

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РИНДЮК СВІТЛАНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 699.059: 536.212.3

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Риндюк С.В.

Науковий керівник Дудар Ігор Никифорович, доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2018

АНОТАЦІЯ

Риндюк С.В. Метод визначення теплопровідності будівельних матеріалів та виробів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 «Будівельні матеріали та вироби». – Вінницький національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Вінниця, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної проблеми підвищення теплопровідності будівельних матеріалів та виробів.

Розглянуто методи експериментального та теоретичного дослідження теплопровідності будівельних матеріалів та виробів, які використовуються для дослідження розповсюдження температури в багат шарових конструкціях. Здійснено огляд праць за темою дослідження.

Питаннями вивчення теплопровідності огорожувальних виробів, дослідженням температурних полів займалися такі видатні вчені: А. В. Ликов, Г. Карслоу, В. М. Богословський, В. Д. Мачинський, О. Є. Власов, П. В. Цой, В. М. Ільїнський, Ф. В. Ушков, А. М. Шкловер, Б. Ф. Васильєв, С. Н. Шорін, Л. Ф. Черних, Г. Г. Фаренюк, Є. Г. Фаренюк, С. Л. Фомін, А. М. Пріщенко, Д. О. Міхеєв, Е. М. Карташов, Н. І. Нікітенко, Л. А. Коздоба, В. Л. Рвачев, А. П. Слесаренко, Н. М. Беляєв та інші.

Однак ці дослідження використовуються для стаціонарного режиму роботи огорожувальних багат шарових конструкцій, що не дозволяють проаналізувати динаміку процесу теплопереносу складових стін при мінливій в часі температурі зовнішнього повітря.

При виконанні теплотехнічних розрахунків, пов'язаних з визначенням термічного опору конструкцій для огороження, зазвичай вирішується питання,

коли потрібно знайти товщину шару утеплювача при відомих товщинах інших матеріалів, з яких складається конструкція.

У багатьох випадках елементи конструкції є багатошаровими. Кожному елементу, що входить в систему, притаманні свої теплофізичні, механічні та інші властивості, які найбільш повно узгоджуються з призначенням шарів. Рівність температур теплових потоків на межі розділу тіл свідчить про наявність ідеального термічного контакту. Якщо ж через мікронерівності дійсна площа зіткнення значно менша геометричної, то на місці з'єднання тіл виникає тепловий опір поверхонь, що контактують. При цьому температура на місцях з'єднання конструкцій не буде однаковою.

Теоретичні методи дають можливість досліджувати обмежене коло питань. Отримані на їх основі точні співвідношення виражаються функціональними залежностями, які проблематично використовувати в розрахунковій практиці.

Разом з точними аналітичними методами для дослідження перенесення тепла в багатошарових конструкціях використовувалися і чисельні методи.

На сьогодні базою математичного моделювання для вивчення процесів тепломасопереносу як в теоретичних, так і в практичних дослідженнях є теорія, заснована на законі Фур'є для розповсюдження тепла.

Серед методів розв'язання нестационарної задачі теплопровідності найбільш відомими є класичний метод розділення змінних, метод сіток, варіаційні та проекційні методи, метод R-функцій, метод скінченних елементів.

Основним методам розв'язання нестационарних задач теплопровідності присвячені роботи вчених України та зарубіжжя, а саме: В. В. Скопечького, І. В. Сергієнка, Г. А. Шинкаренка, Г. В. Залужної, П. В. Черпакова, Г. Н. Дулнева, С. О. Тихомірова, Y. Sakai, Е. Мітчела, Р. Уейта, R. Barnhill, J. Cavendish, W. Gordon, G. Nielson та інших.

У результаті вивчення вітчизняних та зарубіжних публікацій щодо визначення теплопровідності встановлено, що розповсюдження температури в будівельних виробках визначається для кожного окремого шару в цілому і розрахунок температурного поля одно- та багат шарових стінових конструкцій свідчить про відсутність більш достовірної інформації розповсюдження температури в кожному шарі конструкції.

З метою визначення теплопровідності будівельних матеріалів та виробів в основу досліджень покладено аналітичний, графічний та практичний методи розрахунку.

У результаті досліджень методів найточнішим виявився практичний метод розрахунку теплопровідності (метод Фокіна). Він виявляє дослідження розповсюдження температури в усіх вузлах досліджуваного матеріалу шляхом розбиття його на квадрати (метод сітки): попередньо задаються деякі довільні значення температури в усіх вузлах сітки, потім послідовно обчислюють значення температур, замінюючи попередні значення отриманими до тих пір, поки в кожному вузлі сітки поля температура не стане задовольнятися відповідними рівняннями при заданих температурах повітря з одного і з іншого боку конструкції. Процес розрахунку можна вважати закінченим тільки тоді, коли в межах заданої точності температура залишається постійною у всіх вузлах сітки.

В аналітичному методі розрахунок температурного поля базується на основі класичної теорії температурного поля. Тобто дослідження теплопровідності зводиться до дослідження просторово-часової зміни температури в межах усіх шарів конструкції. При цьому коефіцієнти теплопровідності матеріалів не залежать від температури і зміна температури зображується прямою лінією.

Для визначення температури в багат шарових конструкціях графічним методом відкладають горизонтальну вісь, що відповідає нульовій температурі та

відкладають всі термічні опори. Через отримані точки проводять вертикальні лінії, які відповідають температурі t_b та t_3 і з'єднують прямою лінією. Точки перетину цієї прямої з відповідними вертикальними лініями дають межі відрізків, що виражають величини температур на межах шарів конструкції.

Для дослідження розповсюдження температури в багатошарових виробках розроблено та реалізовано методику експериментальних досліджень на експериментальній установці. Всередині установки розміщено конструкцію, яка імітує реальну частину стіни з різними видами утеплювачів. З її допомогою визначали розповсюдження температури в багатошарових виробках з різними видами утеплювачів.

Дослідження проводились для реальної частини стіни з двома видами утеплювачів: пінопласту та мінеральної вати з внутрішнім та зовнішнім утепленням. Експериментальні дослідження дали змогу підтвердити нелінійну залежність поширення температури в більшій частині конструкції. Тобто в частині утеплення спостерігається лінійна залежність, а в основній частині конструкції - нелінійна. На основі експерименту отримано графічні та аналітичні залежності зміни температури в часі по товщині конструкції для різних видів утеплювальних матеріалів та різних видів утеплення.

Запропоновано моделювання теплопровідності багатошарових будівельних виробів, основою якого є розв'язок задачі нестационарної теплопровідності шляхом розбиття кожного шару матеріалу на n -ну кількість прошарків.

