

## **ВИСНОВОК**

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

**Протектора Дениса Олеговича**

**«Нестаціонарні теплові процеси в анізотропних твердих тілах»,**

яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

### **1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації і виконання індивідуального плану навчальної та наукової роботи.**

Аспірант Протектор Денис Олегович виконав у повному обсязі Індивідуальний план виконання освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Освітня програма в обсязі 40 кредитів ECTS виконана у повному об'ємі. Він успішно склав наступні дисципліни:

- залік з навчальної дисципліни «Іноземна мова для аспірантів» (82 бали);
- залік з навчальної дисципліни «Філософські засади та методологія наукових досліджень» (93 бали);
- залік з навчальної дисципліни «Підготовка наукових публікацій та презентація результатів досліджень» (93 бали);
- залік з навчальної дисципліни «Інформаційні технології у прикладній фізиці» (95 балів);
- залік з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів» (95 балів);
- іспит з навчальної дисципліни «Іноземна мова для аспірантів» (75 балів);
- складено залік з навчальної дисципліни «Новітні технології обробки даних у фізиці» (95 балів);
- іспит з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів» (90 балів);
- іспит з навчальної дисципліни «Новітні технології обробки даних у фізиці» (95 балів).

Всі заплановані види робіт були виконані своєчасно. Здобувач плідно співпрацював з науковими керівниками протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

## **2. Обґрунтування вибору теми дослідження.**

Велика кількість природних і штучних матеріалів, які використовуються в різних галузях науки і техніки, є анізотропними, тобто деякі їх фізичні властивості залежать від обраного напрямку. До анізотропних матеріалів належать кристалічні матеріали (зокрема рідкі кристали), метали і сплави, волокнисті та композиційні матеріали, деякі полікристалічні матеріали та інші. Анізотропні характеристики матеріалам надають у процесі їх отримання або спеціальною технологічною обробкою. Анізотропні матеріали застосовуються для виготовлення приладів та пристрій, деталей конструкцій та машин – наприклад, трансформаторів із сердечниками з текстуреною сталі (в електротехніці), лопаток газотурбінних двигунів із жароміцних нікелевих сплавів з монокристалічною структурою (в авіації), п'єзоперетворювачів, електрооптичних модуляторів та рідкокристалічних індикаторів (в електронному приладобудуванні). Сучасні анізотропні матеріали зі складною структурою (наприклад, композитні матеріали, багатошарові матеріали, покриття, нанесені на підкладки) все частіше використовуються в новітніх інженерних розробках.

У різних технологічних процесах і пристроях дані матеріали піддаються тепловому впливу, внаслідок чого в них відбуваються фізико-хімічні явища, зокрема зміна геометричних розмірів. Неконтрольоване теплове розширення конструкційних матеріалів може привести до погіршення експлуатаційних характеристик пристроя, а також до аварійних ситуацій. Тому при створенні та використанні таких матеріалів необхідно враховувати анізотропію їх теплофізичних властивостей, а також досліджувати теплові процеси, які в них протікають.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження теплових процесів в анізотропних твердих тілах за допомогою безсіткового методу розв'язання тривимірних задач нестационарної тепlopровідності.

Основні завдання дисертаційного дослідження:

1. Дослідити теоретичні аспекти в області числового моделювання теплових процесів із застосуванням безсіткових підходів.
2. Розробити безсітковий метод розв'язання тривимірних задач нестационарної тепlopровідності в анізотропних твердих тілах.
3. Провести моделювання розподілу нестационарних температурних полів в анізотропних твердих тілах різної геометричної форми при наявності внутрішніх джерел або стоків тепла за допомогою безсіткового методу на основі використання анізотропних радіальних базисних функцій.
4. Оцінити точність результатів моделювання безсітковим методом, заснованим на використанні анізотропних радіальних базисних функцій, шляхом зіставлення отриманих результатів моделювання з аналітичними розв'язками крайових задач або за допомогою обчислення відносних нев'язок.
5. Провести аналіз існуючих схем побудови атомарних радіальних базисних функцій багатьох незалежних змінних, що породжені різними диференціальними операторами.
6. Побудувати сімейство атомарних радіальних базисних функцій трьох незалежних змінних, породжених диференціальним оператором спеціального типу, який включає в себе компоненти тензора другого рангу, що визначає анізотропію матеріалу.
7. Розробити методику використання сімейства атомарних радіальних базисних функцій трьох незалежних змінних, які враховують анізотропію матеріалу, при моделюванні нестационарних теплових процесів в анізотропних твердих тілах із використанням безсіткового методу.
8. Провести моделювання розподілу нестационарного температурного поля в анізотропному твердому тілі у формі пластини при наявності рухомого

точкового джерела тепла, за допомогою безсіткового методу на основі використання анізотропних та атомарних радіальних базисних функцій.

9. Здійснити порівняльний аналіз точності отриманих результатів моделювання нестационарного теплового процесу в твердому анізотропному тілі в формі пластини безсітковим методом при використанні анізотропних і атомарних радіальних функцій в якості базисних.

10. Дослідити модель взаємодії безперервного лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1064 нм з монокристалом ніобату літію  $\text{LiNbO}_3$  у формі циліндра на часовому інтервалі 2 год 30 хв і встановити час, протягом якого досягається сталий режим нагрівання монокристалу  $\text{LiNbO}_3$ .

11. Розробити програмний комплекс «AnisotropicHeatTransfer3D» для моделювання нестационарних теплових процесів в анізотропних твердих тілах у вигляді додатка з графічним інтерфейсом користувача, який засновано на використанні безсіткового методу та атомарних радіальних базисних функцій  $AH_{opt_k}(x_1, x_2, x_3)$ .

12. Провести тестування розробленого програмного комплексу.

#### **Об'єкт та предмет дослідження.**

Об'єктом дослідження є нестационарні теплові процеси, які протікають в анізотропних твердих тілах.

Предмет дослідження – числове розв'язання тривимірних задач нестационарної тепlopровідності в анізотропних твердих тілах з використанням безсіткового методу.

#### **Методи дослідження.**

1. Порівняння особливостей реалізації числових методів і підходів до розв'язання задач математичної фізики (використано при розробці безсіткового методу числового розрахунку теплових процесів, які протікають в анізотропних твердих тілах).

2. Збір початкових даних (використано при формулюванні постановок крайових задач нестационарної тепlopровідності в анізотропних твердих тілах).

3. Моделювання нестационарних теплових процесів в анізотропних твердих тілах із використанням безсіткового підходу (використано при накопиченні результатів розподілу нестационарних температурних полів в анізотропних твердих тілах).

4. Аналіз схем побудови атомарних радіальних базисних функцій багатьох незалежних змінних, що породжені різними диференціальними операторами (використано при побудові сімейства атомарних радіальних базисних функцій трьох незалежних змінних, які враховують анізотропію матеріалу).

5. Обробка результатів моделювання теплових процесів, які протікають в анізотропних твердих тілах (використано для оцінки ефективності безсіткового методу моделювання теплопередачі в анізотропних твердих тілах).

### **3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна відповідно до плану науково-дослідних робіт навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики, зокрема, в межах науково-дослідної роботи «Математичне моделювання теплових процесів в анізотропних наноматеріалах» № держреєстрації 0122U001482, при виконанні якої здобувач приймав участь як виконавець.

### **4. Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна.**

Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна полягає у наступному:

1. Вперше розроблено безсітковий метод розв'язання тривимірних задач нестационарної теплопровідності в анізотропних твердих тілах, який засновано на комбінації методу подвійного заміщення в поєднанні з анізотропними радіальними базисними функціями та методу фундаментальних розв'язків.

2. Вперше проведено моделювання розподілу нестационарних температурних полів в анізотропних твердих тілах різної геометричної форми при наявності внутрішніх джерел або стоків тепла за допомогою розробленого безсіткового методу.

