

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**РИНДЮК СВІТЛАНА ВОЛОДИМИРІВНА**

УДК 699.059: 536.212.3

**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ  
МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2018

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор,  
**Дудар Ігор Никифорович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри будівництва, міського господарства  
та архітектури.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Саницький Мирослав Андрійович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри будівельного виробництва;

кандидат технічних наук, доцент,  
**Фощ Альона Вікторівна**,  
Одеська державна академія будівництва та архітектури,  
доцент кафедри міського будівництва та господарства.

Захист відбудеться «20» вересня 2018 р. об 11-30 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.04 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розіслано «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради К 05.052.04,  
к.т.н., доцент

В. В. Швець

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Надзвичайно важливим для сьогодення України є питання вирішення проблем використання енергоресурсів та підвищення енергоефективності, як будівельної галузі так і економіки в цілому. 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, з яких 67 % через стіни і підлоги та 33 % через вікна та двері. Тому вирішення проблеми, пов'язаної з розробкою нових підходів до розрахунку, конструювання та виготовлення стінових конструкцій з утеплювальних матеріалів та їх використання, є актуальним.

Недостатня вивченість розповсюдження температури в тілі матеріалу, з якого складається конструкція стіни, вимагає вдосконалення теоретичної та наукової бази. Розрахунки теплопровідності конструкцій виконуються за стандартною методикою на стиках конструкції і вважається, що в середині шару, який складається з одного матеріалу, зміна температури буде прямолінійною. Виходячи з цього не можливо встановити, що відбувається насправді в тілі кожного конкретного будівельного матеріалу і, знаючи тільки температуру на початку та в кінці певного прошарку стіни, не можливо зробити висновок про її лінійне розповсюдження.

Таким чином, актуальність роботи обумовлена необхідністю теоретичного дослідження теплопровідності будівельних матеріалів та виробів з метою підвищення енергоефективності. Враховуючи не вивченість питання, а також 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 та завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вдосконалення методу визначення теплопровідності будівельних матеріалів та виробів, яка полягає в дослідженні розповсюдження температури не тільки на межах шарів, а й у середині самого матеріалу, що надасть можливість компонувати багатошарові утеплювальні конструкції.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні **задачі**:

- на основі аналізу методів визначення теплопровідності вибрати найоптимальніший для дослідження будівельних виробів;

- розробити експериментальну установку для дослідження поширення температури в тілі будівельного матеріалу;
- дослідити поширення температури в будівельному матеріалі шляхом розбиття його на  $n$ -у 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 багатошарових будівельних конструкцій; фізичного моделювання багатошарових конструкцій та аналізу експериментальних даних; метод порівняння результатів розрахунків теплопровідності різними методами.

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено нелінійність градієнта температури шляхом поділу багатошарової конструкції на  $n$ -у 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 розбиттів областей інтегрування, що дозволяє вибирати різницеві схеми розрахунку і аналізувати достовірність результатів;
- вдосконалено метод розрахунку теплопровідності багатошарових 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 більш точно визначати розповсюдження температури в багатошарових будівельних матеріалах та виробках, що дасть можливість розробляти ефективніші утеплювальні матеріали; при 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, 9]; 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]; використано метод дослідження теплопровідності для віконної рами [7]; розроблено метод дослідження поширення температури в багатошарових будівельних конструкціях [8]; проведено дослідження для підвищення теплоізоляції будинків та споруд [10, 12]; проведено аналіз теплофізичних характеристик енергоефективних матеріалів та конструкцій для теплового захисту будівель та споруд [11, 14]; показано моделювання розрахунку теплопередачі в багатошаровому одно- та двовимірному неоднорідних середовищах за допомогою інтегрального методу прямих [13];

**Апробація роботи** 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-ї регіональних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю 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, 2017 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено у 14 наукових працях, 9 опубліковано у наукових фахових виданнях 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, списку використаних джерел із 125 найменувань і додатків. Робота викладена на 130 сторінках основного тексту, містить 24 рисунки, 15 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено обґрунтування вибору теми дослідження, зазначено зв'язок із науково-дослідними програмами, темами, сформульовано мету та завдання дослідження. Окреслено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача та наведено дані щодо апробації роботи.

У **першому розділі** дисертації розглянуто методи експериментального та теоретичного дослідження теплопровідності будівельних матеріалів та виробів. Здійснено огляд праць за темою досліджень. Комплекс робіт з вивчення теплопровідності огорожувальних виробів було виконано видатними вченими А. В. Ликовим, В. М. Богословським, В. Д. Мачинським, О. Є. Власовим, В. М. Ільїнським, Ф. В. Ушковим, А. М. Шкловером, Б. Ф. Васильєвим, С. Н. Шоріним та іншими.

Фундаментальними для дослідження температурних полів та експериментальними випробуваннями в кліматичній камері в натурних умовах є сучасні роботи Л. Ф. Черних, Г. Г. Фаренюка, Є. Г. Фаренюка, С. Л. Фоміна, А. М. Пріщенко, Д. О. Міхеєва.

Зміна будівельних норм і правил у бік посилення вимог до санітарно-гігієнічних норм та норм енергозбереження зовнішніх огорожувальних конструкцій поставило перед будівельниками низку додаткових завдань, пов'язаних з необхідністю не просто збільшувати товщину шару утеплювача захисної конструкції, щоб підвищити її термічний опір, але і змінити саму конструкцію, використовувати інші більш ефективні з теплотехнічної точки зору матеріали.

Розрахункові залежності, наведені в офіційних ДБНах, отримані для стаціонарного режиму роботи огорожувальних багатошарових конструкцій, не дозволяють проаналізувати динаміку процесу теплоперенесення в складових конструкцій стін при змінюваній в часі температурі зовнішнього повітря.

Питання теорії теплопровідності розглядається в фундаментальних дослідженнях Г. С. Карслоу, А. В. Ликова, а окремі аспекти цієї проблеми відображені в роботах П. В. Цоя, Е. М. Карташова, Н. І. Нікітенко, Л. А. Коздоба, В. Л. Рвачева і А. П. Слесаренка, Н. М. Беляєва та інших.

При виконанні теплотехнічних розрахунків, пов'язаних з визначенням термічного опору огорожувальних конструкцій, зазвичай вирішується завдання, в якому потрібно знайти товщину шару утеплювача при відомих товщинах інших матеріалів, що входять до складу конструкції.

