

Торайғыров университетінің
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Торайғыров университета

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ

Физика, математика және компьютерлік
ғылымдар сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Физика, математика
и компьютерные науки
Издается с 1997 года

ISSN 2959-068X

№ 1 (2023)
Павлодар

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА**

Серия: Физика, математика и компьютерные науки
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ91VPY00046988

выдано

Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области физики, математики,
механики и информатики

Подписной индекс – 76208

<https://doi.org/10.48081/SGQS7560>

Бас редакторы – главный редактор

Тлеуменов С. К., *ф.-м.г.д., профессор*

Заместитель главного редактора Испулов Н. А., *ф.-м.г.к., профессор*

Ответственный секретарь Жумабеков А. Ж., *PhD*

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Esref Adali,	<i>PhD докторы, профессор (Турция);</i>
Qadir Abdul,	<i>PhD докторы, профессор (Пакистан);</i>
Донбаев К. М.,	<i>ф.-м.г.д., профессор;</i>
Демкин В. П.,	<i>ф.-м.г.д., профессор (Российская Федерация);</i>
Жумадилаева А. К.,	<i>т.г.к., кауымд. профессор;</i>
Ибраев Н. Х.,	<i>ф.-м.г.д., профессор;</i>
Косов В. Н.,	<i>ф.-м.г.д., профессор;</i>
Сентова С. М.,	<i>пед.г.д., профессор;</i>
Шоканов А. К.,	<i>ф.-м.г.к., профессор</i>
Омарова А. Р.,	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров
университета» обязательна

© Торайгыров университет

***Н. А Испулов¹, М. Р. Ахметсафин²**

^{1,2}Toraighyrov University, Pavlodar 140008, Kazakhstan

*e-mail: nurlybek_79@mail.ru

ТЕТРАГОНАЛДЫ СИНГОНИЯНЫҢ АНИЗОТРОПТЫ ОРТАДА ТЕРМОСЕРПІМДІ ТОЛҚЫНДАРДЫҢ ТАРАЛУЫ КЕЗІНДЕГІ КЛАССИКАЛЫҚ ЕМЕС ҚАТАН ЕМЕС ТҮЙІСҮДІҢ ШЕКАРАЛЫҚ ШАРТТАРЫ ТУРАЛЫ

Жұмыста әртүрлі физика-механикалық қасиеттері бар жұқа қабаттардың толқындық процестерге әсерін зерттеу үшін классикалық емес байланыс жағдайларын жалпылау ұсынылады. Тетрагоналды жүйенің 422, 4 мм, 4/мм класстарының анизотропты орталарында термосерпімді толқындардың таралуын сипаттайтын айнымалы коэффициенттері бар 1-ретті дифференциалдық теңдеулер жүйесі құрылды. Термосерпімді қасиеттері бар жұқа қабат үшін қатты емес байланыс шарттарының қорытындысы келтірілген. С-тәрізді қасиеттері бар қабаттарды зерттеу мүмкіндігі дәлелденді (δ - Дирак функциясы). Матрицант әдісінің ерекшеліктерінің бірі – осы әдіс шеңберінде ортаның бейнелі қасиеттерін зерттеу мүмкіндігі. Бұл қасиеттер жұқа қабаттың қасиеттері мен қоршаған ортаның қасиеттері арасындағы айтарлықтай айырмашылық жағдайын модельдейді. Қатты емес контактінің шекаралық шарттарын шығару матрицалық әдісті қолдануға негізделген. Бұл жұмыста көп қабатты гетероструктуралардағы толқындардың таралуын зерттеуге матрицант әдісін қолдану мүмкіндігі талқыланады. Шекаралық шарттар арқылы жұқа қабаттардың әсерін есепке алу осы қабаттардағы қозғалыс теңдеулерінің шешімдерін құруға жол бермеді. Бұл есептеу көлемін едәуір азайтады және алынған шешімдерді талдауды жеңілдетеді. Толқындық процестерге әртүрлі физика-механикалық қасиеттері бар жұқа қабаттардың әсерін зерттеу үшін классикалық емес байланыс жағдайларын жалпылау келтірілген.

Кілтті сөздер: анизотропты орта, жылу теңдеулері, жылу ағыны, термосерпімді толқындар, қатты емес байланыс, матрицант әдісі.

Кіріспе

Пьезоэлектрлік, пьезомагниттік және термопьезоэлектрлік қасиеттері бар ортадағы өзара байланысты серпімді және электромагниттік толқындық процестерге ғылыми қызығушылық аспап жасау, микро және наноэлектроника, ақпараттық технологиялар сияқты ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында қолдану перспективасымен байланысты болды. Жоғары жиілікті электроникадағы келесі қосымшаларды ерекше атап өтуге болады; әртүрлі логикалық элементтерде, жад элементтерінде және ақпаратты өңдеу құрылғыларында мультиферроидты құрылымдарды қолдану; дербес сымсыз энергия көздері; айнымалы және тұрақты өріс датчиктері; жаңа композициялық материалдар жасау [1].

