


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**



СОРОКОВИЙ РОДІОН ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 620.92:697.7:697.132.3

**ТЕПЛОФІЗИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІ-
НЮВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬ**

Спеціальність 05.14.06 –технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Давиденко Борис Вікторович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
головний науковий співробітник відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Желих Василь Михайлович
Національний університет «Львівська політехніка»,
інститут будівництва та інженерних систем МОН України, завідувач кафедри теплогазопостачання і вентиляції

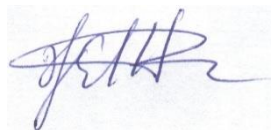
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Суржик Таміла Володимирівна
Інститут відновлювальної енергетики НАН України,
Вчений секретар ІВЕ НАН України

Захист дисертації відбудеться “ 26 ” червня 2025 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики НАН України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2-а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту технічної теплофізики, 03164, м. Київ, вул. Булаховського, 2.

Автореферат розісланий “ 22 ” травня 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,
д.т.н., професор,
член-кореспондент НАН України



Ж.О. Петрова

ВСТУП

Актуальність теми.

В Україні витрати енергії на опалення і вентиляцію будівельних споруд складають більше 40% від загального споживання енергії, що значно вище, ніж в країнах ЄС. Це пояснюється недостатньо ефективними заходами по теплозбереженню 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 зміна вологовмісту огорожувальних конструкцій та надходження теплоти сонячного випромінювання. Енергія Сонця істотно впливає на тепловологісний стан огорожень і внутрішніх приміщень будівель. Відомо, що в сонячні дні опалювального періоду до 30% теплоти в будівлі може генеруватись за рахунок сонячної радіації.

Результати експериментальних і розрахункових досліджень інтенсивності сонячного випромінювання, його впливу на тепловий стан огорожувальних конструкцій та теплонадходжень у внутрішні приміщення будівель демонструють роботи Б. Баска, В. Дешка, Л. Декуші, Л. Воробйова, С. Кудрі, Н. Фіалко, Б. Давиденка, В. Кучинського, Н. Мхитаряна, О. Підгорного, Т. Суржик, О. Сергійчука, Г. Фаренюка, та інших. Однак дослідження впливу добової зміни інтенсивності сонячного випромінювання на динаміку тепловологісного стану огорожувальних конструкцій та радіаційно-конвекційних теплових потоків у внутрішніх приміщеннях будівель потребують подальшого розвитку.

Всі будівельні матеріали представляють собою гетерогенні пористі системи, що володіють сорбційними властивостями і при зміні температури та вологості оточуючого середовища, дії сонячного випромінювання їх вологовміст теж істотно змінюється. Це відображається на теплозахисних якостях огорожувальних конструкцій (ДБН В.2.6-31:2021) та мікрокліматі внутрішніх приміщень будівель.

Використання експериментальних методів для дослідження тепло- і масообмінних процесів в огорожувальних конструкціях та внутрішніх приміщеннях будівель, які знаходяться 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.

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

Дисертаційна робота є складовою частиною наукових досліджень, які знаходились у плані бюджетних тем № 1. 1.7.1.863. Енергомоделювання будівлі з врахуванням її конструктивних особливостей, систем енергозабезпечення, зовнішнього середовища та клімату. № ДР: 0115U003364 (2015р. – 2019 р.); 2.1.7.1.899 "Розроблення науково-технічних засад модернізації систем централізованого теплопостачання України згідно з вимогами до четвертого покоління цих систем", № ДР: 0120U101006; № 3.1.7.1.906 "Розроблення теплофізичних засад енергокліматичної безпеки систем

енергозабезпечення у житловому секторі", № ДР: 0123U101696, в яких автор був одним з виконавців і що виконувались в Інституті технічної теплофізики НАН України.

Мета і задачі дослідження. *Метою дисертаційної роботи є теплофізичне обґрунтування та визначення характеру впливу сонячного випромінювання на тепловологісний стан огорожувальних конструкцій будівлі та мікроклімат приміщень.*

Виходячи з поставленої мети, були визначені *основні завдання дослідження:*

- на основі довгострокових експериментальних досліджень виявити закономірності зміни інтенсивності сонячного випромінювання на огорожувальних конструкціях різної орієнтації;

- розробити математичну модель перенесення теплоти і вологи через огорожувальну конструкцію будівлі за наявності сонячного випромінювання і виконати розрахунковий аналіз впливу сонячного випромінювання на температурний і вологий стан огорожувальних конструкцій;

- з використанням запропонованої математичної моделі динаміки зміни тепловологісного стану приміщень при урахуванні додаткового надходження теплоти від сонячної радіації виявити залежність характеристик цього стану від величини променевих потоків;

- розробити розрахунково-експериментальний метод визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій.

Об'єкт дослідження – процеси тепло- і вологопереносу в стінових конструкціях будівель та опалюваних приміщеннях, що знаходяться під впливом сонячної радіації.

Предмет дослідження – вплив інтенсивності сонячної радіації на тепловологісний стан будівель.

Методи досліджень. Робота заснована на використанні експериментальних і теоретичних методів дослідження: експериментальний метод з використанням сучасного піранометра СР-М для дослідження інтенсивності сонячної радіації; методи математичного моделювання для дослідження процесів перенесення теплоти та вологи через стінову конструкцію будівлі з урахуванням дії сонячного випромінювання та температурного стану приміщення із застосуванням сучасних чисельних методів. Реалізація побудованих математичних моделей виконувалася за допомогою сучасної електронної обчислювальної техніки.

Наукова новизна отриманих результатів.

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 багатопарової 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.

Достовірність 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.

Практичне значення отриманих результатів.

Основні результати виконаних досліджень впроваджено підприємством ПП «Ірпін'ятеплосервіс» в робочому проекті «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 результати роботи використовувалися 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. Результати роботи також використовувалися 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. Також, результати дисертаційної роботи 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.

Особистий внесок здобувача. Аналіз стану проблеми, алгоритми та обчислювальні програми, результати чисельного моделювання, формулювання та обґрунтування методики обробки даних обчислювальних експериментів та зіставлення їх з експериментальними даними інших авторів, фізичне моделювання та обробка результатів експерименту належать здобувачу. Вибір напряму досліджень, постановка завдань, розробка математичних моделей та методів розрахунку, формулювання наукових положень та висновків, підготовка матеріалів до публікації здійснювалися під

керівництвом доктора технічних наук, старшого наукового співробітника Б.В. Давиденка.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися на Міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів, 2016; на X, XI Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки», Київ, 2017, 2019; на I, II, III, IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Хімічна технологія та інженерія», Львів, 2017, 2019, 2021, 2023; на XV міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання», Київ, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018; на XVIII міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» Одеса, 2020; 2nd International scientific and practical conference «Science and technology: challenges, prospects and innovations», Osaka, Japan, 2024.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладені у 20 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.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 190 сторінок машинописного тексту, що містять 174 сторінок основної текстової частини, 61 рисунок і 126 бібліографічних найменувань на 14 сторінках, а також 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Дається загальна характеристика роботи, обґрунтовується її актуальність, новизна, мета, визначаються цілі і завдання досліджень, наводяться наукова новизна і практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** зроблено огляд сучасного стану проблеми, що розглядається, і на підставі цього виконано постановку задач дослідження. В огляді розглянуто питання щодо потенціалу сонячної енергії в Україні та перспективи її використання, проаналізовано типи пасивних і активних сонячних систем. Проведено огляд існуючих експериментальних і теоретичних методів дослідження інтенсивності сонячного випромінювання. Зроблено висновок, що існуючі теоретичні підходи для оцінки теплозахисних властивостей огороджувальних конструкцій не враховують зміну їх вологовмісту та надходження теплоти сонячного випромінювання, а дослідження впливу останнього на температурний режим приміщень будівель потребують подальшого розвитку.

У **другому розділі** наводяться результати експериментальних досліджень інтенсивності сонячної радіації, що потрапляє на поверхні різної орієнтації в різні пори року, запропоновано підхід до врахування хмарності, проведено чисельне моделювання зміни інтенсивності сонячного випромінювання упродовж будь-якого дня року. Експериментальні дослідження проводилися із застосуванням піранометру, що розроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України та встановлений на даху одного з корпусів ІТТФ НАН України. Піранометр СР-М1 містить перетворювачі теплового потоку (ПТП) прямокутної форми, розташовані на гранях куба, орієнтованих

по сторонах світу та до горизонту. Сигнал через систему фіксуючих та передаючих пристроїв надходить до комп'ютера, який з інтервалом 10 хв записує отримані дані для подальшої обробки. Результати обробки виміряних даних представлялись у вигляді графіків зміни локальних густин променевого потоку у місцях розміщення датчиків. На рис.1 наведено зміну інтенсивності сонячного випромінювання в залежності від орієнтації поверхонь ПТП в просторі упродовж лютого.

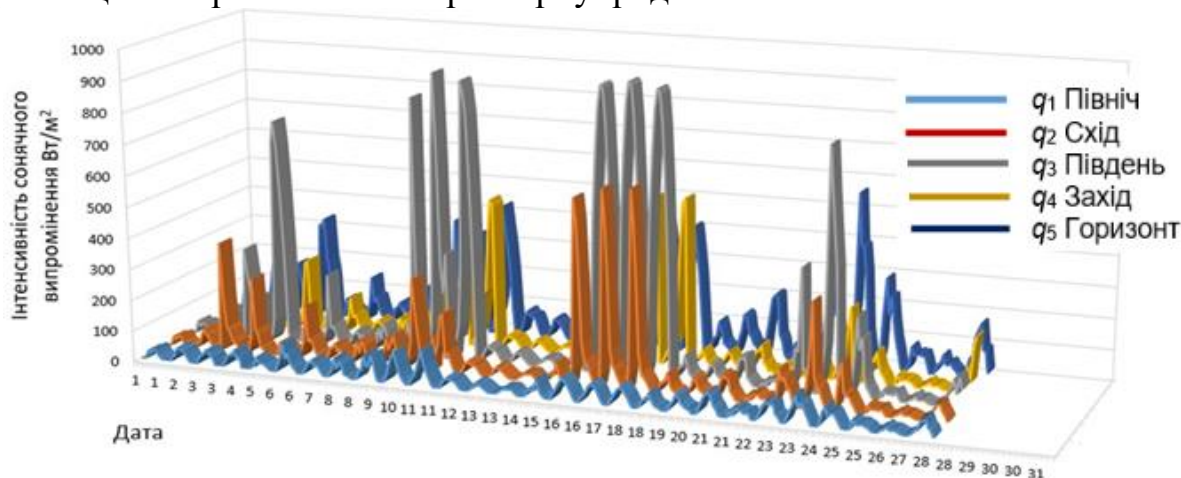


Рисунок 1 – Графіки зміни інтенсивності сонячного випромінювання q , Вт/м², що надходять на кожен грань блоку ПТП упродовж лютого місяця

Максимальні значення q_3 , як в денний, так і в нічний час кожної доби фіксуються на грані, оберненій на південь, а мінімальні q_1 – з північної сторони. Графіки дозволяють зробити висновок стосовно кількості періодів відносно сонячних днів. Їх було 4 з максимальною густиною потоків q_3 сонячної радіації 650, 840, 860 та 700 Вт/м². Ближче до кінця місяця спостерігається зростання потоків q_4 і q_5 , які потрапляють на західну і горизонтальну грані, що пояснюється збільшенням світового дня майже на 1,5 години. Ці результати було використано для оптимізації теплопостачання при опалюванні приміщень корпусів ІТТФ НАНУ.

На рис.2 представлено графіки зміни інтенсивності сонячного випромінювання у світлий період найтеплішого (а) і найхолоднішого (б) днів лютого.

