

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ

ЯКУСЕВИЧ СЕРГІЙ ГРИГОРОВИЧ

УДК 514.18

**ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ
СИСТЕМ ФАСАДНОГО УТЕПЛЕННЯ БУДИНКІВ**

Спеціальність: 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
СКОЧКО ВОЛОДИМИР ІГОРОВИЧ,
Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ) МОН України,
доцент кафедри архітектурних конструкцій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ПУСТЮЛЬГА СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ,
Луцький національний технічний університет
(м. Луцьк) МОН України,
завідувач кафедри дизайну та графіки

кандидат технічних наук, доцент
ГЕТЬМАН Олександра Георгіївна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ), МОН України,
доцент кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки

Захист дисертації відбудеться « 30 » червня 2021 р. о 13⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.06 у Київському національному університеті будівництва і архітектури, 03037, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31, ауд. 466).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий « 28 » травня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.056.06

О. А. Бондар

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Методи прикладної геометрії та графічні технології набувають все більшого значення при вирішенні задач архітектурно-будівельної фізики, енергоефективності та екології. Окрім традиційних задач «променевої» природи, де традиційно ефективно працюють методи лінійчатої геометрії, все більшої актуальності набувають напрямки досліджень, що вимагають створення геометричних або геометрично інтерпретованих методів опису складних нелінійних фізичних процесів - теплопровідності, тепломасопереносу тощо. Такі методи та відповідні моделі є важливими елементами розв'язання практичних задач енергозбереження та енергоефективності.

Особливої уваги питання енергозбереження набувають в будівництві і архітектурі, причому не лише стосовно нового будівництва, але особливо – при термомодернізації існуючого будинкового фонду.

В процесі проектування та реконструкції сучасних енергоефективних будівель багато уваги приділяється вирішенню задач забезпечення надійності роботи теплових оболонок цих будівель, а також усуненню наявних при стандартних архітектурно-конструктивних рішеннях містків холоду. Як правило, для того, щоб ефективно вирішувати ці задачі, необхідно вдаватися до чисельного моделювання температурних полів у нетипових вузлах огороджувальних конструкцій досліджуваної.

При цьому виникають дві проблеми:

1) моделювання температурних полів у товщі конструкцій, що мають складну геометричну форму і в більшості випадків є неоднорідними, представляє собою нетривіальну задачу, розв'язок якої вимагає від інженера-проектувальника високого освітнього рівня кваліфікації та трудомістких розрахунків;

2) результат моделювання температурного поля потребує подальшого аналізу і розв'язання наступної задачі щодо підбору заходів, яких потребує досліджуваний конструктивний вузол для поліпшення його теплоізоляційних властивостей.

Однак, вказана вище проблема на практиці вирішується за допомогою типових методик підбору товщини теплоізоляційного шару. Тобто, за умови невиконання вимоги будівельних норм щодо відповідності приведенного опору теплопередачі конструктивного вузла нормативному значенню, виконується збільшення товщини зовнішнього шару утеплювача по всьому периметру теплової оболонки. Враховуючи загальну площу огороджувальних конструкцій, яка включає такі вузли, це призводить до нерівномірних тепловтрат крізь теплову оболонку будівлі та перевитратам вартісних ізоляційних матеріалів, і як наслідок, - зниження економічної ефективності таких рішень.

Для вирішення означеної проблеми фахівці вдаються до використання чисельного моделювання, на основі якого отримуються дані щодо значень температур у деяких точках наперед визначеної сітки. Однак, ці дані носять дискретний характер і ускладнюють точне визначення інших важливих фізичних показників, таких як тепловтрати у довільній точці поверхні огороджувальної конструкції або температура поверхні у будь-якій іншій (в т. ч. внутрішній)

точці, що не належить до сітки базових вузлів чисельної моделі. Тому, моделювання температурного поля у визначених точках моделі вимагає застосування додаткових інтерполяційних алгоритмів, які дозволяють отримати проміжні дані між базовими розрахунковими вузлами. Все це призводить до використання комп'ютерних програм, які працюють на основі чисельних методів. Операційні алгоритми таких програм, як правило, є закритими, і користувачі не мають можливості контролювати їх точність і коректність з фізичної точки зору.

Натомість методи, що дозволяють на основі певних допущень відтворювати неперервні функції температурних полів, майже не розвиваються, оскільки передбачають використання складних математичних перетворень та вимагають від інженера наявності високого рівня математичної підготовки й кваліфікації. Очевидно, що розробка відносно простих та наочних методів побудови функцій неперервних температурних полів є актуальною та важливою проблемою.

На практиці це означає, що для підвищення ефективності проектів термореконструкції вкрай гострим і актуальним є вирішення питання розробки більш зручних і дієвих методик оптимізації конструктивних рішень огорожувальних конструкцій будівель на основі геометричного моделювання температурних полів та аналізу характеру розподілу їх ізотерм.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано у Київському національному університеті будівництва і архітектури згідно з тематикою науково-дослідної роботи кафедри архітектурних конструкцій за напрямом: «Розробка геометричних моделей складних об'єктів і процесів», зокрема за темою «Організаційно-технологічне проектування будівельною діяльністю» (ДР №0115U001646), де автором запропоновано методика ефективної термореконструкції будівель (Довідка про впровадження від 13.11.2020р).

Мета і завдання дослідження. *Мета* дисертаційної роботи полягає у розробці геометрично інтерпретованого способу та алгоритмів побудови температурних полів енергоефективних огорожувальних конструкцій будівель та вдосконаленні на цій основі процесу проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій загалом.

Для реалізації зазначеної мети необхідно виконати такі *завдання*:

1. Проаналізувати сучасний стан досліджень методів геометричного та чисельного моделювання фізичних процесів, що протікають в експлуатованих огорожувальних конструкціях будівель;

2. Дослідити та визначити основні аспекти системної побудови функції температурного поля огорожувальних конструкцій з позицій геометричного моделювання;

3. Розробити алгоритм побудови неперервного температурного поля у суцільних огорожувальних конструкціях на основі інтегральних рівнянь потенціалу;

4. Дослідити практичні аспекти геометричного моделювання температурних полів огорожувальних конструкцій будівель та особливості їх проектування;

5. Виконати геометричне моделювання температурних полів для найбільш характерних вузлів огорожувальних конструкцій та проаналізувати характер розподілу їх ізотерм;

6. Виконати програмну реалізацію алгоритму побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу;

7. Виконати впровадження результатів дисертаційного дослідження в практику проектування теплових оболонок огорожувальних конструкцій будівель та навчальний процес.

Об'єктом дослідження є вдосконалення процесу проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій будівель.

Предмет дослідження – геометричні моделі побудови температурних полів експлуатованих огорожувальних конструкцій будівель.

Методи дослідження. При виконанні роботи використано методи геометричного моделювання, методи будівельної фізики, чисельні методи, методи інтегрально-аналітичного моделювання, методи багатофакторної оптимізації, системний аналіз, методи прийняття рішень.

Наукову базу здійснених досліджень становлять подані у списку літературних джерел дисертації праці вітчизняних та закордонних учених з обчислювальної геометрії, теорії кривих і поверхонь, апроксимації та інтерполяції, множин і графів, математичного моделювання об'єктів і процесів, баз даних, алгоритмів, програмування, оптимізації, архітектурно-будівельного проектування, комп'ютерної графіки. Відповідні посилання є в тексті дисертації.

