

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 32 (71) № 1 2021

Частина 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2021

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Бронін Сергій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дехтяр Анатолій Соломонович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;

Дичко Аліна Олегівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технологій та дизайну;

Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Сегай Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 6 від 03.02.2021 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2021

ЗМІСТ

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Андрущак В.С., Андрухів Т.В., Максимюк Т.А., Бешлей М.І., Думич С.С. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ МАРШРУТИЗАЦІЄЮ В ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	1
Лисенко О.І., Романюк В.А., Гуйда О.Г., Дворська С.В., Осинський А.К. КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЖИВУЧОСТІ БЕЗПРОВОДОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПЛАТФОРМ.....	10
Літвінов Є.А., Сайченко І.О. ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНОГО РАДІО ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДАННЯ СИГНАЛІВ У ВИДИМОМУ СВІТЛІ.....	17
Ольшевський С.В., Танасійчук Я.В. СИНТЕЗ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ ТЕСТОВОГО ДІАГНОСТУВАННЯ РЕЗОНАТОРНИХ БЛОКІВ МАГНЕТРОНІВ, НАПРАВЛЕНИХ НА РЕГЕНЕРАЦІЮ.....	28

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Aliiev H.A. THE CALCULATING METHOD OF NGN ACCESS NODE CHARACTERISTICS WHEN SERVICING VOICE AND DATA TRAFFIC.....	33
Баган Т.Г., Бунь В.П., Ремінна А.А. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПАРИ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛОАГРЕГАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА.....	38
Бараненко Р.В. КІБЕРАТАКИ ЯК ОДНА З ФОРМ КІБЕРТЕРОРИЗМУ.....	45
Виганяйло С.М., В'юнєнко О.Б. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У БІЗНЕС-АНАЛІТИЦІ.....	51
Войтко В.В., Бевз С.В., Бурбело С.М., Ставицький П.В. АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ СИНТЕЗУ ТА АНАЛІЗУ МУЗИЧНИХ ЗВУКІВ.....	56
Зіноватна С.Л., Комлева О.О., Улізко Г.В., Писаренко К.О. УПРАВЛІННЯ ВИМОГАМИ ДО ТЕКСТОВОГО РЕДАКТОРА З МОЖЛИВІСТЮ ДОДАВАННЯ АУДІОНОТАТОК.....	61
Івченко Р.А., Купін А.І. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ АБО ДЕТАЛЕЙ НА ВИРОБНИЦТВІ.....	67
Качурівський В.О., Качурівська Г.М. ПОБУДОВА АНІМАЦІЙНИХ ДІАГРАМ ЗАСОБАМИ CANVAS API.....	73
Киричек Г.Г., Гаркуша В.Ю. ВІРТУАЛІЗАЦІЯ ХОСТІВ НА ОСНОВІ PROXMOX VE В УМОВАХ НАДЛИШКОВОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ.....	78
Коломоєць Г.П. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПЕРЕВІРКИ ДОДАТКІВ ДО ДИПЛОМІВ ПРО ВИЩУ ОСВІТУ.....	85
Кравець А.М., Сімоненко В.П. МЕТОД ЗНАХОДЖЕННЯ ІСТОРИЧНИХ ПАМ'ЯТОК НА ЗОБРАЖЕННІ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ.....	93

Левкін Д.А., Бережна Н.Г., Макаров О.А., Кутья О.В. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.....	98
Логвін А.О. ТИПИ ГЕНЕРАТИВНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	103
Логінова Н.І., Янковський О.Г., Лобода Ю.Г., Толокнов А.А. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ФОРМУВАННЯ РОЗПОДІЛУ НАВЧАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ КАФЕДРИ.....	110
Мануляк І.З., Мельничук С.І. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ПОПЕРЕДНЬОГО ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ЗІ ЗБЕРЕЖЕННЯМ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛ ДАНИХ.....	117
Марченко Н.Б., Монченко О.В., Мартинюк Г.В. БАГАТОРІВНЕВІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ ЯК КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗВИТОК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	123
Movchan K.O., Oleshchenko L.M. CLUSTERING OF INTERNET USERS SEARCH QUERIES USING GRAPH THEORY.....	128
Озерова Д.С., Пелих С.М. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ У ГРУПІ ПІДГРІВАЧІВ ВИСОКОГО ТИСКУ.....	134
Осадчий С.І., Березюк І.А., Мельніченко М.М. МАКСИМІЗАЦІЯ ТОЧНОСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ПОСАДОЧНОЇ ПЛАТФОРМИ.....	140
Плохотнюк М.О., Пелих С.М. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ГРУПИ ПІДГРІВАЧІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	146
Чанышев Р.И. УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ДАНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ С ПРОВАЙДЕРАМИ ОБЛАЧНЫХ СЕРВИСОВ.....	151
Шаров С.В., Лубко Д.В., Шарова Т.М. ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОННОГО ПІДРУЧНИКА З УКРАЇНСЬКОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	159
Шкарупило В.В., Чемерис О.А., Душеба В.В., Кудерметов Р.К., Польська О.В. МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ДО КОНТРОЛЮ ПОКАЗНИКІВ НЕФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ.....	166
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	172

