

ОТРАЖЕНИЕ УПРУГОЙ ВОЛНЫ ОТ ПОВЕРХНОСТИ
СОПРИКОСНОВЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПОЛОСЫ И
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Агаян К.Л., Атоян Л.А., Саакян С.Л.

Ключевые слова: упруго-спиновые волны, диэлектрическое полупространство, ферромагнитный слой, магнитный экран.

Aghayan K.L., Atoyan L.A., Sahakyan S.L.

Reflection of an elastic wave from the contact surface of a ferromagnetic layer and a dielectric half-space

Key words: elastic-spin waves, dielectric half-space, ferromagnetic layer, magnetic screen.

The paper solves the problem of reflection and refraction of an elastic wave from the contact surface of a dielectric half-space and a ferromagnetic layer with a magnetic screen. In addition, the dependences of the amplitudes of these waves on the frequency of the incident wave and the intensity of the external magnetic field in which the structure under consideration is located are numerically investigated.

Աղայան Կ.Լ., Աթոյան Լ.Ա., Սահակյան Ս.Լ.

Դիֆրակտիկ կիսատարածության և ֆերոմագնիսական շերտի շփման մակերևույթից առաձգական ալիքի անդրադարձումը

Բանալի բառեր՝ առաձգա-սպինային ալիքներ, դիֆրակտիկ կիսատարածություն, ֆերոմագնիսական շերտ, մագնիսական էկրան:

Հոդվածում լուծված է առաձգական ալիքի անդրադարձման և բեկման խնդիրը դիֆրակտիկ կիսատարածության և մագնիսական էկրանով ֆերոմագնիսական շերտի շփման մակերեսից: Բացի այդ, թվային կերպով հետազոտվել են այդ ալիքների ամպլիտուդների կախվածությունը անկման ալիքի հաճախականությունից և արտաքին մագնիսական դաշտի ինտենսիվությունից, որում գտնվում է դիտարկվող կառուցվածքը:

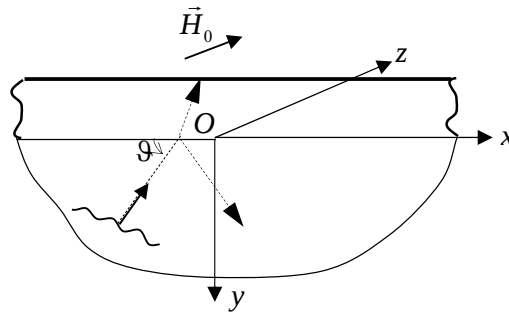
В работе решается задача отражения и преломления упругой волны от поверхности контакта диэлектрического полупространства и ферромагнитной полосы с магнитным экраном. Кроме этого численно исследованы зависимости амплитуд этих волн от частоты падающей волны и интенсивности внешнего магнитного поля, в котором находится рассматриваемая конструкция.

1. Введение. Как известно [1-3,8,10] в магнитоупорядоченных средах на определенных частотах возникают взаимосвязанные (гибридные) магнитоупругие волны (МУВ), или иначе упруго-спиновые волны (УСВ). Впервые описание движения намагниченности в магнитоупорядоченных средах было дано Ф. Блохом в 1930 г., им же был введен термин “спиновые волны”. Взаимодействие спиновых и упругих волн происходит на ультразвуковых и гиперзвуковых частотах $\approx 10^9$ Гц, верхняя граница для МУВ равна $5 \cdot 10^{10}$ Гц. В качестве ферромагнитного материала используется железо-иттриевый гранат (ЖИГ), который обладает низкими потерями при прохождении как спиновых, так и МУВ.

В предлагаемой работе рассматривается конструкция, состоящая из диэлектрического упругого полупространства (подложки) и примыкающего к нему ферромагнитного слоя с магнитным экраном, закрепленным на его внешней поверхности. Вопросы распространения МУВ в различных ферромагнитных конструкциях типа магнит/немагнит, магнит/ магнит и пр. рассмотрены во многих работах [1-12]. Предполагается, что вся конструкция находится во внешнем, постоянном магнитном поле $\vec{H}_0(0,0,H_0)$, направленном перпендикулярно распространению МУВ.