У багатьох випадках елементи конструкції є багатошаровими, кожен з елементів, що входять в систему, має свої теплофізичні, механічні та інші властивості, які найбільш повно узгоджуються з призначенням шарів. Якщо на межі розділу тіл має місце рівність температур теплових потоків, то це свідчить про наявність ідеального термічного контакту. Якщо ж через мікронерівності дійсна площа зіткнення значно менше геометричної, то в

місці стику тіл виникає тепловий опір контактуючих поверхонь. При цьому температура на стиках конструкцій не буде однаковою.

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

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

На сьогодні базою математичного моделювання для вивчення процесів тепломасоперенесення як в теоретичних, так і в практичних дослідженнях є теорія, заснована на законі Фур'є для розповсюдження тепла. У зв'язку з цим в сучасній математичній теорії для опису процесів зі скінченною швидкістю розповсюдження температури, низкою авторів було запропоновано більш адекватні моделі цих процесів (врахування явища релаксації та біпараболічні моделі). Інженерні розрахунки температурних полів згідно з покращеними математичними моделями теплопровідності навіть у найпростіших випадках є набагато більш громіздкими порівняно з відповідними розрахунками в рамках класичної моделі Фур'є.

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.

Основні методи розв'язання нестационарних задач теплопровідності розглядаються в роботах 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. Тіхомірова, Y. Sakai, E. Мітчела, Р. Уейта, R. Barnhill, J. Cavendish, W. Gordon, G. Nielson та інших.

Аналіз праць провідних вчених, літературних та нормативних джерел показав, що з питання дослідження теплопровідності будівельних матеріалів та виробів є досить мало праць.

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 багатошарових стінових конструкцій свідчить про відсутність більш достовірної інформації розповсюдження температури в кожному шарі конструкції.

Дослідження показали, що питанню розповсюдження температури в будівельних матеріалах і виробках на цей час приділено недостатньо уваги. Це дозволило висунути робочу гіпотезу, яка полягає в тому, що температура в тілі будівельного матеріалу розповсюджується нелінійно.

Розуміння дійсного градієнта температури в матеріалі дозволить більш ефективно компанувати багатошарові конструкції, що зменшить вартість утеплювача та більш точно визначати точку роси.

У другому розділі наведено теоретичні методи розрахунку теплопровідності в багатошарових будівельних вироббах.

В основу досліджень покладено аналітичний, графічний та практичний методи розрахунку теплопровідності багатошарових будівельних матеріалів та виробів.

В результаті досліджень методів найточнішим виявився практичний метод розрахунку теплопровідності (метод Фокіна), який показує дослідження розповсюдження температури в усіх вузлах досліджуваного матеріалу, шляхом розбиттям матеріалу на квадрати методом сітки де попередньо задаються деякими довільними значеннями температури у всіх вузлах сітки, потім послідовно обчислюють значення температур, замінюючи отриманими значеннями температур попередні 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 температури залишаються постійними 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 на границях усіх шарів конструкції. При цьому коефіцієнти теплопровідності матеріалів не залежать від температури і зміна температури зображується прямою лінією.

Для визначення температури в багатошарових конструкціях графічним методом відкладають горизонтальну вісь, що відповідає нульовій температурі та відкладають всі термічні опори і через отримані точки проводять вертикальні лінії, які відповідають температурі  $t_B$  та  $t_3$ , які з'єднують прямою лінією. Точки перетину цієї прямої з відповідними вертикальними лініями дають границі відрізків, що виражають величини температур на границях шарів конструкції.

В розділі розроблено та реалізовано методу експериментальних досліджень для визначення розповсюдження температури в багатошарових вироббах на розробленій експериментальній установці, в середині якої розміщено конструкцію, яка імітує реальну частину стіни з різними видами утеплювачів. А також визначено прогнозування точності та достовірності вимірювань.

Експериментальна установка, загальний вигляд та схему якої наведено на рис. 1 та рис. 2, складається з досліджуваної конструкції (2) та двох камер: «холодної» (1) та «теплової» (3). Для забезпечення рівномірних теплових потоків на робочих поверхнях конструкції по його периметральних гранях було створено охорону зону з екструдованого пінополістиролу (4) SYMMER XPS EXTRA DURABLE INSULATION. Ефективний теплообмін між робочими гранями фрагмента і повітрям в «холодильній» камері забезпечується за допомогою повітряного компресора (5), який через



трубопроводу здійснює подачу холоду. З боку «холодильної» камери на середині висоти встановлено термометр (7) для підтримання температури, що імітує зовнішнє повітря. В «тепловій» камері встановлено електричний обігрівач (6), який здійснює подачу тепла. З боку «теплової» камери на середині висоти встановлено термометр (7) для підтримання температури, що імітує внутрішнє повітря.



Рис.1. Загальний вигляд експериментальної установки

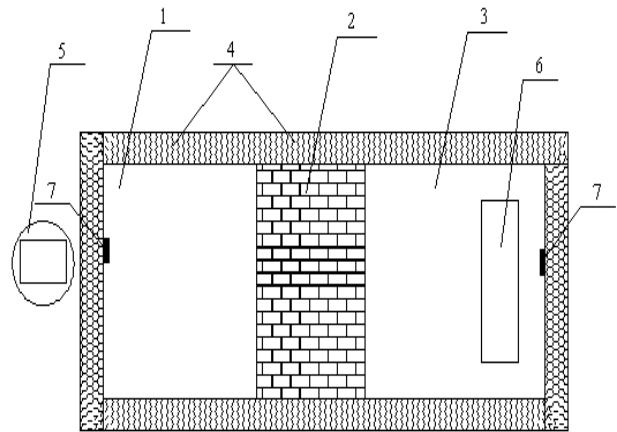


Рис.2. Схема експериментальної установки

Для проведення експериментальних досліджень теплопровідності багатошарових виробів застосовується випробувальне устаткування і засоби вимірювальної техніки. Для вимірювання температури використовуються термопари ТСМ 2-8, які під'єднанні до цифрового вбудованого термостата STH0024UW-v3, що дають змогу отримувати достовірні результати дослідження.

В якості матеріалів для дослідження використовувалась цегла лицьова М-150, цегла повнотіла М-125 в якості теплоізоляційних матеріалів використовуються плити пінопласту ПСБ-С-25 та мінеральна вата ТЕХНОФАС.