Для теоретичного дослідження теплопровідності розглянуто розв'язок задачі нестационарної теплопровідності за допомогою інтегрального методу прямих, коли область складається з трьох частин з різними коефіцієнтами теплопровідності. З метою визначення температури в кожному шарі конструкції та місцях їх з'єднання використовуються отримані рекурентні формули для коефіцієнтів наближеного розв'язку системи рівнянь нестационарної

теплопровідності. За рахунок інтегрування рівняння теплопровідності навколо кожного вузла з врахуванням наближеного розв'язку отримана система диференціальних рівнянь 1-го порядку відносно значень температури у вузлових точках відповідного шару конструкції. Зміна області інтегрування призводить до розв'язання задачі за методом прямих, покращеному методу прямих та методу з вибором області інтегрування за рахунок початкових умов.

Враховуючи отримані результати з різними різницевиими схемами, можна обрати точніший розв'язок для конкретного компонування матеріалів.

Змінюючи товщину шарів та коефіцієнти теплопровідності матеріалів, можна підібрати необхідне компонування матеріалів для досягнення відповідної мети. А це, можливо, дасть змогу отримати нові теплоізолюючі матеріали.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблений метод дозволяє точніше визначати розповсюдження температури в багатошарових будівельних матеріалах та виробках. Це дасть можливість розробляти ефективніші матеріали для утеплення. Для розрахунку товщини утеплювального матеріалу для 9-ти поверхового будинку в м. Білогородка Київської області виконано дослідне впровадження розробленого методу для ТОВ «ДЕВЕЛОПМЕНТ БІЛДІНГ ГРУП».

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено нелінійність градієнта температури шляхом поділу багатошарової конструкції на n -ну кількість прошарків;
- запропоновано новий метод дослідження теплопровідності багатошарових виробів завдяки використанню рекурентних формул для визначення коефіцієнтів, які входять в наближений розв'язок для будь-якого числа розбиття областей інтегрування, що дозволяє обирати різницеві схеми розрахунку й аналізувати достовірність результатів;

- вдосконалено метод розрахунку теплопровідності багатошарових виробів з врахуванням граничних умов першого, другого та третього роду, що дозволяє отримати різницеві схеми.

Ключові слова: теплопровідність, енергоефективність, термічний опір, температура, температурне поле, утеплювальні матеріали, багатошарові будівельні конструкції, будівельні вироби, чисельні методи.

ABSTRACT

Ryndiuk S. Method of determining the thermal conductivity of building materials and wares. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a Candidate Scientific Degree of Technical Sciences. Speciality 05.23.05 «Building materials and wares». - Vinnytsia National Technical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia, 2018.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and practical problem of increasing the thermal conductivity of building materials and products.

Considers the methods of experimental and theoretical studies of thermal conductivity of building materials and products that are used to study the temperature distribution in multilayer structures. Reviewed papers on the topic of the study.

The following outstanding scientists engaged in the study of the thermal conductivity of enclosing design, the study of temperature fields: A. Likov, G. Karslow, V. Bogoslovsky, V. Machinsky, A. Vlasov, P. Tsoi, V. Ilyinsky, F. Ushkov, A. Shklover, B. Vasiliev, S. Shorin, L. Chernykh, G. Fahrenyuk, E. Fahrenyuk, S. Fomin, A. Prishchenko, D. Mikheev, E. Kartashov, N. Nikitenko, L. Kozdoba, B. Rvachev, A. Slesarenko, N. Belyaev and others.

However, these studies are used for the stationary operation mode of the enclosing multilayer structures, do not allow to analyse the dynamics of the process of

heat transfer components of the walls with the changing time, the outdoor air temperature.

When performing heat engineering calculations related to the definition of thermal resistance of structures for fencing, it is usually solved the question when it is necessary to find the thickness of the heater layer with known thicknesses of other materials from which the design is made.

In many cases, the elements of the construction are multilayered, each of the elements included in the system, has its thermophysical, mechanical and other properties that are most fully consistent with the designation of the layers. If the equality of the temperatures of heat fluxes occurs at the boundary of the body, this indicates that there is an ideal thermal contact. If, due to micronivity, the actual area of collision is considerably less geometric, then the thermal resistance of the contacting surfaces occurs at the point of the body junction. At the same time, the temperature at the joints of the structures will not be the same.

Theoretical methods provide the opportunity to explore a limited range of issues. The exact relationships obtained on their basis are expressed by functional dependencies, which are difficult to use in the calculation practice.

Together with precise analytical methods for the study of heat transfer in multilayer structures used numerical methods.

For today the base of mathematical modeling to study the processes of heat and mass transfer processes, both in theoretical and practical studies is a theory based on the Fourier law for heat propagation.

Among the methods of solution of nonstationary heat conductivity, the best known are the classic variable separation method, grid method, variational and projection methods, the method of R-functions, finite element method.

The main methods of solving nonstationary problems of heat conduction dedicated to the work of scientists in Ukraine and abroad, namely: V. Skopetsky, I. Sergienko, G. Shynkarenko, G. Zaluzhnaya, P. Cherpakova, G. Dulneva,

S. Tikhomirova, Y. Sakai, E. Mitchell, R. Wait, R. Barnhill, J. Cavendish, W. Gordon, G. Nielson and others.

A study of domestic and foreign publications on the determination of the thermal conductivity found that the distribution of temperature in structural elements is determined for each layer as a whole and the calculation of the temperature field of single and multilayer wall structures indicates the absence of more accurate information the temperature distribution in each layer of the structure.

To determine the thermal conductivity of building materials and products as the basis of research based on analytical, graphical and practical methods of calculation.

As a result of the research methods was the most accurate practical method of calculating thermal conductivity method (Fokine). He finds the study of the distribution of temperature at all nodes of the studied material by breaking it into squares (grid method): pre-defined some arbitrary values of temperature in all grid nodes, and then sequentially calculates the values of the temperature, replacing the previous values obtained as long as each grid node of the field temperature will not be content with the relevant equations for given air temperatures on either side of the structure. The calculation process can be considered complete only when within the given accuracy the temperature remains constant in all grid nodes.

In the analytical method, the calculation of the temperature field based on the classical theory of the temperature field. That is, the study of the thermal conductivity is reduced to the study of spatial-time variations of the temperatures within all layers of the design. The coefficients of thermal conductivity of materials does not depend on temperature and change of temperature is depicted by a straight line.

To determine the temperature in multilayer structures graphically lay horizontal axis, which corresponds to zero temperature and set aside all of the thermal resistance. Through the got the point conduct vertical lines are made that correspond to the temperature of the internal and external air and connect a straight line. The points of intersection of this line with the corresponding vertical lines give the boundaries of

the segments, which express the values of temperatures at the boundaries of the layers of the design.

To study the temperature distribution in multilayer construction developed and implemented an experimental method the experimental setup. Inside the installation there is a construction that mimics the real part of the wall with different types of heaters. It was determined the temperature distribution in multilayer products with different types of insulation.

The research was conducted for the real part of a wall with two types of insulation: polystyrene and mineral wool with the internal and external insulation. The pilot study allowed to confirm the nonlinear dependence of the distribution of temperature in most parts of the structure. That is, in terms of insulation, there is a linear dependence, but in the main part of the structure is non linear. On the basis of the experiment received graphical and analytical dependences of temperature change over time on the corpulence of the structure for different types of insulation materials and different types of insulation.

