

## ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора Желиха Василя Михайловича на дисертаційну роботу молодшого наукового співробітника Сорокового Родіона Ярославовича «Теплофізичне обґрунтування впливу сонячного випромінювання на формування тепловологісного стану будівель», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

В дисертаційній роботі розглядаються питання розвитку теплофізичних підходів щодо оцінки впливу інтенсивності сонячного випромінювання на тепловологісний стан огорожувальних конструкцій будівель та мікроклімат приміщень з метою зниження навантаження опалювальних приладів та покращення умов експлуатації будівель.

### 1. Актуальність теми

В Україні витрати енергії на опалення і вентиляцію будівельних споруд складають більше 40% від загального споживання енергії, що значно більше, ніж в країнах ЄС. Це пояснюється недостатньо ефективними заходами по збереженню теплоти огорожувальними конструкціями і нераціональним використанням енергоресурсів.

На практиці, при проектуванні систем опалення будівель та при оцінці потреб в тепловій енергії в процесі експлуатації будівель не враховуються достатньо точно зміна вологовмісту огорожувальних конструкцій, який впливає на їх теплозахисні властивості, та надходження теплоти від сонячного випромінювання. Але відомо, що в сонячні дні опалювального періоду до 30% теплоти в будівлі може генеруватись за рахунок сонячної радіації.

Використання експериментальних методів для дослідження тепло- і масообмінних процесів в огорожувальних конструкціях та внутрішніх приміщеннях будівель в умовах постійної зміни стану оточуючого середовища, спряжено з істотними технічними труднощами. Розробка теплофізичних підходів та методів математичного моделювання для аналізу впливу зміни параметрів стану оточуючого середовища, дії систем опалення та інтенсивності сонячного випромінювання на тепловологісний стан будівельних конструкцій і мікроклімат приміщень становить актуальну проблему, вирішення якої сприяє зниженню навантаження на опалювальні прилади та покращенню умов експлуатації будівель.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Сорокового Р. Я., яка виконувалась в Інституті технічної теплофізики НАН України, є безумовно актуальною і перспективною. Це підтверджується також тим, що дана дисертаційна робота є складовою частиною фундаментальних наукових досліджень, що виконувалися в ІТТФ НАН України, і тісно пов'язана з його темами, планами і науковими програмами.

## 2. Коротка характеристика змісту роботи

### Структура та обсяг роботи

Дисертаційна робота включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних літературних джерел та 2 додатки. Загальний об'єм дисертації складає 190 сторінок, з них 174 сторінки основної текстової частини, 61 рисунок. Список літератури містить 126 бібліографічних найменувань на 14 сторінках. В додатках подано 2 акти впровадження результатів у виробництво та у навчальний процес.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і задачі дослідження, розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи. Представлено відомості про особистий внесок, публікації автора по темі дисертації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі виконано огляд щодо потенціалу сонячної енергії в Україні, прикладів і перспектив її пасивного і активного використання, проведено аналіз існуючих експериментальних методів дослідження інтенсивності сонячного випромінювання, зазначено переваги і недоліки відомих приладів вимірювання сонячної радіації. Розглянуто алгоритми розрахункових підходів визначення інтенсивності сонячного випромінювання, врахування дії сонячної енергії на тепловий стан приміщень будівель та на тепловий стан огорожувальних конструкцій.

За результатами проведеного аналізу зроблено висновок, що існуючі теоретичні підходи для оцінки теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій не враховують зміну їх вологовмісту та надходження теплоти сонячного випромінювання, а дослідження впливу останнього на температурний режим приміщень будівель потребують подальшого розвитку.

Також здійснено постановку задач дослідження, які цілком відповідають за науковою і практичною цінністю вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

У другому розділі дисертаційної роботи наводяться методика та результати довготривалих експериментальних досліджень інтенсивності сонячної радіації на поверхнях різної орієнтації – горизонтальній та вертикальних, спрямованих у напрямку різних сторін світу – для широти м. Києва. Знайдені максимальні значення інтенсивності сонячного випромінювання в різні пори року. Визначено час доби, при якому інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні різної орієнтації є максимальною. Встановлено, що в зимовий період року максимальна інтенсивність сонячного випромінювання спостерігається на вертикальній площині, зорієнтованій на південь, а в літній період – на горизонтальній поверхні. Виконано зіставлення одержаних експериментальних результатів з відомими даними, отриманими на основі чисельної методики Американського

товариства інженерів з опалення, охолодження і кондиціонування повітря ASHRAE, та встановлено їх задовільний збіг.