Наукова новизна роботи полягає у розробці геометрично інтерпретованого способу та алгоритмів побудови температурних полів огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу, зокрема:

вперше:

- розроблено та запропоновано до використання геометрично інтерпретований спосіб побудови температурних полів огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу;

- розроблено комплекс алгоритмів побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій, визначення та усунення містків холоду;

удосконалено:

- підхід до відтворення температурних полів огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу;

- методологію визначення раціональних теплофізичних параметрів огорожувальних конструкцій на основі змодельованих температурних полів;

- засоби програмної реалізації розрахунків температурних полів у огорожувальних конструкціях;

отримали подальший розвиток:

- теорія архітектурно-будівельного проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій за допомогою використання інтерпретаційного

способу побудови температурних полів огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу;

- концептуальні основи раціонального проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що: застосування запропонованих геометрично інтерпретаційного способу побудови температурних полів огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу дає змогу досягти зменшення трудомісткості розрахунків та більшої їх наочності, що призведе до скорочення часу та підвищення якості розробки проектних рішень, дозволить зменшити обсяг вартісного теплоізоляційного матеріалу та відповідно вартості будівельних робіт, підвищити теплоізоляційні властивості огорожувальних конструкцій будівель. Створені алгоритми та рекомендації щодо практичного використання розробленого підходу геометричного моделювання можуть бути використані як інструмент оптимізації конструктивних параметрів енергоефективних огорожувальних конструкцій будь-якої конфігурації. Запропоновані алгоритми є адаптованими до реалізації у програмному комплексі.

Результати досліджень впроваджено в ТОВ «ГРАДОБУД-К» при розробці проектів термореконструкції теплових оболонкок житлових будівель (Акт від 17.08.2020 р. № 23/20); на кафедрі архітектурних конструкцій КНУБА при викладанні спецкурсу «Енергоефективність будівель» (Акт від 04.08.2020 р. № 015-61); у БНЕС-Центрі КНУБА при формуванні спецкурсу підготовки енергоаудиторів (Акт від 06.09.2020 р. № 44б-61).

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, які викладені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень. Автором виконано аналіз сучасного стану досліджень методів геометричного та чисельного моделювання фізичних процесів, що протікають в експлуатованих огорожувальних конструкціях будівель; досліджено основні аспекти системної побудови функції температурного поля огорожувальних конструкцій з позицій геометричного моделювання; розроблено алгоритм побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу; досліджено практичні аспекти геометричного моделювання температурних полів огорожувальних конструкцій будівель; виконано моделювання температурних полів для найбільш характерних вузлів огорожувальних конструкцій; проаналізовано характер розподілу ізотерм побудованих моделей; виконано програмну реалізацію алгоритму побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу; виконано впровадження результатів дисертаційного дослідження на практиці.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідались на Міжнародних науково-практичних конференціях молодих вчених "Build-Master-Class – 2017 та 2020" (м. Київ, 2017, 2020 рр.); на VII та IX міжнародних науково-практичних конференціях

«Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «Енергоінтеграція – 2017 та 2019» (м. Київ, 2017, 2019 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладені та опубліковані у 8 друкованих наукових працях, в т. ч. у 3 фахових виданнях, що входять до наукометричних баз та 1 міжнародному виданні, та 4 апробативного характеру.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел зі 144 найменувань і додатків. Робота викладена на 166 сторінці, містить 23 рисунків, 7 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, наведено дані про зв'язок дисертаційної роботи з науковими темами та програмами, сформульовано мету і задачі дослідження, подано об'єкт, предмет та методи дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, приведені відомості про особистий внесок здобувача, публікації, про впровадження та апробацію результатів дослідження.

У **першому розділі «Аналіз сучасного стану досліджень методів геометричного та чисельного моделювання фізичних процесів в огорожувальних конструкціях будівель»** вміщено огляд підходів щодо проведення розрахунків для влаштування систем фасадної теплової ізоляції; проаналізовано основні види теплової ізоляції будівель та визначена їх специфіка; представлено основні підходи щодо визначення характеристик містків холоду; наведено основні математичні моделі, що дозволяють здійснити розрахунок температурного режиму огорожувальних конструкцій, виконано аналіз основних методів геометричного й чисельного моделювання температурних полів у вузлах огорожувальних конструкцій та теплової оболонки будівлі, виконано обґрунтування вибору напрямку вирішення поставлених завдань дослідження.

При проектуванні теплової ізоляції зовнішніх огорожувальних конструкцій інженери та архітектори мають вирішити три основні задачі:

- 1) відповідно до специфіки умов подальшої експлуатації обрати оптимальний матеріал (матеріали) для теплової ізоляції;
- 2) виходячи із конструктивних міркувань, визначитися з типом фасадної системи в цілому та принципом кріплення утеплювача;
- 3) спираючись на теплотехнічні розрахунки підібрати оптимальну товщину утеплювача.

При вирішенні першої задачі враховуються: призначення будівлі (наприклад, житлова, громадська, промислова, сільськогосподарського призначення тощо); кліматологічні особливості району розміщення будівлі (середня температура в холодну пору року, вологість повітря тощо); особливості режиму провітрювання та режим експлуатації за санітарно-гігієнічними вимогами (з вологим, мокрим, сухим, нормальним режимами, або з надлишковим виділенням тепла).

При вирішенні другої задачі оцінюються конструктивні особливості

несучих огороджувальних конструкцій, механічні властивості їх матеріалів та здатність до сприйняття додаткових навантажень від системи теплової ізоляції.

При вирішенні третьої задачі беруться до уваги теплотехнічні характеристики матеріалів несучих та самонесучих огороджувальних конструкцій будинку.

Наявність теплопровідних включень та зміни геометричної форми зовнішніх огороджувальних конструкцій потребують особливої уваги, оскільки ці два випадки вагомо впливають на зміну розподілу ліній току теплової енергії в товщі конструкцій.

При вирішенні сучасних інженерних задач, а також при проведенні досліджень різних речовин та матеріалів виникає потреба у встановленні фізичних закономірностей, які відображають ті чи інші процеси. Одним із найбільш ефективних способів такого дослідження є створення їх математичних (зокрема, геометричних) моделей. Актуальним є розвиток конструктивного напрямку створення зазначених моделей, що забезпечуватиме їх спрощення та наочність зі збереженням функціональності й якісних параметрів. При цьому моделі не мають втрачати основних ознак, які відображають індивідуальну природу та характер досліджуваного процесу.

Найбільш конструктивними та наочними методами, які можуть дотримуватися усіх перерахованих вимог, є методи геометричного моделювання. Дані методи дозволяють забезпечити метричні та диференціальні властивості як самого середовища, так і фізичного процесу або явища, що у ньому поширюється.

В розділі виконано аналіз основних методів геометричного й чисельного моделювання температурних полів у вузлах огороджувальних конструкцій та теплової оболонки будівлі. Найбільш розповсюдженими є чисельні методи, які застосовуються при моделюванні температурних полів, зокрема, - 1) метод скінченних елементів; 2) метод скінченних різниць; 3) метод граничних елементів.

Виконано обґрунтування вибору напрямку досліджень та обраного інструментарію. При вирішенні більшості задач будівельної фізики, які пов'язані з дослідженням температурно-вологісного режиму приміщень або будівель в цілому, виникає необхідність у відтворенні температурних полів у елементах і вузлах зовнішніх огороджувальних конструкцій. Відзначено недоліки існуючих методів дискретного моделювання температурних полів, які представлені у комерційних системах комп'ютерного проектування. Натомість, методи, що дозволяють на основі певних допущень та використанням геометричних та графічних інтерпретацій відтворювати неперервні функції температурних полів, розвинуті недостатньо. Очевидно, розробка таких методів є актуальною та важливою з практичної точки зору проблемою.

Відтак більш доцільною для вирішення відповідної задачі є глобальна інтерполяція, в результаті якої одержується єдина функція температурного поля, найшвидші спуски і підйоми по якій можуть бути побудовані без дотримання умов заміни інтерполяційних функцій на різних ділянках вузла.

Згідно з цим, поверхня огорожувальної конструкції з вищою температурою (зовнішня або внутрішня), буде представляти собою умовне джерело, а з меншою – умовний стік, і тоді значення умовних щільностей виділення (пропускання) або поглинання теплової енергії (поверхнею витоку або стоку відповідно) будуть визначатися з умови дотримання встановлених температур цих поверхонь.