CONTENTS

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Andrushchak V.S., Andrukhiv T.V., Maksymiuk T.A., Beshlei M.I., Dumych S.S. INTELLIGENT ROUTING MANAGEMENT IN OPTICAL TRANSPORT NETWORK USING GRAPH NEURAL NETWORK.....	1
Lysenko O.I., Romaniuk V.A., Guida O.G, Dvorskaya S.V., Osinskiy A.K. CONCEPTUAL APPROACH TO SURVIVABILITY FUNCTIONAL WIRELESS SENSOR NETWORKS THROUGH THE USE OF MOBILE TELECOMMUNICATION PLATFORM.....	10
Litvinov Ye.A., Saichenko I.O. USING SOFTWARE DEFINED RADIO TO STUDY SIGNAL TRANSMISSION IN VISIBLE LIGHT.....	17
Olszewski S.V., Tanasiichuk Ya.V. INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DEFECT IN THE MAGNETRON RESONATORY SYSTEM ON THE PARAMETERS OF IT'S MICROWAVE FIELD.....	28

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Aliev H.A. THE CALCULATING METHOD OF <i>NGN</i> ACCESS NODE CHARACTERISTICS WHEN SERVICING VOICE AND DATA TRAFFIC.....	33
Bahan T.H., Boun V.P., Reminna A.A. DESIGN OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF DIRECT-FLOW BOILER STEAM TEMPERATURE USING A NEUROCONTROLLER.....	38
Baranenko R.V. CYBER ATTACKS AS A FORM OF CYBER TERRORISM.....	45
Vyhaniailo S.M., Viunenko O.B. TENDENCY OF DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY IN BIZNES ANALYTIC.....	51
Voitko V.V., Bevz S.V., Burbelo S.M., Stavytskyi P.V. ANALYSIS OF TOOLS FOR SOFTWARE IMPLEMENTATION OF SYNTHESIS SYSTEM AND ANALYSIS OF MUSICAL SOUNDS.....	56
Zinovatna S.L., Komleva O.O., Ulizko H.V., Pysarenko K.O. MANAGEMENT OF REQUIREMENTS FOR THE TEXT EDITOR WITH THE POSSIBILITY OF ADDING AUDIO NOTES.....	61
Ivchenko R.A., Kupin A.I. RESEARCH OF MULTICRITERIA OPTIMIZATION METHODS FOR SELECTION OF EQUIPMENT OR PARTS IN PRODUCTION.....	67
Kachurivskii V.O., Kachurivska H.M. CONSTRUCTION OF ANIMATION DIAGRAMS BY CANVAS API.....	73
Kirichek G.G., Harkusha V.Yu. HOSTS VIRTUALIZATION ON BASED PROXMOX VE IN CONDITIONS EXCESSIVE USE OF RESOURCES.....	78
Kolomoiets H.P. AUTOMATION OF HIGHER EDUCATION DIPLOMAS SUPPLEMENTS VERIFICATION.....	85
Kravets A.M., Simonenko V.P. LANDMARKS RECOGNITION METHOD USING COMPUTER VISION TECHNOLOGIES.....	93
Levkin D.A., Berezhnaja N.G., Makarov O.A., Kutiya O.V. MATHEMATICAL MODELING OF TECHNICAL SYSTEMS.....	98