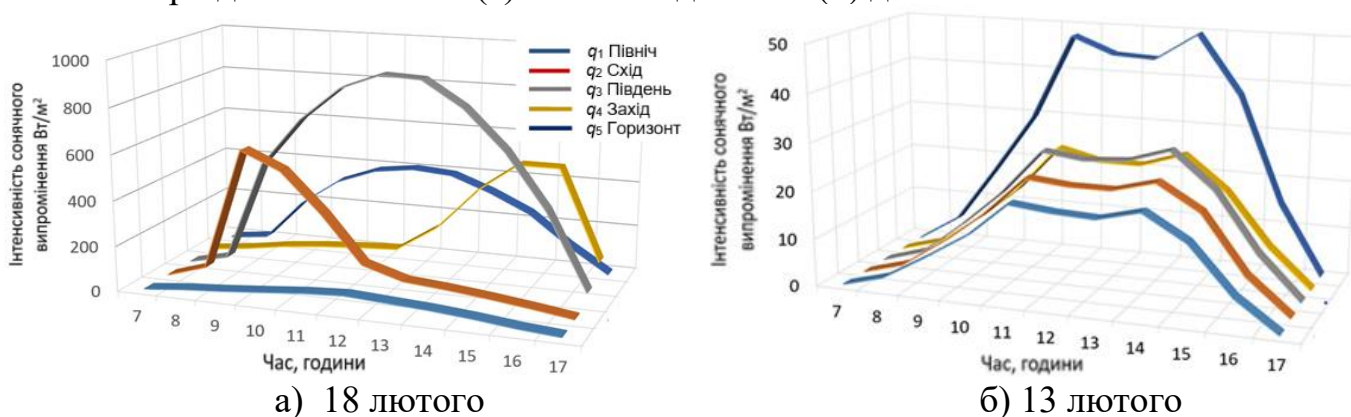


Рисунок 2 – Зміна в часі інтенсивності сонячного випромінювання, що надійшло на грані блоку ПТП упродовж найтеплішого (а) і найхолоднішого (б) днів лютого

Максимуми густин сонячного потоку (рис. 2 (а)) розподілені досить нерівномірно. На гранях, орієнтованих на північ ($q_{1max} = 100$ Вт/м²), південь ($q_{3max} = 600$ Вт/м²) і на горизонтальній площині ($q_{5max} = 800$ Вт/м²) максимальні значення потоків

зафіксовано в період між 11 і 13 годинами дня. Максимальне значення $q_{2\max} = 400$ Вт/м² на східній грані досягається близько 8 год – через годину після сходу сонця, а $q_{4\max} = 440$ Вт/м² на західній грані – з 14 до 15 год, перед заходом Сонця. В найхолодніший день лютого (рис.2 б) наявність хмарності відобразилась на всіх графіках двома максимумами. З північної сторони q_1 не перевищував 10 Вт/м², з південної грані q_3 наблизився до 25 Вт/м², а на горизонтальну поверхню q_5 досягнув 50 Вт/м². Аналіз довгостроково вимірюваних густин потоків сонячного випромінювання показав, що для різних місяців року орієнтація поверхонь, що сприймають найбільші променеві потоки не є однаковою. Так найбільші потоки упродовж літніх місяців потрапляють на горизонтальну поверхню, тоді як для осінніх, зимових і весняних місяців – на поверхню, обернену на південь.

Вплив висоти Сонця h над горизонтом на інтегральні величини добових надходжень сонячної радіації показано на рис.3. Розглянуто дні літнього і зимового сонцестояння, весняного і осіннього рівнодення.

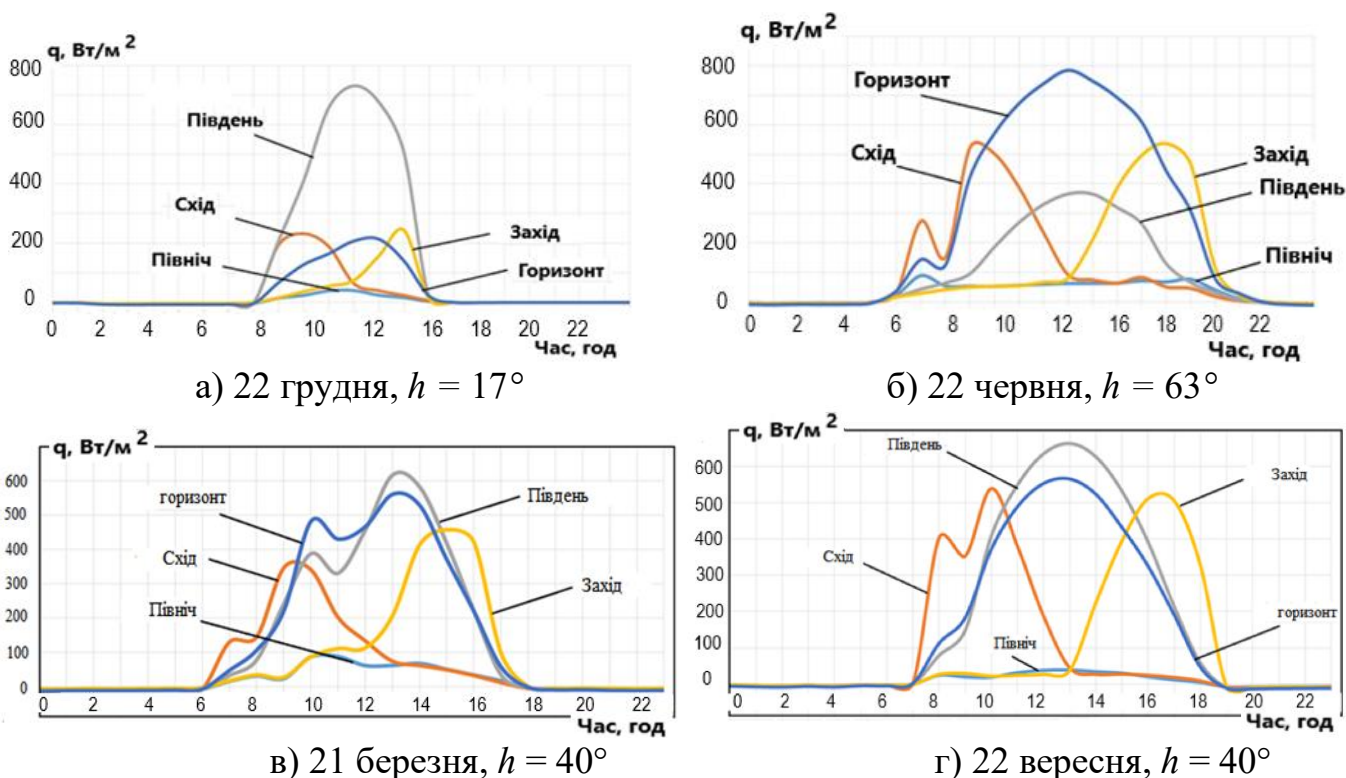


Рисунок 3 – Зміна за добу інтенсивності сонячної радіації, що падає на поверхні різної орієнтації у дні зимового (а) і літнього (б) сонцестояння, весняного (в) і осіннього (г) рівнодення

З рис. 3 слідує, що на інтегральну величину надходжень сонячної радіації помітно впливає хмарність, про яку можна судити по характерним вигинам кривих густин теплових потоків. Для можливості числової оцінки ступенів хмарності запропоновано такі вагові коефіцієнти: повністю хмарне небо – це 0, повністю безхмарне – 1, переважно хмарно – 0,25, частково хмарно – 0,5, переважно ясно – 0,75. Цей підхід було випробувано при чисельній оцінці інтенсивності сонячного випромінювання, проведеного на базі математичної моделі Американського товариства інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (ASHRAE) 2001 року. Математична модель

ASHRAE включає рівняння для прямого I_b та дифузного I_d сонячного випромінювання на земну поверхню

$$I_b = A \exp\left(-\frac{B}{\sin(\theta_z)}\right), \quad I_d = C \cdot I_b \cdot F_{ss}, \quad (1)$$

де A – видиме позаземне випромінювання, $A = E_0$; E_0 – інтенсивність сонячного випромінювання на межі земної атмосфери, $E_0 = E_{sc} [1 + 0,033 \cos(B)]$; E_{sc} – сонячна постійна, $E_{sc} = 1367 \text{ Вт/м}^2$; B – денний кут, $B = 360(n-1)/365$, n – поточний день року; θ_z – кут зеніту Сонця (кут падіння випромінювання на горизонтальну поверхню що є функціями дати і враховують сезонні зміни відстані Земля-Сонце); C – безрозмірний параметр, який залежить від наявності пилу і вологи в атмосфері, який оцінювався коефіцієнтом хмарності; F_{ss} – кутовий фактор, $F_{ss} = 0,5[1 - \cos(\alpha)]$, де кут α між площиною поверхні і горизонтом. Результати зіставлення розрахункових за згаданою математичною моделлю та експериментальних даних наведено на рис. 4.

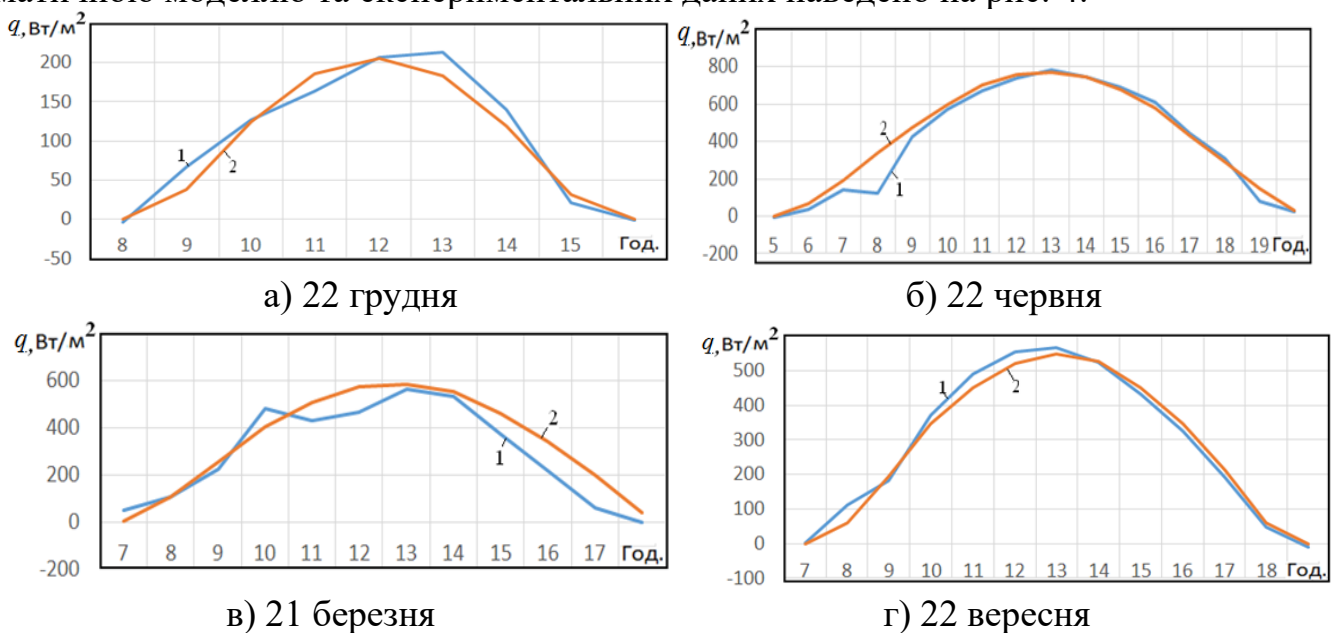


Рисунок 4 – Зміна у часі інтенсивності сонячного випромінювання, що падає на горизонтальну поверхню: 1 – дані вимірювання; 2 – результати розрахунків

Як видно, результати розрахунку за математичною моделлю ASHRAE, в яку введені коефіцієнти хмарності, досить добре узгоджуються з даними експериментальних досліджень. На її основі враховувався вплив добової зміни сонячної радіації при математичному моделюванні тепловологісного стану огорожувальних конструкцій споруд та чисельному дослідженні теплового стану приміщень будівель.