У **третьому розділі** наведено експериментальні дослідження, які передбачали визначення розповсюдження температури в багатошарових виробках з різними видами утеплювачів.

Дослідження проводились в експериментальних умовах шляхом моделювання процесів теплопереносу крізь багатошарові вироби.

Суть дослідження полягала в експериментальному дослідженні розповсюдження температури в конструкції не тільки на протилежних гранях, а і в кожному шарі матеріалу, шляхом встановлення термопар як на стиках матеріалів, так і в них самих.

Для дослідження теплопровідності в конструкції стіни було встановлено 11 термопар ТСМ 2-8, які було позначено Т1-Т11. Положення термопар фіксували за допомогою скотчу, а потім закріплювали чутливий елемент у заглибленнях, діаметром 3 мм та глибиною 10 мм, за допомогою

теплопровідної пасти Kill-8 для зниження контактного опору між матеріалом конструкції і термопарою. Після затвердіння клею перевірялась надійність закріплення елемента і скотч видалявся.

Термопари кріпились до конструкції з однієї сторони, а з іншої виведені кінці підключались до цифрового термостата STH0024UW-v3, який показував температуру кожного з матеріалів. На рис. 3 показано схему розташування термопар в досліджуваній конструкції.

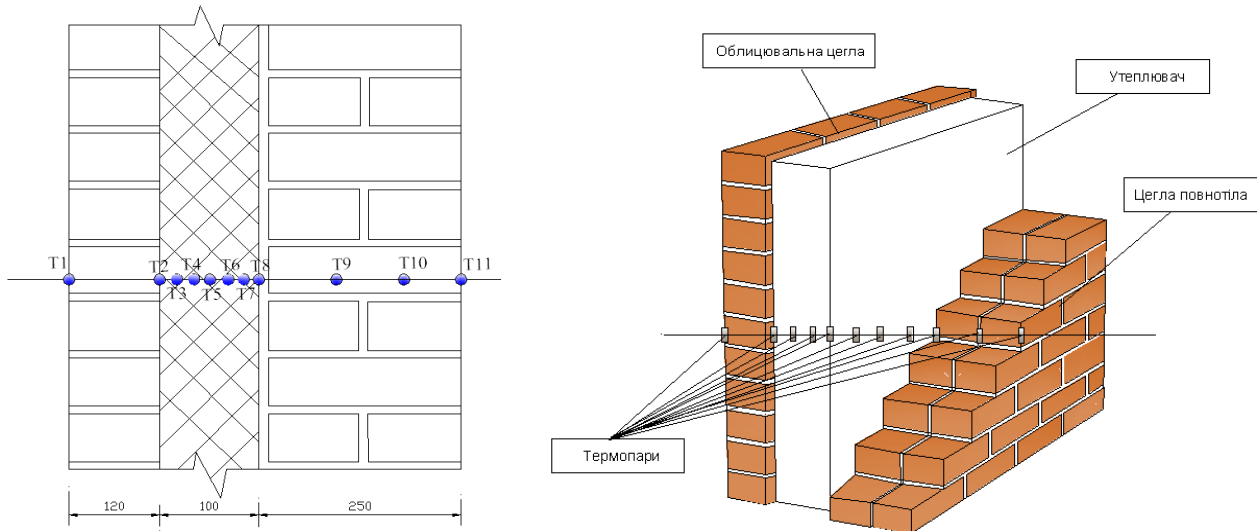


Рис. 3. Схема розташування термопар в багатошаровій конструкції з внутрішнім утеплювачем

Критерієм вибору конструкцій для експериментального дослідження було обрано частину багатошарової стінової конструкції з різними видами утеплювальних матеріалів. На рис. 4 та рис. 5 показано загальний вигляд досліджуваних конструкцій.

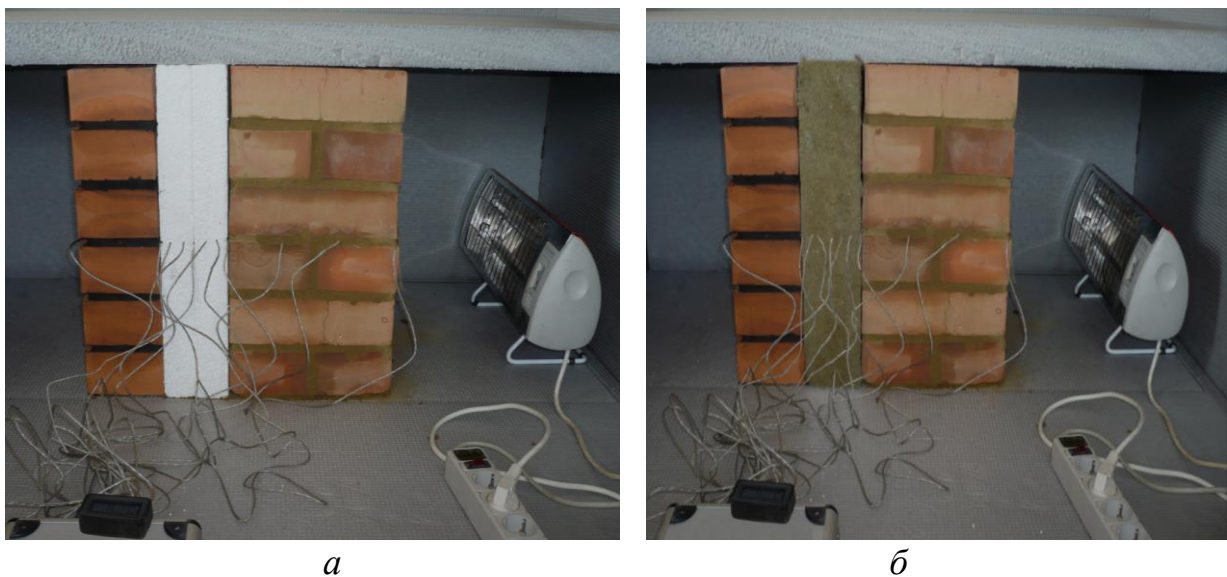


Рис. 4. Загальний вигляд досліджуваної конструкції з внутрішнім утеплювачем: а – пінопласт, б – мінеральна вата