The proposed modeling of thermal conductivity of multilayer construction products, which is based on the solution of the problem unsteady heat conduction problems by breaking each layer of material on a certain number of layers.

For a theoretical study of thermal conductivity reviewed the problem of unsteady heat conduction using the direct integral method, when the region consists of three parts with different coefficients of thermal conductivity. With the aim of determining the temperature in each layer of the structure and the connection uses the derived recursion formulae for the coefficients of the approximate solution of system of equations of nonstationary heat conductivity. By integrating the heat equation around each node, taking into account the approximate solution, we obtain a system of differential equations of the first order in relation to the temperature values at the nodal points of the corresponding construction layer. The change of the integration

results to the solution of direct method, the improved method and direct method with the selection of the region of integration due to the initial conditions.

Considering the results obtained with various differencing schemes, you can select the exact solution for a specific composing of materials.

By changing the thickness of layers and coefficients of thermal conductivity of materials, you can choose the desired composing of materials to achieve the relevant goal. And, probably, will allow to obtain new insulating materials.

Practical application of received results.

Practical significance of the obtained results is that the developed method allows to determine more precisely the distribution of temperature in the layered construction materials and product. This will allow you to develop more efficient materials for insulation. To calculate the thickness of insulation material for a 9-storey house in the town of bilohorodka of the Kyiv region experimental implementation of the developed method for «LLC DEVELOPMENT GROUP».

Scientific innovation of the received results:

- theoretically substantiated and experimentally confirmed the nonlinearity of the temperature gradient by dividing the multilayered structure into a certain number of layers;

- the a new method is proposed of investigation of thermal conductivity of multilayer products through the use of recursive formulas to determine the coefficients included in the approximate solution for any number of partitioning areas of integration that allows you to select a difference scheme calculate and analyze the reliability of the results;

- improved an improved method for calculation of thermal conductivity of multilayer products subject to the boundary conditions of the first, second and third kind, which allows to obtain a difference scheme.

Keywords: thermal conductivity, energy efficiency, thermal resistance, temperature, temperature field, thermal insulation materials, multi-layered building constructions, building products, numerical methods.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та Т. І. Міщук, «Моделювання теплопровідності двовимірних неоднорідних багат шарових середовищ», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник*, № 3, с. 105 - 111, 2006.
- [2] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та Т. І. Міщук, «Чисельно-аналітичний розв'язок одновимірної релаксаційної математичної моделі теплопровідності», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник*, № 4, с. 119 - 122, 2007.
- [3] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та Т. І. Міщук, «Моделювання процесу теплопровідності двовимірного тришарового середовища», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник*, № 5, с. 99 -103, 2008.
- [4] С. В. Риндюк, та І. Н. Дудар, «Методика дослідження температурного поля з врахуванням нестационарних коефіцієнтів», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник*, № 5, с. 96 - 98, 2008.
- [5] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та Т. І. Міщук, «Автоматизація розв'язання задачі теплопровідності двовимірного неоднорідного багат шарового середовища», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 162 - 166, 2009.
- [6] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та Т. І. Міщук «Дослідження процесу теплопровідності багат шарових середовищ з врахуванням явища релаксації

- за допомогою інтегрального методу прямих», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник*, № 1, с. 84 - 91, 2009.
- [7] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та Н. І. Старушок, «Розв'язок біпараболічного рівняння теплопровідності за допомогою інтегрального методу прямих», *Сучасні технології матеріалів і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник*, № 1. с. 89 - 91, 2012.
- [8] С. В. Риндюк, «Исследование повышения теплоизоляции зданий и сооружений», *Приволжский научный вестник: научно-практический журнал*, № 10 (26), с. 45 - 47, 2013.
- [9] С. В. Риндюк, та І. Н. Дудар, «Дослідження теплофізичних характеристик утеплення конструкцій будівель та споруд», *Енергоефективність в будівництві та архітектурі: науково-технічний збірник*, № 4, с. 100 - 103, 2013.
- [10] С. В. Риндюк, та І. Н. Дудар, «Енергоефективні матеріали та конструкції для теплового захисту будівель і споруд», *Сучасні технології матеріалів і конструкції в будівництві: міжнародний науково-технічний журнал*, № 2, с. 31 -35, 2017.
- [11] С. В. Риндюк, «Автоматизація дослідження теплопередачі багат шарових середовищ при нестационарному тепловому потоці», в *IV Міжнародна конференція молодих вчених ГАС–2011. Геодезія, архітектура та будівництво*, с. 130 - 131, 2011.
- [12] С. В. Риндюк, та І. Н. Дудар, «Дослідження підвищення теплоізоляції будинків та споруд», в *Матеріалах Міжнародної науково-практичної конференції. Енергоефективні технології в міському будівництві та господарстві*, с. 39 - 42, 2012.
- [13] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та А. М. Власенко, «Моделювання процесу теплопровідності віконної рами з утепленням», *Сучасні технології, матеріали*

і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник, № 2, с. 101 - 105, 2009.

- [14] С. В. Риндюк, та А. М. Власенко, «Моделювання високотемпературного руйнування залізобетонних конструкцій», 2014, 108 с.

ЗМІСТ

ВСТУП		20
РОЗДІЛ 1	АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БУДІВНИЦТВІ	25
1.1.	Енергозбереження в будівництві. Енергетична паспортизація та нормування витрат енергії	25
1.2	Дослідження процесу теплопровідності огорожувальних конструкцій будівель	30
1.3	Методи дослідження теплопровідності багатошарових будівельних виробів	35
1.4	Дослідження нестационарної теплопровідності багатошарових будівельних виробів	40
1.5	Робоча гіпотеза досліджень	44
1.6	Висновки до розділу	44
РОЗДІЛ 2	МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАПЛАНОВАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	45
2.1	Конструкції зовнішніх стін з теплоізоляцією та вимоги до проектування та влаштування	45
2.2	Аналіз існуючих методів дослідження теплопровідності багатошарових будівельних виробів	48
2.2.1	Аналітичний метод розрахунку теплопровідності в будівельних виробках	48
2.2.2	Графічний метод розрахунку теплопровідності в будівельних виробках	50
2.2.3	Практичний метод розрахунку теплопровідності в будівельних виробках (метод Фокіна)	52
2.3	Розробка методики експериментальних досліджень	57

2.3.1	Розробка експериментальної установки	57
2.3.2	Підбір приладів для експериментального дослідження теплопровідності багат шарових виробів та аналіз їх характеристик	60
2.3.3	Вибір матеріалів для дослідження теплопровідності багат шарових виробів та аналіз їх характеристик	62
2.4	Прогнозування точності та достовірності результатів	65
2.5	Висновки до розділу	66
РОЗДІЛ 3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ БАГАТОШАРОВИХ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ	68
3.1	Дослідження теплопровідності конструкції стіни з облицювальної та повнотілої цегли з внутрішнім утеплювачем з пінопласту	68
3.2	Дослідження теплопровідності конструкції стіни із облицювальної та повнотілої цегли з внутрішнім утеплювачем із мінеральної вати	73
3.3	Дослідження теплопровідності стінової конструкції повнотілої цегли з зовнішніми утеплювачами з мінеральної вати та пінопласту	77
3.4	Висновки до розділу	82
РОЗДІЛ 4	МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ БАГАТОШАРОВИХ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ	84
4.1	Підвищення теплоізоляції будинків та споруд	84
4.2	Вплив теплофізичних характеристик утеплення конструкцій будівель та споруд	86
4.3	Задача нестационарної теплопровідності в багат шарових середовищах	89