Решается задача отражения и преломления упругой, сдвиговой волны, падающей изнутри из бесконечности диэлектрического полупространства на его поверхность соприкосновения с магнитным слоем. Найдены волновые поля в конструкции, кроме того проведено численное исследование зависимостей амплитуд отраженной и преломленной волн от частоты падающей волны и интенсивности внешнего магнитного поля. Приведены соответствующие графики зависимостей.

2. Постановка задачи. Рассматривается упругое диэлектрическое полупространство в декартовой системе координат $Oxyz$, занимающее область $(-\infty < x, z < \infty; y > 0)$, и примыкающий к нему ферромагнитный слой с магнитным экраном, закрепленным на поверхности слоя $y = -h$. Полагается, что вся конструкция находится во внешнем, магнитном поле $\vec{H}_0(0,0,H_0)$, направленном по оси Oz . Далее полагаем, что на поверхность соприкосновения $y = 0$ изнутри полупространства из бесконечности под углом ϑ падает упругая сдвиговая волна, которая преломляясь на границе соприкосновения, возбуждает упруго-спиновую волну в ферромагнитной полосе (Фиг. 1).



Фиг. 1

В дальнейшем, все величины, относящиеся к полупространству, будут отмечены индексом 1, а относящиеся к ферромагнитному слою - индексом 2.

Упругое волновое поле в подложке определяется следующим уравнением [13]:

$$\vec{w}_1 = S_1^2 \Delta w_1, \quad (1)$$

где $w_1(x, y, t) = w_{1p}(x, y, t) + w_{1o}(x, y, t)$, $w_{1p}(x, y, t)$, $w_{1o}(x, y, t)$ - падающая и отраженная упругие волны, $S_1^2 = G_1 / \rho_1$ - скорость упругой поперечной волны, G_1 - модуль сдвига, ρ_1 - плотность материала подложки, $\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$.

Магнитостатическое поле в диэлектрическом полупространстве характеризуется магнитным потенциалом $\varphi_1(x, y, t)$, который определяется уравнением [6, 14]:

$$\Delta \varphi_1 = 0. \quad (2)$$

Система уравнений, характеризующая упруго-спиновую волну в ферромагнитном слое, имеет вид [1-3,5]:

$$\begin{aligned} \ddot{w}_2 &= S_2^2 \Delta w_2 + \rho_2 B(\mu_{2x} + v_{2y}), \\ \dot{\mu}_2 &= \omega_M (\varphi_{2y} + \hat{b} v_2 + B w_{2y}), \\ \dot{v}_2 &= -\omega_M (\varphi_{2x} + \hat{b} \mu_2 + B w_{2x}), \\ \Delta \varphi_2 &= (\mu_{2x} + v_{2y}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $w_2(x, y, t)$ - механическое перемещение, $\bar{\mu}_2(\mu_2, v_2, t)$ - намагниченность ферромагнетика, $S_2^2 = G_2 / \rho_2$ - скорость упругой поперечной волны в слое, $\omega_M = \gamma_0 M_0$, γ_0 - гиромагнитное отношение, $M_0 = \rho_2 \mu_0$ - объемная плотность намагниченности насыщения, ρ_2 - плотность ферромагнетика, μ_0 - массовая плотность намагниченности насыщения, $B = f \mu_0$, $\hat{b} = b + H_0 / M_0$; b , f - магнитоупругие коэффициенты связи, H_0 - внешнее постоянное магнитное поле, φ_2 - магнитостатический потенциал магнитного слоя.