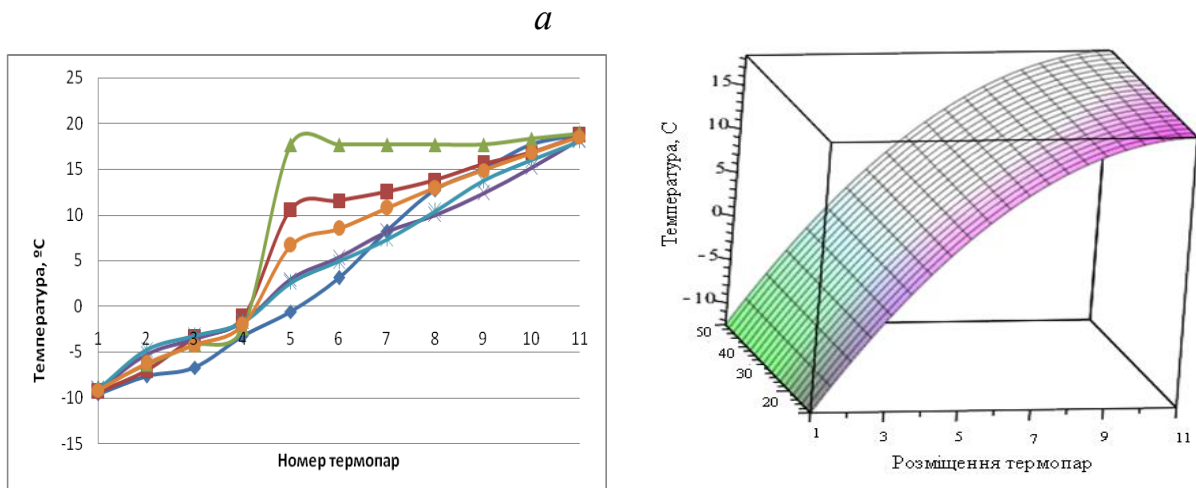


Рис. 5. Загальний вигляд досліджуваної конструкції з зовнішніми утеплювачами: *а* – пінопласт, *б* – мінеральна вата

Дослідження температур виконувалось в експериментальній установці після того, як в «тепловій» камері було створено зону внутрішнього повітря, яка дорівнювала  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  за допомогою електричного нагрівача, а в «холодильній» камері створювалась зона зовнішнього повітря, яка дорівнювала  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  за допомогою компресора, який подавав холодне повітря. Після встановлення відповідних температур у камерах, електронагрівач та компресор було вимкнено.

Створивши відповідну зону за допомогою цифрового термостата здійснювалось замірювання температури в кожному шарі конструкції та на її краях. Контрольні вимірювання проводилися безперервно протягом 1 години кожні 10 хвилин із записом показань термопар до настання стаціонарного режиму. Коливання результатів вимірювань температури в умовах встановленого теплового потоку не перевищували границі допустимих основних похибок. Максимальне відхилення від середньої величини не перебільшувало 3 %, що свідчить про достовірність отриманих результатів.

Проведенням експерименту було сформовано необхідну вихідну інформацію для встановлення закономірностей зміни температури в часі за допомогою MS Excel та побудовано графіки, а також поверхні зміни температури в часі по товщині конструкції для різних видів утеплювальних матеріалів та різних видів утеплення, рис. 6 та рис. 7.



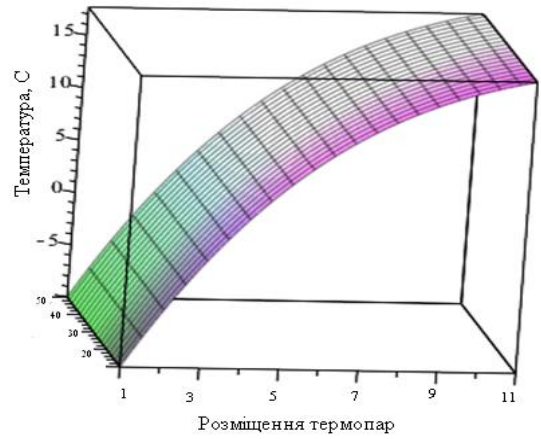
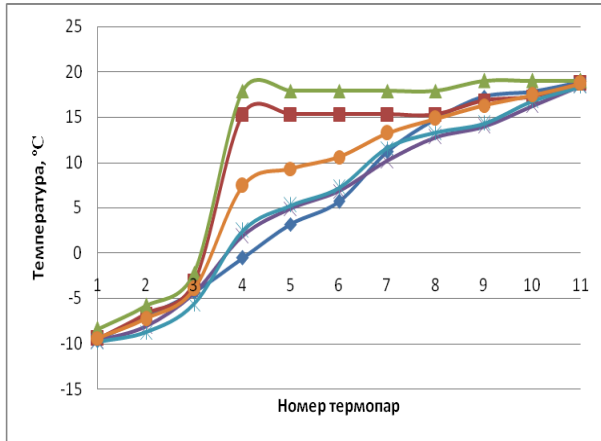
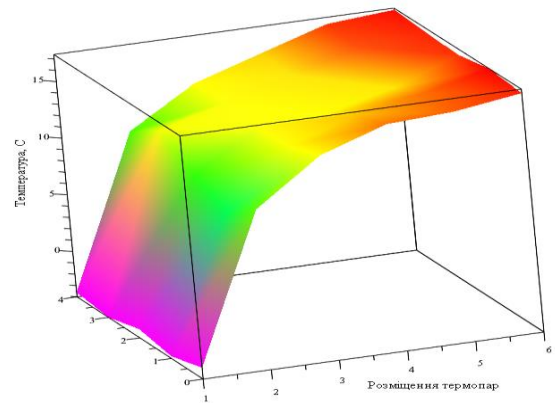
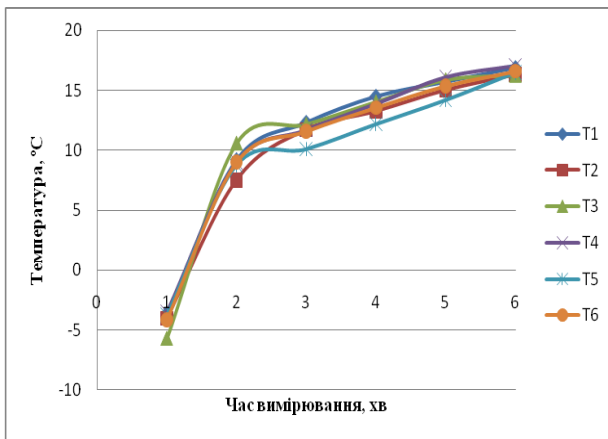