[2] жұмыста төмен жиілік диапазонында және электромеханикалық резонанс саласында магнитострикциялық және пьезоэлектрлік материалдарға негізделген композиттік қабатты композиттердің қасиеттерін сипаттайтын теориялық модель ұсынылған. Теория ұсынылған және эксперименталды түрде зерттелген магнитоэлектрлік әсер әртүрлі пішіндегі үлгілерге арналған феррит-пьезоэлектриктерге негізделген көп қабатты композициялық материалдарда және екі қабатты магнитострикциялық-пьезоэлектрлік құрылымда. Теориялық зерттеуді тек ресейлік ғалымдар ғана емес, басқа елдердің өкілдері де жүргізеді. Мысалы, [3] мақаласы магнитострикциялық қабаттардың магнитоэлектрлік әсерін зерттейді.

Электромагниттік және серпімді (акустикалық) толқындық процестерді зерттеумен қатар, өзара трансформация болған кезде әртүрлі физикалық сипаттағы толқындардың таралу заңдылықтарын зерттеу өзекті болып табылады. Байланысты өрістердегі толқындық процестер серпімді, электромагниттік және жылу өрістерінің өзара әсерін көрсетеді. Электромагниттік өрістердің деформация өрісімен байланысы пьезоэлектрлік, пьезомагниттік және магнитострикциялық қасиеттері бар ортада орын алады.

Жаңа физикалық құбылыстарды зерттеу және қатты күйдегі электроника құралдары мен құрылғыларын жасау негізінен жаңа берілген қасиеттері бар материалдарды синтездеуге, екі немесе одан да көп бөлек фазалардан тұратын көпфункционалды композиттік материалдарды жасауға байланысты [4–7].

Материалдар мен әдістер

Бұл мақалада матрицант әдісіне негізделген [8] әртүрлі физикалық-механикалық қасиеттері бар ортада серпімді және жылу толқындарының таралуы және осы ерекшеліктерді практикалық мақсатта пайдалану зерттеледі.

Сонымен қатар байланысты өрістер болған кезде гетероқұрылымдардың орташа физикалық-механикалық параметрлерін анықтау әдісін әзірлеу қарастырылады.

Матрицант әдісіне сүйене отырып, серпімді анизотропты ортадағы, анизотропты диэлектрлік ортадағы толқындық процестер, анизотропты пластиналардағы толқындар, магнитоэлектрлік әсер ететін ортадағы электромагниттік толқындар [9], сұйық кристалдардағы толқындар [10], термосерпімді ортадағы толқындардың таралуы [11-17], пьезоэлектрлік және пьезомагниттік әсерлерімен байланысты толқындық процестер қарастырылды [18].

Бұл жұмыста көп қабатты гетероструктуралардағы толқындардың таралуын зерттеуге матрицант әдісін қолдану мүмкіндігі талқыланады.

$\lambda \gg l_i$ шартын қанағаттандыратын қабаттар болған кезде (λ – толқын ұзындығы, l_i – қабаттың қалыңдығы) толқын өрістерінің шешімдерін құру және оларды талдауды едәуір жеңілдетуге болады. Бұл жағдайда жұқа қабаттардың әсері арнайы (классикалық емес) шекаралық шарттарымен ескеріледі.

Шекаралық шарттар арқылы жұқа қабаттардың әсерін есепке алу осы қабаттардағы қозғалыс теңдеулерінің шешімдерін құруды болдырмауға мүмкіндік береді. Бұл есептеу көлемін едәуір азайтады және алынған шешімдерді талдауды жеңілдетеді.

Алғаш рет Подьяпольский Г.С. [19] жұмысында қатаң емес байланыстың шекаралық шарттары ұсынылды. Оларды енгізудің негізгі мақсаты қатаң байланыс арасындағы аралық жағдайды қамтитын және жұқа тұтқыр серпімді қабаттарды енгізуге негізделген байланыс жағдайларын қарастыруға болады:

$$\overline{W}_i|_{z=0} = \overline{W}_z|_{z=0} \quad (1)$$

Жоғарыда көрсетілген және басқа да ғылыми жарияланымдарда қатаң емес байланыстың шекаралық шарттарын қолдану деформацияланатын қатты механика ортасының әртүрлі модельдерімен шектеледі. Сонымен қатар, қатаң емес байланыстың шекаралық жағдайларын конструктивті қолдану саласы өте кең.