4.4	Чисельно-аналітичний розв’язок одномірної релаксаційної математичної моделі теплопровідності	91
4.5	Задача теплопровідності двовимірного неоднорідного багатошарового середовища	96
4.6	Моделювання процесу теплопровідності двовимірного тришарового середовища	101
4.7	Вплив явища релаксації на процес теплопровідності багатошарових середовищ	105
4.8	Моделювання теплопровідності віконних укосів	111
4.9	Біпараболічне рівняння теплопровідності з використанням інтегрального методу прямих	116
4.10	Висновки до розділу	120
РОЗДІЛ 5	ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ БАГАТОШАРОВИХ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ	122
5.1	Методичні основи оцінювання економічної ефективності утеплення багатошарових стінових конструкцій	122
5.2	Економічна ефективність застосування утеплювальних матеріалів для термомодернізації будівлі	123
5.3	Визначення ефективності запропонованого методу дослідження теплопровідності багатошарових конструкцій	125
5.4	Висновки до розділу	128
	ВИСНОВКИ	129
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	131
	ДОДАТКИ	145
	Додаток А – Акт впровадження дисертаційної роботи	146
	Додаток Б – Список опублікованих праць за темою дисертації	147

Додаток В – Алгоритм розрахунку теплопровідності будівельних конструкцій	149
Додаток Г – Програма для розрахунку трьохшарової стінової конструкції	150
Додаток Д – Розрахунок товщини утеплювального матеріалу	154

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Надзвичайно важливим для сьогодення України є питання вирішення проблем використання енергоресурсів, а саме: енергозбереження та підвищення енергоефективності. Енергозбереження в будівлях при вирішенні практичних завдань скорочення загальної витрати непоновлюваних енергоресурсів (вугілля, газу, нафти та ін.) реалізується шляхом застосування ефективних теплоізоляційних матеріалів, енергоекономічних конструкцій зовнішніх стін, істотного збільшення теплозахисту експлуатованого фонду. Якщо розглядати основні джерела тепловтрат у будівлі, то 68 % втрачається через огорожувальні конструкції; 67 % – через стіни і підлогу та 33 % – через вікна та двері. Тому актуальним залишається вирішення проблеми, пов'язаної з розробкою нових підходів до розрахунку, конструювання та виготовлення утеплювальних матеріалів стінових конструкцій та їх використання.

Необхідно вдосконалити теоретичну та наукову базу для ретельнішого вивчення розповсюдження температури всередині матеріалу, з якого складається конструкція стіни. Розрахунки теплопровідності конструкцій виконуються за стандартною методикою на місцях з'єднання конструкції. Вважається, що всередині шару, який складається з одного матеріалу, зміна температури буде прямолінійною. Як наслідок, неможливо встановити, що відбувається насправді всередині кожного конкретного будівельного матеріалу. Якщо відома температура лише на початку та в кінці певного прошарку стіни, неможливо зробити висновок про її лінійне розповсюдження.

Таким чином, актуальність роботи обумовлена необхідністю теоретичного дослідження теплопровідності будівельних матеріалів та виробів з метою підвищення енергоефективності. Зважаючи на те, що питання досконало не

вивчене, а також на необхідність енергозбереження, можна вважати дану тему досить актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до Закону України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 № 74/94-ВР, а також в рамках проекту «Енергоефективність у житловому секторі України», виконувалась на підставі Галузевої програми «Підвищення енергоефективності у будівельній галузі на 2010–2014 роки», затвердженої наказом Мінрегіонбуду від 30.06.09 № 257, згідно з Програмою Уряду у сфері енергоефективності та енергозбереження.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення методу визначення теплопровідності будівельних матеріалів та виробів, що полягає в дослідженні розповсюдження температури не тільки на межах шарів, а й усередині самого матеріалу, що дасть можливість komponувати багатошарові утеплювальні конструкції.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

- на основі аналізу методів визначення теплопровідності обрати найоптимальніший для дослідження будівельних виробів;
- розробити експериментальну установку для дослідження поширення температури всередині будівельного матеріалу;
- дослідити поширення температури в будівельному матеріалі шляхом розбиття його на n -ну кількість прошарків;
- теоретично та експериментально підтвердити нелінійне поширення температури в багатошарових конструкціях;
- розробити метод дослідження теплопровідності багатошарових конструкцій, який буде враховувати дійсний градієнт температури.

Об'єктом дослідження є процеси поширення температури в багатошарових будівельних конструкціях.

Предметом дослідження є метод визначення теплопровідності будівельних матеріалів та виробів.

Методи дослідження: аналітичні та експериментальні методи визначення теплопровідності будівельних матеріалів та виробів; математичного моделювання процесу теплопровідності багат шарових будівельних конструкцій; фізичного моделювання багат шарових конструкцій та аналізу експериментальних даних; метод порівняння результатів розрахунків теплопровідності різними методами.

Наукова новизна отриманих результатів:

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено нелінійність градієнта температури шляхом поділу багат шарової конструкції на n -ну кількість прошарків;
- запропоновано новий метод дослідження теплопровідності багат шарових виробів завдяки використанню рекурентних формул для визначення коефіцієнтів, які входять в наближений розв'язок для будь-якого числа розбиття областей інтегрування, що дозволяє обирати різницеві схеми розрахунку і аналізувати достовірність результатів;
- вдосконалено метод розрахунку теплопровідності багат шарових виробів з врахуванням граничних умов першого, другого та третього роду, який на відміну від існуючих при різних значеннях області інтегрування рівняння теплопровідності дозволяє отримати різницеві схеми.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблений метод дозволяє точніше визначати розповсюдження температури в багат шарових будівельних матеріалах та виробках, що дасть можливість розробляти ефективніші утеплювальні матеріали; для розрахунку товщини утеплювального матеріалу для 9-ти поверхового будинку в м. Білогородка

Київської області виконано дослідне впровадження розробленого методу для ТОВ «ДЕВЕЛОПМЕНТ БІЛДІНГ ГРУП».