У другому розділі «Геометричне моделювання температурних полів конструктивних вузлів огорожувальних конструкцій будівель та споруд» описано геометричну модель температурного поля огорожувальних конструкцій, алгоритм побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу та принципи побудови крайових та початкових умов моделювання температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій.

Розглянуто системні **концептуальні основи** раціонального проектування теплоізоляційної оболонки будівлі, на основі яких запропоновано **відповідна послідовність дій**, а саме:

Етап 1. Чисельне моделювання температурного поля. На основі проведеного розрахунку мають бути зафіксовані показники температур на зовнішній та внутрішній поверхнях огорожувальної конструкції. Перед початком моделювання слід визначитися із оптимальним кроком решітки вузлів розрахункової моделі. Вибір кроку має обумовлюватися загальною геометричною складністю будинку та може змінюватися на окремих ділянках стін. Також, крок сітки необхідно згущувати в зонах підвищення температури зовнішньої поверхні та в зонах пониження температури внутрішніх поверхонь.

Етап 2. Розрахунок інтенсивності та кількості тепловтрат на поверхні типової протяжної ділянки огорожувальної конструкції та визначення опору теплопередачі цієї ділянки.

Етап 3. Розрахунок товщини теплової ізоляції для типової протяжної ділянки огорожувальної конструкції. Після цього необхідно перевірити виконання усіх санітарно-гігієнічних нормативних вимог.

Етап 4. Визначення інтенсивності та кількості тепловтрат на поверхні інших фрагментів зовнішніх огорожувальних конструкцій із обраним кроком.

Етап 5. Визначення товщини теплової ізоляції на усіх досліджуваних ділянках (з обраним кроком) зовнішніх огорожувальних конструкцій шляхом інтерполювання на основі значень тепловтрат та товщини теплової ізоляції типової протяжної ділянки зовнішньої стіни.

Запропонований алгоритм передбачає різні підходи до визначення конструктивного вирішення теплової ізоляції, що буде змінною й пропорційною тепловтратам в кожній точці огорожувальної конструкції.

Найбільш ефективним підходом до підбору товщини утеплювача є аналіз характеру теплових ізополів у перерізах досліджуваних огорожувальних конструкцій. В результаті відтворення повної картини температурного поля стає можливою оцінка щільності ліній току теплової енергії. Це, в свою чергу, дозволяє прослідкувати усі траєкторії теплових втрат від нагрітих внутрішніх поверхонь до холодних зовнішніх граней зовнішніх стін (рис. 1). Такий підхід

дає змогу порівняти площу внутрішніх нагрітих системою опалення та іншими джерелами теплової енергії стінових конструкцій (включаючи дотичні до зовнішніх стін внутрішні несучі стіни й перегородки) та зовнішню площу огорожень, крізь яку внутрішнє тепло покидає будівлю. Саме на основі даних розрахунків й визначаються фактори форми геометрично складних ділянок та теплопровідних включень.

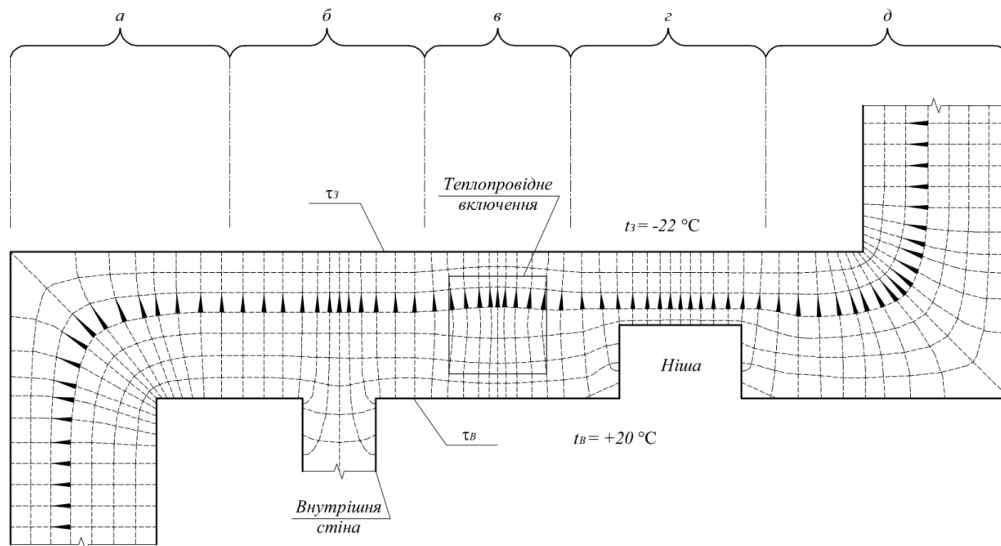


Рисунок 1 – Розподіл ізотерм та ліній току теплового потоку в зовнішній огорожувальній конструкції:

a – зовнішній кут будівлі; *б* – фрагмент приєднання внутрішньої стіни до зовнішньої огорожувальної конструкції; *в* – фрагмент із теплопровідним включенням; *г* – фрагмент із внутрішнім заглибленням (нішою) в товщі зовнішньої стіни; *д* – внутрішній кут будівлі

В переважній більшості випадків причини надмірних тепловтрат носять змішаний характер та обумовлюються як фізичними, так і геометричними особливостями огорожувальних конструкцій.

Якщо товщина теплової ізоляції буде змінною й пропорційною тепловтратам в кожній точці огорожувальної конструкції, то можлива раціоналізація витрат теплоізоляційних матеріалів, на основі мінімізації й рівномірного перерозподілу втрати тепла між усіма фрагментами огорожувальної конструкції.

Побудова геометричної моделі температурного поля огорожувальних конструкцій неможлива без існування деякої неперервної функції $f(x, y)$, що визначатиме температуру T в середині конструкцій (1):

$$T = f(x, y), \quad (1)$$

Побудова такої функції базується на диференціальному рівнянні теплопровідності (2):

$$a \cdot \Delta T + \frac{\gamma}{c \cdot \rho} = \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, c та ρ – питома теплоємність та густина матеріалу конструкції відповідно; γ – джерело теплоти (просторова щільність джерел теплової енергії), виділеної в одиниці об'єму середовища за одиницю часу τ ; Δ – оператор Лапласа.

Шукана функція (1) має задовольняти диференціальному рівнянню в часткових похідних параболічного типу. Окрім того, функція (1) повинна бути потенціальною, оскільки, за законом Фур'є, тепловий потік знаходиться у градієнтній залежності з температурою T . Щоб побудувати неперервну функцію температури, звернемося до принципів побудови функцій потенціалу електростатичних полів. Відповідні функції також повинні бути потенціальними й задовольняти аналогічному диференціальному рівнянню.

Для того, щоб записати функцію температури в i -й точці, що розповсюджуватиметься від j -го витоку або стоку енергії, необхідно ввести додаткову величину ξ_j , яка представлятиме собою умовну щільність виділення (пропускання) або поглинання теплової енергії поверхнею Ω_j витоку або стоку відповідно. При цьому, функція прийме наступний вигляд:

$$T_{i,j} = \int_{\Omega_j} \frac{\xi_j d\Omega_j}{r_{i,j}}, \quad (3)$$

де $r_{i,j}$ – це відстань від елементарного умовного обсягу поверхневої теплової енергії $\xi_j d\Omega_j$ до i -ї досліджуваної точки поля в межах матеріалу конструкції, що розглядається.