3. Вперше побудовано сімейство атомарних радіальних базисних функцій трьох незалежних змінних  $AHorp_k(x_1, x_2, x_3)$ , породжених диференціальним оператором типу Гельмгольца, який включає в себе компоненти тензора другого рангу, що визначає анізотропію матеріалу.

4. Вперше програмно реалізовано алгоритм побудови сімейства атомарних радіальних базисних функцій трьох незалежних змінних  $AHorp_k(x_1, x_2, x_3)$ , породжених диференціальним оператором типу Гельмгольца, який включає в себе компоненти тензора другого рангу, що визначає анізотропію матеріалу.

5. Вперше застосовано сімейство атомарних радіальних базисних функцій трьох незалежних змінних  $AHorp_k(x_1, x_2, x_3)$  в якості базисних при реалізації безсіткового методу числового розрахунку теплових процесів, які протікають в анізотропних твердих тілах.

6. Вперше проведено моделювання розподілу нестационарного температурного поля в анізотропному твердому тілі у формі пластини при наявності рухомого точкового джерела тепла, за допомогою безсіткового методу на основі використання атомарних радіальних базисних функцій  $AHorp_k(x_1, x_2, x_3)$ .

7. Вперше, за допомогою розробленого безсіткового методу, досліджено модель взаємодії безперервного лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1064 нм з монокристалом  $\text{LiNbO}_3$  у формі циліндра на часовому інтервалі 2 год 30 хв і встановлено час, протягом якого досягається сталий режим нагрівання монокристалу  $\text{LiNbO}_3$ .

8. Вперше розроблено програмний комплекс «AnisotropicHeatTransfer3D» для моделювання нестационарних теплових процесів в анізотропних твердих

тілах у вигляді додатка з графічним інтерфейсом користувача, який засновано на використанні розробленого безсіткового методу та атомарних радіальних базисних функцій  $AHorp_k(x_1, x_2, x_3)$ , що підтверджується свідоцтвом про державну реєстрацію авторського права на твір.

## **5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.**

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних Протектором Д. О., при проведенні досліджень за темою дисертаційної роботи, забезпечується використанням фундаментальних підходів і методів обчислюальної і математичної фізики. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в індексованих наукових журналах та доповідалися на міжнародних наукових конференціях. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

## **6. Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.**

Розроблена безсіткова схема моделювання нестационарних теплових процесів в анізотропних твердих тілах може бути використана при реалізації нових ефективних підходів до моделювання теплового стану тіла за наявності процесів плавлення, випаровування або затвердіння, а також методів розв'язання задач нестационарної тепlopровідності в композиційних матеріалах з довільним числом рухомих границь фазових перетворень (задача Стефана).

Сімейство атомарних радіальних базисних функцій трьох незалежних змінних  $AHorp_k(x_1, x_2, x_3)$ , які враховують анізотропію матеріалу, являють собою новий підклас функцій, які можуть використовуватися в якості базисних при реалізації безсіткових методів та підходів к моделюванню теплових процесів в анізотропних матеріалах.

Результати дисертаційного дослідження Протектора Д. О., а саме теоретичний матеріал та розроблений програмний комплекс

«AnisotropicHeatTransfer3D» для моделювання нестационарних теплових процесів в анізотропних твердих тілах, були впроваджені у навчальний процес Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Національного університету «Запорізька політехніка», Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського та Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, про що свідчать відповідні акти впровадження.

Результати дисертаційної роботи Протектора Д. О. використовуються в наукових дослідженнях Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, про що свідчить відповідна довідка про використання результатів дисертаційного дослідження.