Особистий внесок здобувача полягає у виконанні експериментальних досліджень, обробці отриманих результатів, що відображено у наукових працях: розроблено метод математичної моделі теплопровідності неоднорідних багатошарових середовищ з врахуванням явища релаксації за допомогою інтегральних методів [1, 7]; створена методика чисельно-аналітичного розв'язання математичної моделі теплопровідності [2]; проведено моделювання процесу теплопровідності двовимірного неоднорідного та тришарового середовища [3, 5]; розроблено методику дослідження температурного поля з врахуванням нестационарних коефіцієнтів теплопровідності [4]; виконано дослідження температурного поля багатошарових конструкцій з врахуванням явища релаксації та внутрішнього джерела енергії [6]; розроблено метод дослідження поширення температури в багатошарових будівельних конструкціях [11]; проведено дослідження для підвищення теплоізоляції будинків та споруд [8, 12]; проведено аналіз теплофізичних характеристик енергоефективних матеріалів та конструкцій для теплового захисту будівель та споруд [9, 10]; використано метод дослідження теплопровідності для віконної рами [13]; показано моделювання розрахунку теплопередачі в багатошаровому одно- та двовимірному неоднорідних середовищах за допомогою інтегрального методу прямих [14].

Апробація матеріалів дисертації проводилась на Всеукраїнській науково-технічній конференції «Енергоефективність в галузях економіки України» (Вінниця, ВНТУ, 2011 р.); II Міжнародній науково-технічній конференції «Земля України – потенціал енергетичної та екологічної безпеки держави» (Вінниця, ВНАУ, 2011 р.); IV Міжнародній конференції молодих вчених GAC – 2011 «Геодезія, архітектура та будівництво» (Львів, Львівська політехніка, 2011 р.); Науково-практичних конференціях «Енергозбереження в

міському будівництві та житлово–комунальній сфері» (Одеса, ОДАБА, 2011, 2012 рр.); 40–41-й регіональних науково–технічних конференціях професорсько–викладацького складу, співробітників та студентів університету за участі працівників науково–дослідних організацій та інженерно–технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (Вінниця, ВНТУ, 2011, 2012 рр.); Третій Міжнародній науково–практичній конференції Інтегровані технології в архітектурі та будівництві «ЕНЕРГОІНТЕГРАЦІЯ – 2013» (Київ, КНУБА, 2013 р.); Міжнародній науково–технічній конференції «Інноваційні технології в будівництві» (Вінниця, ВНТУ, 2014 р.); 46–й Науково–технічній конференції факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання (Вінниця, ВНТУ, 2017 р.); Міжнародній науково–технічній конференції «Енергоефективність в галузях економіки України» (Вінниця, ВНТУ, 2017р.); 47–й Науково–технічній конференції факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання (Вінниця, ВНТУ, 2018 р.);

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 14 наукових працях, 9 опубліковано у наукових фахових виданнях цитованих у Index Copernicus, 1 стаття у науково-практичному журналі РИНЦ, 3 – у матеріалах доповідей міжнародних конференцій та 1 монографії.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів та загальних висновків. Загальний обсяг дисертації становить 154 сторінки, обсяг основного тексту – 130 сторінках. Робота містить 24 рисунки, 15 таблиць, список використаних джерел зі 125 найменувань та 5 додатків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] С. В. Риндюк, та І. Н. Дудар «Енергоефективні матеріали та конструкції для теплового захисту будівель і споруд», *Сучасні технології матеріалів і конструкції в будівництві: міжнародний науково-технічний журнал*, № 2, с. 31 - 35, 2017.
- [2] В. А. Жовтянський, М. М. Кулик та Б. С. Стогній, *Стратегія енергозбереження в Україні: аналітично-довідкові матеріали в 2-х томах*. Київ, Україна: Академперіодика, Т.1, 2006, 510 с.
- [3] В. Бригілевич, *Термомодернізація житлового фонду: організаційний, юридичний, соціальний, фінансовий і технічний аспекти*. Львів, Україна, 2016, 220 с.
- [4] *Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2016*. [Чинний від 2017-04-01]. Київ, Україна: Мінрегіонбуд. України, 2017, 33 с.
- [5] *Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2006*. [Чинний від 2007-04-01]. Київ, Україна: Держбуд України, 2006, 71 с.
- [6] *Контрольні показники питомих витрат теплоти на опалення громадських споруд*. Наказ №105 від 29.12. 1994.
- [7] *Нормативи опору теплопередачі зовнішніх захисних конструкцій житлових і цивільних будинків при новому будівництві, реконструкції та капітальному ремонті*. Наказ №220 від 08.08. 2016.
- [8] *Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні*. КТМ 204 Україна 244-94. Київ: ЗАТ «ВІПОЛ», 2001. 376 с.
- [9] *Посібник та доповнення до Норм та вказівок по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також*

на господарсько-побутові потреби в Україні. Київ: УкрНДІнжпроект, 2004. 64 с.

- [10] *Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорту будинків при новому будівництві та реконструкції: ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007*. [Чинний від 2008-07-01]. Київ, Україна: Мінрегіонбуд України, 2008, 44 с.
- [11] *Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій: ДСТУ-Н Б В.2.6-101:2010*. [Чинний від 2010-10-01]. Київ, Україна: Мінрегіонбуд України, 2010, 84 с.
- [12] *Теплові характеристики будівель. Якісне виявлення теплових відмов в огорожувальних конструкціях. Інфрачервоний метод: ДСТУ Б EN 13187:2011*. [Чинний від 2013-07-01]. Київ, Україна: Мінрегіон України, 2012, 33 с.
- [13] *Енергозбереження. Енергетичний аудит. Загальні технічні вимоги: ДСТУ 4065-2001*. [Чинний від 2002-07-01]. Київ, Україна: Держстандарт України, 2002, 42 с.
- [14] *Енергозбереження. Енергетичний аудит промислових підприємств. Порядок проведення та вимоги до організації роботи: ДСТУ 4713: 2007*. [Чинний від 2007-07-01]. Київ, Україна: Держстандарт України, 2007, 19 с.
- [15] *Енергозбереження. Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями та довкіллям: ДСТУ 4035-2001 (ГОСТ 25380-2001)*. [Чинний від 2002-01-01]. Київ, Україна: Держстандарт України, 2002, 49 с.
- [16] J. R. Philip, and D. A. De Vries, *Moisture movement in porous materials under temperature gradients*. Transactions American Geophysical Union, 1994, p. 485.

- [17] В. С. Беляев, «Расчет температуры поверхности стен», *Жилищное строительство*, № 6, с. 21 - 24, 1980.
- [18] А. В. Лыков, *Теоретические основы строительной теплофизики*. Минск, Республика Беларусь: Академии наук БССР, 1961, 525 с.
- [19] В. Н. Богословский, *Тепловой режим здания*. Москва, Россия: Стройиздат, 1979, 248 с.
- [20] А. Д. Кривошеин, и С. В. Федоров, «К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций», *Инженерно-строительный журнал*, № 8, с. 21 - 27, 2010.
- [21] «Строительная теплофизика и энергоеффективное проектирование ограждающих конструкций зданий», *Сборник трудов II Всероссийской научной конференции*. Санкт-Петербург, 2009. 154 с.
- [22] Г. Г. Фаренюк, и Е. Г. Фаренюк, «Теплотехнические характеристики фасадных комбинированных систем», *Оконные технологи*, № 6, с. 35 - 45, 2001.
- [23] С. Л. Фомин, и Ю. В. Фурсов, «Особенности конструирования дополнительной теплозащиты фасадных конструкций», *Науковий вісник будівництва*, Вип. 41, с. 290 - 294, 2007.
- [24] А. М. Прищенко, «Вузлові з'єднання зовнішніх стін з підвищеними теплотехнічними показниками як засіб забезпечення енергоефективності будівель»: дис. канд. техн. наук., Донбаська національна академія будівництва і архітектури, Краматорск, 2015.
- [25] К. Ф. Фокин, *Строительная теплотехника ограждающих частей зданий*. Изд. 4-е, перераб. и доп. Москва, Россия: Стройиздат, 1973, 287 с.
- [26] Д. В. Чернуха, Д. В. Воінов, «Особливості функціонування будівельних споруд з утепленими огорожуючими конструкціями», *Труды Одесского политехнического университета*, Вип. 2 (24), с. 101 - 104, 2005.