Функція (3) є потенціальною та задовольняє диференційному рівнянню в часткових похідних параболічного типу. При цьому можемо зробити припущення, що ξ_j є сталою величиною на кожній поверхні (ділянці). Таке припущення є цілком допустимим, оскільки в більшості випадків в межах окремих плоских ділянок не застосовуються різні опоряджувальні матеріали. Якщо все ж таки використані різні матеріали з різними величинами ξ_j , то доцільніше здійснити додаткове розбиття даної поверхні на окремі фрагменти.

На основі вищезазначеного, в роботі розроблено **алгоритм побудови неперервного температурного поля**, що складається з наступних кроків:

1. Визначаємо способом розбиття досліджуваного вузла конструкції на окремі поверхні або їх елементи, які в подальшому представлятимуть собою умовні джерела або стоки теплової енергії.

2. Будуємо функції форм кожної з ділянок умовного розбиття. У найпростішому й найбільш практичному випадку функції форм цих ділянок будуть представлені функціями поверхонь (для тривимірного простору) або прямих (для двовимірного випадку) загального положення.

3. Обраємо найбільш характерні точки S_i на одержаних окремих i -х поверхнях (або точки, що лежать у максимально малому околі точок цих поверхонь) та задаємо або шляхом вирішення одновимірної задачі

теплопровідності віднаходимо значення температур T_i в обраних точках. Точки варто підбирати таким чином, щоб їх температури можна було б розрахувати без застосування чисельних методів або складних аналітичних обчислень, оскільки в такому випадку застосування даного алгоритму втрачатиме доцільність.

4. Для кожної з n обраних точок на n поверхнях відповідних ділянок складаємо рівняння певного типу, в результаті чого отримуємо систему рівнянь у наступній формі:

$$\begin{cases} T_1 = \xi_1 \cdot \int_{\Omega_1} \frac{d\Omega_1}{r_{1,1}} + \xi_2 \cdot \int_{\Omega_2} \frac{d\Omega_2}{r_{1,2}} + \dots + \xi_n \cdot \int_{\Omega_n} \frac{d\Omega_n}{r_{1,n}}, \\ T_2 = \xi_1 \cdot \int_{\Omega_1} \frac{d\Omega_1}{r_{2,1}} + \xi_2 \cdot \int_{\Omega_2} \frac{d\Omega_2}{r_{2,2}} + \dots + \xi_n \cdot \int_{\Omega_n} \frac{d\Omega_n}{r_{2,n}}, \\ \dots \\ T_n = \xi_1 \cdot \int_{\Omega_1} \frac{d\Omega_1}{r_{n,1}} + \xi_2 \cdot \int_{\Omega_2} \frac{d\Omega_2}{r_{n,2}} + \dots + \xi_n \cdot \int_{\Omega_n} \frac{d\Omega_n}{r_{n,n}}. \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язуємо систему (4) відносно невідомих показників умовної щільності виділення або поглинання теплової енергії ξ_j .

5. Одержані щільності ξ_j підставляємо до функції (3),

$$T_i = \sum_{j=1}^n \xi_j \cdot \int_{\Omega_j} \frac{d\Omega_j}{r_{i,j}}. \quad (5)$$

в результаті чого отримуємо можливість визначити температурні показники в усіх внутрішніх точках досліджуваного вузла конструкції, але лише у області, обмеженій ділянками, одержаними при умовному розбитті (дискретизації).

Представлений алгоритм до побудови температурних полів у тілі конструктивних вузлів та елементів огорожувальних і внутрішніх конструкцій будівель та споруд є набагато простішим, ніж способи одержання дискретних температурних показників на основі використання чисельних методів розрахунків, які, окрім іншого, потребують застосування інтерполяційних методик. Відтак даний алгоритм дає змогу значно скоротити трудовитрати на побудову моделі й реалізації процесу розрахунку без втрат його коректності.

На основі інтерполяційної методики побудови суцільного температурного поля та підходу до визначення траєкторій найшвидшого спадання або зростання температури в тілі вузла, сформульовано та реалізовано **принциповий алгоритм пошуку та усунення містків холоду**, який складається з наступних кроків:

Крок 1. Виконується моделювання суцільного температурного поля вузла огорожувальної конструкції у її початковому (неоптимізованому) стані. При цьому застосовується один із методів чисельного моделювання з подальшою

локальною або глобальною інтерполяцією, або використовується інтегральна формула (5) для побудови температурного поля:

Крок 2. Обирається множина з m регулярних або специфічних точок на внутрішній та зовнішній поверхнях досліджуваного архітектурно-конструктивного вузла, температура яких вища або нижча за температури інших точок відповідних поверхонь.

Крок 3. Здійснюється моделювання найшвидшого підйому чи спуску з використанням одновимірної пошуку, починаючи у обраних на попередньому етапі алгоритму точках внутрішніх або зовнішніх поверхонь. При цьому застосовуємо наступні формули для визначення координат точок дискретної траєкторії спусків та/або підйомів:

$$x_i^{(k)} = x_i^{(k-1)} + \mu \cdot v_{x_i}^{(k-1)}, \quad (i = \overline{1, m}; k = \overline{1, r}), \quad (6)$$

$$y_i^{(k)} = y_i^{(k-1)} + \mu \cdot v_{y_i}^{(k-1)}, \quad (i = \overline{1, m}; k = \overline{1, r}), \quad (7)$$

де складові одиничного вектору градієнта $\bar{\mathbf{v}}$ визначаються за формулами:

$$v_{x_i} = \frac{\frac{\partial T}{\partial x_i}}{\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y_i}\right)^2}}, \quad (8)$$

$$v_{y_i} = \frac{\frac{\partial T}{\partial y_i}}{\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y_i}\right)^2}}. \quad (9)$$

В формулах (6) та (7): k – це номер поточного кроку переміщення уздовж траєкторії досліджуваного містка холоду, r – кількість кроків переміщення, а μ – параметр, абсолютні значення якого відраховуються в напрямку вектору градієнта $\bar{\mathbf{v}}$:

$$\bar{\mathbf{v}} = v_x \cdot \bar{\mathbf{e}}_x + v_y \cdot \bar{\mathbf{e}}_y \quad (10)$$

на кожному кроці спуску (чи підйому).

Крок 4. Розраховуються опори теплопередачі матеріалів досліджуваного вузла огорожувальних конструкцій, що потрапляють у визначені траєкторії містків холоду. Відповідні опори визначаємо за формулою:

$$R = \frac{1}{\alpha_3} + \sum_{k=1}^r \frac{\mu}{\lambda_{k,k-1}} + \frac{1}{\alpha_B}, \quad (7)$$

де $\lambda_{k,k-1}$, α_3 та α_B – коефіцієнт теплопровідності на ділянці містку холоду між точками на k -му й $(k-1)$ -му кроках переміщення під час градієнтного спуску,

коефіцієнти тепловіддачі зовнішньої та внутрішньої поверхонь досліджуваного вузла огорожувальних конструкцій відповідно.

Крок 5. Перевіряється, чи задовольняють розраховані опори теплопередачі нормативним показникам.

Крок 6. У випадку, якщо опори теплопередачі окремих траєкторій поширення містків холоду не задовольняють нормативним показникам, необхідно для підвищення рівня відповідного опору теплопередачі передбачити на шляху відповідної траєкторії влаштування шарів конструктивних матеріалів з низьким значенням коефіцієнту теплопровідності λ , що не знижуватимуть загальну конструктивну надійність досліджуваного вузла і конструктивної системи будівлі у цілому.

Крок 7. Після «оптимізації» конструкції необхідно повторити процес розрахунку згідно пунктів 1 – 6 даного алгоритму й зупинити оптимізаційний процес лише у випадку, якщо розраховані опори теплопередачі траєкторій містків холоду будуть задовольняти нормативним показникам, відповідно до пункту 5.

Подальші дослідження показали різні аспекти виконання даного алгоритму за умови оперування зміною товщин, теплопровідних властивостей та розташування матеріалів зовнішньої теплоізоляції.