## **7. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.**

Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в **10** наукових працях, серед яких **3** публікації у міжнародних виданнях, які входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science, **1** публікація у науковому виданні, включенному на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, **5** тез доповідей, **1** свідоцтво про реєстрацію авторського права:

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

*Публікації у наукових фахових виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз Scopus або Web of Science:*

1. Protektor D. O. Family of the Atomic Radial Basis Functions of Three Independent Variables Generated by Helmholtz-Type Operator // East European Journal of Physics. 2021. No. 4. P. 49-58. DOI: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2021-4-05> (Scopus, Web of Science)
2. Protektor D. O., Lisin D. O. Simulation of Heat Transfer in Single-Crystal Lithium Niobate in Interaction with Continuous-Wave Laser Radiation // East

European Journal of Physics. 2022. No. 1. P. 10-15. DOI:  
<https://doi.org/10.26565/2312-4334-2022-1-02> (Scopus, Web of Science)

(Особистий внесок здобувача: здійснив моделювання теплового процесу, який протікає в монокристалі ніобату літію при взаємодії з безперервним лазерним випромінюванням з використанням безсіткового методу; визначив час, протягом якого досягається сталий режим нагрівання кристала  $LiNbO_3$ , а також його температурний діапазон на всьому часовому інтервалі; обчислив норму відносної нев'язки отриманого наближеного розв'язку задачі нестационарної теплопровідності)

Публікація у періодичному науковому виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз Scopus або Web of Science держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та Європейського Союзу (Нідерланди):

3. Protektor D. O., Kolodyazhny V. M., Lisin D. O., Lisina O. Yu. A Meshless Method of Solving Three-Dimensional Nonstationary Heat Conduction Problems in Anisotropic Materials // Cybernetics and Systems Analysis. 2021. Vol. 57, No. 3. P. 470-480. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00372-8> (Scopus, Web of Science)

(Особистий внесок здобувача: розробив безсітковий метод розв'язання тривимірних нестационарних задач теплопровідності в анізотропних твердих тілах, заснований на комбінації методу подвійного заміщення в поєданні з анізотропними радіальними базисними функціями та методу фундаментальних розв'язків; застосував розроблений безсітковий метод для моделювання теплового процесу в анізотропному та ізотропному твердих тілах у формі куба зі сталим джерелом тепла)

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертацій:**

4. Протектор Д. О., Лісін Д. О. Безсітковий підхід для розв'язку тривимірних нестационарних задач теплопровідності в анізотропному середовищі // Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ-2019) : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, 19 черв. 2019 р., Харків, 2019. С. 20-21.

5. Protektor D. O. A Meshless Approach for Solving Heat Conduction Problems in Anisotropic Solids Using Radial Basis Functions // Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the I International Scientific and Theoretical Conference, 26 Mar. 2021. : abstr. Chicago, 2021. P. 67-68.

6. Protektor D. O. Constructing Family of the Atomic Radial Basis Functions of Three Independent Variables Generated by Helmholtz-type Operator // Problemas y perspectivas de la aplicación de la investigación científica innovadora : Colección de documentos científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica, 11 Jun. 2021. : abstr. Panama, 2021. P. 117-119.

7. Protektor D. O., Hariachevska I. V. Software for simulation of non-stationary heat transfer in anisotropic solid // An integrated approach to science modernization: methods, models and multidisciplinarity : Proceedings of the III Correspondence International Scientific and Practical Conference, 29 Apr. 2022. : abstr. Vienna, 2022. P. 356-358.

8. Протектор Д. О., Гарячевська І. В. Програмний комплекс для чисельного розв'язання тривимірних задач нестационарної теплопровідності в анізотропних твердих тілах за безсітковим методом // Комп'ютерні технології і мехатроніка : збірник наукових праць за матеріалами IV Міжнародної науково-методичної конференції, 26 трав. 2022 р., Харків, 2022. С. 67-71.