- [27] М. В. Нагорний, «Ефективні енергозберігаючі конструкції малоповерхових житлових будинків», дис.. канд. техн. наук., Харк. акад. залізн. транс., Харків, 2001.
- [28] Є. Г. Фаренюк, «Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель», дис.. канд. техн. наук, Нац. унів. водн. господ., Рівне, 2015.
- [29] Ю. В. Видин, В. В. Иванов, и Р. В. Казаков, *Инженерные методы расчета задач теплообмена*. Красноярск, Россия: Сиб. федер. ун-т, 2014, 168 с.
- [30] Т. И. Рубашкина, «Исследование эффективности современных утеплителей в многослойных ограждающих конструкциях зданий», дис. канд. техн. наук., Ирк. гос. унив. путей сообщ., Чита, 2009.
- [31] В. А. Пашинський, та О. А. Плотніков, «Експериментальні дослідження теплового режиму стін житлових будинків», в *Збірнику науковий праць. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, Рівне, Вип. 27, 2013, с. 360 - 366.
- [32] М. А. Михеев, и И. М. Михеева, *Основы теплопередачи: научное издание*. Изд.3-е, перераб. и доп. Москва, Россия: Бастет, 2010, 343 с.
- [33] О. І. Філоненко, та О. І. Юрін, *Будівельна теплофізика огорожувальних конструкцій будівель*. Полтава, Україна: Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2015, 328 с.
- [34] С. В. Риндюк, та І. Н. Дудар, «Дослідження теплофізичних характеристик утеплення конструкцій будівель та споруд», *Енергоефективність в будівництві та архітектурі: науково-технічний збірник*, № 4, с. 100 - 103, 2013.
- [35] Г. Карслоу, и Д. Егер, *Теплопроводность твердых тел*. Москва, Россия: Наука, 1964, 488 с.

- [36] А. В. Лыков, *Теория теплопроводности*. Москва, Россия: Высш. школа, 1967, 600 с.
- [37] П. В. Цой, *Приближенные и точные методы математической физики*, Душанбе, Таджикистан: ТаджикНИИТИ, 1993, 242 с.
- [38] А. Г. Коротких, *Теплопроводность материалов*, Томск, Россия: Изд-во Томского политехнического университета, 2011, 97 с.
- [39] А. В. Гільчук, та А. А. Халатов, *Теорія теплопровідності. Частина 1*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017, 86 с.
- [40] В. П. Шолудько, *Теплотехніка та використання теплоти*, Львів, Україна: Сполум., 2007, 190 с.
- [41] Н. М. Беляев, и А. А. Редно, *Методы нестационарной теплопроводности*, Москва, Россия: Высш. школа, 1978, 328 с.
- [42] Б. В. Процюк, М. М. Семерак, Р. Б. Веселівський, та В. М. Синюта, «Дослідження нестационарного температурного поля в багатошаровій плоскій конструкції», *Збірник наукових праць ЛДУ БЖД. Пожежна безпека*, № 20, с. 111 - 117, 2012.
- [43] М. А. Саницький, О. Р. Позняк, та У. Д. Марущак, *Енергозберігаючі технології в будівництві*, Друге видання, виправлене, Львів, Україна: Видавництво Львівської політехніки, 2013, 236 с.
- [44] А. И. Борисюк, и И. А. Мотовиловец, «О температурном поле оболочки переменной толщины», *Прикладная математика и механика*, № 12, с. 84 - 89, 1967.
- [45] Р. М. Тацій, та О. Ю. Чмир, «Визначення розподілу температурного поля в багатошарових сферичних огорожувальних конструкціях», *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, № 5(1), с. 13 - 19, 2011.

- [46] О. Б. Кошлатий, та В. В. Ільченко, *Теплотехнічні розрахунки огорожувальних конструкцій будівель*. Полтава, Україна: ПНТУ, 2002, 57с.
- [47] Ю. С. Васильев, Д. В. Крестьянкин, А. Н. Нагорная, и В. И. Панферов, «Приведение многослойных ограждающих конструкций к однослойным при тепловых расчетах», *Вестник ЮУрГУ*, № 12, с. 49 - 57, 2008.
- [48] Paul H Baker, and Graham H Galbraith, «Temperature gradient effects on moisture transport in porous building materials», *Article in Building Service Engineering*, № 30(1). p. 37 - 48, 2009.
- [49] А. М. Протасевич, и В. В. Лешкевич, «Расчет температурного поля многослойных ограждающих конструкций с теплопроводными включениями методом конечных элементов», *Энергоэффективность*, № 10, с. 16 - 20, 2013.
- [50] В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, и В. В. Калашников, *Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций*. Москва, Россия: Высшая школа, 2005, 340 с.
- [51] В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев, и В. С. Шаврин, *Математические методы теплофизики*. Москва, Россия: Машиностроение-1, 2001, 232 с.
- [52] А. В. Румянцев, *Метод конечных элементов в задачах теплопроводности*. Калининград, Россия: Калининградский государственный университет, 1995, 170 с.
- [53] Е. Н. Туголуков, *Решение задач теплопроводности методом конечных интегральных преобразований*, Тамбов, Россия: Изд-во Тамб. гос.техн. ун-та., 2005, 116 с.
- [54] А. М. Вайнберг, *Математическое моделирование процессов переноса. Решение нелинейных краевых задач*. Москва - Иерусалим: Едиториал, 2009, 209 с.