Граничные и контактные условия представляются следующим образом:

$$\begin{aligned}
w_1(x, y)|_{y=+0} &= w_2(x, y)|_{y=-0}, \\
\left[G_1 \frac{\partial w_1(x, y)}{\partial y} \right]_{y=+0} &= \left[G_2 \frac{\partial w_2(x, y)}{\partial y} + \rho_2 B v_2 \right]_{y=-0}, \\
\varphi_1(x, y)|_{y=+0} &= \varphi_2(x, y)|_{y=-0}, \\
\left[\frac{\partial \varphi_1(x, y)}{\partial y} \right]_{y=+0} &= \left[\frac{\partial \varphi_2(x, y)}{\partial y} - \rho_2 v_2 \right]_{y=-0}, \\
w_2(x, y)|_{y=-h} &= 0, \\
\left[\frac{\partial \varphi_2(x, y)}{\partial y} - \rho_2 v_2 \right]_{y=-h} &= 0.
\end{aligned} \tag{4}$$

Выше временной фактор опущен. Первые два соотношения (4) - это условия непрерывности перемещений и напряжений, третье и четвертое условия - это условия равенства магнитных потенциалов и индукций, пятое - это условие закрепления магнитного экрана и слоя, шестое - равенство нулю магнитной индукции на магнитном экране.

Как следует из уравнения (1) падающая и отраженная упругие сдвиговые волны в подложке определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
w_{1p} &= W_{1p} e^{i(px-qt)} e^{-i\omega t}, \\
w_{1o} &= W_{1o} e^{i(px+qt)} e^{-i\omega t},
\end{aligned} \tag{5}$$

где W_{1p}, W_{1o} - постоянные.

Магнитостатический потенциал в подложке, как следует из уравнения (2), представляется следующим выражением:

$$\varphi_1(x, y, t) = \Phi_1 e^{-|p|y} e^{ipx} e^{-i\omega t}, \tag{6}$$

где Φ_1 - постоянная.

Ставится задача определения волновых полей отраженных и преломленных волн в конструкции, а также задача определения зависимостей амплитуд этих волн от безразмерной частоты $\Omega = \omega / \omega_M$ и нормированной интенсивности внешнего магнитного поля $H = H_0 / M_0$.

3. Решение задачи. В ранее опубликованной нашей работе [11] были определены образы Фурье функций $W_2(x, y), \Phi_2(x, y), M_2(x, y), N_2(x, y)$, которые характеризуют амплитуды парциальных волн преломленной гибридной волны в ферромагнитном слое:

$$(w_2, \phi_2, \mu_2, \nu_2) = (W_2, \Phi_2, M_2, N_2)e^{-i\omega t}. \quad (7)$$

Образы Фурье амплитудных функций имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{W}_2(\sigma, y) &= Q_1 e^{-\gamma y} + Q_2 e^{\gamma y}, \\ \bar{\Phi}_2(\sigma, y) &= R_1 e^{-\sigma y} + R_2 e^{\sigma y} + \tau_0 (Q_1 e^{-\gamma y} + Q_2 e^{\gamma y}), \\ \bar{M}_2(\sigma, y) &= C_1 \bar{W}_{2y} + i\sigma C_2 \bar{W}_2 + C_3 \bar{\Phi}_{2y} + i\sigma C_4 \bar{\Phi}_2, \\ \bar{N}_2(\sigma, y) &= i\sigma C_1 \bar{W}_2 - C_2 \bar{W}_{2y} + i\sigma C_3 \bar{\Phi}_2 - C_4 \bar{\Phi}_{2y}. \end{aligned} \quad (8)$$

где Q_1, Q_2, R_1, R_2 - постоянные, σ - параметр Фурье,

$$\begin{aligned} \bar{\Omega}_M &= \hat{b}^2 - \Omega^2; \quad \tilde{\Omega}_{SV}^2 = \Omega_{SV}^2 - \rho_2 \hat{b} B S_2^{-2}; \quad \Omega_{SV}^2 = \hat{b}^2 + \hat{b}; \quad \tau_0 = \frac{\hat{b} B}{\Omega_{SV}^2 - \Omega^2}; \\ C_1 &= \frac{B \Omega_M}{\Omega_M}; \quad C_2 = \frac{\hat{b} B}{\Omega_M}; \quad C_3 = \frac{\Omega_M}{\Omega_M}; \quad C_4 = \frac{\hat{b}}{\Omega_M}; \quad \Omega = \omega / \omega_M; \\ \Omega_M &= -i\Omega, \quad \gamma^2 = \sigma^2 - r^2; \quad r^2 = \frac{\omega^2 (\Omega^2 - \Omega_{SV}^2)}{S^2 (\Omega^2 - \tilde{\Omega}_{SV}^2)}; \end{aligned}$$

