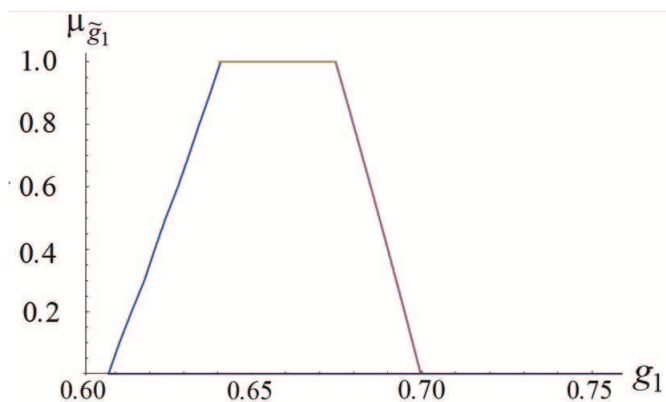


Рис. 4. Функция принадлежности для нечетко-множественной характеристики $\tilde{g}_1$.

Таким образом, при расчетах распределений $\tilde{g}_j, \tilde{g}_j^2$, приводимых на рис. 4, 5 и рис. 6, 7, использовалось разбиение на α -срезы с равномерным шагом $\Delta_\alpha = 0.01$ варьирования параметра α . Данные распределения описывают характеризующую нормированными параметрами $0 \leq \mu_{\tilde{g}_j}, \mu_{\tilde{g}_j^2} \leq 1$ степень уверенности в том, что значения эндогенных характеристик рассматриваемой модели g_j, g_j^2 при учете задаваемых разбросов экзогенных параметров будут изменяться в пределах интервалов $(\underline{g}_{j\alpha}, \bar{g}_{j\alpha})$, $(\underline{g}_{j\alpha}^2, \bar{g}_{j\alpha}^2)$ на соответствующих α -уровнях уверенности.

Полученные оценки позволяют, в частности, сделать выводы о диапазонах наиболее достоверных значений относительных амплитудных показате-

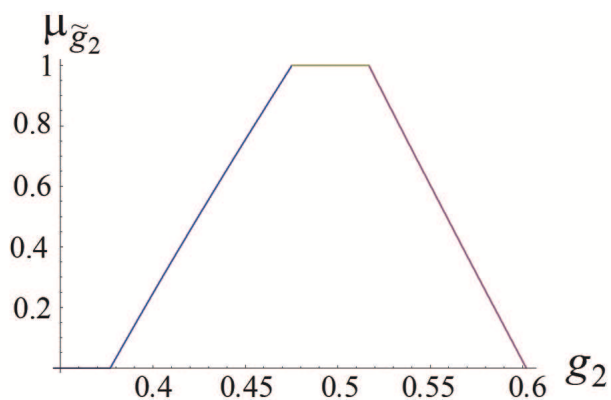


Рис. 5. Функция принадлежности для нечетко-множественной характеристики $\tilde{g}_2$.

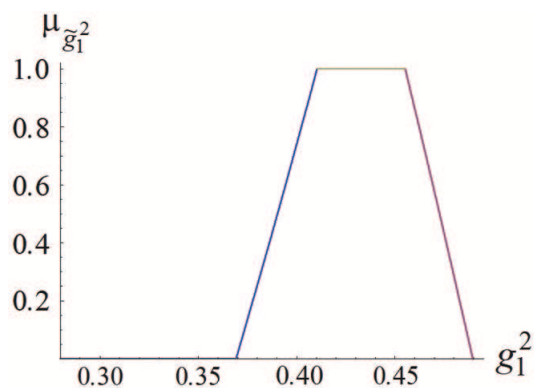


Рис. 6. Функция принадлежности для нечетко-множественной характеристики $\tilde{g}_1^2$.

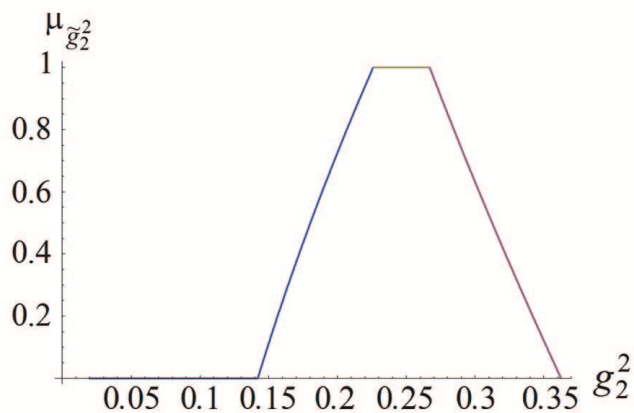


Рис. 7. Функция принадлежности для нечетко-множественной характеристики $\tilde{g}_2^2$.

лей отраженных и прошедших экран сигналов, а также о границах предельно возможных разбросов для соответствующих характеристик, и, тем самым, повысить достоверность расчетных результатов предпроектного моделирования конструкционных элементов систем гидроакустического экранирования.