Әртүрлі физика-механикалық құбылыстары бар серпімді анизотропты орталар үшін шекаралық қатты емес жанасуды шығару матрицант әдісіне негізделген қарапайым және түсінікті. Термосерпімді орта жағдайында қозғалыс теңдеулері:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (2)$$

сәйкесінше Фурье жылу өткізгіштік теңдеулері мен жылу ағынының теңдеулері:

$$\lambda_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = -q_i$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial x_i} = -i\omega \beta_{ij} \varepsilon_{ij} - i\omega \frac{c_\varepsilon}{T_0} \theta \quad (3)$$

Дюгамель – Нейманның анықтаушы қатынастарымен байланысты:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} - \beta_{ij} \theta \quad (4)$$

мұндағы σ_{ij} – кернеу тензоры;

ρ – ортаның тығыздығы;

λ_{ij} – жылуөткізгіштік тензоры;

q_i – жылу ағынының векторы;

ω – айналмалы жиілік;

β_{ij} – термомеханикалық параметрлер;

ε_{ij} – Кошидің кіші деформация тензоры;

c_ε – тұрақты деформация кезіндегі жылусыйымдылық;

$\theta = T - T_0$ – табиғи жай-күй температурасымен салыстырғанда температураның өсуі, кіші деформация үшін.

Нәтижелер және талқылау

1-ші ретті дифференциалдық теңдеулер жүйесін құру. Матрица коэффициенттерін талдау

Тетрагоналдық сингония (422, 4 mm, 4/mmm класстары) үшін Дюгамель – Нейман қатынастары келесі түрде болады:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \beta_{11} & 0 & \beta_{13} \\ 0 & \beta_{11} & \beta_{13} \\ \beta_{13} & \beta_{13} & \beta_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \theta \quad (5)$$

Ал бірінші ретті теңдеулер жүйесі:

$$\frac{d\vec{W}}{dz} = B\vec{W} \quad (6)$$

Бұл дифференциалдық теңдеулер жүйесі келесі 8 теңдеулерге келтіріледі:

$$\frac{dU_x}{dx} = \frac{1}{c_{11}}\sigma_{xx} + \frac{c_{12}}{c_{11}}inU_y + \frac{c_{13}}{c_{11}}inU_z + (\beta_{11} + \beta_{13})\theta$$

$$\frac{d\sigma_{xx}}{dx} = -\rho\omega^2 U_x + in\sigma_{xy} + il\sigma_{xz}$$

$$\frac{dU_y}{dx} = \frac{1}{c_{66}}\sigma_{xy} + inU_x$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{xy}}{dx} = in \frac{c_{12}}{c_{11}}\sigma_{xx} + \left[-\rho\omega^2 + n^2 \left(c_{11} - \frac{c_{12}^2}{c_{11}} \right) + c_{44}n^2 \right] U_y \\ + nl \left(c_{13} - \frac{c_{12}c_{13}}{c_{11}} + c_{44} \right) U_z + \left(\frac{c_{12}}{c_{11}} - 1 \right) (\beta_{11} - \beta_{13})in\theta \end{aligned}$$

$$\frac{dU_z}{dx} = \frac{1}{c_{44}}\sigma_{xz} + ilU_x$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{xz}}{dx} = il \frac{c_{13}}{c_{11}}\sigma_{xx} + ml \left[c_{44} + \frac{c_{13}c_{12}}{c_{11}} + c_{13} \right] U_y \\ + \left(-\rho\omega^2 + n^2c_{44} - l^2 \frac{c_{13}^2}{c_{11}} + c_{33}l^2 \right) U_z + \\ + \left[\frac{c_{13}}{c_{11}}(\beta_{11} - \beta_{13}) - (2\beta_{13} + \beta_{33}) \right] il\theta \end{aligned}$$

$$\frac{d\theta}{dx} = -\frac{1}{\lambda_{11}}q_x$$

$$\begin{aligned} \frac{dq_x}{dx} = i\omega \frac{\beta_{11} + \beta_{13}}{c_{11}}\sigma_{xx} + i\omega n \left(\frac{c_{12}}{c_{11}}(\beta_{11} + \beta_{13}) - (\beta_{11} + \beta_{13}) \right) U_y \\ + i\omega l \left[\frac{c_{13}}{c_{11}}(\beta_{11} + \beta_{13}) - (2\beta_{13} + \beta_{33}) \right] U_z + \\ + i\omega \left[\frac{1}{c_{44}}(\beta_{11} + \beta_{13}) - \frac{c_\varepsilon}{T_0} \right] \theta \end{aligned}$$