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації, авторські свідоцтва:**

9. Протектор Д. О., Лісін Д. О., Лісіна О. Ю. Система комп'ютерного моделювання для розв'язку тривимірних задач теплопровідності в анізотропному середовищі // Радіоелектроніка та інформатика. 2019. Т. 84, № 1. С. 20-27. DOI: [https://doi.org/10.30837/1563-0064.1\(84\).2019.184712](https://doi.org/10.30837/1563-0064.1(84).2019.184712)

*(Особистий внесок здобувача: створив програмний комплекс «AnisotropicHeatTransfer3D» для моделювання нестационарних теплових процесів в анізотропних твердих тілах, який заснований на використанні розробленого безсіткового методу)*

10. А. с. 112945 Україна, Комп'ютерна програма “Програмний комплекс «AnisotropicHeatTransfer3D»” / Д. О. Протектор. № с202201916 ; заявл. 11.05.22 ; опубл. 16.05.22.

Результати дисертаційної роботи повністю відображені в публікаціях.

### **8. Дотримання академічної добросовісності.**

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної добросовісності.

### **9. Апробація матеріалів дисертації.**

Результати проведених досліджень представлялися на міжнародних та вітчизняних наукових конференціях у формі доповідей, за результатами яких були опубліковані матеріали наукових конференцій:

1. Протектор Д. О., Лісін Д. О. Безсіткивий підхід для розв'язку тривимірних нестационарних задач тепlopровідності в анізотропному середовищі // Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ-2019) : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, 19 черв. 2019 р., Харків, 2019. С. 20-21.

2. Protektor D. O. A Meshless Approach for Solving Heat Conduction Problems in Anisotropic Solids Using Radial Basis Functions // Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the I International Scientific and Theoretical Conference, 26 Mar. 2021. : abstr. Chicago, 2021. P. 67-68.

3. Protektor D. O. Constructing Family of the Atomic Radial Basis Functions of Three Independent Variables Generated by Helmholtz-type Operator // Problemas y perspectivas de la aplicación de la investigación científica innovadora : Colección de

documentos científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica, 11 Jun. 2021. : abstr. Panama, 2021. P. 117-119.

4. Protektor D. O., Hariachevska I. V. Software for simulation of non-stationary heat transfer in anisotropic solid // An integrated approach to science modernization: methods, models and multidisciplinarity : Proceedings of the III Correspondence International Scientific and Practical Conference, 29 Apr. 2022. : abstr. Vienna, 2022. P. 356-358.

5. Протектор Д. О., Гарячевська І. В. Програмний комплекс для чисельного розв'язання тривимірних задач нестационарної теплопровідності в анізотропних твердих тілах за безсітковим методом // Комп'ютерні технології і мехатроніка : збірник наукових праць за матеріалами IV Міжнародної науково-методичної конференції, 26 трав. 2022 р., Харків, 2022. С. 67-71.

## **10. Оцінка структури, мови та стилю дисертації.**

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступно для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму здійсненого автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченого ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

## **11. Відповідність змісту дисертації спеціальності, за якою вона подається до захисту.**

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Протектора Д. О. «Нестационарні теплові процеси в анізотропних твердих тілах» повністю відповідає паспорту спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали». Здобувачем повністю

виконано освітню та наукову складову третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

## **12. Результати обговорення та проведення презентації. Рекомендація дисертації до захисту.**

Здобувач представив основні результати своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна щодо попередньої експертизи дисертації (Витяг з протоколу № 9-1/22 розширеного засідання кафедри інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах від 28 вересня 2022 р.) у формі презентації та наукової дискусії після її завершення. На даному засіданні були присутні 11 співробітників із різних наукових та навчальних установ України, із яких 6 докторів наук та 4 кандидатів наук. Дисертанту було задано 11 запитань, на які він надав вичерпні відповіді. Також виступили 4 науковця, які позитивно відізвались про дисертаційне дослідження Протектора Д. О..

У рамках цього розширеного засідання було ухвалено одноголосно (11 голосів) рекомендувати дисертаційну роботу аспіранта Протектора Дениса Олеговича «Нестаціонарні теплові процеси в анізотропних твердих тілах» до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Кандидат фізико-математичних наук,  
доцент, завідувач кафедри  
інформаційних технологій  
в фізико-енергетичних системах  
Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна

Руслан СУХОВ