

**Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»**

ЛИМАРЕНКО ОЛЕКСІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 536.422:622.691.2

**ТЕПЛОМАСООБМІН У ВЕНТИЛЬОВАНИХ ШАРАХ ОГороДЖУЮЧИХ
КОНСТРУКЦІЙ БУДИНКІВ І СПОРУД**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика
144 – теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі відновлюваної енергетики, енергоефективних споруд та інженерних мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, а також на кафедрі теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Павленко Анатолій Михайлович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри відновлюваної енергетики, енергоефективних споруд та інженерних мереж

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ганжа Антон Миколайович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій

кандидат технічних наук, доцент

Кравець Тарас Юрійович
Національний університет «Львівська політехніка»

доцент кафедри теплотехніки і теплових електричних станцій

Захист відбудеться «12» лютого 2021 року о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 79013, м. Львів, вул. Устияновича, 5, ауд. 51.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

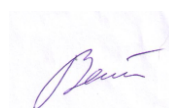
Автореферат розіслано «30» грудня 2020 року

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Д 35.052.04

к.т.н., доцент



Ю.З. Вашкурак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Житлово-комунальне господарство України (ЖКГ) споживає близько третини усіх паливно-енергетичних ресурсів країни. Важливим чинником, що визначає енергоефективність ЖКГ на всіх етапах ланцюга джерело-мережі-абонент, є енергогенеруючі установки комунальної енергетики. У житлово-комунальному господарстві України споживається 44% енергетичних ресурсів, що становить близько 30% загального споживання палива в Україні. Щорічно галузь споживає: електроенергії – 10,0 млрд. кВт·год, природного газу – 14,0 млрд. м³, вугілля – 1,5 млн.т. Значним вкладом до невиправдано великих втрат тепла у житлово-комунальній сфері є недосконалість існуючих будівельних конструкцій, а також практична відсутність індивідуальних засобів обліку та систем регулювання енергоспоживання. Протягом опалювального періоду внаслідок різниці між температурою внутрішнього повітря будинку і зовнішнього повітря відбуваються втрати тепла: трансмісійні – через зовнішні огороджуючі конструкції; пов'язані з повітрообміном – через підігрів до температури внутрішнього повітря холодного зовнішнього повітря, яке надходить через нещільності або відкриті вікна і двері.

Одним із шляхів підвищення енергоефективності ЖКХ та вирішення проблеми обігріву приміщень є будівництво «пасивних будинків», що складаються з відповідних енергетично обґрунтованих конструкцій.

Підвищення теплового захисту будівель і споруд є важливим завданням державного регулювання в більшості країн світу. Ці вимоги розглядаються також з точки зору охорони навколишнього середовища, раціонального використання невідновлюваних природних ресурсів і зменшення впливу «парникового» ефекту, а також інших шкідливих речовин на атмосферу.

Ці норми стосуються частини загального завдання енергозбереження в спорудах. Одночасно із створенням ефективного теплового захисту вживаються заходи щодо підвищення ефективності інженерного обладнання споруд, зниження втрат енергії при її виробленні й транспортуванні, а також щодо скорочення витрат теплової та електричної енергії.

Вирішення зазначеної проблеми може бути удосконалення та розробка шляхом теоретичного й експериментального обґрунтування оптимальних огороджуючих конструкцій будинків.

Отже, суттєве підвищення енергоефективності будинків і споруд є одним із першочергових завдань для дослідників. Тому, дисертаційну роботу присвячено розробці й детальному науковому обґрунтуванню конструктивних та енергетичних параметрів огороджуючих конструкцій будівель і споруд.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Напрямок, мета, та результати дослідження відповідають Державній програмі України наукового напрямку 04.06 – «Екологічно чиста енергетика і ресурсозберігаючі технології», плану заходів на 2010 – 2030 рр. з реалізації «Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», затвердженому розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071-р від 24.07.2013.