Третій розділ присвячено математичному моделюванню температурно-вологісного стану стінових конструкцій з урахуванням впливу сонячного випромінювання. Надлишковий вологовміст стін будівлі, як відомо, не тільки погіршує теплоізоляційні характеристики будівельних конструкцій, але й знижує їх довговічність. Для достовірного визначення температурного та вологого стану стінових конструкцій, а також обсягів теплових втрат і обсягів перенесення вологи через огорожувальні конструкції враховується багато факторів, зокрема природа матеріалу стін, їх орієнтація у просторі, взаємодія з оточуючими середовищами, дія сонячного випромінювання. Вплив

останнього на тепловологісний стан огорожувальних конструкцій потребує спеціальних поглиблених досліджень.

Більшість будівельних матеріалів мають капілярно-пористу структуру. В їх порах може міститись як крапельна волога, так і суміш водяної пари з повітрям. Серед механізмів переносу вологи в капілярно-пористих тілах основними слід вважати дифузію водяної пари, що протікає за рахунок градієнта його парціального тиску в матеріалі, і перенос крапельної рідини за рахунок дії капілярних сил. За наявності в товщі огорожувальної конструкції градієнта парціального тиску водяної пари буде відбуватися дифузний перенос пари з області з більш високим парціальним тиском пари в область, де цей тиск нижче. Якщо припустити, що загальний тиск пароповітряної суміші всередині стін не змінюється по товщині стіни, рух цієї суміші через пори будівельних конструкцій буде відсутній.

Побудова загального рівняння перенесення маси вологи в стінових конструкціях здійснювалась виходячи з наступних міркувань. Дифузія водяної пари у повітряній фазі в порах стінки описується скорегованим законом Фіка

$$j_{va} = -\rho \frac{D_{va}}{\zeta} \text{grad}(Y_{va}), \quad (2)$$

де j_{va} – густина масового потоку водяної пари, кг/(м²·с); Y_{va} – відносна масова концентрація водяної пари в повітрі, кг/кг; D_{va} – коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі, м²/с; ρ – парціальна густина паро-повітряної суміші, кг/м³; ζ – коефіцієнт опору дифузії парів води в пористому матеріалі ($\zeta > 1$). З урахуванням закону Фіка складається рівняння перенесення маси пари в пористому матеріалі

$$\frac{\partial w_v}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{va}}{\zeta} \frac{\partial Y_{va}}{\partial x_i} \right) + H_v, \quad (3)$$

де x_i ($i=1..3$) – Декартові координати; $w_v = m_v / V$ – вміст водяної пари, який визначається як маса пари в одиниці об'єму пористого матеріалу; τ – час; H_v – маса водяної пари, що випаровується ($H_v < 0$), або конденсується ($H_v > 0$) в одиниці об'єму капілярно-пористого матеріалу в одиницю часу.

Рівняння перенесення сухого повітря запишеться у аналогічному вигляді, але без джерельного члена та за умов $\frac{\partial Y_{av}}{\partial x} = -\frac{\partial Y_{va}}{\partial x}$; $\frac{\partial Y_{av}}{\partial y} = -\frac{\partial Y_{va}}{\partial y}$; $\frac{\partial Y_{av}}{\partial z} = -\frac{\partial Y_{va}}{\partial z}$.

Рушійною силою для переносу рідкої вологи в капілярно-пористих тілах є градієнт тиску в рідкій фазі. Його можна розраховувати як різницю між тиском в газовому середовищі над меніском p_g і капілярним тиском p_c . Згідно з законом Дарсі,

$$j_l = K_l \text{grad}(p_c), \quad (4)$$

де K_l – коефіцієнт проникності для рідини в даному капілярно-пористому тілі.

Враховуючи (4) складається рівняння переносу рідкої вологи в пористому матеріалі

$$\frac{\partial w_l}{\partial \tau} = -\sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{w_l}{\rho_l} \cdot K_l \frac{\partial p_c}{\partial x_i} \right) + H_l, \quad (5)$$

де $w_l = m_l / V$ – масовий вміст рідкої вологи в одиниці об'єму пористого матеріалу; ρ_l – густина рідини; H_l – кількість рідкої вологи, що випаровується, або конденсується в одиниці об'єму стінової конструкції в одиницю часу.

Загальне рівняння перенесення маси пароподібної та рідкої вологи складається, виходячи з умов $H_v = -H_l$ та $w = w_l + w_v$:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{va}}{\zeta} \frac{\partial Y_{va}}{\partial x_i} - \frac{w_l}{\rho_l} K_l \frac{\partial p_c}{\partial x_i} \right). \quad (6)$$

Рівняння енергії для стінової конструкції складається з урахуванням перенесення теплоти дифузійними потоками водяної пари і сухого повітря та фільтраційним потоком рідкої вологи, який виникає за рахунок градієнту капілярного тиску

$$\begin{aligned} & [(1-\Pi)\rho_s C_s + w_l C_l + w_v C_v + w_a C_a] \frac{\partial T}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^3 \left(C_l K_l \frac{w_l}{\rho_l} \frac{\partial p_c}{\partial x_i} - \left(C_v \frac{w_v}{\rho_v} - C_a \frac{w_a}{\rho_a} \right) \rho \frac{D_{va}}{\zeta} \frac{\partial Y_{va}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} = \\ & = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left((1-\Pi)\lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + r H_l, \end{aligned} \quad (7)$$

де T – температура; Π – пористість матеріалу; C_s, C_l, C_v, C_a та $\lambda_s, \lambda_l, \lambda_v, \lambda_a$ – питомі теплоємності та коефіцієнти теплопровідності твердої фракції, рідкої вологи, водяної пари та сухого повітря відповідно; r – теплота випаровування рідини.

Рівняння (6) і (7) дозволяють розраховувати тепловий і вологий стан зовнішніх стінових конструкцій будівель. Вплив стану оточуючого стінову конструкцію повітря та дії сонячної радіації, що потрапляє на зовнішню поверхню стіни, задається в граничних умовах. Для рівняння (6) граничні умови враховують перенесення рідкої і пароподібної вологи в пористій стінці і перенос водяної пари у зовнішньому середовищі. Рідка волога з поверхні стіни може випаровуватись, або утворюватися на ній внаслідок конденсації пари в залежності від стану оточуючого повітря та дії сонячної радіації. Процеси фазових перетворень супроводжуються відповідними тепловими ефектами і враховуються в граничних умовах для рівняння (7). Остаточні, граничні умови на поверхнях стіни, що контактують з повітряним середовищем, мають вигляд:

$$\left(-\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{va}}{\zeta} \frac{\partial Y_{va}}{\partial n} + \frac{w_l}{\rho_l} K_l \frac{\partial p_c}{\partial n} \right)_{n=-0} = \left(\frac{w_v}{\rho_v} + \frac{1}{1-Y_{va}} \frac{w_l}{\rho_l} \right)_{n=+0} \beta_c (Y_{va}|_{n=+0} - Y_{va,\infty}); \quad (8)$$

$$- \left[(1-\Pi)\lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a} \right]_{n=-0} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=-0} = \quad (9)$$

$$= \alpha_{c+r} (T|_{n=0} - T_\infty) + r \left(\frac{1}{1-Y_{va}|_{n=+0}} \right) \beta_c (Y_{va}|_{n=+0} - Y_{va,\infty}) \frac{w_l}{\rho_l} - q_{sol} \gamma$$

Тут індекс " $n = -0$ " означає, що потоки теплоти і маси на поверхні розглядаються з боку пористого матеріалу, а " $n = +0$ " – з боку повітряного середовища, α_{c+r} – радіаційно-конвекційний коефіцієнт тепловіддачі, β – коефіцієнт масовіддачі, q_{sol} – тепловий потік від сонячної радіації, що падає на зовнішню поверхню огорожувальної конструкції (для граничної умови на внутрішній поверхні стіни $q_{sol}=0$), індекс ∞ – відповідає умовам повітряного середовища (внутрішнього або зовнішнього) на значній віддалі від поверхонь, γ – коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання.

В рівняння переносу (6) і (7) та граничні умови (8) і (9) входять фізичні параметри, що описують температурний та вологий стан пористого матеріалу стінових конструкцій. До них відносяться: температура T , вологовміст w , капілярний тиск p_c , парціальний тиск пари в пароповітряній суміші p_v , відносна концентрація водяної пари в

повітрі Y_{va} . Для зменшення кількості невідомих величин до наведених рівнянь додаються співвідношення між ними. Залежність вологовмісту w матеріалу від відносної вологості повітря ϕ описується ізотермою сорбції-десорбції $w=w(\phi, T)$. Долучаються також залежності між капілярним тиском p_c та вологовмістом тіла w , та співвідношення між відносною вологістю повітря ϕ та відносною концентрацією водяної пари у повітрі Y_{va} . Тобто, ізотерма сорбції $w=w(\phi, T)$ представляється у вигляді $w=w[\phi(Y_{va}), T]$. Отже, для описання вологого стану матеріалу може бути достатнім розподіл відносної концентрації водяної пари у повітрі Y_{va} та температури T .

Розв'язання наведеної системи тривимірних нестационарних рівнянь з відповідними граничними умовами здійснювалась методом скінчених різниць з явною схемою апроксимації за часом. Виконано розрахункове дослідження зміни температури та вологовмісту по поверхнях та по товщині стінової конструкції. В якості прикладу розглянуто стіну з керамічної цегли товщиною 250 мм, що містить віконний проріз і розташована на південній стороні будівлі. Висота і ширина стіни $h=3\text{ м}$ і $a=3\text{ м}$. Приміщення опалюється за допомогою панельного радіатора, що розташований під вікном та має температуру $T_p=60\text{ }^\circ\text{C}$. Чисельні дослідження виконуються для зимового періоду року (лютий). Зміна у часі температури зовнішнього повітря та інтенсивності сонячної радіації для цієї доби відображено на рис. 5. Коефіцієнт поглинання сонячної радіації цегляною поверхнею складає $\gamma = 0,7$.

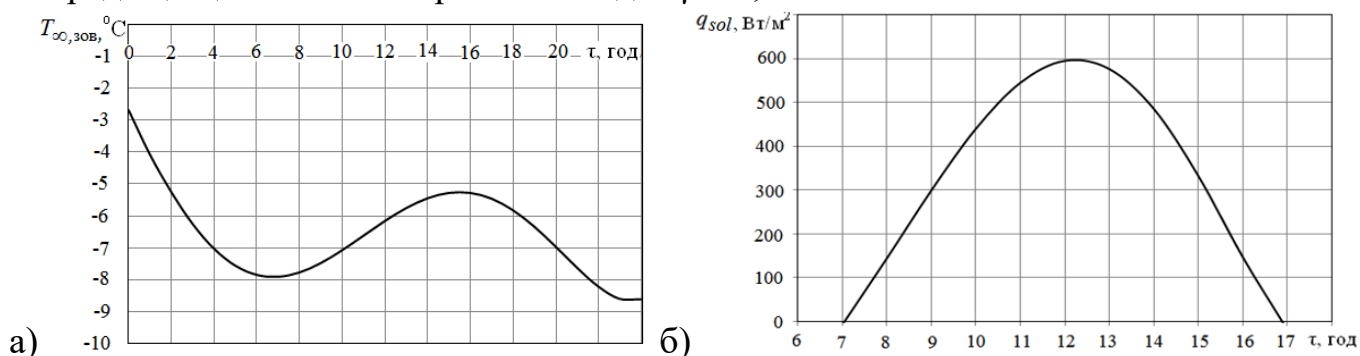


Рисунок 5 – Залежність від часу температури зовнішнього повітря (а) та густини теплового потоку від сонячної радіації (б).