У **третьому розділі** розроблено нестационарні нелінійні математичні моделі динаміки тепло- і вологоперенесення в одно- і багат шарових огорожувальних будівельних конструкціях, які на відміну від існуючих математичних моделей враховують вплив сонячного випромінювання та різних механізмів перенесення вологи з метою встановлення закономірностей формування їх тепловологісного стану. Виконано порівняльний аналіз даних, що відповідають відсутності і наявності теплоізоляційного шару на зовнішній поверхні стіни. Показано, що в останньому випадку дія сонячного випромінювання локалізується головним чином в зоні теплоізоляції. Теоретично виявлено і обґрунтовано ефект інверсії теплового потоку в огорожувальній конструкції під впливом сонячного випромінювання за відсутності теплоізоляційного шару. Встановлено що наявність сонячного випромінювання спричиняє суттєве зменшення вологовмісту цегляної стінки, що призводить до підвищення її теплоізоляційних властивостей. Розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення рівноважного вологовмісту капілярно пористих матеріалів в залежності від відносної вологості повітря при даній температурі, на базі якого було отримано ізотерми сорбції будівельних матеріалів. Ці результати можуть використовуватися для замикання математичних моделей тепловологоперенесення. Одержано задовільне узгодження розрахункових і експериментально отриманих даних для рівноважного вологовмісту цих матеріалів.

**Четвертий розділ** присвячено дослідженню температурного режиму приміщення, що виконано на базі математичного моделювання конвекційного теплообміну в опалювальному приміщенні будівлі. Математична модель враховує добову зміну температури зовнішнього повітря і зміну інтенсивності сонячного випромінювання. Виконано порівняльний аналіз закономірностей течії повітря і теплообміну в опалювальних приміщеннях за наявності та відсутності впливу енергії Сонця. Отримані результати свідчать про те, що за наявності сонячного випромінювання помітно змінюється картина течії повітря в приміщенні – поблизу протилежної вікну стінки спостерігається зміна напрямку руху повітря. Дія сонячної радіації спричиняє суттєвий вплив на розподіли температур повітря і внутрішніх стінок приміщення. Зокрема, підвищення температури стінок може сягати 18 °С, а температури повітря в приміщенні може підвищуватися на 2...3 °С. Підвищення температури повітря всередині приміщення, зумовлене наявністю сонячного випромінювання, дозволяє за певних умов зменшувати потужність опалювальних приладів, а відтак отримувати відчутний економічний ефект.

У **висновках** наводиться перелік основних наукових і практичних результатів, одержаних у дисертаційній роботі.

### **3. Наукова новизна роботи полягає в наступних отриманих результатах**

1. На основі результатів комплексу виконаних експериментальних досліджень встановлено залежність інтенсивності сонячного випромінювання від орієнтації сприймаючої поверхні у різні пори року на широті м. Києва. Отримані дані можуть бути використані при проектуванні та ефективній експлуатації активних і пасивних сонячних систем.

2. Вперше встановлено закономірності формування тепловологісного стану багатошарової стінової конструкції за умов зміни потоків сонячної радіації та теплового режиму зовнішнього середовища в добовому циклі. Результати виконаних досліджень сприяють як підвищенню точності оцінок теплових втрат через огорожувальні конструкції, так і доцільному вибору матеріалу та товщини шару ізоляції стінових конструкцій.

3. Вперше теоретично виявлено і обґрунтовано ефект обернення теплового потоку в огорожувальній конструкції будівлі під впливом сонячного випромінювання в результаті зміни положення температурного мінімуму від зовнішньої поверхні стіни до її внутрішніх шарів.

4. Запропоновано новий розрахунково-експериментальний метод визначення рівноважного вологовмісту капілярно-пористих матеріалів і побудови ізотерм сорбції-десорбції, зокрема, будівельних матеріалів для встановлення температурно-вологісних умов їх виробництва, зберігання та експлуатації.

5. Побудовано математичну модель температурного режиму приміщення в опалювальний період з урахуванням додаткового теплового надходження на внутрішні поверхні стін та підлогу від сонячного випромінювання через віконні прорізи.

6. На основі запропонованої математичної моделі одержано нові дані щодо впливу сонячної радіації на аеродинаміку повітряних потоків і тепловий стан приміщення. Встановлено, що в зимовий період за рахунок вказаного додаткового теплонадходження температура протилежної вікну стінки може підвищуватись на  $16 - 18$  °С, при цьому температура повітря в приміщенні збільшується  $2 - 3$  °С, що обґрунтовує можливість зменшення теплового навантаження на опалювальні пристрої будівель.

### **4. Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному**

1. Основні результати виконаних досліджень впроваджено підприємством ПП «Ірпінтьеплосервіс» в робочому проєкті «Капітальний ремонт будівлі спортивного залу Державного закладу професійної (професійно-технічної) освіти зі специфічними умовами навчання «Академія патрульної поліції» за адресою м. Київ, вул. Святослава Хороброго, 9», зокрема

- при проектуванні на даху спортивного залу сонячної фотовольтаїчної станції для визначення кута нахилу панелей, з пріоритетом роботи в зимовий період, що уточнювався на основі даних експериментальних досліджень по інтенсивності сонячного випромінювання на поверхні різної орієнтації;

- при розробці заходів з енергозбереження для визначення товщини шару захисних покриттів огорожувальних конструкцій на базі математичної моделі тепловологопереносу в огорожувальних конструкціях з урахуванням сонячної радіації.

2. Результати дисертаційної роботи, а саме

- чисельне моделювання тепломасообміну через огорожувальні будівельні конструкції з урахуванням інтенсивності сонячного випромінювання;

- розрахунковий метод визначення ізотерм сорбції будівельних матеріалів використовуються у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури в освітніх програмах «Теплогазопостачання та вентиляції» та «Теплоенергетика обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів».