В матрицасының құрылысы көлемдік жағдайда Тетрагоналдық сингония үшін мына түрде болады

$$B = \begin{bmatrix} 0 & b_{12} & b_{13} & 0 & b_{15} & 0 & b_{17} & 0 \\ b_{21} & 0 & 0 & b_{24} & 0 & b_{26} & 0 & 0 \\ b_{24} & 0 & 0 & b_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{13} & b_{43} & 0 & b_{45} & 0 & b_{47} & 0 \\ b_{26} & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{56} & 0 & 0 \\ 0 & b_{15} & b_{45} & 0 & b_{65} & 0 & b_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{78} \\ 0 & i\omega b_{17} & i\omega b_{47} & 0 & i\omega b_{67} & 0 & b_{87} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7) құрылысынан әртүрлі поляризациялы серпімді толқындардың жылулық толқынмен байланыса таралып, термосерпімді эффектiге ие болатыны байқалады.

Тетрагоналдық сингония үшін коэффициенттері матрицасының b_{ij} элементтері көлемдік жағдайда мына түрде болады:

$$b_{12} = \frac{1}{c_{11}}; b_{13} = \frac{c_{12}}{c_{11}}il; b_{15} = \frac{\beta_{11} + \beta_{13}}{c_{11}}; b_{21} = -\omega^2\rho; b_{24} = in; b_{26} = il$$

$$\begin{aligned} b_{34} &= \frac{1}{c_{66}}; b_{43} = \left(c_{11} - \frac{c_{12}^2}{c_{11}}\right)n^2 + c_{44}l^2 - \omega^2\rho; b_{45} \\ &= \left(c_{44} + c_{13} - \frac{c_{12}c_{13}}{c_{11}}\right)nl; \\ b_{47} &= \left(\frac{c_{12}}{c_{11}} - 1\right)(\beta_{11} + \beta_{13})in \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{56} &= \frac{1}{c_{44}}; b_{65} = \left(c_{33} - \frac{c_{13}^2}{c_{11}}\right)l^2 + c_{44}n^2 - \omega^2\rho; b_{67} \\ &= \left(\frac{c_{13}}{c_{11}}(\beta_{11} + \beta_{13}) - (2\beta_{13} + \beta_{33})\right)il; \end{aligned}$$

$$b_{87} = -i\omega\left(-\frac{\beta_{11} + \beta_{13}}{c_{11}} + \frac{c_\varepsilon}{T_0}\right); b_{78} = -\frac{1}{\lambda_{11}}$$

В матрицасының нөлден өзгеше b_{13} , b_{24} коэффициенттері бойлық және көлденең Х-поляризацияланған толқындардың өзара тасымалын анықтайды. b_{15} , b_{26} элементтері көлденең Y-поляризациясының бойлық толқынмен өзара байланысын анықтайды. Нөлден өзгеше b_{45} элементі көлденең поляризацияның толқындары арасындағы өзара трансформацияны анықтайды.

b_{17} коэффициентінің нөлден өзгешелігі көлденең толқынның термосерпімді эффектiмен таралатынын бiлдiредi:

$$b_{17} = \frac{\beta_{11} + \beta_{13}}{c_{11}}$$

b_{47} және b_{67} нөлдік элементтері:

$$b_{47} = \left(\frac{c_{12}}{c_{11}} - 1 \right) (\beta_{11} + \beta_{13}) in$$

$$b_{67} = \left(\frac{c_{13}}{c_{11}} (\beta_{11} + \beta_{13}) - (2\beta_{13} + \beta_{33}) \right) il;$$

Көлденең поляризациялы серпіді толқындардың термосерпімді эффектiмен таралатынын бiлдiредi. Осы кезде b_{47} X- поляризациялы серпiмдi толқынның термосерпiмдi эффектiсiн, ал b_{67} Y-поляризациялы көлденең толқынның термосерпiмдi эффектiсiн сипаттайды.

Қатаң емес байланыстың шекаралық шарттары

Егер жылу серпiмдi ортада h және $\lambda \gg h$ қалыңдығының жұқа қабаты болса (λ – толқын ұзындығы, h – гетерогенділік кезеңі), онда (6) теңдеулер жүйесін ақырлы айырмашылық түрінде ұсынуға болады:

$$\frac{d\vec{W}}{dz} \cong \frac{\Delta\vec{W}}{h} = B\vec{W}; \Delta\vec{W} = \vec{W}_2 - \vec{W}_1 \quad (8)$$

(8) формуладан тікелей:

$$\vec{W}_2 = [E + Bh]\vec{W}_1. \quad (9)$$

(9) формуланы келесі түрде жазып:

$$\vec{W}_2 = G\vec{W}_1; G = E + Bh; \quad (10)$$

термосерпимді қасиеттері бар жұқа қабаттың әсерін сипаттайтын шекаралық шарттарды аламыз.