Температура внутрішнього повітряного середовища в приміщенні постійна і дорівнює $T_{\infty,в}=20\text{ }^\circ\text{C}$. Значення коефіцієнту тепловіддачі на зовнішній поверхні стіни $\alpha_{c+r,з}=23\text{ Вт/м}^2/\text{К}$. На внутрішній поверхні стіни крім ділянки, що розташована безпосередньо за радіатором, приймається $\alpha_{c+r,в}=8,6\text{ Вт/м}^2/\text{К}$. Для ділянки поверхні внутрішньої стіни за радіатором складова $\alpha_{c+r}(T|_{n=0} - T_{\infty,в})$ в граничній умові замінюється на $\alpha_c(T|_{n=0} - T_p) + \alpha_r(T|_{n=0} - T_p)$, де конвекційний коефіцієнт тепловіддачі α_c розраховується за відповідною залежністю для природної конвекції на вертикальній поверхні, а радіаційний коефіцієнт тепловіддачі α_r визначається з закону Стефана-Больцмана. Величини цих коефіцієнтів тепловіддачі залежать від температур $T|_{n=0}$ та T_p . Коефіцієнт масовіддачі визначається зі співвідношення $\beta_c = \alpha_c / C_a Le^{2/3}$, де $Le = D_{va} C_a \rho_a / \lambda_a$ – число Льюїса.

Результати чисельного моделювання представлено на рис. 6 – 12. Розподіли температури по внутрішній та зовнішній поверхнях стінової конструкції в момент часу $\tau=24\text{ год}$ наведено на рис. 6. Максимальна температура $36\text{ }^\circ\text{C}$ має місце на ділянці

внутрішньої поверхні стіни (точка *a*), біля якої знаходиться панельний радіатор. За межами цієї ділянки (точка *b*) температура поверхні внутрішньої стіни зменшується до 17 °С. Залежність від часу розподілу температури по товщині стіни уздовж ліній *a-a* та *b-b* наведено на рис.7. За умов відсутності сонячної радіації (о 7 год ранку) температура зовнішньої поверхні стіни змінюється від -5 °С до -2,5 °С (криві 1). О 12 год, коли густина теплового потоку від сонячної радіації максимальна і становить (за умови $\gamma = 0,7$) 417 Вт/м², а температура зовнішнього повітря підвищується до -6,16 °С, температура зовнішньої поверхні стіни зростає до 11...14 °С. О 14 год за рахунок дії сонячного випромінювання температура на зовнішній поверхні стіни становить 10...14 °С (крива 4). Далі температура стіни починає зменшуватися. Характерною особливістю розподілу температури по товщині стіни за умов дії сонячної радіації є те, що криві розподілу температури в певні моменти часу можуть мати мінімуми та максимуми всередині стінової конструкції (криві 3 на рис.7).

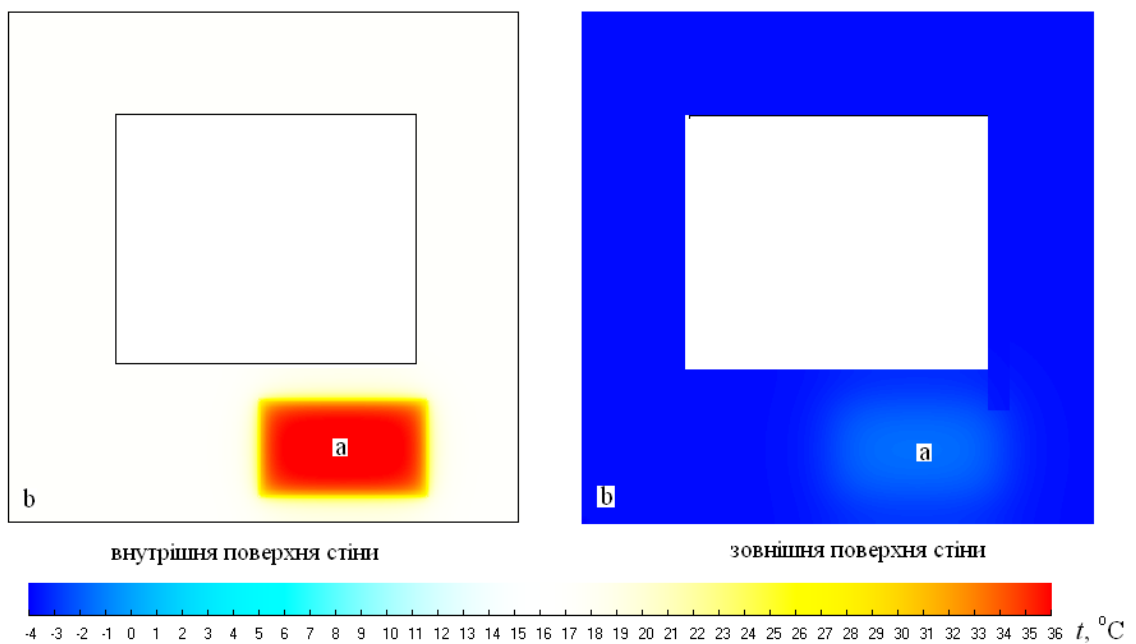


Рисунок 6 – Розподіл температури по внутрішній та зовнішній поверхнях цегляної стіни при $\tau=24$ год

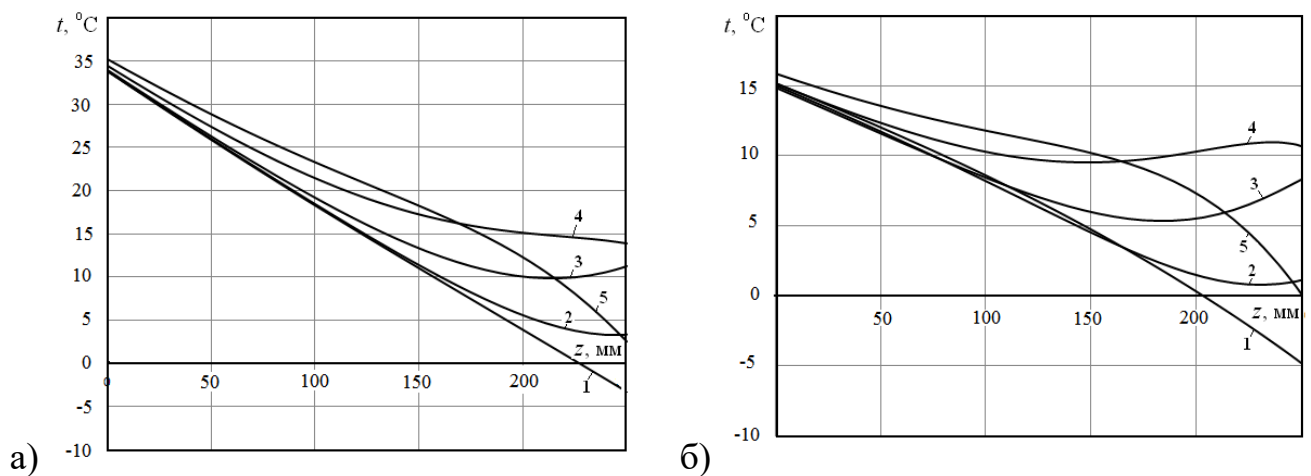


Рисунок 7 – Розподіли температури по товщині стіни вздовж лінії *a-a* (а) та *b-b* (б) в різні моменти часу: 1– 7 год; 2– 9 год; 3– 11 год; 4– 14 год; 5– 17 год

Залежності температури від часу в точках *a* і *b* на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни представлено на рис. 8, залежність від часу сумарного теплового потоку на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни наведено на рис. 9. На внутрішній поверхні стіни (рис. 9) сумарний тепловий потік Q є позитивним і змінюється упродовж доби в межах 200...270 Вт. На зовнішній поверхні Q може бути як позитивним (до 8 та після 14 год), так і негативним (з 8 до 14 год). О 8 і 14 год відбувається інверсія теплового потоку на зовнішній поверхні. Інверсія пов'язана з тим, що у внутрішніх шарах стіни температура виявляється нижчою, ніж температура на зовнішній поверхні.

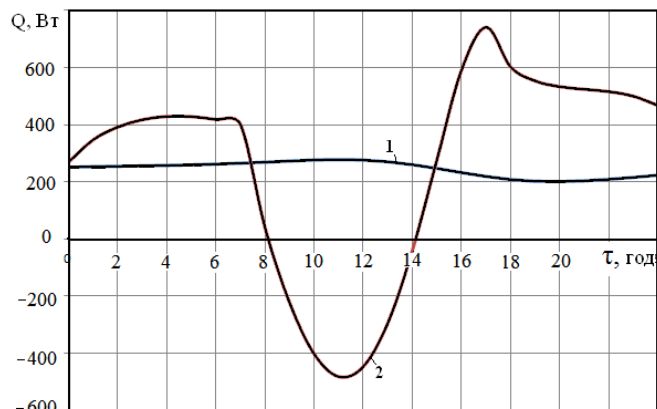
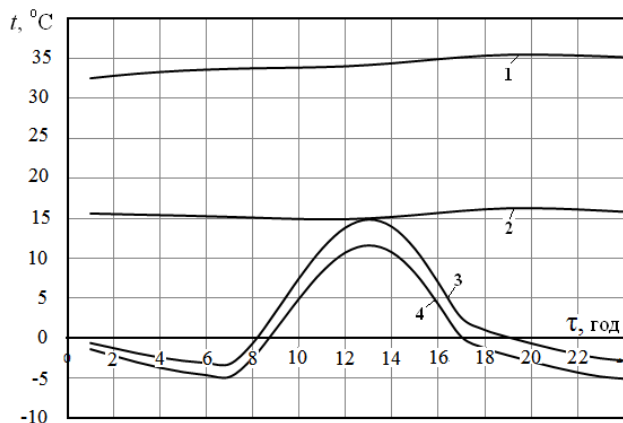


Рисунок 8 – Зміна у часі температури на внутрішній (1;2) та зовнішній (3;4) поверхнях стіни: 1; 3 – точка *a*; 2; 4 – точка *b*

Рисунок 9 – Залежність від часу теплового потоку на внутрішній (1) та зовнішній (2) поверхнях стіни

За рахунок дії сонячного випромінювання температура зовнішньої поверхні зростає швидше, ніж у внутрішніх шарах стіни. Зміну відносного вологовмісту $W_l = m_l/m$ по товщині стіни уздовж ліній *a – a* та *b – b* в різні моменти часу наведено на рис.10. Залежності відносного вологовмісту від часу в точках *a* і *b* на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни зображено на рис.11.

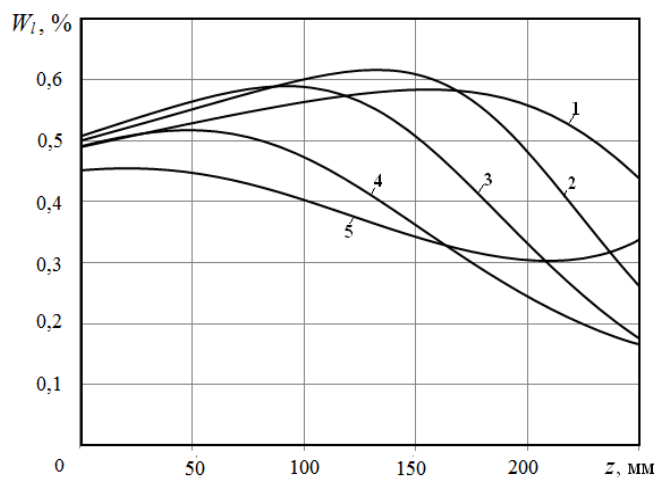
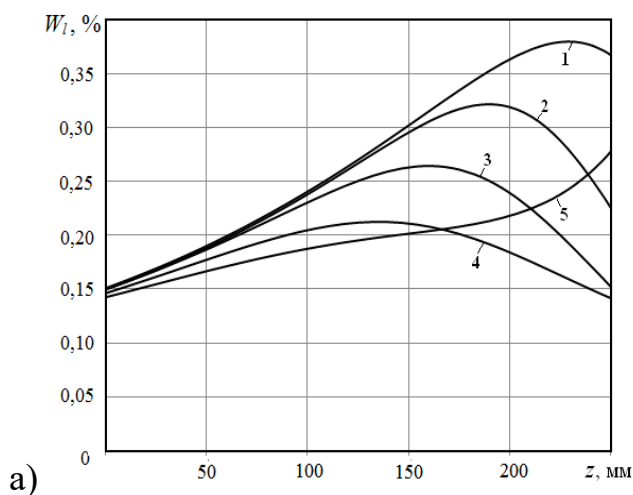


Рисунок 10 – Розподіл вологовмісту по товщині стіни вздовж лінії *a – a* (а) та *b – b* (б) в різні моменти часу: 1– 7 год; 2– 9 год; 3– 11 год; 4– 14 год; 5– 17 год

До 7 год, коли сонячна радіація відсутня, вологовміст стіни збільшується з середині назовні, що є наслідком зменшення температури стіни від внутрішньої поверхні до зовнішньої поверхні. Після 9 год починається дія сонячної радіації і вологовміст

зовнішньої поверхні стіни зменшується внаслідок підвищення її температури. Після 17 год, коли сонячна радіація вже відсутня, її температура зменшується, внаслідок чого вологовміст починає знову зростати (рис.11). Отже, сонячне випромінювання істотно впливає на температурно-вологісний стан стінової конструкції.