Рис. 6. Характер зміни температури в часі по товщині конструкції з внутрішніми утеплювачами: *а* – пінопласт, *б* – мінеральна вата

*а*



*б*

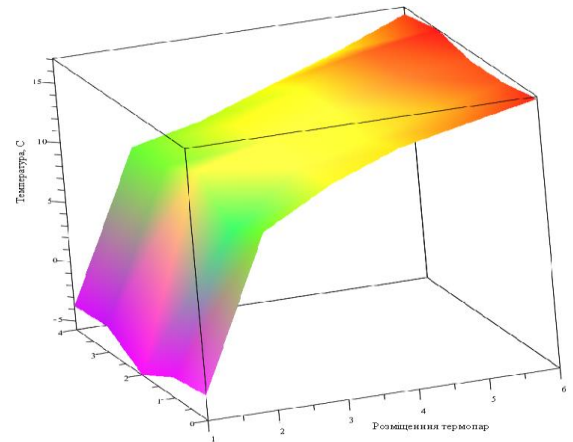
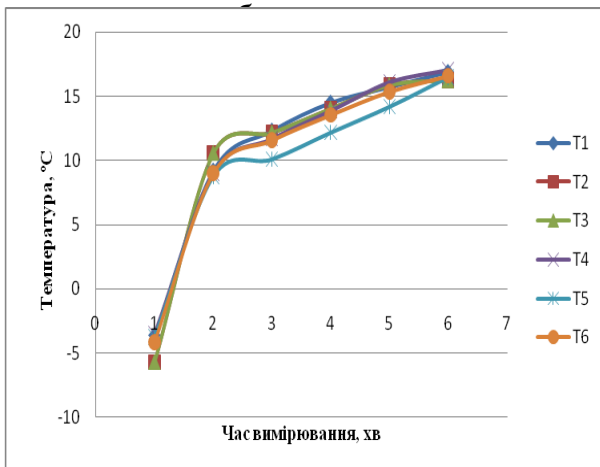


Рис. 7. Характер зміни температури в часі по товщині конструкції з зовнішніми утеплювачами: *а* – пінопласт, *б* – мінеральна вата

Для більш детального розуміння процесів внутрішньої теплопередачі в стіновій конструкції необхідно знати не тільки функціональні зміни температури з часом, але і швидкості їх зміни, які легко знаходяться на основі експериментальних даних. Такі залежності дозволяють визначити найважливіші характеристики нестационарного теплообміну: градієнт та перепади температур.

Проведені експериментальні дослідження дали змогу підтвердити нелінійну залежність поширення температури в стіновій конструкції. На рис. 8 показано зміну температури в будівельній конструкції, де можна спостерігати нелінійну залежність в більшій частині конструкції. Тобто в частині утеплення спостерігається лінійна залежність, а в основній частині конструкції нелінійна.

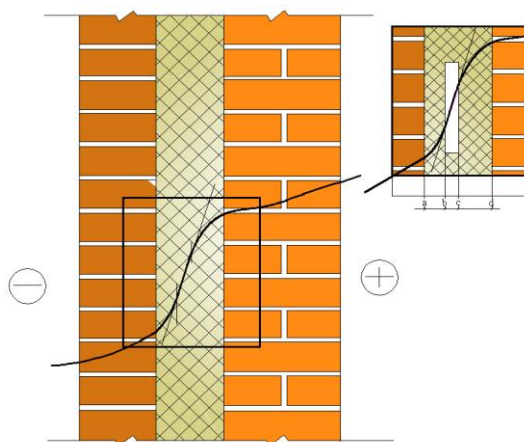


Рис. 8. Зміна температури в будівельній конструкції

У **четвертому розділі** показано моделювання теплопровідності багатошарових будівельних виробів. Основою якої є розв'язання задачі нестационарної теплопровідності шляхом розбиття кожного шару матеріалу на  $n$ -у кількість прошарків.

Для теоретичного дослідження теплопровідності розглянуто розв'язання задачі нестационарної теплопровідності за допомогою інтегрального методу прямих, коли область складається з трьох частин з різними коефіцієнтами теплопровідності, рис. 9.

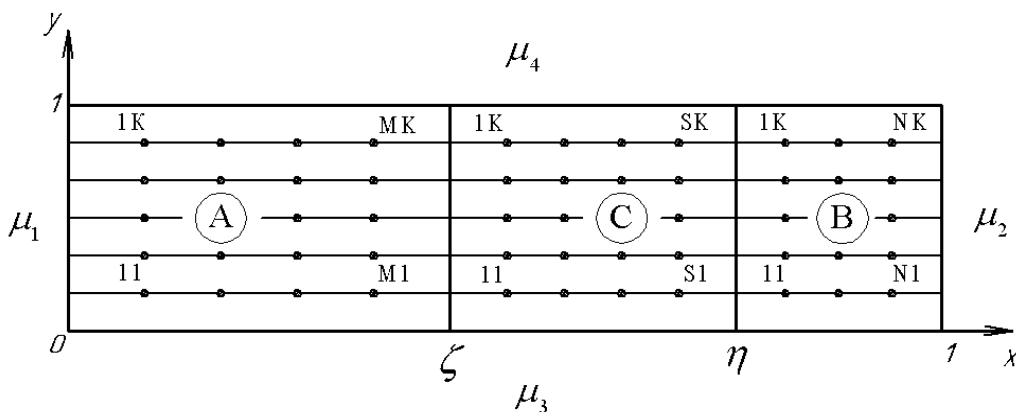


Рис. 9. Розрахункова схема теплопровідності

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 в околі кожного вузла з врахуванням наближеного розв'язку отримано систему диференціальних рівнянь 1-го порядку відносно значень температури у вузлових точках відповідного шару конструкції. Зміна області інтегрування приводить до розв'язання задачі за методом прямих, покращеним методом прямих та методом з вибором області інтегрування за рахунок початкових умов.