Далее сделаем ПФ функций (5), (6) и граничных контактных условий (4), получим:

$$\begin{aligned} \bar{w}_1(\sigma, y) &= 2\pi(W_{1p} e^{-iqy} + W_{10} e^{iqy})\delta(\sigma + p); \\ \bar{\phi}_1(\sigma, y) &= 2\pi\Phi_1 W_{1p} e^{-|p|y}\delta(\sigma + p). \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{w}_1|_{+0} &= \bar{w}_2|_{-0}, \quad G_1 \bar{w}_{1y}|_{+0} = [G_2 \bar{w}_{2y} + \rho_2 B \bar{N}_2]_{-0}, \quad \Phi_1|_{+0} = \bar{\Phi}_2|_{-0}, \\ \bar{\phi}_{1y}|_{+0} &= [\bar{\phi}_{2y} - \rho_2 \bar{N}_2]_{-0}, \quad \bar{w}_2|_{y=-h} = 0, \quad [\bar{\phi}_{2y} - \rho_2 \bar{N}_2]_{-h} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив образы Фурье общих решений (8), (9) в граничные и контактные условия (10), получим алгебраическую систему для определения неизвестных: $Q_1, Q_2, R_1, R_2, \Phi_1, W_{10}$:

$$\begin{aligned}
2\pi(W_{1p} + W_{1o})\delta(\sigma + p) &= Q_1 + Q_2, \\
2\pi iqG_1(W_{1o} - W_{1p})\delta(\sigma + p) + \gamma G_2(Q_2 - Q_1) + \\
+ \rho_2 B[i\sigma C_1(Q_1 + Q_2) - \gamma C_2(Q_2 - Q_1) + i\sigma C_3(R_1 + R_2 + \\
+ \tau_0(Q_1 + Q_2)) - C_4(\sigma(R_2 - R_1) + \gamma\tau_0(Q_2 - Q_1))] &= 0, \\
2\pi\Phi_1\delta(\sigma + p) &= R_1 + R_2 + \tau_0(Q_1 + Q_2), \\
2\pi\Phi_1 |p| \delta(\sigma + p) + \sigma(R_2 - R_1) + \gamma\tau_0(Q_2 - Q_1) - \\
- \rho_2[i\sigma C_1(Q_1 + Q_2) - \gamma C_2(Q_2 - Q_1) + i\sigma C_3(R_1 + R_2 + \\
+ \tau_0(Q_1 + Q_2)) - C_4(\sigma(R_2 - R_1) + \gamma\tau_0(Q_2 - Q_1))] &= 0, \\
Q_1 e^{\gamma h} + Q_2 e^{-\gamma h} &= 0, .
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
\sigma(R_2 e^{-\sigma h} - R_1 e^{\sigma h}) + \gamma\tau_0(-Q_1 e^{\gamma h} + Q_2 e^{-\gamma h}) - \rho_2[i\sigma C_1(Q_1 e^{\gamma h} + Q_2 e^{-\gamma h}) - \\
- \gamma C_2(Q_2 e^{-\gamma h} - Q_1 e^{\gamma h}) + i\sigma C_3(R_1 e^{\sigma h} + R_2 e^{-\sigma h} + \tau_0(Q_1 e^{\gamma h} + Q_2 e^{-\gamma h})) - \\
- C_4(\sigma(R_2 e^{-\sigma h} - R_1 e^{\sigma h}) + \gamma\tau_0(Q_2 e^{-\gamma h} - Q_1 e^{\gamma h}))] &= 0
\end{aligned}$$