Для визначення дії сонячної радіації на тепловолігисний стан стінової конструкції з теплоізоляційним покриттям, модель (6)–(9) було доповнено умовами спряження для потоків теплоти і маси на границі контакту стінки і покриття.

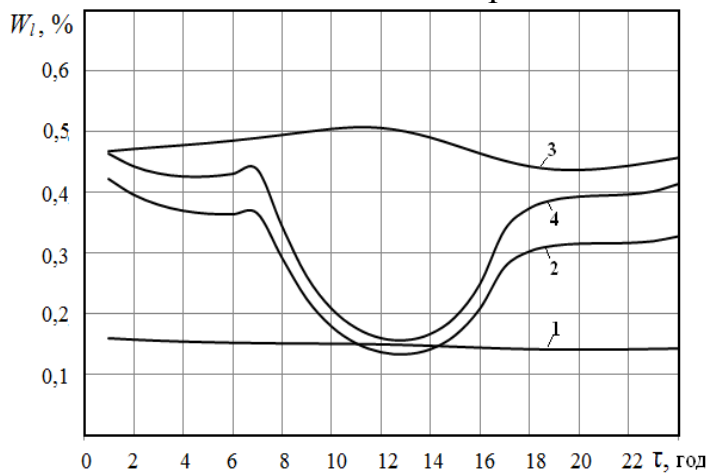


Рисунок 11 – Зміна у часі вологовмісту на внутрішній (1; 3) та зовнішній (2; 4) поверхнях стіни: 1; 2 – точки *a*; 3; 4 – точки *b*.

В якості ізоляції обрано шар з базальтової вати завтовшки 0,1 м. Результати розрахунку зміни температури по товщині стіни з покриттям в різні моменти часу уздовж ліній *a–a* та *b–b* наведено на рис.12. Сонячне випромінювання найбільш суттєво впливає на розподіл температури в ізоляційному шарі.

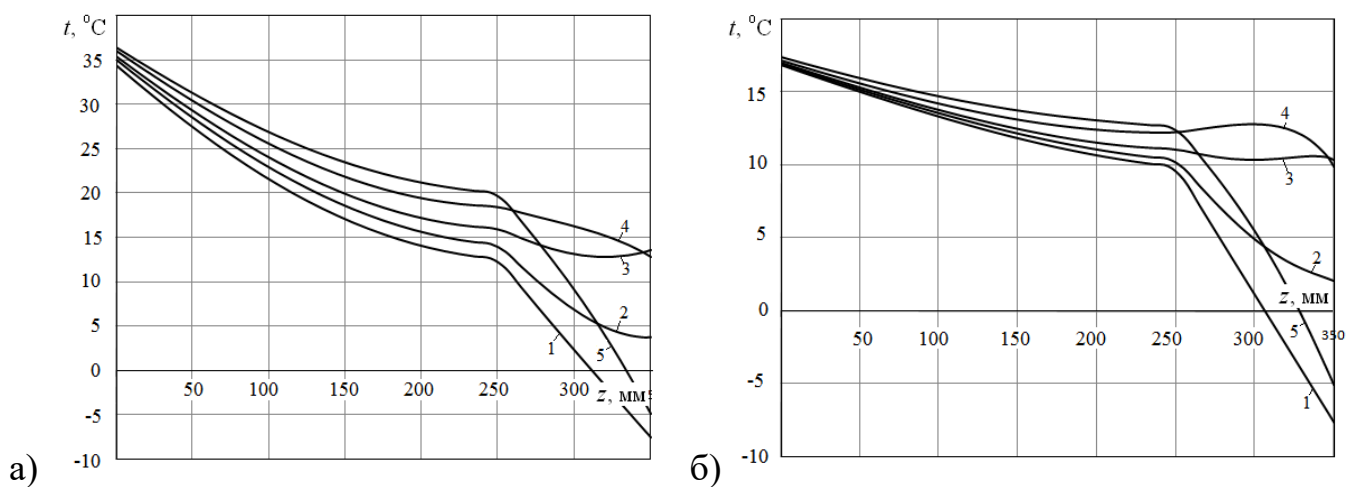


Рисунок 12 – Розподіл температури по товщині стіни з теплоізоляційним покриттям вздовж ліній *a – a* (а) та *b – b* (б) в різні моменти часу: 1 – 7 год; 2 – 9 год; 3 – 11 год; 4 – 14 год; 5 – 17 год

Зміну у часі температури в характерних точках на внутрішній та зовнішній поверхнях стіни з теплоізоляційним покриттям наведено на рисунку 13. Вплив сонячної радіації на вологісний стан стінової конструкції з шаром базальтової вати зображено на рисунку 14. Як видно з цього рисунку, сонячне випромінювання найбільш суттєво впливає на вологовміст власне покриття, у якого коефіцієнт опору дифузії парів води суттєво менший, ніж у несучої стіни з цегли.

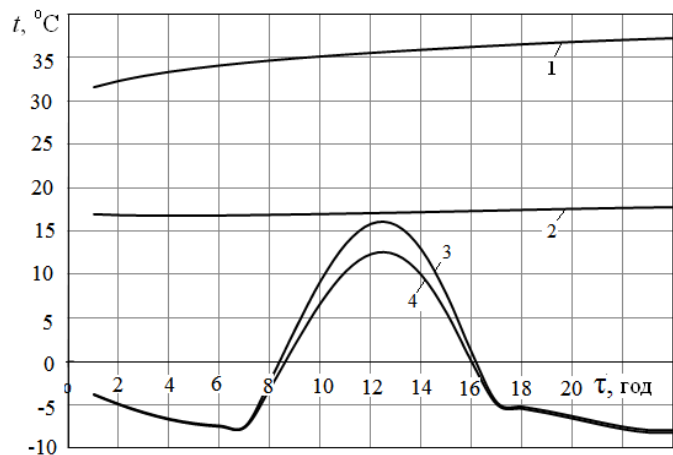


Рисунок 13 – Зміна у часі температури на внутрішній (1; 2) та зовнішній (3;4) поверхнях стіни з теплоізоляційним покриттям: 1; 3 – точки *a*; 2; 4 – точки *b*.

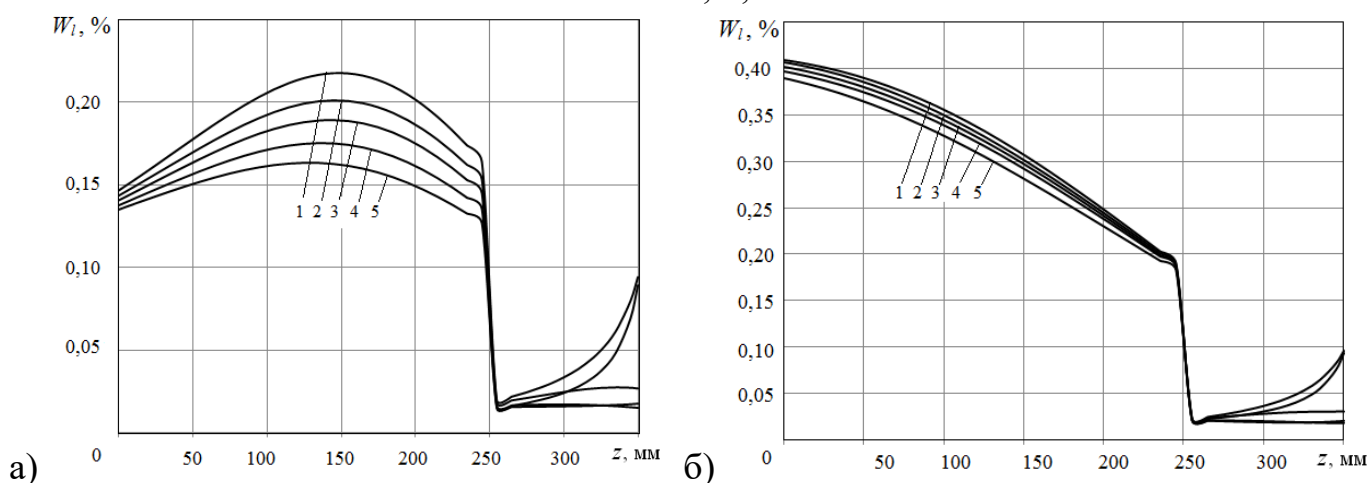


Рисунок 14 – Розподіл вологовмісту по товщині стіни уздовж лінії *a – a* (а) та *b – b* (б) в різні моменти часу: 1 – 7 год; 2 – 9 год; 3 – 11 год; 4 – 14 год; 5 – 17 год

Визначення залежностей рівноважного вологовмісту пористих матеріалів w від температури T і відносної вологості повітря φ виду $w=w[\varphi(Y_{va}), T]$ зазвичай здійснюється експериментальним шляхом. Експерименти є технічно складними у організації і досить тривалими. В роботі запропоновано метод чисельного визначення ізотерм сорбції-десорбції, який базується на використанні інтегральної функції розподілу пор по розмірах $F(r)$ для даного матеріалу та формули для рівноважної товщини δ шару конденсату $\delta=\delta^*(1-\sqrt{1-\varphi})$, де $\delta^*=A/(\xi n)$ – середня довжина зміщення активізованих молекул всередині конденсованого тіла, A – енергія активації молекул, ξ – коефіцієнт опору переміщенню активованої молекули до вільної поверхні конденсованого шару, n – густина молекул, що утворюється на твердій поверхні, розміщеній в парогазовій суміші при незмінних значеннях T і φ . Тоді відносна вологість повітря

$$\varphi = \frac{p_{v,p}}{p_{v,n}} = \frac{\delta}{\delta^*} \left(2 - \frac{\delta}{\delta^*} \right), \quad (10)$$

де $p_{v,p}$ і $p_{v,n}$ – рівноважний тиск і тиск насичення.

З (10) випливає, що при заповненні капілярів з радіусами $r > \delta$, при заданих T і ϕ товщина шару конденсату, що утворюється на стінках пор різного розміру, є однаковою і дорівнює δ , а капіляри з $r \leq \delta$ заповнені рідиною повністю.

По відомих даних про $F(r)$, будується масив чисел $F_i = F(r_i)$ на рівномірній різницевої сітці $r_i = i\Delta r$; $i = 0, 1, \dots, I$; $\Delta r = (r_{\max} - r_{\min}) / (I - 1)$, де r_{\min} і r_{\max} – мінімальний і максимальний радіуси капілярів для даного матеріалу, на якій обчислюється диференціальна функція розподілу пор по розмірах за різницевиими співвідношеннями в граничних і у внутрішніх точках: $f_1 = (F_2 - F_1) / \Delta r$, $f_I = (F_I - F_{I-1}) / \Delta r$, $f_i = (F_{i+1} - F_{i-1}) / 2\Delta r$, $i = 2, \dots, I - 1$; вводиться різницєва сітка по товщині шару конденсату: $\delta_m = m \cdot \Delta \delta$; $m = 0, 1, \dots, M$; $\Delta \delta = (\delta^* - \delta_0) / (M - 1)$, де δ_0 – товщина шару конденсату в початковому рівноважному стані. Далі розраховуються по (10) значення ϕ_m , що відповідають кожному δ_m , обчислюється радіус R_{im} внутрішньої циліндричної поверхні капіляра радіуса r_i , вільного від рідини: $R_{im} = r_i - \delta_m$ та об'ємна частка рідини Ψ_{im} у капілярі: $\Psi_{im} = [\pi r_i^2 - \pi (r_i - \delta_m)^2] / \pi r_i^2 = (2\delta_m - \delta_m^2) / r_i$. Вологовміст пористого тіла при даному значенні відносної вологості парогазового середовища ϕ_m визначається з виразу:

$$w = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I (f_i \Psi_{i,m} + f_{i-1} \Psi_{i-1,m}) \Delta r.$$

Знайдена функція $w = f_i(\phi_m)$ при даній температурі T представляє ізотерму сорбції.