Робота виконувалась у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка на кафедрі теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики, де формувалися напрями досліджень та основні результати, отримані на кафедрі відновлюваної енергетики, енергоефективних споруд та інженерних мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також відповідні розроблені методики розрахунків автор отримав при виконанні науково-дослідних держбюджетних робіт МОН України за темами: № Д-13-17-П «Розробка нових методів оцінювання технічного стану металоконструкцій довготривалої експлуатації з використанням засобів фізичної мезомеханіки» (ІФНТУНГ); роботи 8-1Д/2017 «Формування теплофізичних властивостей елементів конструкції теплового захисту енергетичного обладнання шляхом створення прогнозованих пористих структур для промисловості України» (номер державної реєстрації 0117U006455).

Результати дисертаційної роботи використовувалися також при виконанні досліджень згідно з госпдоговірними роботами: ПП МЕТАН; ОКВПТГВ «Миргородтеплоенерго» з сумарним економічним ефектом 116584 грн на рік; № 01-16 з European academy of education and science: «Створення теоретичних основ формування пористої структури на основі мінералізованої сировини», м. Полтава, де здобувач був відповідальним виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в створенні наукового підґрунтя для аналізу теплообмінних процесів в повітряних каналах, на прикладі вентиляційних огорожуючих конструкцій, пасивних будинків, шляхом визначення, дослідження і обґрунтування основних характеристик енергообміну в цих конструкціях.

Відповідно до зазначеної мети дисертаційна робота містить постановку і розв'язання таких основних задач:

- проаналізувати сучасний стан і тенденції зміни конструктивних рішень вентиляційних каналів огорожуючих конструкцій ВОК пасивних будинків;
- розробити математичні моделі процесу теплообміну у ВОК та методики визначення їх основних енергетичних та конструктивних параметрів;
- розробити фізичну модель й експериментально дослідити процес енергообміну у ВОК;

- провести комплекс експериментальних досліджень тепломасообмінних процесів для встановлення раціональних параметрів, покладених в основу моделювання ВОК, що можуть бути використані для енергетичного захисту будівель та в якості повітряних теплообмінників;

- розробити рекомендації раціонального використання теплообмінних ВОК для систем енергозабезпечення пасивних будинків.

Об’єкт дослідження – технологія теплового захисту будівель і споруд.

Предмет дослідження – процесів теплообміну у вентильованих повітряних прошарках.

Методи дослідження Методи дослідження включають сучасні експериментальні й розрахункові методики, що базуються на оптимальному математичному плануванні експериментів, математичному моделюванні гідродинамічних і тепломасообмінних процесів, які відбуваються у ВОК. Фізичне моделювання реалізоване шляхом створення спеціального лабораторного стенду на кафедрі відновлюваної енергетики, енергоефективних споруд та інженерних мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, та на філії кафедри (підприємство Івано-Франківськ-цемент) та в Технолічному університеті м. Кельце (Польща). Дослідження теплопровідності конструкцій виконувалися в кліматичній камері кафедри Будівельної фізики та відновлюваної енергетики Келецького технологічного університету (Польща) згідно Угоди №03/16. Усі експериментальні дослідження виконані з використанням повірених приладів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- уперше експериментально досліджено процеси теплообміну у вентильованих каналах з урахуванням конструктивних особливостей ВОК: довжини, ширини, товщини каналу і зовнішніх температур, теплових потоків, вологості, що дозволило визначити раціональні геометричні параметри каналів в залежності від наведених факторів;

- уперше експериментально досліджено вплив зовнішніх кліматичних факторів на теплову інерційність будинку при використанні вертикальних ВОК, що дозволило отримати узагальнені рівняння для оцінки теплового балансу будинку та розробити методику регулювання системи енергопостачання;

- отримали подальший розвиток теоретичні й технологічні основи теплового захисту будівель і споруд, на основі яких установлені раціональні конструктивні параметри ВОК, а саме розміри, вплив вологи на інтенсивність теплообміну та теплові втрати через огорожуючі конструкції;

- удосконалені методи аналізу, розрахунку й інтенсифікації теплообміну у вентильованих повітряних каналах, що дозволило розробити технологічні прийоми використання теплової енергії в системах теплового захисту будівель і споруд.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблена експериментальна методика аналізу енергообміну у ВОК;
- розроблена технологія теплового захисту будівель;
- використання результатів дисертаційних досліджень у промислових умовах

