

## **ВІДГУК**

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри дизайну та графіки  
Луцького національного технічного університету

**Пустюльги Сергія Івановича**

на дисертаційну роботу

**Якусевича Сергія Григоровича**

**«Геометричне моделювання ефективних конструкцій систем фасадного  
утеплення будинків»**,

подану до захисту у спеціалізованій вченій раді Д 26.056.06  
у Київському національному університеті будівництва та архітектури  
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка

### **1 Актуальність теми дослідження**

Дисертаційне дослідження присвячено розробці геометрично інтерпретованого способу та алгоритмів побудови температурних полів енергоефективних огорожувальних конструкцій будівель задля вдосконалення, на цій основі, процесу проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій загалом.

При вирішенні більшості задач будівельної фізики, які пов'язані з дослідженням температурно-вологісного режиму конструкцій або будівель в цілому, виникає необхідність у відтворенні температурних полів у елементах і вузлах зовнішніх огорожувальних конструкцій. Найчастіше проектувальники та науковці 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 огорожувальної конструкції або температура поверхні у деякій іншій точці, що не належить до сітки базових вузлів чисельної моделі.

Застосування підходів геометрично інтерпретованих методів опису складних нелінійних фізичних процесів – теплопровідності, тепломасопереносу – на даний час є актуальним завданням. Такі підходи дозволяють враховувати особливості зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі, визначати їх недоліки, наприклад такі як містки холоду, що, в свою чергу, дозволяє раціонально та ефективно застосовувати теплоізолюючі матеріали для будівель.

Геометричні методи, що дозволяють на основі певних допущень відтворювати неперервні функції температурних полів, на сьогодні висвітлено недостатньо, такі методи передбачають використання складних математичних перетворень. Очевидно, що розробка відносно простих та наочних методів

побудови функцій неперервних температурних полів є актуальною та важливою проблемою.

На основі вищезазначеного дисертаційна робота Якуевича Сергія Григоровича «Геометричне моделювання ефективних конструкцій систем фасадного утеплення будинків» є актуальною в теоретичному і практичному аспектах.

Дана робота виконувалася відповідно до плану наукових досліджень Київського національного університету будівництва і архітектури згідно з тематикою науково-дослідної роботи кафедри архітектурних конструкцій за напрямом: «Розробка геометричних моделей складних об'єктів і процесів».

## **2 Аналіз змісту дисертації, її завершеності й оформлення**

Побудова дисертації відповідає прийнятим для наукового дослідження нормам. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У *вступі* розкрито актуальність теми дослідження та наукових завдань; наведено інформацію про зв'язок роботи із науковими програмами, планами та темами; визначено об'єкт, предмет та гіпотезу дослідження; сформульовано мету й завдання дослідження; описано методи дослідження; розкрито наукову новизну, практичне значення одержаних результатів та визначено особистий внесок здобувача; наведено відомості про апробацію результатів роботи, публікації, структуру та обсяг роботи.

*Перший розділ* присвячено аналізу сучасного стану досліджень геометричного та чисельного моделювання фізичних процесів в огорожувальних конструкціях будівель. Розділ є оглядовим і вміщує аналіз підходів щодо проведення розрахунків для влаштування систем фасадної теплової ізоляції, оскільки до 70% енергії втрачається саме через огорожувальні конструкції. Автор аналізує методологію проектування систем утеплення будівель. У своєму аналізі автор спирається на державні будівельні норми та демонструє застосування геометричного апарату для проведення ефективного проектування, звертаючи основну увагу на важливі аспекти з позиції енергоефективності: опір теплопередачі, теплосасвоєння, щільність теплового потоку тощо. Здобувач аналізує характеристики містків холоду, звертаючи увагу на те, що наявність теплопровідних включень та зміни геометричної форми зовнішніх огорожувальних конструкцій потребують особливої уваги, оскільки ці два випадки вагомо впливають на зміну розподілу ліній току теплової енергії в товщі конструкцій. Крім того, наведено основні математичні моделі, що дозволяють здійснити розрахунок температурного режиму огорожувальних конструкцій та виконано аналіз основних методів геометричного і чисельного моделювання температурних полів.

Розділ завершується постановкою проблеми, формулюванням мети дослідження, об'єкту та предмету дослідження, визначення завдань, що необхідно виконати для досягнення мети, отриманий науковий результат.

*Другий розділ* присвячено розробці геометричного апарату моделювання температурних полів конструктивних вузлів огорожувальних конструкцій будівель.

Автор пропонує застосовувати підхід, що дозволяє на основі допущень розподілу щільностей теплових потоків відтворювати неперервні функції температурних полів. Описано алгоритм побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу та принципів побудови крайових та початкових умов моделювання температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій. Такий алгоритм передбачає різні підходи до визначення конструктивного вирішення теплової ізоляції, що буде змінною і пропорційною тепловтратам в кожній точці огорожувальної конструкції. Здобувач описує умови існування неперервної функції температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій та основи системної побудови функції температурного поля огорожувальних конструкцій.