Даний чисельний метод було використано для визначення ізотерм сорбції для ряду капілярно-пористих матеріалів, що застосовуються в будівництві, серед яких силікагель (рис 15 а) і будівельна керамічна цегла (рис. 15 б).

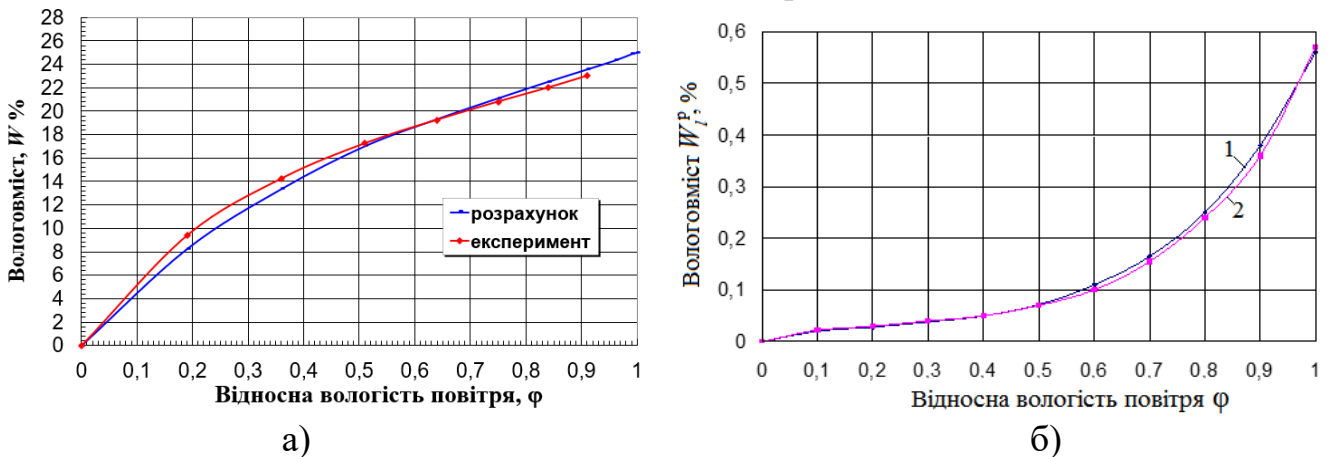


Рисунок 15 – Ізотерми сорбції парів води силікагелем при $T=30^\circ\text{C}$ (а), і керамічною цеглою при $T=20^\circ\text{C}$ (б): 1 – розрахунок; 2 – експеримент.

Порівняння результатів чисельного визначення ізотерм сорбції з експериментально отриманими дає гарне співпадіння. Метод дозволяє визначати рівноважний вологовміст пористих матеріалів в усьому діапазоні значень відносної вологості повітряного середовища.

В четвертому розділі проводились розрахункові дослідження повітряно-теплого стану внутрішніх приміщень в опалювальний період з урахуванням дії сонячного випромінювання, що надходить через віконні прорізи. Дослідження виконувались на основі розв'язування тривимірної нелінійної задачі теплообміну, що описується системою рівнянь турбулентного переносу імпульсу та енергії.

Особливості повітряно-температурного режиму приміщення розглядаються на прикладі робочої кімнати з двома вікнами і двома радіаторами під ними. Висота кімнати $H = 3$ м, довжина $L = 5,6$ м і ширина $B = 6,3$ м; товщина зовнішньої бетонної стіни $0,24$ м. Внутрішні стіни, підлогу і стелю також виконано з бетону. Товщина внутрішніх стін $0,12$ м, вікна однокамерні з товщиною скла 3 мм та відстанню між ними 60 мм. Площі панелей радіаторів $0,5$ м². Ширина кожної панелі 10 мм. Відстань між панелями 100 мм. Розглядається випадок, коли температура панелей радіаторів дорівнює $t_p = 40$ °С. Температура зовнішнього повітря $t_3 = -10$ °С.

Конвекційний рух повітря в приміщенні, що виникає за рахунок нерівномірного розподілу температури, описується системою рівнянь турбулентної течії спільно з рівнянням енергії. До цієї системи входять: *рівняння нерозривності*

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \quad (11)$$

рівняння енергії для повітряного середовища

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (12)$$

рівняння переносу імпульсу уздовж осі O_x

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_{\text{еф}} \frac{\partial u_x}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_{\text{еф}} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_{\text{еф}} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Рівняння переносу імпульсу уздовж осей O_y і O_z записуються аналогічно. Тут u_x, u_y, u_z – проєкції вектору швидкості на осі декартових координат, p – тиск, ρ – густина, $\nu_{\text{еф}} = \nu + \nu_t$, $\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$, $a_{\text{еф}} = a + \nu_t / \sigma_T$, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, a – коефіцієнт температуропровідності; k – кінетична енергія турбулентності; ε – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності; $\sigma_T = Pr_T$ – турбулентне число Прандтля.

Система рівнянь доповнюється рівняннями k - ε моделі турбулентності:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial k}{\partial x} + u_y \frac{\partial k}{\partial y} + u_z \frac{\partial k}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \nu_t S^2 - \varepsilon; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + u_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + u_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t S^2 - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (15)$$

де $S^2 = \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2$;

$C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $\sigma_T = 0,85$.

На поверхнях стін приміщення приймаються граничні умови:

$$u_x = 0; \quad u_y = 0; \quad u_z = 0; \quad k = 0.$$

Функція ε визначається в найближчих до стіни вузлах за виразом $\varepsilon = C_D k^{3/2} / (\kappa \cdot \Delta n)$, де $C_D \approx 0,08/C_\mu$, Δn – відстань від найближчого до поверхні вузла до самої поверхні; $\kappa \approx 0,4$ – постійна Кармана.

Температурне поле в стінових конструкціях описує рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_c \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_c \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_c \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (16)$$

де a_c – коефіцієнт температуропровідності огорожувальних конструкцій приміщення (стіл приміщення або віконного скла).

На зовнішній поверхні стіни і вікна задається гранична умова третього роду:

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} = \alpha_{\text{зов}} (T|_{n=0} - T_\infty) - q_{\text{сон}} \gamma$$

де λ_c – коефіцієнт теплопровідності стіни або вікна, $\alpha_{\text{зов}}$ – радіаційно-конвекційний коефіцієнт тепловіддачі, $\alpha_{\text{зов}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

На внутрішніх поверхнях вікна та внутрішніх поверхнях стін задаються умови четвертого роду з урахуванням променистого теплового потоку $q_{\text{п}}$

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial n} + q_{\text{п}}$$

Тут $\lambda_{\text{п}}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря. Вважається, що променистий теплообмін відбувається між радіатором та внутрішніми поверхнями приміщення. Взаємний променистий теплообмін між внутрішніми поверхнями кімнати не враховується. У зв'язку з цим, на зовнішніх границях внутрішніх стін (а також підлоги та стелі) задаються умови симетрії: $\partial T / \partial n = 0$. На нижню ділянку стіни, що протилежна вікну, та на ділянку підлоги, що примикає до цієї стіни, надходить сонячне випромінювання, що проходить крізь вікно. Тому граничні умови на цих ділянках стіни і підлоги задаються з урахування густини теплового потоку $q_{\text{сон}}$ сонячного випромінювання

$$-\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_{\text{пов}} \frac{\partial T}{\partial n} - \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \int \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos(\psi_{\text{ст}-n_w}) \cdot \cos(\psi_{\text{п}-n_r})}{\pi r^2} dF_p - q_{\text{сон}},$$

де r – відстань між точкою на поверхні стіни і точкою на поверхні радіатора, n_w – нормаль до поверхні стіни, n_r – нормаль до поверхні радіатора; $\psi_{\text{ст}-n_w}$ і $\psi_{\text{п}-n_r}$ – кути між радіусом-вектором r і нормальми до поверхні стіни та до поверхні радіатора; $\varepsilon_{\text{ст}}$ і ε_p – ступені чорноти поверхонь, значення яких приймаються рівними 0,8.

Система рівнянь (11) – (16) спільно з граничними умовами розв'язується методом скінчених різниць. Результати розрахунку полів швидкості і температури в приміщенні за умов відсутності та за умов наявності сонячного випромінювання представлені на рис. 16 і 17. Поля швидкості і температури представлено у двох взаємно перпендикулярних вертикальних площинах перерізу приміщення: В–В (рис.16 а) – паралельний бічним стінам, що перетинає панелі одного з радіаторів посередині, і С–С (рис.16 б) – паралельний зовнішній стіні приміщення, розташований на відстані 1,6 м від внутрішньої поверхні зовнішньої стіни. З рис.16 видно, що течія повітря в приміщенні має циркуляційний характер. Циркуляційні потоки виникають внаслідок природної конвекції повітря, нагрітого від радіатора та охолодженого біля зовнішньої

стіни і вікна. Температура всередині приміщення підвищується в напрямку від підлоги до стелі. Над підлогою температура повітря не перевищує $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, на висоті $1,4\text{ м}$ від підлоги температура складає $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, а біля стелі зростає до $19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