Lohvin A.O. TYPES OF GENERATIVE NEURAL NETWORKS.....	103
Loginova N.I., Iankovskii O.G., Loboda Yu.G., Toloknov A.A. SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE TASK FOR AUTOMATED FORMATION DISTRIBUTION OF THE STUDY LOAD FOR THE TEACHING SCIENTIFIC STAFF OF THE DEPARTMENT.....	110
Melnychuk S.I., Manuliak I.Z. USING OF SIGNALS PRE-PROCESSING METHODS WITH PRESERVATION OF DATA SOURCES INFORMATIONAL PRODUCTIVITY.....	117
Marchenko N.B., Monchenko O.V., Martinyuk G.V. MULTI-LEVEL MONITORING AND DIAGNOSTIC SYSTEMS AS A CONSTRUCTIVE DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL INFORMATION SYSTEMS.....	123
Movchan K.O., Oleshchenko L.M. CLUSTERING OF INTERNET USERS SEARCH QUERIES USING GRAPH THEORY.....	128
Ozerova D.S., Pelykh S.M. SIMULATION MODELING OF AN AUTOMATIC SYSTEM FOR REGULATING THE WATER LEVEL IN THE GROUP OF HIGH-PRESSURE HEATERS.....	134
Osadchy S.I., Bereziuk I.A., Melnichenko M.M. MAXIMIZING THE STABILIZATION ACCURACY OF ANGULAR POSITION OF THE LANDING PLATFORM.....	140
Plokhotniuk M.O., Pelykh S.M. DEVELOPMENT OF PIPING AND INSTRUMENTATION DIAGRAM OF AUTOMATION FOR A GROUP OF LOW-PRESSURE HEATERS AT A NUCLEAR POWER PLANT.....	146
Chanyshev R.I. CONDITIONS OF PROVIDING CONFIDENTIALITY AND SECURITY OF USER DATA WORKING WITH CLOUD SERVICE PROVIDERS.....	151
Sharov S.V., Lubko D.V., Sharova T.M. FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF ELECTRONIC TEXTBOOK ON UKRAINIAN LITERATURE.....	159
Shkarupylo V.V., Chemerys O.A., Dusheba V.V., Kudermetov R.K., Polska O.V. MODEL-DRIVEN APPROACH TO NON-FUNCTIONAL PROPERTIES INDEXES CONTROL AT DESIGN.....	166
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	172

Левкін Д.А.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Бережна Н.Г.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Макаров О.А.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кутья О.В.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті розглянуті питання математичного моделювання багатошарових систем, які містять джерела термічних навантажень. Мета досліджень – розробка математичних моделей таких систем, а також модифікація наявних чисельних методів у частині врахування специфіки модельованих систем і технічних параметрів випромінювачів. Як досліджуваний об'єкт автори розглядають багатошаровий кулястий матеріал під дією джерел термічних навантажень. Унікальність досліджень полягає в урахуванні багатошарової структури модельованих систем і технічних параметрів випромінювачів, що дозволяє зменшити витрати технічних ресурсів, а також знизити втрати досліджуваного матеріалу.

Авторами цієї роботи наведено один із можливих алгоритмів для розрахунку температурного поля кулястого матеріалу. Запропоновано дві розрахункові математичні моделі (крайові задачі) процесу термічної дії, визначено умови їх коректності та розв'язані крайові задачі. Оскільки в основі крайових задач лежать системи багатовимірних, неоднорідних, нестационарних диференціальних рівнянь теплопровідності у сферичній системі координат, то для доказу існування і єдиності розв'язків скористалися теорією псевдодиференціальних операторів у просторі узагальнених функцій. Це дозволило визначити умови коректності не тільки розглянутих у цій роботі крайових задач, але й низки розрахункових математичних моделей процесу термічної дії на багатошарові матеріали. Реалізація розглянутих розрахункових математичних моделей на комп'ютерах для конкретного досліджуваного об'єкта в перспективі дасть можливість забезпечити контроль за розподілом температурних полів і знизити втрати досліджуваного матеріалу. Отримані результати можуть бути використані для розв'язування багатьох прикладних задач розрахунку параметрів температурних полів у різних багатошарових системах.

Ключові слова: математичні моделі, коректність, псевдодиференціальні оператори, узагальнені функції, прикладні задачі.

Постановка проблеми. У зв'язку зі значними втратами досліджуваного матеріалу і витратами технічних ресурсів багатошарових систем, які містять джерела фізичних полів, збільшується роль математичного моделювання та оптимізації таких систем. Оскільки при цьому здебільшого доводиться розв'язувати прикладні задачі нелінійного математичного програмування, то не можна стверджувати про коректність крайових задач, що лежать в основі розрахункових математичних моделей.