У третьому розділі «Практичні аспекти моделювання температурних полів конструктивних огорожувальних конструкцій будівель» виконано розрахунки, що демонструють запровадження розроблених теоретичних підходів щодо відтворення температурних полів вузлів суцільних огорожувальних конструкцій, визначення товщини теплової ізоляції огорожувальних конструкцій на основі геометричного моделювання температурних полів у їх товщі та алгоритм конструювання вузлів зовнішніх огорожувальних конструкцій при проектуванні теплової оболонки будівлі на основі аналізу містків холоду.

Практична реалізація здійснювалась із застосуванням програмного розрахункового комплексу Mathcad, що дозволило здійснити графічне відображення змодельованого температурного поля заданого конструктивного вузла огорожувальної конструкції.

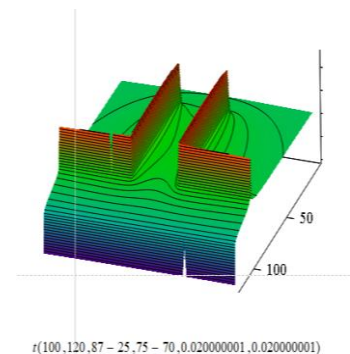
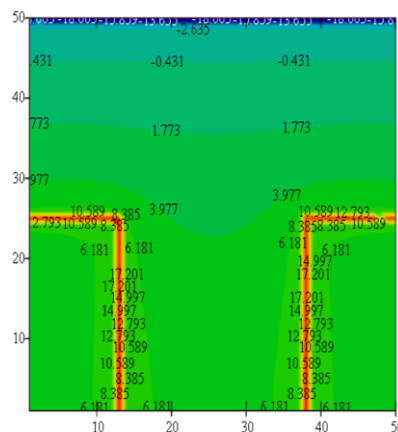
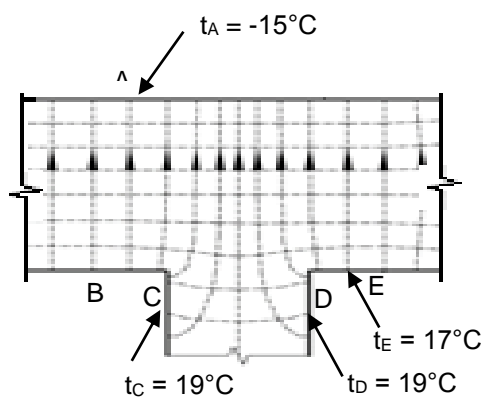


Рисунок 2. Моделювання температурного поля вузла примикання внутрішньої до зовнішньої огорожувальної конструкції.

Таке відображення дозволяє визначити місця теплоізоляційної оболонки будівлі із найбільшими тепловтратами. Результати дозволяють прийняти вірні конструктивні рішення для поліпшення теплового комфорту в приміщенні, шляхом вирівнювання температури на внутрішній поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій, особливо в місцях теплопровідних включень, що є обов'язковою умовою щодо дотримання санітарно-гігієнічного перепаду (різниці) між температурою внутрішнього повітря та приведеною температурою зовнішньої огорожувальної конструкції та оцінки площ, де можлива конденсація водяної пари при розрахункових та екстремальних значеннях температури зовнішнього повітря. Це може забезпечити зниження експлуатаційних витрат на підтримання теплового комфорту в приміщенні, а саме зменшити тепловтрати в місцях стику різних зовнішніх огорожувальних конструкцій та місцях примикання внутрішніх огорожувальних конструкцій до зовнішніх тощо. Також підвищення температури в площинах вузла конструкції супроводжується підвищенням парціального тиску, що є важливим аспектом з точки зору довговічності експлуатації будівельних матеріалів, що застосовані.

Розглянуто основні можливі конструктивні рішення забезпечення рівномірного теплового витоку через зовнішні огорожувальні конструкції. Таким чином, слід визначити наступні підходи до практичної реалізації улаштування теплової ізоляції на основі змодельованого температурного поля:

- 1) використання різної товщини матеріалу теплової ізоляції на фасаді (вимагає узгодження з вирішенням тектоніки фасаду, передбачає узгодженого використання оздоблення тощо), при застосуванні вентилязованого фасаду проблеми можна уникнути;
- 2) використання матеріалу теплової ізоляції однієї товщини, але з різним коефіцієнтом теплопровідності на різних ділянках огорожувальної конструкції;
- 3) використання усередненого за товщиною матеріалу зовнішньої теплової ізоляції;
- 4) використання локальних внутрішніх прошарків теплоізоляційних матеріалів в товщі конструкції у «слабких» зонах огороження;
- 5) локальна модифікація внутрішнього конструктивного рішення та розташування примикань, тепловключень, ніш тощо, якщо це узгоджується з прийнятими принциповими архітектурно-конструктивними рішеннями.

Варіант внутрішнього утеплення зсередини приміщень будівлі не розглядається внаслідок негативних наслідків такого типу рішення, що пов'язано з погіршенням паропроникності та накопиченням вологи в товщі конструкції протягом тривалого терміну експлуатації.

Рисунки 3 та 4 ілюструють розрахункові варіанти зовнішнього нерівномірного утеплення.

Варіант 1а. Практичне втілення засноване на сучасних технологіях

улаштування теплоізоляції із напилувального пінополіуретану. У даному випадку нанесення утеплювача можна буде здійснювати з точністю до одного сантиметра, без різких перепадів й чіткого розмежування шарів наплення (рис. 3). Зважаючи на високу ціну такого типу теплової ізоляції, оптимізація його витрат є особливо актуальною.

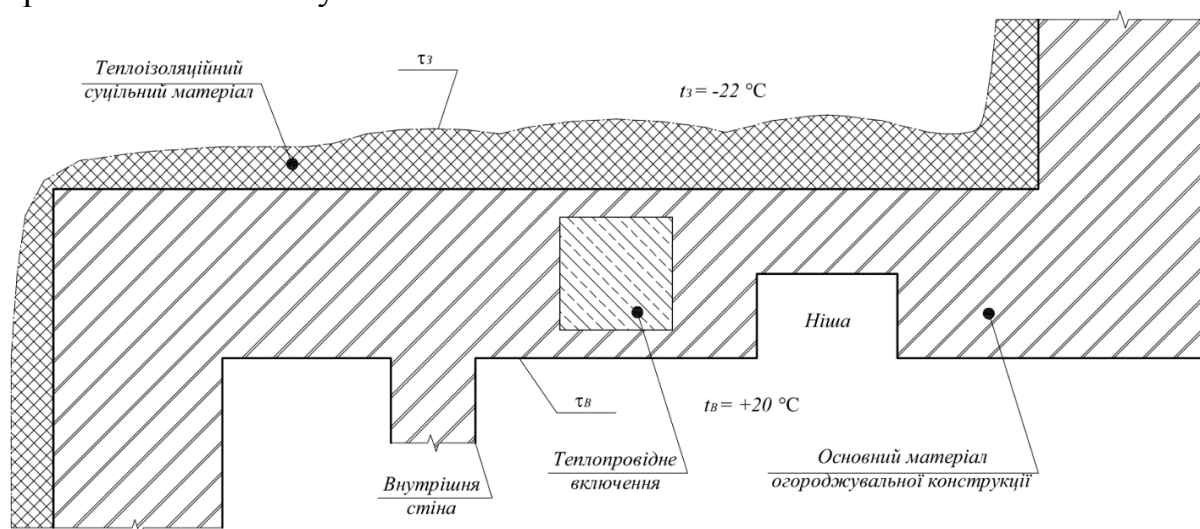


Рисунок 3. Приклад улаштування суцільного шару утеплювача (з напилувального пінополіуретану).