$\lambda \gg h$ шарты жүктелген күйдің квазистатикалығына байланысты жұқа қабаттың ішіндегі толқын өрісінің құрылысын болдырмауға мүмкіндік береді. Шекаралық шарттар (10) қатаң емес байланыстың қажетті шарттары бар. (10) – дан қатты байланыс шарты (1). В матрицасының элементтері жұқа қабаттың физика-механикалық қасиеттерінің әсерін ескереді, өйткені (9) бұл үшін В (7) матрицасын немесе (6) теңдеулер жүйесін білу жеткілікті.

Егер $z \in [0, H]$ аймағында жұқа қабаттың сол жақ шекарасы $z = z_1$ болса, онда қабат матрицасы келесідей болады:

$$T(0, H) = T_2 G T_1; \quad (11)$$

T_1 – матрица қабаты $[0; z_1]$, T_2 – матрица қабаты $[z_1, H]$.

Егер кейбір N қабатының ішінде жұқа қабаттар болса, жалпы қабаттың матрицасы келесідей жазылады:

$$T = T_{N+1} G_N T_N G_{N-1} \dots T_2 G_1 T_1. \quad (12)$$

Қазіргі уақытта матрицант әдісі үшін магнитоэлектрлік әсерді, серпимді, термоэлектрлік, сұйық кристалды орталарды ескере отырып, пьезоэлектрлік және пьезомагниттік орталар үшін (6) типті теңдеулер әзірленді және алынды. (6) жүйесіндегі шекаралық жағдайларға сүйене отырып, осы орталар үшін әртүрлі физика-механикалық қасиеттері бар жұқа қабаттарды енгізу арқылы әртүрлі жасанды гетероқұрылымдарды жобалауға болады.

(10) типті шекаралық шарттарды қолданудың маңызды аспектісі әртүрлі тор кезеңдерімен жанасудағы кристалдық орталардың деформациясы мен бұрмалануының әсерін есепке алу, сондай-ақ жанасу бұрмалануларын және олардың физика-механикалық параметрлерге әсерін зерттеу болып табылады.

Матрицант әдісінің ерекшеліктерінің бірі – осы әдіс шеңберінде ортаның бейнелі қасиеттерін зерттеу мүмкіндігі. Бұл қасиеттер жұқа қабаттың қасиеттері мен қоршаған ортаның қасиеттері арасындағы айтарлықтай айырмашылық жағдайын модельдейді. Математикалық тұрғыдан ол келесідей жазылады:

$$\lim_{h \rightarrow 0} B h = G; \lim_{h \rightarrow 0} b_{ij} h = g_{ij} \quad (13)$$

Қорытынды

Бұл мақалада матрицанттың аналитикалық әдісі негізінде 422, 4 мм, 4/мм класстарының Тетрагоналды сингониясының анизотропты ортасында термосерпімді толқындардың таралу заңдылықтары зерттелді. Тетрагоналды жүйенің 422, 4 мм, 4/мм класстарының анизотропты орталарында термосерпімді толқындардың таралуын сипаттайтын айнымалы коэффициенттері бар 1-ретті дифференциалдық теңдеулер жүйесі құрылды. Толқындық процестерге әртүрлі физика-механикалық қасиеттері бар жұқа қабаттардың әсерін зерттеу үшін классикалық емес байланыс жағдайларын жалпылау келтірілген. Термосерпімді қасиеттері бар жұқа қабат үшін осы шарттардың қорытындысы келтірілген. С тәрізді қасиеттері бар қабаттарды зерттеу мүмкіндігі дәлелденді (δ – Дирак функциясы).

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Martin, L. W., Ramesh, R.** Multiferroic and magnetoelectricheterostructures // ActaMateriale. – 2012.

2 **Бичурин, М. И., Петров, В. М., Филиппов, Д. А., Сринивасан, Г., Лалетин, В. М.** Магнитоэлектрические композиционные материалы на основе феррит-пьезоэлектриков // Перспективные материалы. – 2004. – № 6. – С. 5 – 12.

3 **Ding Jian-ming, Zhong Chong-gui, Jiang Qing.** Influence of the stress on magnetoelectric effect in magnetostrictive-PZ bilayers // Front. Phys. China. 2007, 3(3): 312 – 317

4 **Кристенсен, Р.** Введение в механику композитов. – М. : Мир, 1982. – 333 с.