Об'єктом дослідження є технічні системи, які містять джерела термічного навантаження. Зважаючи на те, що особливістю матеріалів, окрім багатошарової структури, є характеристики впливу, то виникають труднощі в реалізації етапу математичного моделювання на комп'ютерах. Як приклад, до них зараховують збільшення часу і пам'яті при реалізації розрахункових математичних моделей. Це призводить до того, що модельовані системи розглядають без урахування багатошарової структури дослі-

джуваних об'єктів з усередненими значеннями технічних параметрів випромінювачів, і сприяє отриманню досить грубих оцінок технічних параметрів випромінювачів, а також наближеного розв'язку диференціальних рівнянь.

У статті представлено один із можливих алгоритмів розрахунку температурних полів багат шарового кулястого матеріалу під впливом джерел термічного навантаження. Наведено приклади двох розрахункових математичних моделей процесу термічного впливу на багат шарові кулясті матеріали, в основі яких лежать крайові задачі систем багатомірних, нестационарних, неоднорідних диференціальних рівнянь теплопровідності у сферичних координатах. Для доказу коректності крайових задач використано теорію псевдодиференціальних операторів у просторі узагальнених функцій, представлено схему для розв'язування крайових задач. Дослідження цієї роботи можна застосувати для розрахунку температурних полів довільних багат шарових технічних систем. При цьому зазначають зміни постановка і методи реалізації крайових задач, але алгоритм для їх чисельної реалізації залишиться майже без змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Універсальність і широке застосування тематики досліджень цієї роботи привертала увагу багатьох учених [1–5]. У монографіях [1; 2] наведено розрахунок і оптимізацію технічних систем, які містять джерела дії фізичних полів. У цих роботах здійснено формалізацію і систематизацію прикладних задач оптимізації, що дозволило запропонувати чисельні методи і програмно-апаратні засоби для автоматизації досліджень технічних систем. Для досліджень цієї статті важливість результатів монографій [1; 2] полягає в універсальності наведених методів розрахунку і оптимізації технічних систем. Водночас їх авторами не наведено розподіл температурних полів у технічних системах залежно від характеристик параметрів випромінювачів. Розв'язанню прикладних задач оптимізації біотехнологічних систем під дією лазерного променя присвячено результати публікацій [3–5]. Незважаючи на те, що в цих роботах вказується на важливість етапу математичного моделювання та оптимізації під час побудови програмно-апаратних засобів процесу впливу, автори не розглядають теплових режими впливу на ембріон, а технічні характеристики випромінювачів усереднені. Це призводить до додаткових похибок під час розрахунку значень функції мети і параметрів випромінювачів.

Постановка завдання. Запропонувати підхід до чисельної реалізації процесу моделювання технічних систем, які містять джерела термічного навантаження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо крайову задачу системи диференціальних рівнянь теплопровідності процесу термічної дії на кулястий двошаровий матеріал:

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} - \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + q_1 = 0; \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} - \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r_2} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + q_2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де ρ_1, ρ_2 – коефіцієнти густини зовнішнього та внутрішнього шарів матеріалу; c_1, c_2 – коефіцієнти теплоємності зовнішнього та внутрішнього шарів матеріалу; $T_1 = T_1(r, t)$, $T_2 = T_2(r, t)$ – температурні поля шарів; r – просторова координата; t – час термічної дії; λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопровідності шарів; q_1, q_2 – питомі густини потужності термічних навантажень у матеріалі.

Граничні умови Діріхле:

$$\begin{cases} T(r_0, t_0) = T_0; \\ T(r_n, t_n) = T_n, \end{cases} \quad (2)$$

де T_0 – температура зовнішнього шару матеріалу на початку термічної дії; T_n – температура внутрішнього шару матеріалу наприкінці термічної дії.

Рівності розділу середовищ у матеріалі:

$$T_1(r_1, t_1) = T_2(r_2, t_2), \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}. \quad (3)$$

Рівності неперервності температурних полів:

$$\begin{cases} T(r_1, t_1 - 0) = T(r_1, t_1 + 0); \\ T(r_2, t_2 - 0) = T(r_2, t_2 + 0). \end{cases} \quad (4)$$

Граничні умови теплового обміну на границі розділу зовнішнього шару сферичного матеріалу та навколишнього середовища:

$$\left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - A(T_1 - T_{env}) \right) \Big|_{r=0} = 0, \quad (5)$$

де A – параметр тепловіддачі зовнішнього шару матеріалу;

T_{env} – температура навколишнього середовища.