Решение системы (11) приводит нас к выражениям:

$$\begin{aligned}
\Phi_1 &= \frac{1}{2\pi}[\eta_1 + \eta_2 + \tau_0(\eta_3 + \eta_4)]; \quad R_1 = \eta_1 \delta(\sigma + p); \\
R_2 &= \eta_2 \delta(\sigma + p); \quad Q_1 = \eta_4 \delta(\sigma + p); \\
Q_2 &= \eta_3 \delta(\sigma + p); \quad W_{1o} = \frac{L(t_{11}t_9 - t_{12}t_8)}{2\pi\Delta} - W_{1p};
\end{aligned} \tag{12}$$

Выше введены обозначения:

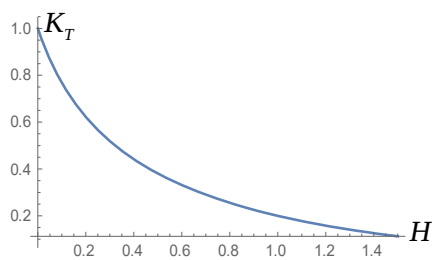
$$\begin{aligned}
L &= 4iq\pi G_1 W_{1p}; \quad t_1 = \frac{e^{2\gamma h} + 1}{e^{2\gamma h} - 1}; \quad t_2 = \frac{e^{2\gamma h}}{1 - e^{2\gamma h}}; \quad t_3 = \frac{1}{1 - e^{2\gamma h}}; \\
t_4 &= iqG_1 - \gamma t_1 G_2 + \rho_2 B(i\sigma C_1 + C_2 \gamma t_1 - i\sigma C_3 \tau_0 + \gamma C_4 \tau_0 t_1); \\
t_5 &= -\rho_2 B\sigma(iC_3 + C_4); \quad t_6 = \rho_2 B\sigma(-iC_3 + C_4); \\
t_7 &= \gamma(t_2 e^{-\gamma h} + t_3 e^{\gamma h})(\rho_2 C_2 - \rho_2 \tau_0 - \tau_0) - (t_3 e^{\gamma h} - t_2 e^{-\gamma h})(\tau_0 C_3 + C_1)i\sigma\rho_2; \\
t_8 &= -\sigma e^{\sigma h}(1 + i\rho_2 C_3 + \rho_2 C_4); \quad t_9 = \sigma e^{-\sigma h}(1 - i\rho_2 C_3 + \rho_2 C_4); \\
t_{10} &= \tau_0(|p| + \gamma t_1) + \rho_2(C_2 \gamma t_1 - i\sigma C_1 - i\sigma C_3 \tau_0 + \gamma C_4 \tau_0 t_1); \\
t_{11} &= |p| - \sigma(1 + i\rho_2 C_3 + \rho_2 C_4); \quad t_{12} = |p| + \sigma(1 - i\rho_2 C_3 - \rho_2 C_4);
\end{aligned}$$

$$\eta_1 = \frac{L(t_{10}t_9 - t_{12}t_7)}{\Delta}; \quad \eta_2 = \frac{L(t_{10}t_8 - t_{11}t_7)}{\Delta}; \quad \eta_3 = -2\pi t_2(W_{1p} + W_{1o});$$

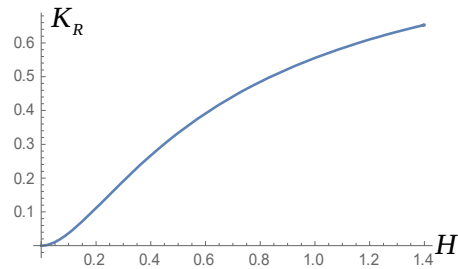
$$\eta_4 = 2\pi t_3(W_{1p} + W_{1o}); \quad \Delta = \begin{vmatrix} t_4 & t_5 & t_6 \\ t_{10} & t_{11} & t_{12} \\ t_7 & t_8 & t_9 \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Подставив найденные выражения (12) в (8), (9), мы определим Фурье-трансформанты искоемых решений. Далее, сделав обратное ПФ, получим вид функций, определяющих волновые поля в рассматриваемой конструкции:

$$\begin{aligned} w_1(x, y, t) &= 2\pi(W_{1p}e^{-iqy} + W_{1o}e^{iqy})e^{i(px-\omega t)}; \\ \varphi_1(x, y, t) &= -2\pi\Phi_1e^{-|p|y}e^{i(px-\omega t)}; \\ w_2(x, y, t) &= (\eta_4e^{-\gamma y} + \eta_3e^{\gamma y})e^{i(px-\omega t)}; \\ \varphi_2(x, y, t) &= [\eta_1e^{-\sigma y} + \eta_2e^{\sigma y} + \tau_0(\eta_4e^{-\gamma y} + \eta_3e^{\gamma y})]e^{i(px-\omega t)}; \\ \mu_2(x, y, t) &= \{C_1(-\gamma\eta_4e^{-\gamma y} + \gamma\eta_3e^{\gamma y}) + i\sigma C_2(\eta_4e^{-\gamma y} + \eta_3e^{\gamma y}) + \\ &+ C_3[-\sigma(\eta_1e^{-\sigma y} - \eta_2e^{\sigma y}) + \tau_0\gamma(-\eta_4e^{-\gamma y} + \eta_3e^{\gamma y})] + \\ &+ i\sigma C_4[\eta_1e^{-\sigma y} + \eta_2e^{\sigma y} + \tau_0(\eta_4e^{-\gamma y} + \eta_3e^{\gamma y})]\}e^{i(px-\omega t)}; \\ v_2(x, y, t) &= i\sigma C_1(\eta_4e^{-\gamma y} + \eta_3e^{\gamma y}) - C_2\gamma(-\eta_4e^{-\gamma y} + \eta_3e^{\gamma y}) + \\ &+ i\sigma C_3[\eta_1e^{-\sigma y} + \eta_2e^{\sigma y} + \tau_0(\eta_4e^{-\gamma y} + \eta_3e^{\gamma y})] - \\ &- C_4[-\sigma\eta_1e^{-\sigma y} + \sigma\eta_2e^{\sigma y} + \tau_0\gamma(-\eta_4e^{-\gamma y} + \eta_3e^{\gamma y})]\}e^{i(px-\omega t)}. \end{aligned} \quad \# \quad (14)$$



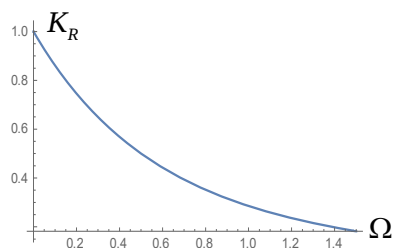
Фиг. 2



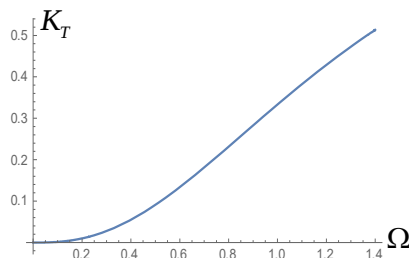
Фиг. 3

В (14) необходимо все “ σ ” заменить на “ $-p$ ”. Таким образом, волновые поля в конструкции найдены. Перейдем к численному анализу зависимостей амплитуд

упругих и упруго-спиновых отраженных и преломленных волн от безразмерной частоты $\Omega = \omega / \omega_M$ падающей волны и интенсивности нормированного внешнего поля $H = H_0 / M_0$. Результаты анализа представлены на фигурах 2-5. Введены обозначения: $K_T = W_2 / W_{1p}$, $K_R = W_{1o} / W_{1p}$.



Фиг. 4



Фиг. 5

4. Заключение. Решена задача отражения и преломления упругой, сдвиговой волны в конструкции, где к упругому диэлектрическому полупространству примыкает ферромагнитная полоса с закрепленным на ее внешней поверхности магнитным экраном.