5 **Van Suchtelen, J.** Product properties: A New Application of Composite Materials // Philips Res. Rep., 1972. V. 27. – P. 28 – 37.

6 Van Suchtelen J. Nonstructural Application of Composite Materials // Ann. Chem. Fr., 1980. –V. 5. – P. 139–145.

7 **Ryu, J., Priya, S., Uchino, K., Kim, H. E.** MagnetoelectricEffect in Composites of Magnetostrictive ad Piezoelectric Materials // J. Of Electroceramics. 2002. V. 8. – P. 107 – 119.

8 **Тлеукунов, С. К.** Метод матрицанта. Павлодар, НИЦПГУ им. С. Торайғырова, 2004, 151 с.

9 **Kurmanov, A. A., Ispulov, N. A., Abdul Qadir, Zhumabekov, A. Zh., Sarymova, Sh. N., Dossumbekov, K. R.** Propagation Of Electromagnetic Waves In Stationary Anisotropic Media, Physica Scripta, 96, Number of article: 085505, DOI: 10.1088/1402-4896/abfe87 – 2021.

10 Dossumbekov, K. R., Ispulov, N. A., Kurmanov, A. A., and Zhumabekov, A. Zh. Propagation of electromagnetic waves in cholesteric liquid crystals. Russian Physics Journal, Vol. 64, № 8, December, 2021, p. 1391–1399.

11 Ispulov, N. A. Qadir, A., Shah, M. A., Seythanova, Ainur K., Kissikov, T. G., Arinov, E. Reflection of thermoelastic wave on the interface of isotropic half-space and tetragonal syngony anisotropic medium of classes 4, 4/m with thermomechanical effect, CHINESE PHYSICS B, Number of article: 038102, DOI: 10.1088/1674-1056/25/3/038102 – 2016.

12 Ispulov, N. A. Qadir, A., Zhubenov, M. K., Arinov, E. The Propagation of Thermoelastic Waves in Anisotropic Media of Orthorhombic, Hexagonal, and Tetragonal Syngonies, Advances In Mathematical Physics, Number of article: 4898467, DOI: 10.1155/2017/4898467 – 2017.

13 Ispulov, N. A. Qadir, A., Zhubenov, M. K., Dossanov, T. S. Kissikov, T. G. The Analytical Form of the Dispersion Equation of Elastic Waves in Periodically Inhomogeneous Medium of Different Classes of Crystals. Advances In Mathematical Physics. Number of article: 5236898, DOI: 10.1155/2017/5236898 – 2017.

14 Муса, Е. У., Испулов, Н. А., Досумбеков, Қ. Р., Жумабеков, А. Ж. Анизотропты орталарда термосерпімді толқындардың таралуы туралы (біртексіздік Y осі бойынша). Вестник Торайгыров университета. Серия физика, математика и компьютерные науки – № 1 – 2022. – С. 58–70.

15 Nurlybek, A. Ispulov, N. A., Zhumabekov, A. Zh., Abdul Qadir, Kurmanov, A. A., Sholpan, N. Sarymova, Kairat, R. Dossumbekov, and Erkin Arinov. The Propagation of Thermoelastic Waves in Different Anisotropic Media Using Matricant Method, Hindawi Advances in Mathematical Physics Vol. 2022, Article ID 5787899, 8 p.

16 Nurlybek, A., Ispulov, N. A., Zhumabekov, A. Zh., Dossumbekov, K. R., Bektazinova, A. K. On matrixes of coefficients of thermoelastic and electromagnetic waves propagating in anisotropic media. Bulgarian Chemical Communications, Vol. 54, Special Issue B1, 2022. P. 53–57.

17 Ispulov, N. A., Abdul Qadir, Zhumabekov, A. Zh., Kurmanov, A. A., Dosumbekov, K. R. On nonclassical boundary conditions for the contact of thin interlayers with different physical and mechanical properties on wave propagation in anisotropic media. Bulletin of the Karaganda University. Physics Series, № 3, 2022. P. 68–79.

18 Tleukenov, S. K. A method for the analytical description of coupled-field waves in various anisotropic media. ActaMechanica. December 2014, Vol. 225, Issue 12, p. 3535–3547.

19 **Подъяпольский Г. С.** Отражение и преломление на границе двух сред в случае нежесткого контакта. Изв. АН СССР, Сер. Географическая, 1963, № 4, с. 525–531.

Материал баспаға түсті 06.03.23.

REFERENCES

1 **Martin L.W., Ramesh R.** Multiferroic and magnetoelectricheterostructures // *ActaMateriale*. – 2012.