Основна задача зводиться до розв'язання такого рівняння:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ a(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + f(x, t), \quad (1)$$

де коефіцієнт теплопровідності  $a(x, y)$  має значення:

$$a(x) = \begin{cases} a_1, x < \xi_1; \\ a_2, \xi_1 < x < \xi_2; \\ a_3, \xi_2 < x < \xi_3; \\ a_4, \xi_3 < x \end{cases} \quad (2)$$

в області  $\{(x, t), 0 < x < 1, x \neq \xi_1, \xi_2, \xi_3; t > 0\}$ , яке задовольняє початкову умову (3),

$$u(x, 0) = \varphi(x); \quad (3)$$

умови на межах границь (4):

$$\begin{cases} \left[ \beta_1 u_x + \gamma_1 u \right]_{x=0} = \psi_1(t), \\ \left[ \beta_2 u_x + \gamma_2 u \right]_{x=1} = \psi_2(t) \end{cases} \quad (4)$$

і умови спряження (5), (6):

$$\begin{aligned} u \Big|_{x=\xi_1-0} &= u \Big|_{x=\xi_1+0}; \\ u \Big|_{x=\xi_2-0} &= u \Big|_{x=\xi_2+0}; \\ u \Big|_{x=\xi_3-0} &= u \Big|_{x=\xi_3+0}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} a_1 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=\xi_1-0} &= a_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=\xi_1+0}, \\ a_2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=\xi_2-0} &= a_3 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=\xi_2+0}, \end{aligned} \quad (6)$$

Кожний шар матеріалу по товщині розбивається відповідним кроком, який задається і містить вузлові точки.

Для чисельного розв'язання задачі (1)–(6) по осі  $x$  вводиться сітка відповідно з кроком:

$$h_{Ax} = \frac{\zeta}{M+1}, \quad h_{Cx} = \frac{\eta - \zeta}{S+1}, \quad h_{Bx} = \frac{1 - \eta}{N+1}.$$

Відносно осі  $y$  на інтервалі  $(0, 1)$  сітка з кроком

$$h_{Ay} = h_{By} = h_{Cy} = \frac{1}{K+1}.$$

Розв'язання рівнянь теплопровідності в околі вузлових точок кожного шару знаходиться у вигляді квадратичного полінома:

$$P(x, x_k, t) = \sum_{i=0}^2 A_i^k(t)(x - x_k), \quad (7)$$

де,  $x_k$  – координата вузлової точки;

$A_i^k(t)$  – коефіцієнти полінома.

Інтегруючи рівняння (1) на інтервалах  $(x_k - \alpha_x h, x_k + \alpha_x h)$ , отримуємо систему алгебраїчних рівнянь  $M \times K + S \times K + N \times K$  лінійних диференціальних рівнянь відносно  $A_{00}^{mk}, C_{00}^{sk}, B_{00}^{nk}$

$$\begin{aligned} \dot{A}_{00}^{mk} + \frac{\alpha_{mk}^2 h_{Ax}^2}{3} \dot{A}_{20}^{mk} + \frac{\alpha_{mk}^2 h_{Ay}^2}{3} \dot{A}_{02}^{mk} &= 2a_A A_{20}^{mk} + 2a_A A_{02}^{mk} + \Phi_A^{mk}; \\ \dot{C}_{00}^{sk} + \frac{\alpha_{sk}^2 h_{Cx}^2}{3} \dot{C}_{20}^{sk} + \frac{\alpha_{sk}^2 h_{Cy}^2}{3} \dot{C}_{02}^{sk} &= 2a_C C_{20}^{sk} + 2a_C C_{02}^{sk} + \Phi_C^{sk}; \\ \dot{B}_{00}^{nk} + \frac{\alpha_{nk}^2 h_{Bx}^2}{3} \dot{D}_{20}^{nk} + \frac{\alpha_{nk}^2 h_{By}^2}{3} \dot{B}_{02}^{nk} &= 2a_D D_{20}^{nk} + 2a_D D_{02}^{nk} + \Phi_D^{nk}, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\Phi$  – подвійний інтеграл від  $f(x, y)$  на кожному інтервалі інтегрування;

$$k = \overline{1, K}, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}.$$

З врахуванням початкових умов цю систему можна виразити в матричній формі

$$\dot{R}_{00} = \alpha R_{00} + \beta \psi + \Phi, \quad (9)$$

$$\text{де } \dot{R}_{00} = \left\{ \dot{A}_{00}^{m,k}, \dot{C}_{00}^{s,k}, \dot{D}_{00}^{m,l}, \dot{E}_{00}^{s,l} \right\}^T, \quad R_{00} = \left\{ A_{00}^{m,k}, C_{00}^{s,k}, D_{00}^{m,l}, E_{00}^{s,l} \right\}^T, \quad \psi = \psi \left( \mu_k, \dot{\mu}_k \right).$$

$\alpha, \beta$  – відповідні матриці з числовими коефіцієнтами при стовпцях  $R_{00}$  і  $\psi$ ;

$\Phi$  – матриця-стовпець подвійних інтегралів від  $f(x, t)$ .

Розв'язуючи систему та задаючи в (1) різні коефіцієнти теплопровідності матеріалів можна дослідити температурне поле багатошарових середовищ різного характеру.

При  $x = x_k$  отримуємо значення температури  $A_0^k(t)$  у  $k$ -му вузлі. Це дозволяє знаходити температуру не тільки у вузлах в околі визначених точок,

а й в межах контакту матеріалів, що дуже важливо.

Змінюючи межі інтегрування  $\left[ x_k - \alpha_0 h_{Ax}, x_{mk} + \alpha_{mk} h_{Ax} \right]$  в рівнянні теплопровідності, розрахунок проводиться за методом прямих та за покращеним методом прямих.

За рахунок отриманих результатів з різними різницевиими схемами можна вибрати більш достовірний розв'язок для конкретної компоновки матеріалів.

Змінюючи товщину шарів та коефіцієнти теплопровідності матеріалів, можна підібрати необхідну компоновку матеріалів для досягнення відповідної мети. А це, дасть можливість отримати нові теплоізоляційні матеріали.

У П'ятому розділі розглядається впровадження результатів дисертаційного дослідження у ТОВ «ДЕВЕЛОПМЕНТ БІЛДІНГ ГРУП», який полягає в розрахунку товщини утеплювального матеріалу для 9-ти поверхового будинку в м. Білогородка Київської області, економічний ефект склав 20011 грн., що документально засвідчено актом впровадження.

Наведено ефективність використання запропонованого методу дослідження теплопровідності багат шарових виробів в порівнянні з існуючими методами (рис. 10).