- [55] В. А. Кудинов, и Б. В. Аверин, *Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях*, Москва, Россия: Высш. школа, 2008, 305 с.
- [56] В. М. Булавацкий, *Некласичні математичні моделі процесів тепло- та масопереносу*. Київ, Україна: Наукова думка, 2005, 282 с.
- [57] А. Н. Нагорная, «Математическое моделирование и исследование нестационарного теплового режима зданий», дис. канд. техн. наук., Южно-Урал. гос. унив., Челябинск, 2008.
- [58] О. С. Макаренко, «Математичне моделювання швидкоплинних процесів теплообміну», автореф. дис. д-р фіз.-мат. наук., Київ, 1996.
- [59] Juris Skujans, «Measurements of heat transfer of multi-layered wall construction with foam gypsum», *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, p. 1219 - 1224, 2007.
- [60] И. В. Ковалева, «Метод измерения теплопроводности твердых теплоизоляционных материалов на основе интегральной формы уравнения Фурье», дис. канд. техн. наук., Моск. гос. унив. инж. экол., Москва, 2005.
- [61] В. М. Фокин, Г. П. Бойков, и Ю. В. Видин, *Основы энергосбережения в вопросах теплообмена*. Москва, Россия: Машиностроение-1, 2006, 192 с.
- [62] О. Б. Кобилянська, «Нелокальні та крайові задачі для рівняння теплопровідності у металургії», дис. канд. техн. наук. Харк. політ. інст., Харків, 2011.
- [63] В. Ю. Клим, и А. В. Сясев, «Математическая модель определения температуры диссипативного разогрева стержневых элементов технических систем», *Вестник Херсонского национального технического университета*, № 3, с. 357 - 361, 2015.
- [64] А. М. Ибрагимов, «Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях», дис. канд. техн. наук., Моск. гос. унив. путей сообщ., Москва, 2006.

- [65] Є. І. Дробот, О. М. Литвин, І. В. Сергієнко, «Метод розв'язання нестационарної задачі теплопровідності з двома просторовими змінними з використанням інтерлінації функцій», *Доповіди НАНУ*, №2, с. 67 - 73, 2000.
- [66] Y. Sakai, «Linear conduction of heat through a serie of connected rods», *The science report of the Tohoku Imprial University*, Vol. 11, N 5, p. 351 - 358, 1922.
- [67] I. V. Sergienko, O. N. Lytvyn, and O. O. Lytvyn, «Method for Solution of Non-Stationary Heat Conduction Problem with Two Space Variables», *Mezhuyev, Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 8(30), 2015. [Online]. Available at: <http://www.indjst.org/index.php/indjst/article/view/84753/65365>.
- [68] А. А. Самарский, и П. Н. Вабищевич, *Вычислительная теплопередача*. Изд. 2. Москва, Россия: Либроком, 2009, 784 с.
- [69] О. І. Гуляр, С. О. Пискунов, В. П. Андрієвський, та О. О. Шкриль, «Розв'язання просторової задачі нестационарної теплопровідності на основі напіваналітичного методу скінченних елементів», *Технологический аудит и резервы производств*, № 3/2(23), с. 61 67, 2015.
- [70] А. Х. Димніч, та О. А. Троянський, *Теплопровідність*. Донецьк, Україна: НОРД-ПРЕС, 2003, 370 с.
- [71] В. И. Лебедев, «Уравнение и сходимость дифференциально-разностного метода (метода прямых)», *Вестн. МГУ. Сер. физ.- мат. наук*, № 10, с. 47- 50. 1965.
- [72] О. М. Белоцерковский, *Численное моделирование в механике сплошных сред*. Москва, Россия: Наука, 1994, 442 с.
- [73] О. М. Литвин, Л. С. Лобанова, та Г. В. Залужна, «Чисельна реалізація інтерлінаційного методу скінченних елементів розв'язання початково-крайових задач з двома просторовими змінними», *Труды института прикладной математики и механики*, Т. 27, с. 199 - 207, 2013.
- [74] О. М. Литвин, *Интерлінація функцій*. Харків, Україна: Основа, 1992, 236 с.

- [75] О. С. Куценко, та Г. А. Зацеркляний, «Моделювання теплообміну через огорожувальні поверхні будівлі», *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 3 (977), с. 129 - 141, 2013.
- [76] Г. В. Залужна «Математичне моделювання нестационарного переносу тепла в неоднорідному середовищі з використанням інтерлінації функцій», дис. канд. техн. наук., Укр. інж.-пед. акад., Харків, 2015.
- [77] Т. Д. Каримбаев, и Н. С. Рапилбекова, «Решению задачи управления направлением тепловых потоков в сплошных средах», *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*,. №6, с. 263 - 269, 2014.
- [78] В. С. Попович, «Метод поетапної лінеаризації розв'язування двовимірних стаціонарних задач теплопровідності термочутливих тіл», *Прикл. проблеми механіки і математики*, Вип. 5, с.149 - 155, 2007.
- [79] В. М. Шевчук, «Нелінійна крайова задача радіаційно-конвективного теплообміну тіл з багат шаровим покриттям», *Машинознавство*, № 5 (155), с. 21 - 25, 2010.
- [80] О. Ю. Пазен, «Математичне моделювання процесів теплопереносу в багат шарових плоских конструкціях за умов пожежі», дис. канд. техн. наук., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, 2016.
- [81] М. Г. Коган, «Нестационарная теплопроводность в слоистых средах», *ЖТФ*, Т. 27, № 3, с.522 - 531, 1957.
- [82] В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, и А. Н. Колиух, *Методы решения задач теплопереноса. Теплопроводность и диффузия в неподвижной среде*. Тамбов, Россия: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005, 80 с.

- [83] И. М. Федоткин, *Математическое моделирование технологических процессов: научное пособие*. Изд.2. Киев, Украина: КД Либроком, 2011, 416 с.
- [84] Н. Н. Светушков, «Моделирование нестационарных тепловых процессов в неоднородных средах», дис. канд. техн. наук., Моск. авиац. унив., Москва, 2010.
- [85] В. Р. Кулінченко, *Теплопередача з елементами масообміну (теорія і практика процесу)*. Київ, Україна: Фенікс, 2014, 917 с.
- [86] Я. Ф. Малкин, «К задачам распределения температуры в плоских пластинах». *Прикл. математика и механика*, Т. 2, № 3, с. 317 – 330, 1939.
- [87] С. А. Тихомиров, «Исследование динамики процессов теплопереноса через ограждающие конструкции», дис. канд. техн. наук., Ростов. гос. строй. унив., Ростов-на-Дону, 2004.
- [88] Л. А. Пульдас, «Нестационарные тепловые режимы в гражданских зданиях», дис. канд. техн. наук., Тюменск. гос. арх.-строй. унив., Тюмень, 2008.
- [89] Н. О. Гембара, «Математичне моделювання теплопровідності пластин і оболонок з багаточисловими покриттями», дис. канд. техн. наук., Укр. акад. друк., Львів, 2014.
- [90] *Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування, улаштування та експлуатації: ДБН В.2.6.-33:2008*. [Чинний від 2009-06-01]. Київ, Україна: Мінрегіонбуд України, 2009, 21 с.
- [91] Г. Г. Фаренюк, О. І. Філоненко, О. Б. Олексієнко, та М. В. Лещенко, «Особенности комплексной термомодернизации громадських будівель», *Вісник ОДАБА*, Вип. 49, с. 232 - 238, 2013.