2 **Bichurin M. I., Petrov V. M., Filippov D. A., Srinivasan G., Laletin V. M.** Magnitoelektricheskie kompozicionny'e materialy' na osnove ferrit-p'ezoelektrikov // *Perspektivny'e materialy' [Magnetoelectric composite materials based on ferrite-piezoelectrics // Perspective materials]*. – 2004. – № 6. – P. 5 – 12.

3 **Ding Jian-ming, Zhong Chong-gui, Jiang Qing** Influence of the stress on magnetoelectric effect in magnetostriptive-PZ bilayers // *Front. Phys. China*. 2007, 3(3): 312 – 317

4 **Kristensen R.** Vvedenie v mekhaniku kompozitov [Introduction to the mechanics of composites]. – М.: Mir, 1982. – 333 p.

5 **Van Suchtelen J.** Product properties: A New Application of Composite Materials // *Philips Res. Rep.*, 1972. V. 27. – P. 28 – 37.

6 **Van Suchtelen J.** Nonstructural Application of Composite Materials // *Ann. Chem. Fr.*, 1980. – V. 5. – P. 139–145.

7 **Ryu J., Priya S., Uchino K., Kim H. E.** MagnetoelectricEffect in Composites of Magnetostriptive ad Piezoelectric Materials // *J. Of Electroceramics*. 2002. V. 8. – P. 107 – 119.

8 **Tleukenov S. K.** Metod matriczanta [The matrizant method]. Pavlodar, NICzPGU im. S. Torajgy'rova, 2004, 151 p.

9 **Kurmanov A. A., Ispulov N. A., Abdul Qadir, Zhumabekov A. Zh., Sarymova Sh. N., Dossumbekov K. R.** Propagation Of Electromagnetic Waves In Stationary Anisotropic Media, *Physica Scripta*, 96, Number of article: 085505, DOI: 10.1088/1402-4896/abfe87 – 2021.

10 **Dossumbekov K. R., Ispulov N. A., Kurmanov A. A., and Zhumabekov A. Zh.** Propagation of electromagnetic waves in cholesteric liquid crystals. *Russian Physics Journal*, Vol. 64, № 8, December, 2021, p. 1391–1399.

11 **Ispulov, N. A. Qadir, A., Shah, M. A., Seythanova, Ainur K., Kissikov, T. G., Arinov, E.** Reflection of thermoelastic wave on the interface of isotropic half-space and tetragonal syngony anisotropic medium of classes 4, 4/m with thermomechanical effect, *CHINESE PHYSICS B*, Number of article: 038102, DOI: 10.1088/1674-1056/25/3/038102 – 2016.

12 Ispulov, N. A. Qadir, A., Zhukonov, M. K., Arinov, E. The Propagation of Thermoelastic Waves in Anisotropic Media of Orthorhombic, Hexagonal, and Tetragonal Syngonies, *Advances In Mathematical Physics*, Number of article: 4898467, DOI: 10.1155/2017/4898467 – 2017.

13 Ispulov, N. A. Qadir, A., Zhukonov, M. K., Dossanov, T. S. Kissikov, T. G. The Analytical Form of the Dispersion Equation of Elastic Waves in Periodically Inhomogeneous Medium of Different Classes of Crystals. *Advances In Mathematical Physics*. Number of article: 5236898, DOI: 10.1155/2017/5236898 – 2017.

14 Musa E. U., Ispulov N. A., Dosumbekov K. R., Zhumabekov A. Zh. Anizotroptıy ortalarda termoserpimdi tolky`ndardy`n taraluy` turaly` (birteksizdik Y osi boıy`nsha) [On the propagation of thermosuppressive waves in anisotropic media (homogeneity along the Y-axis)]. *Vestnik Torajgy`rov universiteta. Seriya fizika, matematika i komp`yuterny`e nauki* – № 1 – 2022. – p. 58–70.

15 Nurlybek A. Ispulov, Almar Zh. Zhumabekov, Abdul Qadir, Almas A. Kurmanov, Sholpan N. Sarymova, Kairat R. Dosumbekov, and Erkin Arinov. The Propagation of Thermoelastic Waves in Different Anisotropic Media Using Matricant Method, *Hindawi Advances in Mathematical Physics* Volume 2022, Article ID 5787899, 8 p.

16 Nurlybek A. Ispulov, Almar Zh. Zhumabekov, Kairat R. Dosumbekov, Anara K. Bektazinova. On matrixes of coefficients of thermoelastic and electromagnetic waves propagating in anisotropic media. *Bulgarian Chemical Communications*, Vol. 54, Special Issue B1, 2022. P. 53–57.

17 Ispulov N. A., Abdul Qadir, Zhumabekov A. Zh., Kurmanov A. A., Dosumbekov K. R. On nonclassical boundary conditions for the contact of thin interlayers with different physical and mechanical properties on wave propagation in anisotropic media. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*, №3, 2022. P. 68–79.