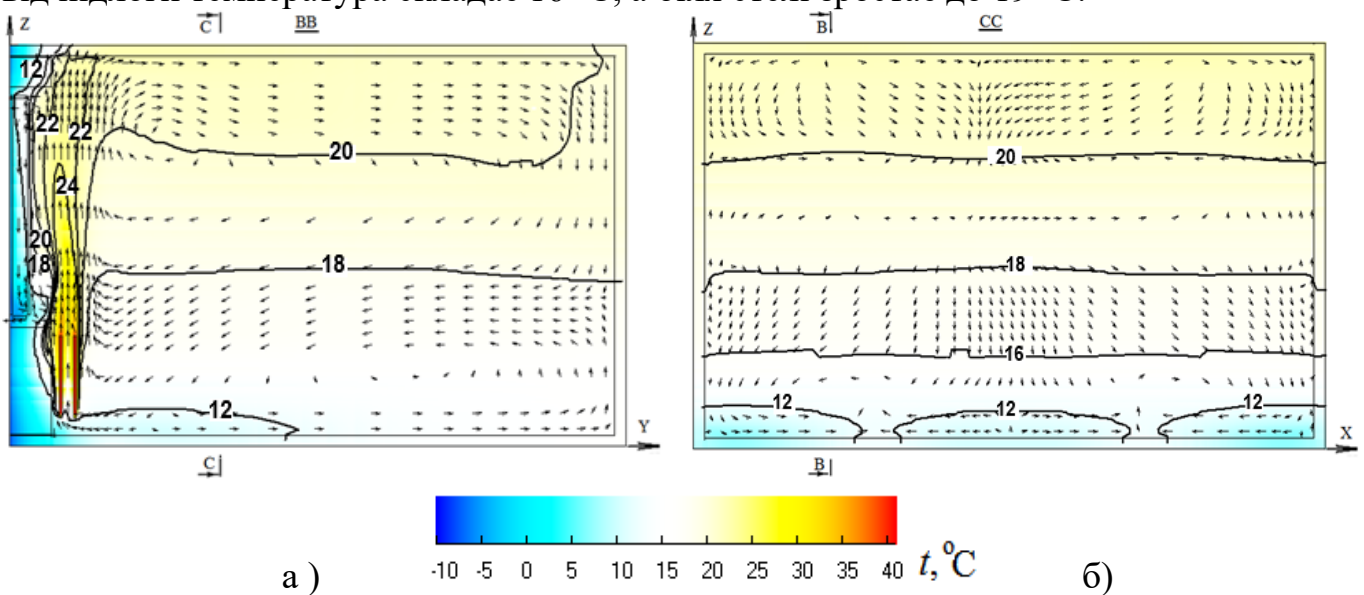
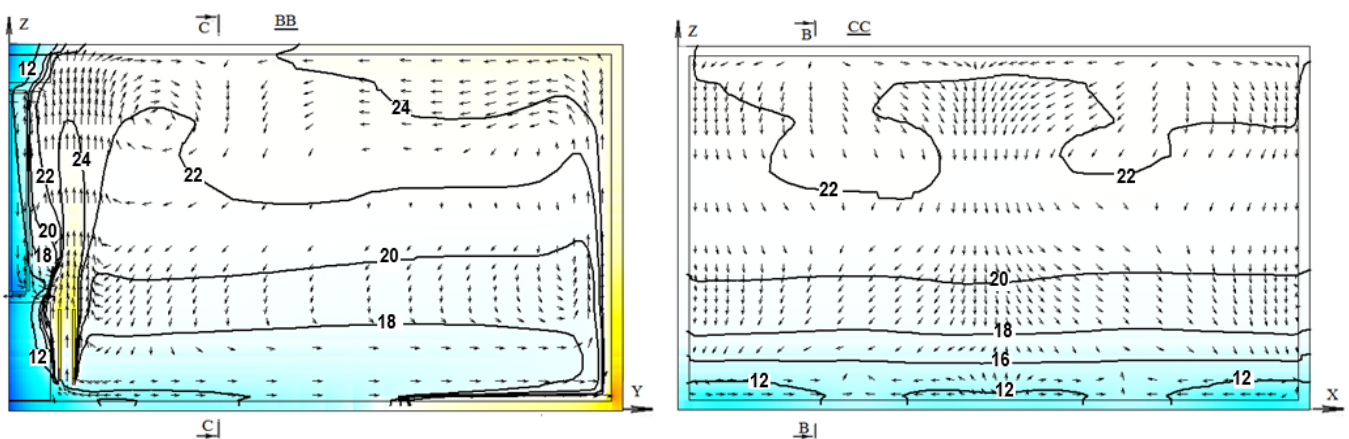


Рисунок 16 – Розподіл швидкості повітря і температури в вертикальних перерізах В-В (а) і С-С (б) при $t_p = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_3 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ за умов відсутності сонячної радіації.

Дані, представлені на рис.17, відносяться до випадку безхмарної погоди 22.12 у м. Києві. Кут висоти Сонця – кут між горизонтом і променем до Сонця – о 12 год у Києві $\beta = 0,28$ радіан. Сонячні промені, що проходять через скло, потрапляють частково на стіну, протилежну вікну, та частково на ділянку підлоги, що примикає до задньої стіни. Максимальна густина сонячної радіації 22.12 о 12 год складає $q_{sol,max} = 393\text{ Вт/м}^2$. З часом кут β змінюється і густини сонячних потоків, що падають на стіну та підлогу, теж змінюються у часі. Крім того, в цю пору року небо може бути частково вкрито хмарами. Тому для розрахунку впливу сонячної радіації на температурний стан кімнати приймається, що з 11 до 13 год осереднена за часом густина теплового потоку від сонця дещо менша, ніж наведена вище величина. Приймається, що вона складає $q_{sol} \sim 300\text{ Вт/м}^2$. Кут, під яким сонячний промінь потрапляє на Землю, вважається постійним. Густина теплового потоку, що потрапляє на підлогу, складає $q_{sol,z} = q_{sol} \sin(\beta)$, а густина теплового потоку, що потрапляє на стіну, що протилежна вікну, дорівнює $q_{sol,y} = q_{sol} \cos(\beta)$. За даних умов площі ділянок, на які потрапляють сонячні промені, складають: на підлозі від першого та другого вікна – по $3,02\text{ м}^2$; на стіні, що протилежна вікнам, від першого та другого вікна – по $0,32\text{ м}^2$.



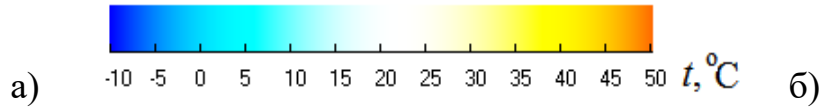
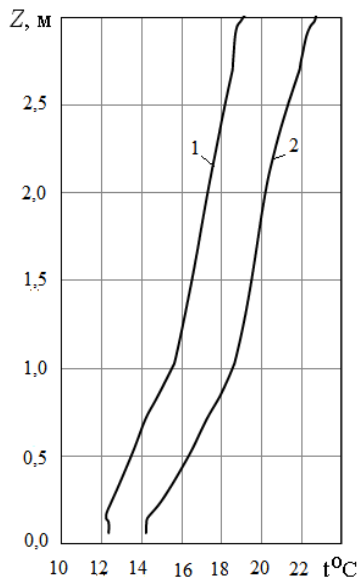


Рисунок 17 – Розподіл швидкості повітря і температури в вертикальних перерізах В–В (а) і С–С (б) при $t_r = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{out} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ за наявності надходжень теплоти від сонячного випромінювання.

Отже, в приміщення об'ємом $105,84\text{ м}^2$, за рахунок сонячного випромінювання надходить додатковий тепловий потік 668 Вт . За наявності сонячної радіації (рис. 17) температура в приміщенні, при тих самих зовнішніх погодних умовах ($t_z = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$) та температурі нагрівальних приладів ($t_p = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$), суттєво підвищується. За умов відсутності сонячної радіації, середня температура повітря в приміщенні складала $18,03\text{ }^{\circ}\text{C}$, при наявності сонячної радіації температура підвищується до $20,63\text{ }^{\circ}\text{C}$. Змінюються також напрямки конвекційних потоків повітря. Це особливо стосується ділянки приміщення, що примикає до стіни, протилежній вікну, температура якої перевищує $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цей вплив також помітний по зміні температури повітря в приміщенні уздовж його висоти. На рис. 18(а) наведено розподіл температури повітря поздовж вертикальної лінії на відстані $y = 0,82\text{ м}$ від передньої стіни і на відстані $x = 1,62\text{ м}$ від бокової лівої стіни. Розподіли температури повітря вздовж вертикальної лінії, що розташовується на відстані $y = 3,11\text{ м}$ від передньої стіни і відстані $x = 1,62\text{ м}$ від бокової лівої стіни, представлено на рис. 18 (б).



а)



Порівняння цих розподілів (а) і (б) вказує на те, що за даних умов сонячне випромінювання сприяє підвищенню температури повітря на 2...3 °С.

Рисунок 18 – Розподіли температури по висоті приміщення уздовж двох вертикальних ліній: $y=0,82$ м; $x=1,62$ м (а); $y = 3,11$ м; $x = 1,62$ м (б); 1 – при відсутності сонячної радіації; 2 – при наявності сонячної радіації.

б)

ВИСНОВКИ

1. На основі фізичних експериментів та математичного моделювання виконано комплекс досліджень ефектів впливу сонячної радіації на тепловологісний стан огороджувальних конструкцій і мікроклімат приміщень.

2. Досліджено закономірності динаміки тепловологоперенесення в стінових конструкціях з урахуванням сонячного випромінювання та дії опалювальних приладів. При цьому:

- розроблено тривимірну нелінійну математичну модель процесу тепло- і вологоперенесення, в якій враховується низка ускладнюючих факторів, таких як зміна концентрацій рідкої і газової фаз, нерівномірність розподілу температури на внутрішній поверхні стінки, зміна інтенсивності сонячного випромінювання і температури навколишнього середовища упродовж доби, тощо;

- встановлено наявність суттєвого впливу сонячної радіації на розподіл температури і вологовмісту по товщині стінки; так, температура зовнішньої поверхні стінки за від'ємної температури навколишнього середовища може підвищуватись на 10-12 °С, а вологовміст приграничних до зовнішньої поверхні шарів зменшуватись вдвічі;

- виявлено явище інверсії теплового потоку в товщі стінки, зумовлене нагріванням її зовнішньої поверхні внаслідок дії сонячної радіації до температур, що перевищують температуру всередині стінки;

- розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення рівноважного вологовмісту капілярно-пористих матеріалів, на базі якого було отримано ізотерми сорбції будівельних матеріалів, що використані для замикання математичної моделі.

3. Одержано дані математичного моделювання тепловологісного режиму багатошарової огорожувальної конструкції будівлі за умов дії сонячної радіації, зокрема:

- показано, що вплив сонячної радіації є найбільш суттєвим у шарі утеплювача;

- встановлено, що розподіл температури і вологовмісту у власне несучій стінці не суттєво залежить від дії сонячного випромінювання, при цьому температура стінки не знижується до від'ємних значень і її вологовміст визначається відносною вологістю повітря в приміщенні.

4. Виконано порівняльний аналіз закономірностей течії повітря і теплообміну в опалювальних приміщеннях за наявності та відсутності впливу енергії Сонця:

- за наявності сонячного випромінювання помітно змінюється картина течії повітря в приміщенні; так, 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 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.

5. Проведено довготривалі експериментальні дослідження з вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання на поверхнях різної орієнтації (горизонтальній та вертикальній, спрямованих у напрямку різних сторін світу) для широти м. Києва.

- встановлено, що в зимовий період року максимальна інтенсивність сонячного випромінювання має місце на вертикальній площині, зорієнтованій на південь, а в літній період – на горизонтальній поверхні;

- виконано зіставлення одержаних експериментальних результатів з відомими даними Американського товариства інженерів з опалення, охолодження і кондиціонування повітря ASHRAE та встановлено їх задовільний збіг.

6. Результати проведених досліджень впроваджено в будівельну практику на підприємстві ПП «Ірпін'ятеплосервіс» у робочому проєкті «Капітальний ремонт будівлі спортивного залу Державного закладу професійно-технічної освіти зі специфічними умовами навчання «Академія патрульної поліції» в м. Київ:

- при розробці заходів з енергозбереження, а саме, для визначення товщини шару захисних покриттів огорожувальних конструкцій використано дані математичного моделювання тепловологісного стану цих конструкцій;

- при проєктуванні на даху спортивного залу сонячної фотовольтаїчної станції; зокрема, на основі даних експериментальних досліджень щодо інтенсивності сонячного випромінювання на поверхнях різної орієнтації у зимовий період визначено оптимальний кут нахилу сонцесприймаючих панелей.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджено також у навчальному процесі підготовки фахівців за спеціальностями ОП «Теплогазопостачання та вентиляції»,

ОП «Теплоенергетика обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів» Київського національного університету будівництва і архітектури.