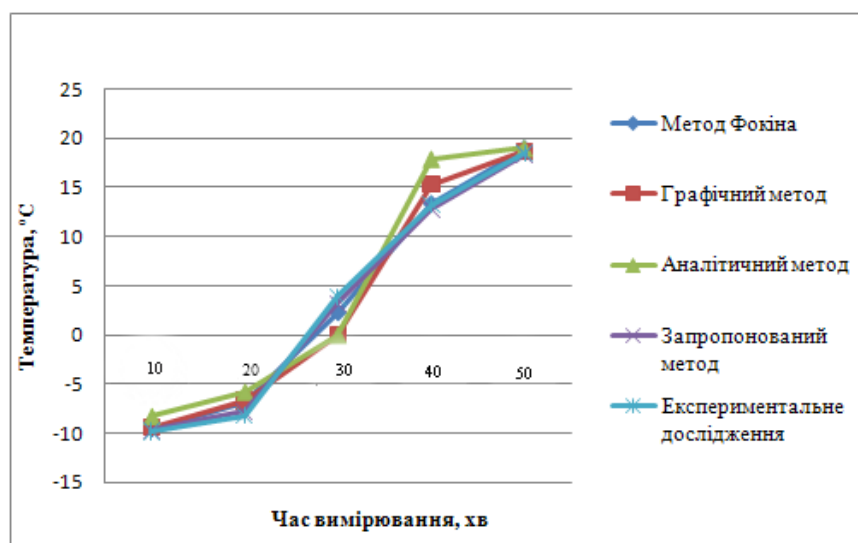


Рис. 10. Порівняння різних методів розрахунку конструкції

Порівнюючи експериментальні та розрахункові дані за запропонованим методом можна сказати, що вони підтверджують нелінійну залежність зміни температури в шарах матеріалів, що суперечить як методу Фокіна, так і графічному та аналітичному, оскільки за їхніми даними температура змінюється за лінійною залежністю, як прийнято вважати.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено практичне завдання з визначення розповсюдження температури в багатошарових будівельних матеріалах.

1. Аналіз існуючих методів дослідження теплопровідності багатошарових конструкцій та методів розрахунку температурного поля одно- та багатошарових будівельних конструкцій показав, що на сьогодні прийнято вважати, що температура в тілі будівельного матеріалу поширюється лінійно, а це не може відповідати дійсності, оскільки в природі немає лінійних процесів. Для проведення досліджень попередньо зроблено аналіз існуючих методів розрахунку теплопровідності багатошарових конструкцій, який показав, що найточнішим є практичний метод розрахунку теплопровідності в багатошарових конструкціях (метод Фокіна), яким розраховується розповсюдження температури в усіх вузлах розбитого на квадрати досліджуваного матеріалу.

2. Запропоновано експериментальну установку для визначення розповсюдження температури в будівельній конструкції, яка імітує реальну частину стіни з різними видами утеплювальних матеріалів, застосовано випробувальне устаткування та засоби вимірювальної техніки.

3. Проведені експериментальні дослідження дали змогу підтвердити нелінійну залежність поширення температури в стіновій конструкції, особливо в зонах прилеглих до стиків матеріалів. У внутрішній зоні матеріалу спостерігається майже лінійна залежність. Різниця між даними експерименту та практичного методу в зоні стику матеріалів досягає 5...6 °С.

4. Проведено моделювання теплопровідності багатошарових будівельних конструкцій на основі розв'язання задачі нестационарної теплопровідності шляхом розбиття кожного шару матеріалу на  $n$ -ну кількість прошарків. Розв'язано задачу нестационарної теплопровідності за допомогою інтегрального методу прямих, коли область складається з трьох частин з різними коефіцієнтами теплопровідності. За рахунок інтегрування рівняння теплопровідності в околі кожного вузла з врахуванням наближеного розв'язку отримано систему диференціальних рівнянь 1-го порядку відносно значень температури у вузлових точках відповідного шару конструкції. Розв'язуючи систему та задаючи різні коефіцієнти теплопровідності матеріалів, можна дослідити температурне поле багатошарових середовищ різного характеру.

5. На основі різних коефіцієнтів теплопровідності матеріалів визначено температурне поле багатошарових конструкцій різного характеру.

6. Використання запропонованого методу при розрахунку системи утеплення дозволяє економити до 15 % утеплювального матеріалу.

7. У ТОВ «ДЕВЕЛОПМЕНТ БІЛДІНГ ГРУП» впроваджено результати досліджень у практику будівництва, що підтвердило їх економічну ефективність та практичну цінність. Загальний економічний ефект від впровадження результатів становить 20011 грн.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Риндюк С. В. , Риндюк В. І., Міщук Т. І. Моделювання теплопровідності двовимірних неоднорідних багатошарових середовищ. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. Вінниця, 2006. № 3. С. 105–111.
2. Риндюк С. В., Риндюк В. І., Міщук Т. І. Чисельно-аналітичний розв'язок одновимірної релаксаційної математичної моделі теплопровідності. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. Вінниця, 2007. № 4. С. 119–122.
3. Риндюк С. В., Риндюк В. І., Міщук Т. І. Моделювання процесу теплопровідності двовимірного тришарового середовища. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. Вінниця, 2008. № 5. С. 99–103.
4. Риндюк С. В., Дудар І. Н. Методика дослідження температурного поля з врахуванням нестационарних коефіцієнтів. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. Вінниця, 2008. № 5. С. 96–98.
5. Риндюк С. В., Риндюк В. І., Міщук Т. І. Автоматизація розв'язання задачі теплопровідності двовимірного неоднорідного багатошарового середовища. Вісник Вінницького політехнічного інституту. Вінниця, 2009. № 5. С. 162–166.
6. Риндюк С. В., Риндюк В. І., Міщук Т. І. Дослідження процесу теплопровідності багатошарових середовищ з врахуванням явища релаксації за допомогою інтегрального методу прямих. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. Вінниця, 2009. № 1. С. 84–91.
7. Риндюк С. В., Риндюк В. І., Власенко А. М. Моделювання процесу теплопровідності віконної рами з утепленням. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. Вінниця, 2009. № 2. С. 101–105.
8. Риндюк С. В. Автоматизація дослідження теплопередачі багатошарових середовищ при нестационарному тепловому потоці. Геодезія, архітектура та будівництво : матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ГАС–2011 (м. Львів, 24–26 листопада, 2011). Львів : Львівська політехніка, 2011, С. 130–131.
9. Риндюк С. В., Риндюк В. І., Старушок Н. І. Розв'язок біпараболічного рівняння теплопровідності за допомогою інтегрального методу прямих. Сучасні технології матеріалів і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. Вінниця, 2012. № 1. С. 89–91.
10. Риндюк С. В., Дудар І. Н. Дослідження підвищення теплоізоляції будинків та споруд. Енергоефективні технології в міському будівництві