Впровадження підтверджуються відповідними актами.

### **5. Достовірність отриманих результатів.**

Забезпечується коректністю математичних постановок задач і фізичних припущень, а також порівняльним аналізом теоретичних і експериментальних результатів. Точність і надійність результатів експерименту зумовлена використанням сучасного приладу вимірювання з комп'ютерною обробкою даних.

### **6. Повнота викладення наукових положень та висновків**

Основні положення і результати дисертаційної роботи викладені у 23 друкованих працях, з яких 3 статті, що входять до наукометричної бази Scopus і Web of Science, 5 статей у наукових фахових виданнях України, 2 колективні монографії, 10 тез та доповідей на наукових конференціях.

Автореферат дисертації Сорокового Р.Я. достатньо повно відображає зміст і суть результатів досліджень, викладених в дисертаційній роботі.

### **7. Оформлення дисертації**

Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертація відповідає вимогам «Постанови КМ від 24.07.2013 № 567 пп. 9, 11, 12, 13» зі змінами згідно постанови КМ № 656 від 19.08.2015 р., які пред'являють до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Робота написана грамотно і ясно, гарно оформлена, чітко структурована.

### **8. Зауваження по дисертації**

Разом з тим, вважаю за необхідне зробити наступні зауваження за змістом роботи:

1. Відомо, що клімат в Україні за останнє десятиріччя перетерплює значних змін, зокрема внаслідок аномальних підвищень температури в літній період. Але в дисертації не вказується, чи дозволяє розроблена математична модель перенесення теплоти та вологи через теплоізовані огорожувальні конструкції оцінювати їх теплостійкість у літній період року?

2. В роботі приймається ряд припущень, зокрема, що капіляри матеріалів огорожувальних конструкцій є циліндричними і спрямовані вздовж напрямку

потоків рідини, пари та повітря. Однак в реальних капілярно-пористих тілах капіляри є криволінійними, мають різну довжину і розташовані довільно в просторі. Внаслідок цього умови переносу компонентів зв'язаної речовини при випаровуванні або адсорбції в шарах різної природи є неоднаковими. Виникає питання, яким чином це враховується при отриманні результатів?

3. При формулюванні граничних умов в математичній моделі тепловологоперенесення через огорожувальні конструкції приймається, що змінний розподіл температури по внутрішній поверхні стінки обумовлений дією опалювальних приладів, тоді як в сонячні дні на температурне поле внутрішньої поверхні стінки може впливати енергія Сонця, що потрапляє через скляні огорожувальні конструкції.

4. У роботі зустрічаються не однакові умовні позначення одних і тих же фізичних величин, зокрема інтенсивність сонячного випромінювання у параграфі 2.1 позначається літерою  $Q$ , у параграфі 2.2 літерою  $I$ , а в математичних моделях  $q_s$ , що ускладнює читання дисертації.

5. Для розрахунку фільтраційного переносу рідкої фази використовується закон Дарсі, згідно якого швидкість фільтрації рідини пропорційна градієнтам тиску цієї фази та масових сил. В роботі фактор впливу масових сил на процес переносу рідкої фази не враховується. Однак для ряду теплоізоляційних матеріалів його роль може бути досить істотною.

6. Для замикання системи рівнянь (4.1) – (4.5) Нав'є-Стокса використовується  $k$ - $\epsilon$  модель. Було б доцільно зробити аналіз існуючих напівемпіричних моделей турбулентності та більш детально оглянути переваги і недоліки обраного в роботі підходу і включити в перший розділ дисертаційної роботи.

Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень і висновків, що виносяться на захист, і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

## **9. Висновок по роботі**

Дисертаційна робота Сорокового Родіона Ярославовича «Теплофізичне обґрунтування впливу сонячного випромінювання на формування тепловологісного стану будівель» являє собою закінчене наукове дослідження, що містить нові актуальні наукові результати в області теорії тепломасопереносу та підходів щодо оцінки впливу інтенсивності сонячного випромінювання на тепловологісний стан огорожувальних конструкцій будівель та мікроклімат приміщень. Зазначена в роботі мета досягнута, а сформульовані і поставлені задачі – вирішені. Автором дотримано правила організації досліджень, використано автоматизовані засоби збору, візуалізації та обробки експериментальних даних.

За напрямком обраних та вирішених питань дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.14.06 – “Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика” та профілю спеціалізованої вченої ради Д26.224.01.

На підставі сказаного, вважаю, що дисертаційна робота «Теплофізичне обґрунтування впливу сонячного випромінювання на формування тепловологісного стану будівель» повністю відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 року № 656), а її автор, Сороковий Р.Я., заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06. – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент

Доктор технічних наук, професор

завідувач кафедри теплогазопостачання і вентиляції

Інституту будівництва та інженерних систем

Національного Національного університету

«Львівська політехніка», МОН України



Василь ЖЕЛИХ

Підпис доктора технічних наук

професора Василя Михайловича Желиха засвідчую:

Вчений секретар ради Національного університету

«Львівська політехніка»



Роман БРИЛИНСЬКИЙ