**Список публікацій здобувача,
в яких представлені основні наукові результати дисертації:
Статті**

1. Basok V.I., Novikov V.G., Davydenko B.V. Belyaeva T.G. Novitskaya M.P. Sorokovoi R.Y. Radiative-Convective Heat Exchange of a Building with the Environment on Exposure to Solar Radiation. Journal of Engineering Physics and Thermophysics 2020. V. 93. Issue 1. P.45–53. *(здобувач приймав участь у розробці математичної моделі, обробці та аналізі результатів чисельних експериментів)*. (Scopus, Web of Science)
2. Фіалко Н., Басок Б., Давиденко Б., Сороковий Р., Сорокова Н., Новіков В. Вплив сонячного випромінювання на температурний режим приміщення в зимовий період. Енергетичні технології та ресурсозбереження. 2024. Т.80, №3, С.135-145. DOI: 10.33070/etars.3.2024.09 *(участь у розробці математичної моделі та обробці результатів чисельних експериментів)*. (Scopus)
3. Басок Б.И., Давиденко Б.В., Новиков В.Г., Сороковой Р.Я. Моделирование солнечного излучения для использования в возобновляемой энергетике и в строительной теплофизике. Пром. теплотехника. 2018, Т.40. №1. С. 44–50. *(проведення експериментальних досліджень інтенсивності сонячного випромінювання з метою верифікації математичної моделі)*.
4. Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М., Сороковий Р.Я. Метод визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій. Energy Efficiency in Civil Engineering and Architecture. 2018. Iss. № 10. С. 62 – 67. ISSN 2310-0516. *(здобувачем визначено інтегральну функцію розподілу пор за розмірами і проведена апробація методу для визначення ізотерми сорбції керамічної цегли)*.
5. Тимощенко А.В., Беляєва Т.Г., Стецюк В.Г., Мороз М.В., Сороковий Р.Я. Конвективна сушка теплоізоляційних базальто-бенітонітових виробів. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. № 3 С. 103 –109. ISSN 1813-5420. *(проведена розробка граничних умов тепломасопереносу і фазових перетворень)*.
6. Basok B., Davydenko B., Timoshchenko A., Novikov V., Sorokoviy R., Moroz M. Influence of Solar Radiation on the Temperature Regime of Buildings Walls. No Conference Proceedings of Scientific Papers, «CASSOTHERM 2018» Technical University of Kosice. 2018. P. 70-76. *(проведені експериментальні дослідження інтенсивності сонячного випромінювання з метою верифікації математичної моделі)*.
7. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokoviy R., Sorokova N., Novikov V. Comparative analysis of temperature conditions of rooms in the presence and absence of solar radiation. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». № 9 (164), 2024. С.62-65. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-9-10390> *(участь у розробці математичної моделі та обробці результатів чисельних експериментів)*
8. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokoviy R., Sorokova N., Novikov V. Mathematical modeling of air flow in rooms taking into account solar radiation. International scientific journal "Internauka". 2024. № 10. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-10-10412> *(участь у розробці математичної моделі та обробці результатів чисельних експериментів)*

розділи колективних монографій

9. Sorokova N.N., Kolchik Yu.N., Sorokoviy R. Y. Mathematical modeling of sorption and desorption dynamics in adsorption systems Chemical Technology and Engineering: Monograph. (Atamanyuk V.M. et al., Eds.) Lviv: SPLOM, 2021. 146 p. P.19-23. ISBN 978-966-919-760-3 <http://cte.org.ua/3rd-chemical-technology-engineering-2021/monograph>

(участь у розробці математичної моделі сорбції і десорбції в пористих матеріалах, обробці результатів чисельних експериментів та їх аналізі).

10. Енергоефективність процесів сушіння Тематичний збірник статей у двох томах. Київ: Видавництво «Тропеа», 2021. I том. 343 с.; С. 137-140; 272-274; 283-298. ISBN 978-617-7894-24-6 (загальний) ISBN 978-617-7894-25-3 (том 1). Ум. друк.арк. 24,7. <http://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/04/snezhkin-zbirnik-statej-2021.pdf>

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

11. Чалаєв Д.М., Сороковий Р.Я. Аналіз ефективності холодильних установок за різними типами конденсаторів. Роб. прогр. та тези доп. I всеукр. наук.-практ. конф. мол. вчених, асп. і студ. «буд-майстер-клас-2015» 26-27 листопада 2015 р. в КНУБА.

12. Сорокова Н.М., Шапар Р.О., Безгін М.М., Сороковий Р.Я. Математичне моделювання тепломасопереносу і фазових перетворень при сушінні біомаси в умовах рівномірного омивання сушильним агентом. Збірник матеріалів IV Міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів. 2016. С. 77.

13. Давиденко Б.В., Декуша Л.В., Воробйов Л.Й., Кравченко В.П., Новіков В.Г., Гончарук С.М., Сороковий Р.Я. Експериментальні дослідження сонячної радіації на поверхнях різної орієнтації. «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»: X міжн. конф. Київ, 2017. Промислова теплотехніка, 2017. Т. 39, № 7. С. 57.

14. Нікітенко М.І., Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М., Сороковий Р.Я. Алгоритм чисельного визначення ізотерми адсорбції на базі інтегральної функції розподілу пор по розмірах. Зб. тез доп. Міжн. наук.-практ. конф. «Хімічна технологія та інженерія» Львів, Нац. університет «Львівська політехніка», 26–30 червня 2017 р., С. 62–63.

15. Давиденко Б.В., Сороковий Р.Я. Вплив сонячного випромінювання на тепловолісний стан огорожуючих конструкцій будівель. Збірник тез доповідей XV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання", Київ, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 84–85. http://ci.kpi.ua/METODA/15_teza_mizhnarodna.pdf

16. Сороковий Р.Я., Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М. Чисельний метод визначення ізотерми сорбції капілярно-пористих матеріалів. Теплофізика та теплоенергетика, 2019. Т. 41, № 5. С. 38. ISSN 2663-7235.

17. Sorokovoi R, Sorokova N, Kolchik Ju. Numerical method of determination of sorbtion isotherm capillary-porous materials. XI Int. Conf. «Problems of thermophysics and heat engineering» May 21-22, 2019. http://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/05/22_abst..pdf

18. Сорокова Н.М., Корінчук Д.М., Сороковий Р.Я. Математичне моделювання динаміки сушіння і термодеструкції торфу. Тези доп. XVIII міжн. наук. конф. «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв». Одеса 12-16 жовтня 2020, ОНАХТ. С. 26-29: <https://card-file.onaft.edu.ua/handle/123456789/16075>.

19. Natalia Sorokova, Julia Kolchik, Rodion Sorokovoi. Mathematical modeling of sorption and desorption dynamics in adsorption systems. 3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings. June 21–24th, 2021, Lviv,

Ukraine. Lviv Polytechnic National University. P. 51-55. <http://cte.org.ua/3rd-chemical-technology-engineering-2021/proceedings>

20. Sorokova N.N., Kolchik Yu.N. Sorokoviy R. Y. Theoretical basis of continuous drying of dispersed materials. 4th Int. Sc. Conf. «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings June 26–29th, 2023, Lviv. Lviv Polytechnic Nat. University, p. 41–44.

21. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokoviy R. Air-thermal conditions of the rooms in the winter period of the year in the presence and absence of solar radiation. 2nd International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations” (October 4-6, 2024) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. P.65-70.

Статті, що додатково відображають наукові результати дисертації

22. Sorokova N.N., Snezhkin, Yu. F. Shapar R. A., Sorokoviy R. Mathematical Simulation and Optimization of the Continuous Drying of Thermolabile Materials. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2019, V.92, Issue 5, P.1180–1190. DOI 10.1007/s10891-019-02032-3. (автором проведена обробка результатів чисельних експериментів та аналіз їх результатів). (Scopus, Web of Science)

23. Сорокова Н.М., Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Сороковий Р.Я. Способ сушки термолабільних матеріалів в ленточній сушильній установці з використанням теплового насоса. Наукові праці ОНАХТ, 2015. Вип. 47. Т.2. С. 91 – 97. (автором проведена обробка результатів чисельних експериментів та аналіз їх результатів).

АНОТАЦІЯ

Сороковий Р.Я. Теплофізичне обґрунтування впливу сонячного випромінювання на формування тепловологісного стану будівель. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» (технічні науки). – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2025.

Дисертацію присвячено дослідженням впливу сонячного випромінювання на тепловологісний стан огорожувальних конструкцій та радіаційно-конвекційний теплообмін у приміщеннях будівель з метою зниження навантаження опалювальних приладів та покращення умов експлуатації будівель.

Проведено довготривалі експериментальні дослідження інтенсивності сумарного сонячного випромінювання на поверхні різної орієнтації, які показали, що в зимовий період року максимальна інтенсивність сонячної радіації має місце на вертикальній поверхні, зорієнтованій на південь, а в літній період – на горизонтальній поверхні. Виконано зіставлення одержаних експериментальних результатів з даними ASHRAE та встановлено їх задовільний збіг. Розроблено тривимірну нелінійну математичну модель тепловологоперенесення в стіновій конструкції, яка дозволяє враховувати вплив сонячної радіації, що змінюється упродовж доби, та опалювальних приладів на розподіл концентрацій рідкої і газової фаз. Встановлено, що внаслідок дії сонячного випромінювання температура зовнішньої поверхні стінки за від’ємної температури навколишнього середовища може підвищуватись на 10-12 °С, а вологовміст прилеглих до зовнішньої поверхні шарів зменшуватись вдвічі. Виявлено явище інверсії теплового потоку в товщі стінки, зумовлене підвищенням внаслідок дії сонячної радіації температури її зовнішньої поверхні відносно температури у внутрішніх

шарах. Одержано дані математичного моделювання тепловологісного режиму стінової конструкції з шаром зовнішнього утеплювача за умов дії сонячної радіації, які показали, що її вплив є найбільш суттєвим саме у шарі утеплювача, при цьому температура несучої стінки не знижується до від'ємних значень. Розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення рівноважного вологовмісту капілярно-пористих матеріалів, на базі якого отримано ізотерми сорбції будівельних матеріалів, що використані для замикання математичної моделі. Виконано порівняльний аналіз закономірностей течії повітря і теплообміну в опалювальних приміщеннях за наявності та відсутності впливу сонячного випромінювання. Виявлено, що при потраплянні сонячних променевих потоків у приміщення, поблизу протилежної вікну стінки спостерігається зміна напрямку руху повітря, підвищується температура внутрішніх поверхонь стінок на 16-18 °С, а температура повітря в приміщенні на 2...3 °С. Отримані результати свідчать, що в сонячні дні зимового періоду доцільно зменшувати потужність опалювальних приладів, що дозволить отримувати відчутний економічний ефект.

Ключові слова: інтенсивність сонячного випромінювання, процеси тепловолопереносу, огорожувальні конструкції, мікроклімат внутрішніх приміщень, капілярно-пористі матеріали, ізотерма сорбції, повітряно-температурний режим приміщення.

ANNOTATION

Sorokovyi R. Ya. Thermophysical Justification of the Influence of Solar Radiation on the Formation of the Thermal and Moisture State of Buildings. – A qualification research work in the form of a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.14.06 "Technical Thermophysics and Industrial Thermal Power Engineering" (technical sciences). – Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the study of the influence of solar radiation on the thermal and moisture state of enclosing structures and radiation-convective heat flows in the interior spaces of buildings, with the aim of reducing the load on heating devices and improving building operating conditions. Long-term experimental studies of the intensity of total solar radiation on surfaces of different orientations have been conducted, which have shown that in the winter period of the year the maximum intensity of solar radiation occurs on a south-oriented surface, and in the summer period - on a horizontal surface. A three-dimensional nonlinear mathematical model of heat and moisture transfer in a wall structure has been developed, which allows taking into account the influence of solar radiation and ambient temperature, which change throughout the day, and heating devices on the distribution of concentrations of the liquid and gas phases. It has been established that due to the action of solar energy, the temperature of the outer surface of the wall at negative ambient temperatures can increase by 10-12 °C; the phenomenon of heat flux inversion in the thickness of the wall was discovered, caused by an increase in the temperature of its outer surface due to the action of solar radiation relative to the temperature at the internal points of the wall. Data from mathematical modeling of the thermal and moisture regime of a wall structure with an external insulation layer under the action of solar radiation were obtained, which showed that the influence of solar energy is most significant precisely in the insulation layer, while the temperature of the load-bearing wall does not decrease to negative values and its

moisture content is determined by the relative humidity of the air in the room. A calculation method for determining the equilibrium moisture content in capillary-porous materials was developed, based on which sorption isotherms of building materials were obtained. A comparative analysis of the patterns of air flow and heat exchange in heated rooms with and without the influence of solar radiation was performed. It was found that when solar radiation flows into the room, near the wall opposite the window, a change in the direction of air movement is observed, the temperature of the inner walls increases by 16-18 °C, and the air temperature by 2...3 °C. The results obtained confirm that on sunny days in the winter period it is advisable to reduce the power of heating devices, which will allow obtaining a tangible economic effect.

Keywords: solar radiation intensity, heat and moisture transfer processes, enclosing structures, indoor microclimate, capillary-porous materials, sorption isotherm, indoor air-temperature regime.