ТОВ «Миргородтеплоенерго» та ПП МЕТАН (м. Миргород) дозволило скоротити витрати на тепловий захист будівель на суму навчальний процес при викладанні дисципліни «Тепломасообмінні процеси і установки» за напрямом 1106584 гривень на рік;

- результати досліджень упроваджені в підготовку фахівців за напрямом «Теплогазопостачання та вентиляція» ІФНТУНГ;

- комплекс лабораторного обладнання використовується для проведення наукових досліджень під час виконання держбюджетних НДР МОН України «Формування теплофізичних властивостей елементів конструкції теплового захисту енергетичного обладнання шляхом створення прогнозованих пористих структур для промисловості України» ДР № 0113U00857 та роботи № Д-13-17-П «Розробка нових методів оцінювання технічного стану металоконструкцій довготривалої експлуатації з використанням засобів фізичної мезомеханіки».

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати, викладені в дисертації, отримані автором самостійно.

Автору належить аналіз стану проблеми, розробка й обґрунтування основних наукових положень дисертації у постановці та вирішенні завдань теоретичного та практичного характеру, виконання експериментальних досліджень та впровадження отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на розширених міжкафедральних семінарах на кафедрі відновлюваної енергетики, енергоефективних споруд та інженерних мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та на кафедрі теплотехніки та енергоефективних технологій Харківського національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Отримані наукові результати доповідались на міжнародних конференціях: I - Konferencja Naukowo-techniczna «Aktualne zagadnienia energetyki, budownictwa i inżynierii środowiska» (27-29 01. 2016 r., Koszalin (Polska); II - Międzynarodowa Konferencja Naukowo-techniczna «Aktualne zagadnienia energetyki, budownictwa i inżynierii środowiska» (23-25 listopada 2017 r., Kielce); International Conference “Problem of energy saving and nature use” (2014, Budapest); Міжнародна наукова конференція «Використання теплових насосів для отримання тепла і холоду» (2014, Умань); International Conference «Actual tasks of Energy and Construction and Engineering» (2016, Oradea, Romania).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 6 наукових праць, у тому числі: 1 статті у виданнях, що входять до наукометричних баз даних (1 Scopus), 4 статті у наукових фахових виданнях України, 1 – у зарубіжних виданнях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 128 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 161 сторінок, зокрема 136 сторінок основного тексту, 61 рисуноків, 18 таблиць, 1 додатку.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено предмет і об'єкт дослідження, наведено положення, що визначають наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, відзначено особистий внесок здобувача й апробацію результатів дисертації.

У першому розділі виконувався аналіз науково-технічних робіт, що присвячені технологіям теплового захисту будівель та споруд. Розрахунковим методом проаналізовано ефективність відкритих (вентильованих) огорожуючих конструкцій (ВОК) та можливість їх використання для керування теплопостачанням в пасивних системах опалення.

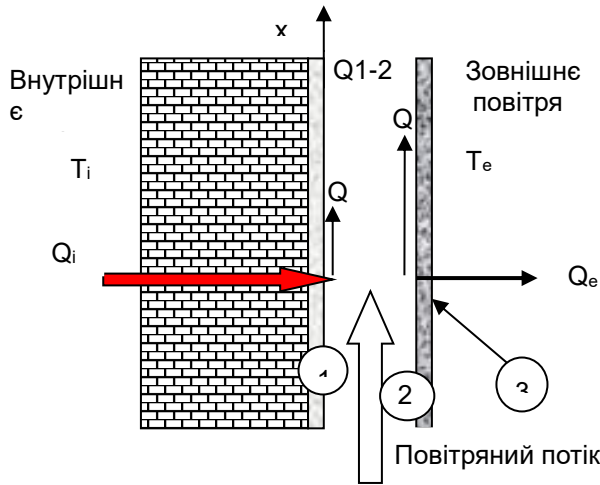
Досить глибокий аналіз і розуміння процесів теплообміну, що відбуваються у ВОК дозволить скоротити втрати тепла через конструктивні елементи будинку в холодний період року, а також зменшити надходження тепла в теплий період. Для того, щоб виконати додаткові дослідження, які мають на меті зменшення витрат на формування відповідного мікроклімату в приміщеннях, проаналізовано існуючі методики розрахунку та проектування ВОК, а також фізичні та математичні моделі теплообміну, які використовуються у цих методиках.