- та господарстві : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Одеса, 3–4 квітня. 2012 р.). Одеса : ОДАБА, 2012. С. 39–42.
11. Риндюк С. В., Дудар І. Н. Дослідження теплофізичних характеристик утеплення конструкцій будівель та споруд. Енергоефективність в будівництві та архітектурі : науково-технічний збірник. Київ : КНУБА, 2013. № 4. С. 100–103.
  12. Риндюк С. В. Исследование повышения теплоизоляции зданий и сооружений. Приволжский научный вестник : научно-практический журнал. Ижевск, 2013. № 10 (26). С. 45–47.
  13. Риндюк С. В., Власенко А. М. Моделювання високотемпературного руйнування залізобетонних конструкцій: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2014. 108 с.
  14. Риндюк С. В., Дудар І. Н. Енергоефективні матеріали та конструкції для теплового захисту будівель і споруд. Сучасні технології матеріалів і конструкції в будівництві : міжнародний науково-технічний журнал. Вінниця, 2017. № 2. С. 31–35.

## 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 виробы. – Вінницький національний технічний університет МОН України. – Вінниця, 2018.

У дисертаційній роботі проведено експериментальні дослідження зміни температури в конструкції не тільки на протилежних гранях, а і в кожному шарі матеріалу, шляхом встановлення термопар як на стиках матеріалів, так і в них самих, що підтвердило нелінійну залежність поширення температури в конструкції.

Досліджено методи визначення теплопровідності багатошарових будівельних матеріалів та розрахунок температурного поля одно- та багатошарових будівельних конструкцій. Запропоновано новий метод розв’язання нелінійної задачі теплопровідності з врахуванням зміни градієнта температури, що дозволяє отримати розрахунок більш точної теплопровідності конструкції та дослідити температурне поле багатошарових конструкцій різного характеру.

Практичне значення роботи полягає в тому, що розроблений метод дозволить більш точно визначати градієнт температури в багатошарових будівельних матеріалах та виробках, що дасть можливість розробляти більш ефективні утеплювальні матеріали та компонувати багатошарові конструкції, і як наслідок, зменшить вартість утеплювача та дасть можливість точніше визначати точку роси.

Розроблений метод був впроваджений при розрахунку товщини утеплювача для 9-ти поверхового будинку, що зводився компанією ТОВ

«ДЕВЕЛОПМЕНТ БІЛДІНГ ГРУП». В порівнянні з існуючими методами економічний ефект склав 20011 грн.

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

## АННОТАЦІЯ

**Рындюк С. В. Метод определения теплопроводности строительных материалов и изделий.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Винницкий национальный технический университет МОН Украины. – Винница, 2018.

В диссертационной работе проведены экспериментальные исследования изменения температуры в конструкции не только на противоположных гранях, но и в каждом слое материала, путем установления термопар, как на стыках материалов, так и в них самих, что подтвердило нелинейную зависимость распространения температуры в конструкции.

Исследованы методы определения теплопроводности многослойных строительных материалов и расчет температурного поля одно - и многослойных строительных конструкций. Предложен новый метод решения нелинейной задачи теплопроводности с учетом изменения градиента температуры, что позволяет получить расчет более точной теплопроводности конструкции и исследовать температурное поле многослойных конструкций различного характера.

Практическое значение работы заключается в том, что разработанный метод позволит более точно определять градиент температуры в многослойных строительных материалах и изделиях, что даст возможность разрабатывать более эффективные утеплительные материалы и компоновать многослойные конструкции, и как следствие, уменьшит стоимость утеплителя и даст возможность точнее определять точку росы.

Разработанный метод был внедрен при расчете толщины утеплителя для 9-ти этажного дома, возводимого компанией ООО «БИЛДИНГ ДЕВЕЛОПМЕНТ ГРУПП». В сравнении с существующими методами экономический эффект составил 20011 грн.

**Ключевые слова:** теплопроводность, энергоэффективность, термическое сопротивление, температура, температурное поле, утеплительные материалы, многослойные строительные конструкции, строительные изделия, численные методы.

## 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.

Thesis research presents the analytical and experimental study of heat-conducting of building materials and wares.

In theory the methods of determination of heat-conducting of multi-layered building materials and determine of the temperature field are investigational one and multi-layered building constructions.

Experimental studies of change of temperature are undertaken in a construction not only on opposite verges but also in every layer of material by establishment of thermocouples, as on the joints of materials so in them. That gave the opportunity to confirm a non-linear dependence of the temperature distribution in the structure, that is, in one part of the warming observed linear dependence and the other linear.

For a more detailed understanding of the process of internal heat transfer in the structure, it is necessary to know not only the functional changes of temperature with time, but their rate of change, which are easily found on the basis of experimental data. Such dependences allow us to determine the most important characteristics of non-stationary heat transfer: dew point and temperature gradient.

The method of solving nonlinear problems of heat-conducting is offered taking into account the changes of the temperature gradient that allows to obtain a more accurate calculation heat-conducting of construction and knowing the different coefficients of heat-conducting of materials to investigate the temperature field of multi-layered constructions of different character.

Also the method of calculation of heat-conducting of multi-layered building constructions got further development in two-dimensional case taking into account subject to boundary conditions of the first, second and third kind.

The practical value of the work is that the developed method will allow more accurately determine the temperature distribution in multilayer building materials and products, which will enable the development of more effective insulation materials and more efficiently layered multilayer materials that will reduce the cost of the heater and more accurately determine the dew point .

Application of the proposed method is organized with the insulation of a 9-storey house by a company «DEVELOPMENT BUILDING GROUP», which consists in calculating the thickness of insulating material. In comparison with existing methods the economic effect amounted to 20011 UAH, which was achieved by reducing the number of insulated material.

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

Підписано до друку 16.05.2018 р. Формат 29,7×42 ¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2018-093.

Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.