Розглянемо крайову задачу системи диференціальних рівнянь теплопровідності процесу термічної дії на кулястий багат шаровий матеріал:

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} - \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + q_1 = 0; \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} - \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r_2} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + q_2 = 0; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \rho_N c_N \frac{\partial T_N}{\partial t} - \lambda_N \left(\frac{\partial^2 T_N}{\partial r^2} + \frac{2}{r_N} \frac{\partial T_N}{\partial r} \right) + q_N = 0, \end{cases} \quad (6)$$

де $T_e = T_e(r, t)$ – температурні поля багатощарового матеріалу; r_e – просторова координата, в якій розраховано значення температурного поля; t_e – часова координата.

Інші позначення залишаються такими ж, як у крайовій задачі (1) з урахуванням багатощарової структури матеріалу. Граничні умови Діріхле (2) встановлюють початок та кінець термічної дії на багатощаровий матеріал.

Рівності розділу середовищ застосовані для урахування багатощарової структури матеріалу:

$$\begin{cases} T_1(r_1, t_1) = T_2(r_2, t_2), \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}; \\ T_2(r_2, t_2) = T_3(r_3, t_3), \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ T_{N-1}(r_{N-1}, t_{N-1}) = T_N(r_N, t_N), \quad -\lambda_{N-1} \frac{\partial T_{N-1}}{\partial r} = -\lambda_N \frac{\partial T_N}{\partial r}. \end{cases} \quad (7)$$

Позначення такі ж, як у системі (6).

Рівності неперервності температурних полів:

$$\begin{cases} T(r_1; t_1 - 0) = T(r_1; t_1 + 0); \\ T(r_2; t_2 - 0) = T(r_2; t_2 + 0); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ T(r_N; t_N - 0) = T(r_N; t_N + 0). \end{cases} \quad (8)$$

Для врахування теплового обміну застосовано граничні умови (5).

Використовуючи результати публікацій [6; 7], перевіримо коректність розглянутих крайових задач. Для цього проведемо дослідження диференціального рівняння:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q = 0. \quad (9)$$

Диференціальний символ рівняння:

$$P(r, \tau, \eta) = P_0(r, \tau, \eta) + P_1(r, \tau, \eta) = i\tau + \frac{\lambda}{\rho c} \eta^2 - \frac{2\lambda i \eta}{\rho c r}. \quad (10)$$

Поліном $P_0(r, \tau, \eta)$ за $\text{Im } \tau < 0$ буде експоненціально-коректним та вдовольнить умову сталості сили. За $\text{Im } \tau \rightarrow -\infty$ і $r > \delta$ псевдодифе-

ренціальний оператор $P_1(r, D)T$ є підлеглим оператору $P_0(r, D)T$.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що розглянуті в роботі крайові задачі будуть коректними в просторі узагальнених функцій гладко залежних від часу.

О.А. Макаровим і Д.А. Левкіним запропоновано універсальний алгоритм для розв'язування крайової задачі (6) – (8). Розглянемо в загальному випадку однорідну та неоднорідну крайові задачі:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = P_1 \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, t); \\ \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = P_2 \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, t); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = P_N \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, t), \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_0 \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, 0) + D_1 \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, t_1) + \dots + \\ + D_N \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, t_N) = \varphi(x), \end{aligned} \quad (12)$$

де $P_j \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right)$ і $D_j \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right)$ – псевдодиференціальні оператори із символами з простору нескінченно диференційованих функцій степеневого зростання, $j = 1, \dots, N$

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = P_1 \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, t) + f(x, t); \\ \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = P_2 \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, t) + f(x, t); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = P_N \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, t) + f(x, t). \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} D_0 \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, 0) + D_1 \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, t_1) + \dots + \\ + D_N \left(\frac{\partial}{i\partial x} \right) T(x, t_N) = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Позначення залишаються такими ж, як у крайовій задачі (11) – (12).