Варіант 1б. Цілком допустимим є й влаштування пошарової теплової ізоляції (рис. 2). В такому випадку теплоізоляція носитиме більш дискретний характер, що в той же час не дозволить досягти економії матеріалу в повному обсязі у зв'язку з тим, що плити утеплювача випускаються лише у певних типорозмірах та з певною товщиною листа. Натомість, даний підхід не вимагає високої кваліфікації виконавців.

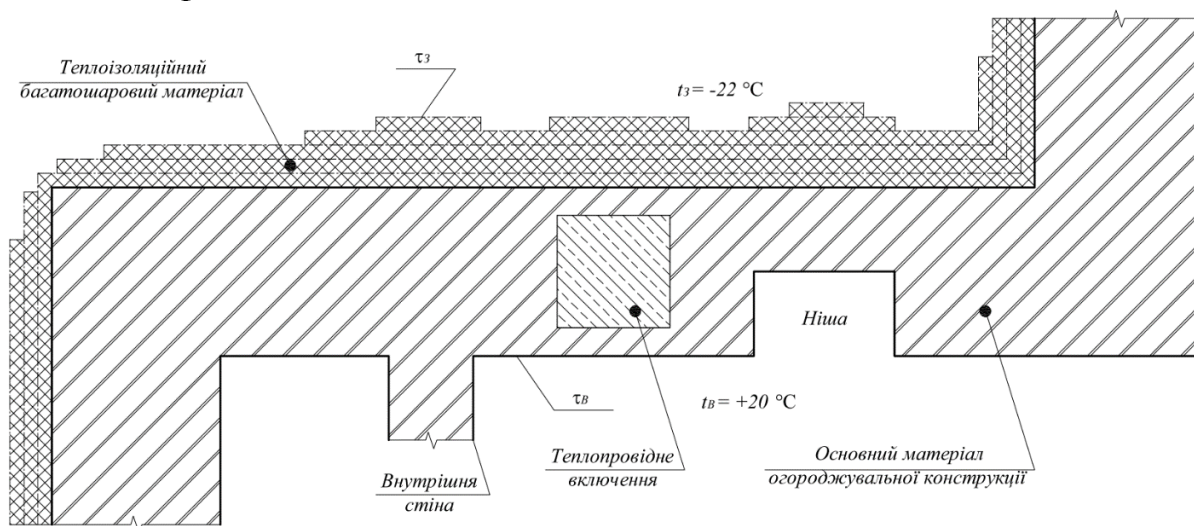


Рисунок 4. Улаштування багатощарового утеплювача (з полістиролу).

У четвертому розділі «Програмна реалізація та впровадження результатів досліджень» описано автоматизацію алгоритмів геометричного моделювання температурних полів суцільних огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу, алгоритмів геометричного

моделювання траєкторій містків холоду вузлів огорожувальних конструкцій та описано впровадження результатів дисертаційного дослідження в практику проектування теплових оболонок огорожувальних конструкцій будівель.

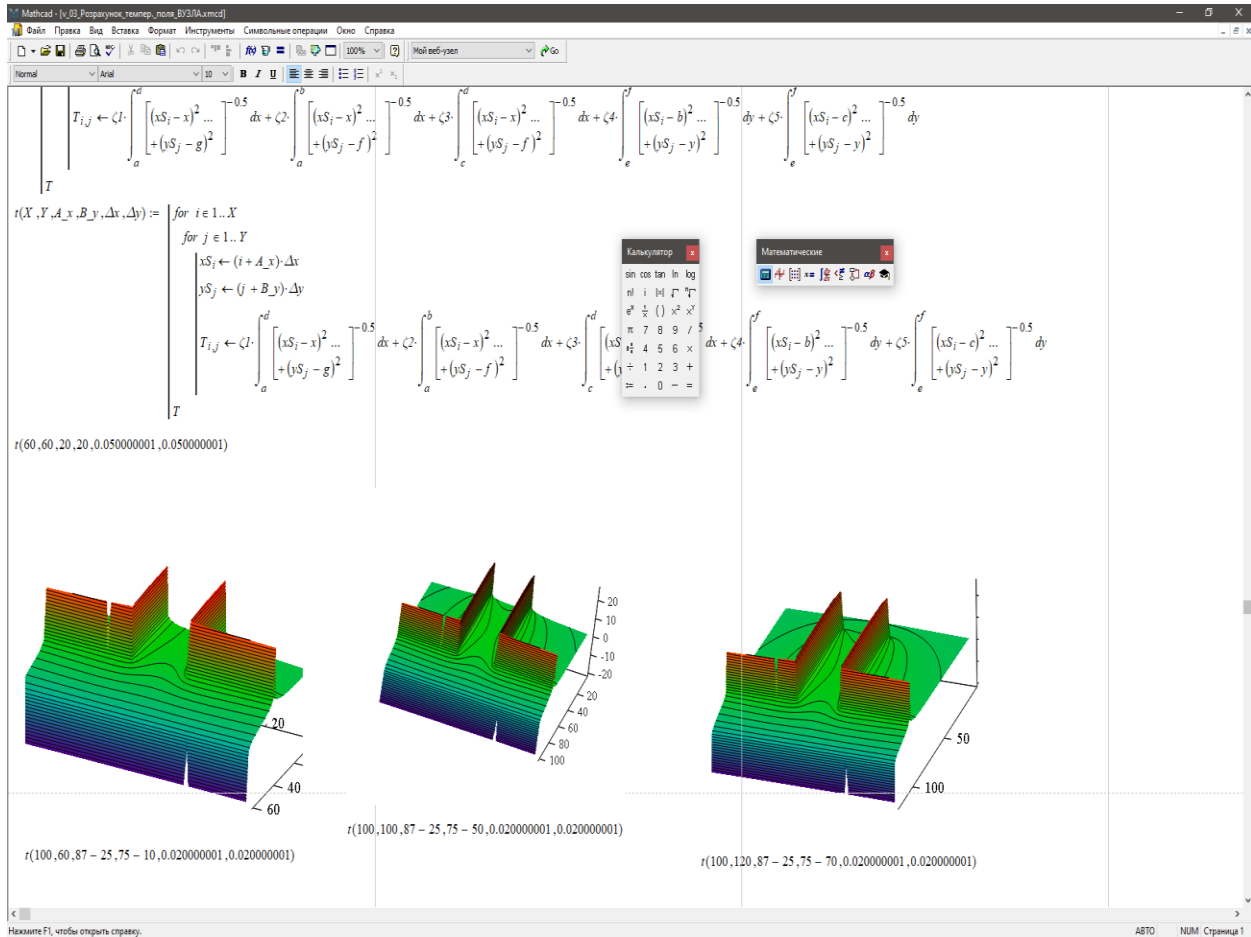


Рисунок 5. Приклад програмної реалізації в середовищі MathCad

Програмне розв'язання задач проектування зовнішніх огорожувальних конструкцій на основі моделювання температурних полів здійснюється в класичні три етапи:

- 1) опис задачі, що передбачає введення даних щодо геометричних та фізичних характеристик моделі, а також структури взаємодії між її елементами;
- 2) приведення в дію чисельних методів моделювання;
- 3) перевірка, оцінка та візуалізація результатів моделювання.

Наведений принцип розбиття процесу розв'язання на логічні рівні відповідає структурі програми з трьома модульними блоками (блоками процесорів): 1) блок введення даних; 2) розрахунковий блок (блок розрахунку температурних полів); 3) блок аналізу даних (постпроцесор).