Определены волновые поля в рассматриваемой конструкции, а также проведено численное исследование зависимостей коэффициентов отражения и преломления от частоты падающей волны и интенсивности внешнего поля. В результате исследования выявлена сильная зависимость коэффициентов отражения и преломления от частоты падающей упругой волны и интенсивности внешнего магнитного поля. Это дает основание заключить, что путем изменения частоты и интенсивности внешнего магнитного поля можно регулировать перераспределение энергии падающей волны между отраженной и преломленной волнами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Можен Ж. Механика электромагнитных сплошных сред. М.: Мир, 1991, 560 стр.
2. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и ферромагнетиках. Москва: Наука, 1973, 591 с..
3. Ахизер А.И., Барьяхтар В.Г., Пелетминский С.В. Спиновые волны. М.: Наука, 1967. 368 с.
4. Даноян З.Н., Атоян Л.А., Саакян С.Л., Даноян Н.З. “Квазипериодические спиновые волны в одномерной ферромагнитной среде”. Proceed. Of 8-th Int. Conf. “The problems of dynamics of interaction of deformable media”, 22-25 Sept., 2014, Goris- Stepanakert.p.205-212.

5. Hasanyan D., Batra R. Antiplane Shear Waves in Two Contacting Ferromagnetic Half Spaces. J. Elast. (2011) 103, p.189-203.
6. Багдасарян Г.Е., Даноян З.Р., Атоян Л.А., Манукян Г.А. Отражение спиновых волн от границы ферромагнитного полупространства. Тр. VI межд. конф. сентябрь, 2008, Горис–Степанакерт, с.115-125.
7. Даноян З.Н., Агаян К.Л., Атоян Л.А. Упруго–спиновые волны в слоистой среде ферромагнит–диэлектрик. Тр. 4-ой межд. конф. по совр. проблем мех. сплош. среды, Армения, Цахкадзор, 21-26 сент., 2015г., стр.185-189.
8. Kittel C. Interaction of spin waves and ultrasonic waves in ferromagnetic crystals. Phys. Rev. B110, 1958, 836-841.
9. Camley R.E., Maradudin A.A. Pure shear elastic surface wave guided by the interface between two semi-infinite magneto-elastic media. Appl. Phys. Lett. 38(8), 1981, 610-612.
10. Nikitov, S.A., Tailhades, Ph., Tsai, C.S. Spin waves in periodic magnetic structures-magnonic crystals. J.Magnet.Mater, v.23, 3, 2001, p.p.320-331.
11. Агаян К.Л., Атоян Л.А. “Упруго-спиновые волны в ферромагнитном полупространстве с экраном”, Изв. НАН Армении, Механика т.76, 2, 2023 г.
12. Агаян К.Л., Атоян Л.А. “Упруго-спиновые волны в ферромагнитной среде с экраном”, Тезисы докладов 22-ой Международной конф. “Современные проблемы механики сплошной среды”, г. Ростов-на-Дону, 11-13 окт., 2023 г.
13. Э. Дьелесан, Д. Руайе. Упругие волны в твердых телах. Москва, Наука, 424 с.
14. Тамм И.Е. Основы теории электричества. Изд. Наука, Москва. 500 с.

Сведения об авторах:

Агаян Каро Леренцович – д.ф.-м.н., вед. науч.сотр. Института механики НАН РА.
Адрес: РА, 0019 Ереван, пр. Маршала Баграмяна 246.
E-mail: karoaghayan@gmail.com

Атоян Левон Арутюнович – к.ф.-м.н., ст.науч. сотр. Института механики НАН РА.
E-mail: levous@mail.ru

Саакян Саак Левонович – к.ф.-м.н., ЕГУ, факультет Информатики и прикладной математики. Тел.: (+374 77) 002-408;
E-mail: ssahakyan@ysu.am

Поступила в редакцию 15 января 2025 г.