Выводы. В результате проведенных исследований разработан и апробирован теоретический алгоритм анализа факторов неопределенности в модели гидроакустического экрана в виде функционально-градиентного вязкоупругого трансверсально-изотропного деформируемого слоя, контактирующего по граням с массивами идеальной слабосжимаемой жидкости. Представляемая нечетко-множественная методика ориентирована на учет разбросов для значений неконтрастных экспериментальных параметров геометрических и физико-механических свойств экрана и разделяемых экраном жидкостей. В основу синтезированного алгоритма положено использование аналитических результатов исследования четкого детерминированного варианта рассматриваемой модели и последующее применение альфа-уровневой модификации эвристического принципа обобщения для перехода к нечетким представлениям экзогенных параметров.

1. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай Системы гидроакустического экранирования для подводных транспортных средств. – Воронеж: Науч. книга, 2017. – 252 с.
2. Глазанов В.Е. Акустические экраны для подводных преобразователей и антенн. Теория и расчет. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ-“ЛЭТ”, 2013. – 175 с.
3. Ларин В.Б. Статистические задачи виброзащиты. – Киев: Наук. думка, 1974. – 128 с.
4. Ломакин В.А. Статистические задачи механики твердых деформируемых тел. – М.: Наука, 1970. – 139 с.
5. Алтухин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. – Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2000. – 352 с.
6. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2004. – 397 с.
7. Павлов А.Н., Соколов Б.В. Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие. – СПб.: ГУАП, 2006. – 72 с.
8. Ротштейн А.П., Штовба С.Д., Козачко А.Н. Моделирование и оптимизация надежности многомерных алгоритмических процессов – Винница: УНІВЕРСУМ, 2007. – 215 с.
9. Сторожев В.И., Сторожев С.В. Нечетко-множественные оценки в моделях теории объемных волн деформаций // Механика твердого тела. – 2015. – Вып. 45. – С. 103–111.
10. Сторожев С.В., Номбре С.Б. Нечеткие оценки для характеристик нелинейных вторых гармоник объемных волн сдвига в трансверсально-изотропной упругой среде // Вестн. Донецкого национального ун-та. Сер. А. Естеств. науки. – 2015. – № 2. – С. 38–43.
11. Сторожев С.В. Нечеткие оценки для характеристик нормальных волн деформаций в поперечно-анизотропном упругом слое // Современные проблемы механики сплошной среды: тр. XVIII Международ. конф. (Ростов-на-Дону, 7 – 10 ноября 2016 г.): в 2 т. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного фед. ун-та, 2016. – Т. 2. – С. 200–204.
12. Storozhev S. V. Uncertainty in the models of the theory of volume elastic waves through the use of the theory of fuzzy sets // Modeling and information technologies: selected papers of

the international scientific school "Paradigma"(Summer-2015, Varna, Bulgaria) / Compiling editor dr. sc., prof. O.Ja. Kravets. – CityplaceYelm, StateWA, country-regionUSA: Science Book Publ. House, 2015. – P. 45–52.

13. *Storozhev S.V.* Fuzzy Evaluations for Kinematic Characteristics of Nonlinear Second Harmonics of Shear Waves in Transversely Isotropic Medium // Nonlinear Dynamics – 2016. Proc. of 5-th International Conference (September 27-30, 2016) / PlaceNameNational PlaceNameTechnical PlaceTypeUniversity «Kharkov Polytechnic Institute» at al. - CityplaceKharkov, 2016. – P. 509–514.
14. *Аннин Б.Д., Остросаблин Н.И.* Анизотропия упругих свойств материалов // Прикл. механика и техн. физика. – 2008. – **49**, № 6. – С. 131–151.
15. *Космодамианский А.С., Сторожев В.И.* Динамические задачи теории упругости для анизотропных сред. – Киев: Наукова думка, 1985. – 176 с.

V.E. Bolnokin, E.I. Mitrushkin, Duong Minh Hai, S.V. Storozhev

Fuzzy model of interaction of hydroacoustic waves with flat viscoelastic transversal-isotropic screen

A theoretical algorithm for the analysis of uncertainty factors in the model of a hydroacoustic screen in the form of a viscoelastic transversally isotropic deformable layer that contacts along the faces with arrays of an ideal weakly compressible liquid is developed and tested. The fuzzy-set technique for allowance of uncertainties for the values of non-contrast experimental parameters of the geometric and physico-mechanical properties of the screen and the liquids separated by the screen is presented. The synthesized algorithm is based on the use of analytical results of a clear deterministic version of the model and the application of the alpha-level modification of the heuristic generalization principle to the transition to fuzzy representations of exogenous parameters.

Keywords: *models of flat hydroacoustic screens, transversely isotropic viscoelastic materials, uncertainties of physico-mechanical and geometric parameters, fuzzy-set estimation of characteristics of screenings, application of the modified heuristic generalization principle, analysis of the case of exogenous parameters in form of fuzzy interval.*

Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва;
ГОУ ВПО “Донбас. национальная акад. строительства и
архитектуры”, Макеевка
stvistvi@mail.ru

Получено 23.05.18