18 Tleukenov S. K. A method for the analytical description of coupled-field waves in various anisotropic media. *ActaMechanica*. December 2014, Volume 225, Issue 12, p. 3535–3547.

19 Pod`yapol'skiy G. S. Otrazhenie i prelomlenie na granice dvux sred v sluchae nezhestkogo kontakta [Reflection and refraction at the boundary of two media in the case of non-rigid contact]. *Izv. AN SSSR, Ser. Geograficheskaya*, 1963, № 4, p. 525–531.

Матеріал 06.03.23 баспаға түсті.

***Испулов Н. А¹, Ахметсафин М. Р².**

Toraighyrov University, Kazakhstan, Pavlodar

Материал поступил в редакцию 06.03.23.

О НЕКЛАССИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ НЕЖЕСТКОГО КОНТАКТА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ТЕРМОУПРУГИХ ВОЛН В АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ СИНГОНИИ

В работе предлагается обобщение неклассических условий контакта для исследования влияния тонких прослоек с различными физико-механическими свойствами на волновые процессы. Построена система дифференциальных уравнений 1-го порядка с переменными коэффициентами, описывающие распространение термоупругих волн в анизотропных средах тетрагональной системы классов 422, 4 mm, 4/mmm. Приведен вывод условий нежесткого контакта для тонкого слоя с термоупругими свойствами. Доказывается возможность исследования слоев с -образными свойствами (- функция Дирака). Одним из конструктивных особенностей метода матрицанта является возможность в рамках этого метода исследовать -образные свойства среды. Эти свойства моделируют случай существенного отличия свойств тонкого слоя от свойств окружающей среды. Вывод граничных условий нежесткого контакта основан на применении матричного метода матрицанта. В данной работе обсуждается возможность применения метода матрицанта к изучению распространения волн в многослойных гетероструктурах. Учет влияния тонких слоев посредством граничных условий позволил исключить построение решений уравнений движения в этих слоях, что, естественно существенно уменьшает объем вычислений и облегчает анализ полученных решений. Дано обобщение неклассических контактных условий для изучения влияния тонких слоев с различными физико-механическими свойствами на волновые процессы.

Ключевые слова: анизотропная среда, уравнения теплопроводности, приток тепла, термоупругие волны, нежесткий контакт, метод матрицанта.

***Ispulov N. A¹., Akhmetsafin M. R².**

^{1,2}Toraighyrov University, Kazakhstan, Pavlodar

Material received on 06.03.23.

ON NON-CLASSICAL BOUNDARY CONDITIONS OF NON-RIGID CONTACT DURING THE PROPAGATION OF THERMOELASTIC WAVES IN ANISOTROPIC MEDIUM OF TETRAGONAL SYNGONY

The paper proposes a generalization of non-classical contact conditions to study the effect of thin layers with different physical and mechanical properties on wave processes. A system of 1st-order differential equations with variable coefficients describing the propagation of thermoelastic waves in anisotropic media of a tetragonal system of classes 422, 4 mm, 4/mmm is constructed. The conclusion of non-rigid contact conditions for a thin layer with thermoelastic properties is given. The possibility of studying layers with δ -shaped properties (δ - Dirac function) is proved. One of the design features of the matricant method is the possibility to investigate the δ -shaped properties of the medium within the framework of this method. These properties simulate the case of a significant difference between the properties of a thin layer and the properties of the environment. The derivation of the boundary conditions of non-rigid contact is based on the application of the matrix method of the matricant. In this paper, the possibility of applying the matricant method to the study of wave propagation in multilayer heterostructures is discussed. Considering the influence of thin layers by means of boundary conditions made it possible to exclude the construction of solutions to the equations of motion in these layers, which naturally significantly reduces the amount of calculations and facilitates the analysis of the solutions obtained. A generalization of non-classical contact conditions is given for studying the effect of thin layers with different physical and mechanical properties on wave processes.

Keywords: anisotropic medium, heat conduction equations, heat inflow, thermoelastic waves, non-rigid contact, matricant method.

Теруге 06.03.2023 ж. жіберілді. Басуға 30.03.2023 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

7,50 Mb RAM

Шартты баспа табағы 9,1. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4020

Сдано в набор 06.03.2023 г. Подписано в печать 30.03.2023 г.

Электронное издание

7,50 Mb RAM

Усл.печ.л. 8,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4020

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университеті» КЕ АҚ

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университеті» КЕ АҚ

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

+7(718)267-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik.tou.edu.kz

<https://vestnik-pm.tou.edu.kz/>