- [92] *Пожжежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги: ДБН В.1.1-7:2016.* [Чинний від 2017-06-01]. Київ, Україна: Мінрегіонбуд України, 2017, 41 с.
- [93] В. Д. Мачинский, *Теплотехнические основы гражданского строительства.* Москва, Россия: Госиздат, 1928, 262 с.
- [94] Ю. И. Толстова, и Р. Н. Шумилов, *Основы строительной теплофизики.* Екатеринбург, Россия: Изд-во Урал. ун-та, 2014, 104 с.
- [95] С. М. Василенко, А. І. Українець, та В. В. Олішевський, *Основи тепломасообміну.* Київ, Україна: НУХТ, 2004, 250 с.
- [96] В. А. Малярєнко, *Основи теплофізики будівель та енергозбереження.* Харків, Україна: САГА, 2006, 482 с.
- [97] К. Ф. Фокин, *Строительная теплотехника ограждающих частей зданий /* Под ред. Ю. А. Табунщикова, и В. Г. Гагарина. Изд. 5-е, пересмотр. Москва, Россия: АВОК-ПРЕСС, 2006, 256 с.
- [98] *Перетворювачі термоелектричні. Загальні технічні умови: ДСТУ 2857-94 (ГОСТ 6616-94).* [Чинний від 1996-01-01]. На заміну ГОСТ 6616-93. Київ, Україна: Держстандарт України, 1995, 44с.
- [99] *Перетворювачі термоелектричні. Частина 1. Технічні характеристики та допустимі відхилення електрорушійної сили (ЕРС) (EN 60584-1:2013, IDT): ДСТУ EN 60584-1:2016.* [Чинний від 2016-11-01 01]. На заміну ДСТУ 2837-94 (ГОСТ 3044-94). Київ, Україна: Держстандарт України, 2016, 96 с.
- [100] *Кирпич и камень керамические: ГОСТ 530-2007.* [Чинний від 2008-03-01]. Москва, Россия: Стандартиформ, 2007, 38 с.
- [101] *Плити пінополістирольні. Технічні умови. Зміна №1: ДСТУ Б В.2.7-8-94.* [Чинний від 1998-03-01]. Київ, Україна: Держстандарт України, 1998, 35 с.
- [102] *Вата мінеральна. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-318:2016.* [Чинний від 2017-07-01]. Київ, Україна: Мінрегіонбуд України, 2015. 33 с.

- [103] Державна система забезпечення єдності вимірювань. Прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями. Методи обробки результатів спостережень. Основні положення: ДСТУ ГОСТ 8.207:2008. [Чинний від 2008-10-01]. 13 с.
- [104] С. В. Риндюк, та І. Н. Дудар, «Дослідження підвищення теплоізоляції будинків та споруд. Енергоефективні технології в міському будівництві та господарстві», Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. ОДАБА, с. 39 - 42, 2012.
- [105] С. В. Рындюк, «Исследование повышения теплоизоляции зданий и сооружений», *Приволжский научный вестник: Научно-практический журнал*, № 10 (26), с. 45 - 47, 2013.
- [106] А. В. Фоц, «Термомодернізація будівель – ресурс енергозбереження в Україні», *Вісник ОДАБА*, № 65, с. 137 - 141, 2017.
- [107] В. А. Маляренко, А. Ф. Редько, Ю. И. Чайка, и В. Б. Поволочко, *Техническая теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений*. Харьков, Украина: Рубикон, 2001, 180 с.
- [108] Э. В. Сысоев, и А. В. Чернышов, *Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств многослойных строительных конструкций*. Москва, Россия: Машиностроение-1, 2006, 104 с.
- [109] В. И. Егоров, *Точные методы решения задач теплопроводности*. Санкт - Петербург, Россия: СПб ГУ ИТМО, 2006, 48 с.
- [110] В. И. Рындюк, «Применение улучшенного интегрального метода прямых к решению краевых задач теплопроводности», *Инженерный физический журнал*, №2, 6 с., 1987.
- [111] С. В. Риндюк, та І. Н. Дудар, «Методика дослідження температурного поля з врахуванням нестационарних коефіцієнтів», *Сучасні технології*,

матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник, № 5, с. 96 - 98, 2008.

- [112] С. В. Корниенко, «Исследование совместного нестационарного тепло-влажнопереноса в ограждающих конструкциях зданий: Трехмерная задача», дис. канд. техн. наук., Волгоград. гос. арх.-строй. акад., Москва, 2000.
- [113] С. В. Риндюк, «Автоматизація дослідження теплопередачі багат шарових середовищ при нестационарному тепловому потоці», в *IV Міжнародній конференції молодих вчених GAC-2011. Геодезія, архітектура та будівництво*, Львів, 2011, с. 130 - 131.
- [114] Б. А. Кутний, та О. Б. Борщ, «Математична модель теплопровідної стінки зі змінними теплофізичними характеристиками», *Комунальне господарство міст: науково-технічний збірник, № 97, с. 149 - 155, 2010.*
- [115] І. М. Конет, *Стационарні та нестационарні температурні поля в ортотропних сферичних областях*. Київ, Україна: Ін-т математики НАН України, 1998, 209 с.
- [116] S. V. Korniyenko, «The Experimental Analysis and Calculative Assessment of Building Energy Efficiency». *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 618. p. 509 - 513, 2014.
- [117] С. В. Карякина, «Исследование теплотерь зданий и коммуникаций в нестационарном режиме», дис. канд. техн. наук., Тюмен. гос. арх. - строй. акад., Тюмень, 2000.
- [118] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та Т. І. Міщук, «Чисельно-аналітичний розв'язок одновимірної релаксаційної математичної моделі теплопровідності», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник, № 4, с. 119 - 122, 2007.*
- [119] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та Т. І. Міщук, «Моделювання процесу теплопровідності двовимірного тришарового середовища», *Сучасні*

технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник, № 5, с. 99 - 103, 2008.

- [120] В. С. Зарубин, *Инженерные методы решения задач теплопроводности*. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 1983, 328 с.
- [121] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та Т. І. Міщук, «Дослідження процесу теплопровідності багат шарових середовищ з врахуванням явища релаксації за допомогою інтегрального методу прямих», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник*, № 1. с. 84 - 91, 2009.
- [122] R. Ber. Reinders, Keram Ges Dtsch, «Verfahren zur Ermittlung effektiver Temperaturleitfähigkeiten», Vol. 57, N 6 - 8, p. 153 - 155, 1980. [Online]. Available: <https://www.linseis.com/de/mediathek/messapplikationen/messung-der-waermeleitfaehigkeit-temperaturleitfaehigkeit/>.
- [123] T. Taylor, J. Counsell, and S. Gill. «Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography», *Energy and Buildings*, Vol. 66, p. 222 - 231, 2013.
- [124] Juris Skujans, «Measurements of heat transfer of multi-layered wall construction with foam gypsum», *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, p. 1219 - 1224, 2007.
- [125] С. В. Риндюк, В. І. Риндюк, та Н. І. Старушок, «Розв'язок біпараболічного рівняння теплопровідності за допомогою інтегрального методу прямих», *Сучасні технології матеріалів і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник*. № 1, с. 89 - 91, 2012.