*Третій розділ* присвячено практичним аспектам моделювання температурних полів конструкторських огорожувальних конструкцій будівель. У розділі 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. Усі теоретичні аспекти проілюстровано прикладами, реалізація яких проводилась за допомогою застосування програмного розрахункового комплексу Mathcad.

Останній *четвертий розділ* присвячено програмній реалізації та впровадженню результатів досліджень. У розділі детально 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.

*У висновках* стисло сформульовані основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи. А саме:

Висновок 1 стосується результатів отриманих у першому розділі та має декларативний характер.

Висновок 2 характеризує основні аспекти системної побудови функції температурного поля огорожувальних конструкцій з позицій геометричного моделювання. Також зазначається відповідність закону Фур'є для опису теплового потоку у температурному полі неперервних багат шарових щільних тіл запропонованої геометричної інтерпретації, а саме: поверхні з вищою температурою представляють собою умовні джерела теплової енергії (або джерела виділення тепла), а поверхні з нижчою температурою – умовні стоки теплової енергії (або споживачі тепла). Зазначений підхід дозволив розробити концепцію побудови інтегральних рівнянь неперервних температурних полів на основі опису процесів тепловіддачі та теплосприйняття на зовнішніх та внутрішніх поверхнях досліджуваних вузлів відповідних огорожувальних конструкцій.

Висновок 3 стосується розроблення способу та алгоритмів побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу зі сталими показниками умовної щільності виділення або поглинання теплової енергії поверхонь досліджуваного конструктивного вузла. Введене припущення щодо сталості показників умовної щільності теплової енергії дозволило автору перетворити систему інтегральних рівнянь на систему лінійних рівнянь, яку можна розв'язати відносно відповідних показників.

Висновок 4 декларує отримані практичні аспекти геометричного моделювання температурних полів огорожувальних конструкцій будівель. Запропоновано здійснювати виявлення траєкторій поширення містків холоду за допомогою градієнтних методів пошуку, що стає можливим і зручним внаслідок неперервності функції скалярного температурного поля, що описується із використанням інтегральних рівнянь.

Висновок 5 стосується проведених у четвертому розділі тестових моделювань температурних полів для найбільш характерних прикладів вузлів огорожувальних конструкцій та аналізу характеру розподілу їх ізотерм. Вказується на коректність роботи запропонованого у цій дисертаційній роботі методу, правильність постановки задач та на достовірність одержаних результатів загалом відносно існуючих методів чисельного моделювання.

Висновок 6 описує результати програмної реалізації алгоритмів побудови неперервного температурного поля суцільних огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу для чого створено відповідну структурну схему.

Висновок 7 стосується упровадження результатів дисертаційного дослідження в практику проектування теплових оболонок огорожувальних конструкцій будівель: при проведенні енергоаудитів, виконанні комплексних теплотехнічних розрахунків огорожувальних конструкцій на предмет тепловтрат, при визначенні розрахункових навантажень на системи опалення,

охолодження та кондиціонування, при розробці енергетичних сертифікатів будівель та спеціальних розділів проектної документації «енергоефективність».

Усі положення та висновки, винесені на захист, висвітлені в дисертації. Це дозволяє зробити висновок, що зміст дисертаційної роботи відповідає її назві.

Дисертаційна робота написана грамотною науковою мовою та оформлена відповідно до існуючих нормативних документів, текст і графічний матеріал виконані з використанням комп'ютерної техніки, робота має естетичний вигляд.

### **3 Новизна наукових положень роботи**

Наукова новизна дисертації полягає у розробці геометрично інтерпретованого способу та алгоритмів побудови температурних полів огорожувальних конструкцій. Наукову новизну визначають результати, що одержані уперше:

- на основі інтегральних рівнянь потенціалу та введеного допущення щодо поняття умовної щільності поглинання тепла поверхнею розроблено геометрично інтерпретований спосіб побудови температурних полів;

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

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

- надано рекомендації до програмної реалізації розрахунків температурних полів у огорожувальних конструкціях.

Окрім цього отримали подальший розвиток теорія архітектурно-будівельного проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій за рахунок використання запропонованого автором інтерпретаційного способу побудови температурних полів на основі інтегральних рівнянь потенціалу.

### **4 Оцінка обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірності і новизни**

Викладені у дисертаційній роботі положення та отримані автором теоретичні і практичні результати мають належний ступінь обґрунтованості, який було досягнуто за рахунок формування розробки та удосконалення геометричних моделей побудови температурних полів огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу.

Достовірність запропонованих алгоритмів та розрахункових схем підтверджується розробленим автоматизованими програмними алгоритмами в програмному пакеті символної математики та наведеними тестовими прикладами.

Достовірність теоретичних та практичних результатів роботи підтверджені актами впровадження. Результати досліджень впроваджено в ТОВ «ГРАДОБУД-К» при розробці проектів термореконструкції теплових оболонки 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. № 446-61).