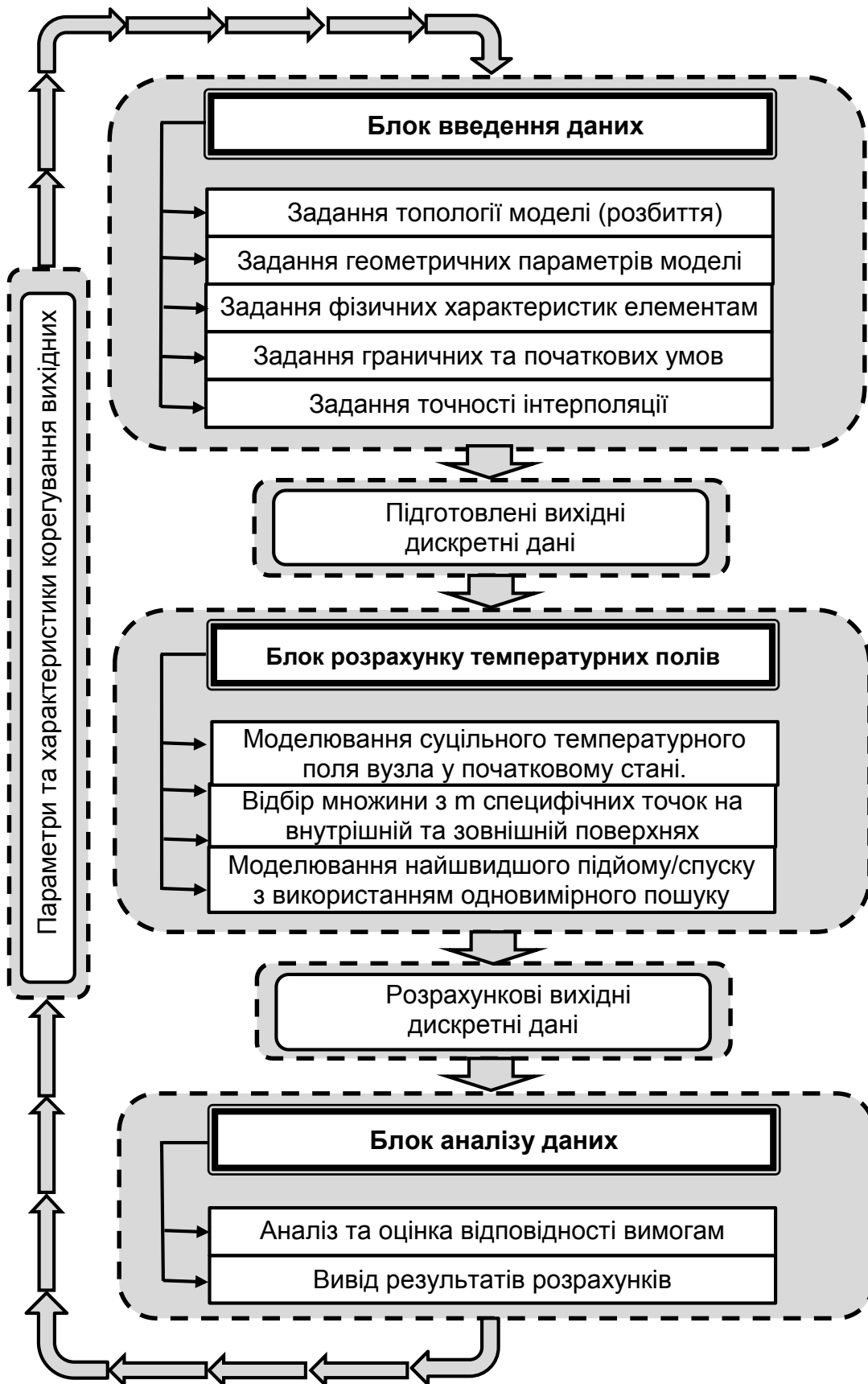


Рисунок 6. Структурна схема програмної реалізації розрахункових алгоритмів моделювання температурних полів суцільних огорожувальних конструкцій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконано актуальне науково-технічне завдання створення геометрично інтерпретованого способу та алгоритмів побудови температурних полів енергоефективних огорожувальних конструкцій будівель та вдосконаленні на цій основі процесу проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій загалом.

Значення для науки полягає у розробленні геометричних алгоритмів побудови температурних полів для огорожувальних конструкцій складної геометрії.

Значення для практики створення методик та програмних засобів для проектування систем утеплення зовнішніх огорожень в процесі термореконструкції будівель.

За результатами дослідження сформульовано такі висновки:

1. Проаналізовано сучасний стан досліджень методів геометричного та чисельного моделювання фізичних процесів, що протікають в експлуатованих огорожувальних конструкціях будівель. Виявлені недоліки існуючих підходів до відтворення температурних полів у вузлах огорожувальних конструкцій полягають переважно у високій складності процесів моделювання на основі чисельних методів та вказують на недостатній розвиток інтегральних методів обчислення параметрів відповідних полів, які дозволили б отримувати неперервні функції і показники температури у будь-якій точці досліджуваної ділянки суцільного середовища.

2. Досліджено основні аспекти системної побудови функції температурного поля огорожувальних конструкцій з позицій геометричного моделювання. Розроблено концепцію побудови інтегральних рівнянь неперервних температурних полів, на основі опису процесів тепловіддачі та теплоприйняття на зовнішніх та внутрішніх поверхнях досліджуваних вузлів відповідних огорожувальних конструкцій. При цьому пропонується вважати, що поверхні вузлів з вищою температурою представляють собою умовні джерела теплової енергії (або іншими словами – джерела виділення тепла), а поверхні з нижчою температурою – умовні стоки теплової енергії (або іншими словами – споживачі тепла). Така інтерпретація не суперечить закону Фур'є для опису теплового потоку у температурному полі неперервних багатосарових щільних тіл.

3. Розроблено геометрично інтерпретований спосіб та алгоритм побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу зі сталими показниками умовної щільності виділення (пропускання) або поглинання теплової енергії кожною з поверхонь досліджуваного архітектурно-конструктивного вузла. Припущення щодо сталості показників умовної щільності теплової енергії дозволяє перетворити систему інтегральних рівнянь, записаних для поверхонь кожної із досліджуваних поверхонь на систему лінійних рівнянь, яку можна розв'язати відносно відповідних показників.

4. Досліджено практичні аспекти геометричного моделювання температурних полів огорожувальних конструкцій будівель та їх проектування, в тому числі розроблено алгоритм виявлення та усунення містків холоду, що базуються на аналізі траєкторій найшвидших тепловтрат крізь товщу матеріалів досліджуваних вузлів з подальшою перевіркою опорів теплопередачі по даним траєкторіям на предмет відповідності нормативним показникам. Запропоновано здійснювати виявлення траєкторій поширення містків холоду за допомогою градієнтних методів пошуку, що стає можливим і зручним з точки зору практичної реалізації внаслідок неперервності функції скалярного температурного поля, що описується із використанням інтегральних рівнянь.

5. Виконано ряд тестових прикладів моделювання температурних полів для найбільш характерних вузлів огорожувальних конструкцій та аналіз характеру розподілу їх ізотерм. Порівняння результатів геометричного моделювання на основі інтегральних рівнянь з результатами моделювання із застосуванням класичних методів чисельного (зокрема методу скінченних різниць й методу скінченних елементів) вказують на коректність роботи запропонованого у даній дисертаційній роботі методу, правильність постановки задач та на достовірність одержаних результатів у цілому. Окрім того, запропоновано спосіб проектування різновисотних теплових оболонки огорожувальних конструкцій будівель для забезпечення рівномірного теплового витоку через зовнішні огорожувальні конструкції та задля зменшення кількості зон, де виникають містки холоду.

6. Програмно реалізовано алгоритм побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу. Розроблено блок-схему програмної реалізації розрахункових алгоритмів моделювання температурних полів суцільних огорожувальних конструкцій.

7. Впроваджено результати дисертаційного дослідження в практику проектування теплових оболонки огорожувальних конструкцій будівель зокрема при визначенні розрахункових значень приведених опорів теплопередачі вузлів примикання огорожувальних конструкцій, які містять потенційні містки холоду різної природи. Одержані результати застосовують при проведенні енергоаудитів, виконанні комплексних теплотехнічних розрахунків огорожувальних конструкцій на предмет тепловтрат, при визначенні розрахункових навантажень на системи опалення, охолодження та кондиціонування, а також при розробці енергетичних сертифікатів будівель та спеціальних розділі проектної документації «енергоефективність».