На основі проведеного аналізу літературних джерел можна стверджувати, що класична методика оцінки теплообмінних процесів у ВОК базується на рівняннях теплового балансу повітря для нескінченно малого об'єму dx . При використанні цього рівняння неможливо врахувати розподіл променевого та конвективного потоків тепла, а також оцінити вплив втрат енергії. Для створення коректної математичної моделі необхідно дослідити експериментально процеси теплообміну повітря у вентильованих каналах та на цьому підґрунті створити відповідні рівняння, які б уточнювали математичну модель.

На основі аналізу наукових розробок сформульовано напрямки та задачі подальших досліджень.

У другому розділі дисертаційної роботи присвячено математичному моделюванню процесів теплообміну у ВОК в холодний період року для

непрозорої вертикальної огорожуючої конструкції з відкритим каналом, схема якої наведена на рис.1.



В холодний період року тепловий потік Q_i направлений з приміщення на зовні. Тепловий потік нагріває внутрішню 1 ВОК. Нагріта внутрішня поверхня в результаті конвективного теплообміну віддає тепло повітря, яке рухається біля неї. Вона також випромінює тепло до поверхні 2 (Q_{1-2}).

Оскільки у ВОК рухається зовнішнє повітря, яке має нижчу температуру порівняно з температурами поверхонь, то воно буде нагріватися і біля внутрішньої і біля зовнішньої

Рис.1. Схема розподілу теплового потоку у вертикальній ВОК

Таким чином, теплове випромінювання, яке надходить до зовнішньої поверхні, частково використовується на нагрівання повітря у каналі, і частково виходить до зовнішнього середовища Q_e . Аналогічно виглядає фізична модель процесу теплообміну для горизонтальної конструкції.

При формулюванні математичної моделі вважаємо, що температура поверхонь 1 та 2 залежить від координати x .

Математична модель теплообміну у ВОК включає наступні рівняння:

- рівняння теплового балансу поверхні 1

$$k_1(T_i - T_1(x))dx = \varepsilon_{1-2}c_0 \left[\left(\frac{T_1(x) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 \right] dx + hc_1(T_1(x) - T_{a_1}(x))dx, \quad (1)$$

- рівняння теплового балансу поверхні 2

$$\varepsilon_{1-2}c_0 \left[\left(\frac{T_1(x) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 \right] dx = hc_2(T_2(x) - T_{a_2}(x))dx + k_2(T_2(x) - T_e)dx. \quad (2)$$

Третім рівнянням, що доповнює рівняння теплових балансів, є рівняння руху повітря у каналі ВОК:

$$\left(\sum \zeta + \lambda_f \frac{h}{D_h} \right) \frac{v_m^2}{2} \rho_m = (n_1 - n_2) \frac{v_w^2}{2} \rho_e + Hg(\rho_e - \rho_m). \quad (3)$$

Для горизонтальної конструкції

$$\left(\sum \zeta + \lambda_f \frac{h}{D_h} \right) \frac{v_m^2}{2} \rho_m = (n_1 - n_2) \frac{v_w^2}{2} \rho_e. \quad (4)$$

В наведених рівняннях прийняті наступні позначення:

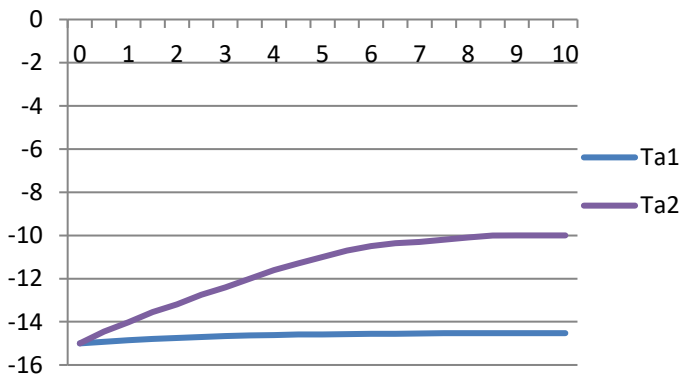
$\sum \zeta$ – сума місцевих опорів; λ_f – коефіцієнт опору ($\lambda_f = f(Re)$); h – товщина повітряного шару; H – відстань між отворами для входу та виходу повітря; D_h – середня ширина повітряного шару; v_w – швидкість вітру; ρ_m – середня густина повітря у ВОК; ρ_e – густина зовнішнього повітря; g – прискорення; n_1, n_2 – аеродинамічні коефіцієнти на вході і на виході каналу; v_m – середня швидкість повітря.

Якщо вхідний і вихідний отвори для повітря за розмірами відрізняються від перетину повітряного каналу, то місцеві втрати тиску в отворах необхідно віднести до швидкості в отворі v_0 . в такому разі до лівої частини рівнянь (3) та (4) необхідно додати місцеві втрати тиску в отворах

$$P_{otv} = \sum \zeta_0 \frac{v_0^2}{2} \rho_0,$$

де $\sum \zeta_0$ – сума втрат тиску в отворах; v_0 – швидкість повітря в отворі.

Розрахунки виконувалися за допомогою програми MachCAD.



Математична модель опису процес теплообміну і рух повітря з урахуванням того, що температура внутрішньої та зовнішньої поверхні каналу змінюється у напрямку руху повітря і можна її розрахувати при розв'язанні рівнянь.

Залежність температури від довжини каналу для поверхонь 1 і 2 показано на рис.2.

Рис. 2. Зміна температури повітря по довжині каналу

У третьому розділі досліджувалися процеси теплообміну у вентилятованих ВОК у теплий період року та розроблено відповідну математичну модель (5). Перше, друге і третє рівняння системи (5) характеризують теплові баланси поверхонь 1, 2 та 3 (див. рис. 1). Четверте і п'яте рівняння (5) описують теплові баланси повітря. Математична модель (5) застосовується для умов, коли температура зовнішньої поверхні ВОК вище, ніж температура зовнішнього повітря. Якщо сонячне випромінювання не потрапляє на зовнішню поверхню ВОК, то тепло у приміщенні буде надходити тільки від зовнішнього повітря.

На рис. 3 показано графіки розподілу температур поверхонь та повітря, розраховані за допомогою рівнянь (5). В системах пасивного опалювання часто використовують прозорі зовнішні вентилятовані огорожуючі конструкції будівель. Фізична модель процесу теплообміну в такій системі представлена на рис. 4.

$$\left\{ \begin{aligned}
 \alpha_p Q_{solar} - \alpha_e (T_1(x) - T_e) dx \cdot 1 &= \varepsilon_1 c_0 \left[\left(\frac{T_1(x) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{surr} + 273}{100} \right)^4 \right] dx \cdot 1 + \\
 &+ \frac{T_1(x) - T_2(x)}{R_1} dx \cdot 1, \\
 \frac{T_1(x) - T_2(x)}{R_1} dx \cdot 1 &= \varepsilon_2 c_0 \left[\left(\frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3(x) + 273}{100} \right)^4 \right] dx \cdot 1 + \\
 &+ hc_2 (T_2(x) - Ta_2(x)) dx \cdot 1, \\
 k_3 (T_3(x) - T_i) dx \cdot 1 &= \varepsilon_{2-3} c_0 \left[\left(\frac{T_2(x) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3(x) + 273}{100} \right)^4 \right] dx \cdot 1 - \\
 &- hc_3 (T_3(x) - Ta_3(x)) dx \cdot 1, \\
 cG_2 dTa_2(x) &= hc_2 (T_2(x) - Ta_2(x)) dx \cdot 1, \\
 hc_3 (T_3(x) - Ta_3(x)) dx \cdot 1 &= cG_3 dTa_3(x), \\
 \left(\sum \zeta + \lambda_f \frac{h}{D_h} \right) \frac{v_m^2}{2} \rho_m &= (n_1 - n_2) \frac{v_w^2}{2} \rho_e + Hg(\rho_e - \rho_m).
 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

де R_1 – тепловий опір зовнішньої частини вентилязованого фасаду.