Подіємо перетворенням Фур'є на рівняння з однорідної й неоднорідної крайових задач (11) – (12), (13) – (14) відповідно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tilde{T}(s,t)}{\partial t} = P_1(s)\tilde{T}(s,t); \\ \frac{\partial \tilde{T}(s,t)}{\partial t} = P_2(s)\tilde{T}(s,t); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{\partial \tilde{T}(s,t)}{\partial t} = P_N(s)\tilde{T}(s,t), \end{array} \right. \quad (15)$$

$$D_0(s)\tilde{T}(s,0) + D_1(s)\tilde{T}(s,t_1) + \dots + D_N(s)\tilde{T}(s,t_N) = \tilde{\varphi}(s), \quad (16)$$

де $\tilde{T}(s,t)$ – перетворення Фур’є функції $T(x,t)$; $\tilde{\varphi}(s)$ – перетворення Фур’є функції $\varphi(x)$. Аналогічно, отримали:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tilde{T}(s,t)}{\partial t} = P_1(s)\tilde{T}(s,t) + \tilde{f}(s,t); \\ \frac{\partial \tilde{T}(s,t)}{\partial t} = P_2(s)\tilde{T}(s,t) + \tilde{f}(s,t); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{\partial \tilde{T}(s,t)}{\partial t} = P_N(s)\tilde{T}(s,t) + \tilde{f}(s,t), \end{array} \right. \quad (17)$$

$$D_0(s)\tilde{T}(s,0) + D_1(s)\tilde{T}(s,t_1) + \dots + D_N(s)\tilde{T}(s,t_N) = 0, \quad (18)$$

де $\tilde{f}(s,t)$ – перетворення Фур’є функції $f(x,t)$. З умови неперервності отримали:

$$\tilde{\varphi}_k(s) = \exp(t_1 P_1(s) + (t_2 - t_1)P_2(s) + \dots + (t_{j-1} - t_{j-2})P_{j-1}(s))\tilde{\varphi}_1(s). \quad (19)$$

Провівши низку алгебраїчних перетворень, знайшли розв’язок крайової задачі (15) – (16):

$$\tilde{T}(s,t) = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{\varphi}(s) \cdot \exp(t P_1(s) / \Delta(s)); \\ \tilde{\varphi}(s) \cdot \exp(t P_2(s) / \Delta(s)); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ \tilde{\varphi}(s) \cdot \exp(t_1 P_1(s) + \dots + (t - t_{N-1})P_N(s) / \Delta(s), \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\Delta(s) = D_0(s) + \dots + D_N(s) \exp(t_1 P_1(s) + (t_2 - t_1)P_2(s) + \dots + (t_N - t_{N-1})P_N(s)).$$

Отримані результати можуть бути використані для дослідження прикладних оптимізаційних математичних моделей, розглянутих, наприклад, в роботі [8]. На думку Д.А. Левкіна, для оптимізації технічних систем із метою підвищення якості технологічних процесів необхідна одночасна реалізація хоча б двох прикладних оптимізаційних математичних моделей.

лізація хоча б двох прикладних оптимізаційних математичних моделей.

Математична модель мінімізації (за параметрами термічного навантаження Y) максимального значення температурного поля:

$$\min_Y \max T(x, y, z, t, Y), \quad (21)$$

де $(x, y, z) \in \Omega^*$ – область матеріалу; t – час дії.

Математична модель мінімізації (за параметрами термічного навантаження Y) травмування матеріалу:

$$L = \frac{V_{\text{segm}}}{V} \times 100\% \rightarrow \min_Y, \quad (22)$$

де V_{segm} – об’єм частини матеріалу, що піддається термічному навантаженню; V – об’єм матеріалу.

Зазначимо, що для оптимізації багатьох технічних систем необхідні додаткові витрати часу та пам’яті під час реалізації прикладних задач оптимізації на комп’ютерах. Зазначені труднощі можна подолати за рахунок використання аналогових чи гібридних сіткових процесорів. Різновид математичного моделювання розглянуто в публікаціях [9; 10] для визначення надійності надання транспортних послуг та підвищення ефективності функціонування транспортних підприємств.

Висновки. У статті досліджені питання розв’язання прикладних задач нелінійного математичного програмування. Авторами запропоновано один із можливих алгоритмів для чисельної реалізації розрахункових математичних моделей. Наведено приклади двох розрахункових математичних моделей для багатошарових матеріалів, які перебувають під впливом джерел термічного навантаження, визначено й обґрунтовано умови коректності розглянутих крайових задач, а також у загальному вигляді здійснено їх реалізацію. З огляду на те, що досить часто під час моделювання технічних та інших систем доводиться мати справу з багатовимірними, нелінійними і нестационарними диференціальними рівняннями, то не можна гарантувати їх коректність. Тому для визначення умов існування і єдиності розв’язування крайових задач можна скористатися теорією псевдодиференціальних операторів у просторі узагальнених функцій. Це дозволить гарантувати коректність розглянутих розрахункових математичних моделей для багатьох технічних систем, які містять джерела термічного навантаження. Дослідження статті вирізняються універсальністю і можуть бути використані для розв’язування багатьох прикладних задач розрахунку та оптимізації багатошарових систем.