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНО В РОБОТАХ:

Публікації у періодичних наукових виданнях інших держав:

1. Leshchenko V., Iakusevych S., Yakusevich A., Skochko V. Comparative analysis of numerical modeling methods of temperature fields related to the problems of energy

efficient structures designing. // Scientific letter of Academes Society of Michail Baludyansky. 2020. Volume 8, № 1a. P. 144–152

(Особистий внесок здобувача: здобувачем виконано аналіз методів чисельного моделювання з точки зору моделювання температурних полів).

Публікації у фахових виданнях:

2. Якусевич С. Г., Плоский В. О. Деякі аспекти ефективного влаштування теплоізоляційної оболонки будинку – Енергоефективність в будівництві та архітектурі, Вип. 9, 2017, – С.259 – 266. (Цит. в Google-Scholar).

(Особистий внесок здобувача: Системно проаналізовано основні чинники, що впливають на вибір матеріалу утеплювача, місця його влаштування та його товщину. Запропоновано алгоритм визначення змінної товщини теплоізоляційного шару).

3. Якусевич С.Г., Плоский В.О. Спосіб відтворення температурних полів конструктивних вузлів будівель та споруд – Прикладна геометрія та інженерна графіка, 2018, Випуск 94, – С. 88-94. (Цит. в Google-Scholar).

(Особистий внесок здобувача: Запропоновано використання підходу, аналогічного до того, що застосовується при моделюванні ізоляцій та ізоповерхонь потенціалу електростатичних полів задля моделювання температурних полів на основі побудови потенціальних функцій температури від умовних джерел та стоків теплової енергії).

4. Якусевич С.Г. Алгоритм конструювання вузлів зовнішніх огорожувальних конструкцій при проектуванні теплової оболонки будівлі – Прикладна геометрія та інженерна графіка, 2018, Випуск 95, – С. 208 - 2013. (Цит. в Google-Scholar).

(Особистий внесок здобувача: Наведено принципи усунення містків холоду в товщі зовнішніх огорожувальних конструкцій. Запропоновано алгоритм поетапної побудови температурних полів у досліджуваних вузлах, пошуку траєкторій найшвидших тепловтрат та визначення опорів теплопередачі уздовж відповідних траєкторій з метою порівняння значення цих опорів із нормативними показниками.)

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Якусевич С.Г. Деякі аспекти визначення теплового потоку на зовнішніх поверхнях вузлів огорожувальних конструкцій будинка – Тези конференції «Build-Master-Class 2017» – С.134 – 135.

6. Yakusevych S., Ploskyi V. Principles of efficient using of thermal insulation for building – Тези конференції «Енергоінтеграція-2017» – С. 87 - 88.

(Особистий внесок здобувача: Автором запропоновано концептуальний підхід вдосконалення методики проектування енергоефективних конструкцій).

7. Якусевич С. Практичні аспекти побудови температурних полів теплової оболонки енергоефективного будинку. – Тези конференції «Енергоінтеграція-2017». - С. 113.

8. Якусевич С., Плоский В., Кулінко Є., Посікера А. Моделювання температурних полів на основі інтегральних рівнянь потенціалу – Тези конференції «Build-Master-Class 2020» – С.82-83.

(Особистий внесок здобувача: Автором запропоновано принципи підходу до моделювання температурного поля на основі інтегральних рівнянь потенціалу).

АНОТАЦІЯ

Якусевич С.Г. Геометричне моделювання ефективних конструкцій систем фасадного утеплення будинків. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка. – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми розробки методик оптимізації конструктивних рішень огорожувальних конструкцій будівель на основі моделювання температурних полів та аналізу характеру розподілу їх ізотерм. В роботі висвітлені питання розробки геометрично інтерпретаційного способу побудови температурних полів огорожувальних конструкцій будівель та впровадження результатів в процес проектування та реконструкції енергоефективних огорожувальних конструкцій.

На основі проаналізованого автором сучасного стану досліджень методів геометричного та чисельного моделювання фізичних процесів, що протікають в експлуатованих огорожувальних конструкціях будівель виконано обґрунтування вибору напрямку досліджень та обраного математичного інструментарію. Досліджено основні аспекти системної побудови функції температурного поля огорожувальних конструкцій з позицій геометричного моделювання. На основі інтегральних рівнянь потенціалу розроблено алгоритм побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій. Отримані результати з урахуванням практичних аспектів геометричного моделювання температурних полів огорожувальних конструкцій будівель розширили методологію визначення раціональних теплофізичних параметрів огорожувальних конструкцій на основі змодельованих температурних полів.

В роботі виконано моделювання температурних полів для найбільш характерних вузлів огорожувальних конструкцій, що дозволило виконати аналіз характеру розподілу їх ізотерм. Розглянуто основні можливі конструктивні рішення забезпечення рівномірного теплового витоку через зовнішні огорожувальні конструкції. Наведено рекомендації щодо програмної реалізації результатів дослідження. Запропоновано відповідну блок-схему та опис програмних алгоритмів побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій.

Ключові слова: геометричне моделювання, неперервне температурне поле, інтегральні рівняння потенціалу, глобальна інтерполяція.

ABSTRACT

Iakusevych S. Geometric modelling of effective constructions of buildings' fasades insulation. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.01.01 - Applied geometry, engineering graphics. - Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and technical problem of development of methods of optimization of constructive decisions of enclosing designs of buildings on the basis of modeling of temperature fields and the analysis of character of distribution of their isotherms. The paper highlights the development of a geometrically interpretive method of constructing temperature fields of energy-efficient enclosing structures of buildings and the implementation of results in the process of design and reconstruction of energy-efficient enclosing structures.

Based on the analyzed by the author of the current state of research methods of geometric and numerical modeling of physical processes occurring in the operated enclosing structures of buildings, the justification of the choice of research direction and selected mathematical tools. The main aspects of the system construction of the temperature field function of enclosing structures from the standpoint of geometric modeling are investigated. Based on the integral equations of potential, an algorithm for constructing a continuous temperature field of continuous enclosing structures has been developed. The obtained results taking into account practical aspects of geometric modeling of temperature fields of enclosing constructions of buildings expanded the methodology of determination of rational thermophysical parameters of enclosing constructions on the basis of simulated temperature fields.

A geometrically interpreted method and algorithm for constructing a continuous temperature field of continuous enclosing structures based on integral potential equations with constant indicators of conditional density of transmission (transmission) or absorption of thermal energy by each of the surfaces of the studied architectural and structural unit are developed. Assumptions about the constancy of the conditional indicators of thermal energy density allow to transform the system of integral equations written for the surfaces of each of the studied surfaces into a system of linear equations that can be solved with respect to the corresponding indicators.

Practical aspects of geometric modeling of temperature fields of enclosing structures of buildings and their design are investigated, including the algorithm of detection and elimination of cold bridges based on the analysis of trajectories of the most rapid heat losses through a thickness of materials of investigated knots with the subsequent check of resistances. regulatory indicators. It is proposed to detect the trajectories of cold bridges using gradient search methods, which becomes possible and convenient in terms of practical implementation due to the continuity of the function of the scalar temperature field, which is described using integral equations.

The simulations of temperature fields for the most characteristic units of enclosing structures were performed in the work, which allowed to perform the analysis of the

nature of the distribution of their isotherms. The main possible design solutions for ensuring uniform heat leakage through external enclosing structures are considered. Recommendations for program implementation of research results are given. The corresponding block diagram and the description of software algorithms of construction of a continuous temperature field of continuous enclosing designs are offered.

Keywords: geometric modeling, continuous temperature field, integral equations of potential, global interpolation.