Враховуючи зазначене вище, можна зробити висновок, що оцінка обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів».

## **5 Важливість результатів дисертаційної роботи для науки і практики.**

Отримані в дисертаційній роботі Якусевича С.Г. наукові результати є теоретичною базою вдосконалення та подальшого розвитку застосування запропонованого геометрично інтерпретаційного способу побудови суцільних температурних полів огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу.

## **6 Рекомендації щодо використання результатів дисертації**

Отримані в даному дослідженні теоретичні та практичні результати можуть бути використані для побудови суцільних температурних полів огорожувальних конструкцій за різних умов експлуатації та складу шарів матеріалів, при розробці будівельних огорожувальних конструкцій, оптимізації проектних рішень. Результати даного дослідження також можуть бути застосовані у навчальному процесі при підготовці фахівців із будівництва та цивільної інженерії.

## **7 Повнота викладення основних результатів дисертації**

Основні результати, наведені в дисертаційній роботі, були в повній мірі опубліковані у 8 друкованих наукових працях, в т. ч. у 1 міжнародному виданні, що індексується у наукометричних базах, у 3 фахових виданнях, що входять до наукометричних баз та у 4 додаткових наукових виданнях.

Результати досліджень пройшли апробацію на 4 вітчизняних та міжнародних конференціях, серед яких VII та IX міжнародні науково-практичні конференції «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «Енергоінтеграція» (м. Київ, 2017, 2019 р.) та Міжнародні науково-практичні конференції молодих вчених "Build-Master-Class 2017" та "Build-Master-Class 2020" (м. Київ, 2017, 2020 рр.);.

Матеріали публікацій охоплюють основні положення та висвітлюють переважну більшість питань, розглянутих у дисертаційній роботі.

## **8 Дискусійні положення та зауваження по змісту дисертаційної роботи**

1. Дисертаційна робота написана грамотною науковою мовою, однак у дисертації наявні довгі громіздкі складнопідрядковані речення. Таке подання ускладнює сприйняття викладеного матеріалу.

2. На поданих в дисертаційній роботі на рисунках (наприклад, рис. 2.1 та рис. 3.1), підписи та позначення подано дрібним шрифтом, що погано читається.

3. У розділі 2, який присвячено питанням геометричного моделювання температурних полів конструктивних вузлів огорожувальних конструкцій, зроблено припущення, що умовна щільність  $\xi$  виділення або поглинання теплової енергії поверхнею є сталою величиною на кожній поверхні (ділянці). Було б доцільним запропонувати оцінку похибок обчислення, які можуть виникати при завданні сталих значень, а також умови застосування такого припущення.

4. У висновках до другого розділу зазначено переваги запропонованого підходу у порівняннях з існуючими підходами застосування методів дискретного моделювання температурних полів. Дане твердження потребує детальнішого розгляду. Таким чином, для наочного порівняння ефективності запропонованої автором методики із методами класичного чисельного моделювання, було б доцільним у якості прикладу провести результати розрахунку температурних полів, наприклад, за методом скінченних різниць або методом скінченних елементів.

5. У зв'язку із тим, що здобувач у третьому розділі розглядає практичні аспекти відтворення плоских температурних полів у конструктивних вузлах з метою пошуку містків холоду, виникає зауваження щодо графічного подання отриманих результатів. Доцільно було б, на нашу думку, додатково відображати напрями поширення теплової енергії у відповідних вузлах у формі векторних полів або їх силових ліній.

Проте зазначені зауваження та недоліки дисертаційної роботи не впливають на загальну позитивну оцінку отриманих наукових результатів дослідження.

## **9 Відповідність дисертації встановленим вимогам і загальні висновки**

Незважаючи на зазначені зауваження, розглянуту дисертаційну роботу слід вважати закінченою науковою працею, яка містить важливі наукові і практичні результати.

Назва і зміст дисертаційної роботи відповідають паспорту спеціальності 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка.

Запропонований підхід до побудови температурних полів огорожувальних конструкцій на основі інтегральних рівнянь потенціалу є важливим науковим внеском у розвиток наукового напряму вирішення відповідної задачі глобальної інтерполяції, у результаті якої одержується єдина

завдань дослідження функції температурного поля. Результати роботи мають прикладний характер і практичне значення для подальшого застосування у галузі будівництва.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації та повною мірою відображає її основні положення.

### **Висновок про відповідність дисертації вимогам ДАК МОН України**

Враховуючи все вищевикладене, вважаю, що дисертаційна робота Якусевича Сергія Григоровича на тему: «Геометричне моделювання ефективних конструкцій систем фасадного утеплення будинків» в цілому становить завершену наукову роботу, яка у повній мірі відповідає вимогам п.п. 9, 11, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою КМУ № 567 від 24 липня 2013 р., а її автор – Якусевич Сергій Григорович – заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка.

Офіційний опонент,  
Завідувач кафедри дизайну та графіки  
Луцького національного технічного університету,  
доктор технічних наук, професор



С.І. Пустюльга