Список літератури:

1. Стоян Ю.Г., Путятин В.П. Оптимизация технических систем с источниками физических полей. Киев : Наук. думка, 1988. С. 44–48.
2. Стоян Ю.Г., Путятин В.П. Размещение источников физических полей. Киев : Наук. думка, 1981. С. 59–87.
3. Levkina R., Levkin A., Petrenko A., Kolomic N. Current approaches to biotechnology in animal husbandry. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020. Vol. 29, Issue 8. P. 2463–2469.
4. Antinori S. Experience with the UV non contact laser in a assisted hatching in human. *Journal of Assist Reprod and Genet*. 1997. Vol. 14, Issue 5. 200 p.
5. Douglas-Hamilton D.H., Conia J. Thermal effects in laser-assisted pre-embryo zona drilling. *Journal of Biomedical Optics*. 2001. Vol. 6, Issue 2. P. 205. DOI: 10.1117/1.1353796.
6. Левкин Д.А. Адекватность расчетной математической модели процесса лазерного воздействия на эмбрион. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. Київ, 2018. Т. 29 (68), № 3., Частина 1. С. 166–169.
7. Makarov A.A., Levkin D.A. Boundary-value problems in a layer for evolutionary pseudo-differential equations with integral conditions. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: «Математика, прикладна математика і механіка»*. 2018. Т. 87. 2018. С. 61–68.
8. Мегель Ю.Е., Путятин В.П., Левкин Д.А., Левкин А.В. Математическое моделирование и оптимизация параметров действия лазерного луча на многослойные биоматериалы. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси». Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 20 (1242). С. 60–64.
9. Vojtov V., Kutija O., Berezhnaja N., Karnaukh M., Bilyaeva O. Modeling of reliability of logistic systems of urban freight transportation taking into account street congestion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, No. 3. P. 15–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.175064.
10. Volkov V., Taran I., Volkova T., Pavlenko O., Berezhnaja N. Determining the efficient management system for a specialized transport enterprise. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2020. Vol. 4. P. 185–191. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/185>.

Levkin D.A., Berezhnaja N.G., Makarov O.A., Kutija O.V. MATHEMATICAL MODELING OF TECHNICAL SYSTEMS

The article considers the issues of mathematical modeling of the multilayer systems that contain sources of thermal loads. The purpose of the research is to develop mathematical models of such systems, as well as modification of existing numerical methods in terms of taking into account the specifics of the modeled systems and technical parameters of emitters. As the object under study, the authors consider a multilayer spherical material under the action of thermal loads. The uniqueness of the research is to take into account the multilayer structure of the simulated systems and technical parameters of the emitters, which reduces the cost of technical resources, as well as reduce the loss of the studied material.

The authors of this work present one of the possible algorithms for the calculating the temperature field of the spherical material. Two calculated mathematical models (boundary value problems) of the thermal action process are proposed, the conditions of their correctness are determined and boundary value problems are solved. Since the boundary value problems are based on systems of multidimensional, inhomogeneous, nonstationary differential thermal equations in a spherical coordinate system, the theory of pseudodifferential operators in the space of generalized functions was used to prove the existence and uniqueness of solutions. This allowed us to determine the conditions for the correctness not only of the boundary value problems considered in this paper, but also of a number of calculated mathematical models of the thermal action process on multilayer materials. The implementation of the considered calculation mathematical models on computers for a specific object under study in the future will provide control over the distribution of temperature fields and reduce the loss of the studied material. The obtained results can be used to solve many applied problems of calculating the parameters of temperature fields in different multilayer systems.

Key words: *mathematical models, correctness, pseudodifferential operators, generalized functions, applied problems.*

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 32 (71) № 1 2021

Частина 1

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 15,20. Ум. друк. арк. 21,16. Зам. № 0321/81

Підписано до друку 04.02.2021. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +38 (048) 709 38 69,

+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.