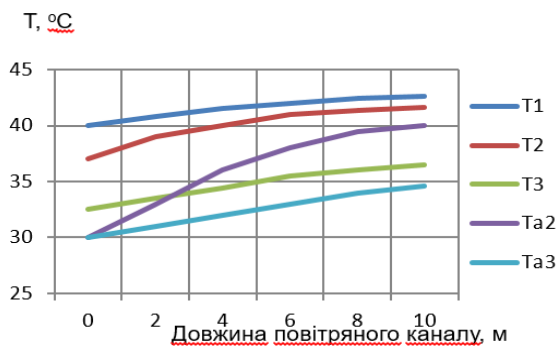


Рис.3. Графіки розподілу температур поверхонь ВОК та повітря в каналі

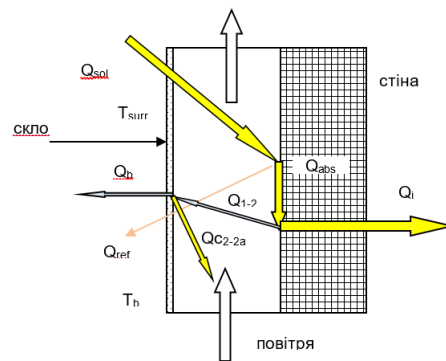
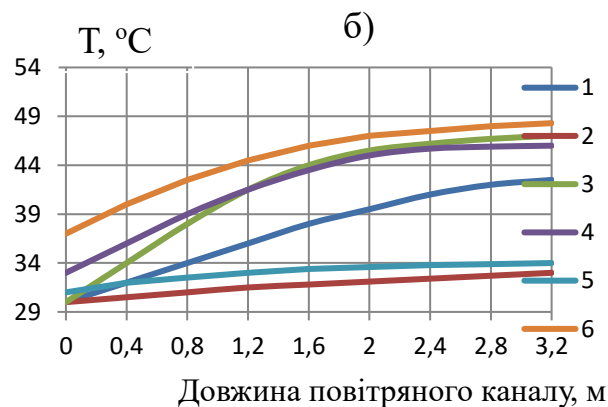
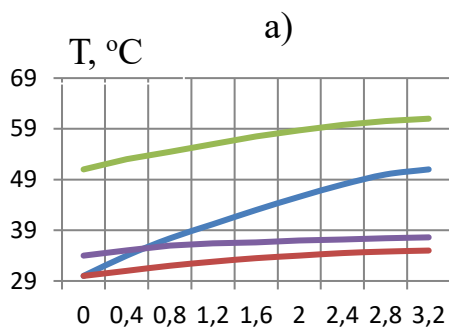


Рис. 4. Схема розподілу теплових потоків у прозорій ВОК

Оскільки прозорі конструкції пропускають сонячне випромінювання, то потік Q_{solar} передається до зовнішньої поверхні масивної стіни. Частина цього потоку поглинається масивною стіною (Q_{abs}) і частково відбивається від поверхні (Q_{ref}). Біля поверхні стіни відбувається конвективний теплообмін між поверхнею і повітрям (Q_{C1-a1}). Через масивну стіну частина тепла Q_i передається теплопровідністю. Оскільки скло не є прозорим для випромінювання довгих хвиль, то воно буде поглинати частину випромінювання Q_{1-2} , в результаті температура скла буде підвищуватися. Біля поверхні скла також відбувається конвективний теплообмін (Q_{C2-a2}). Зовнішня поверхня віддає тепло до зовнішнього середовища (Q_b).

В даному розділі розглянуто різні схеми ВОК та математичні моделі, що враховують відповідні конструктивні особливості (для ВОК з розміщеною всередині повітряного каналу сонцезахисною заслінкою, а також для непрозорої ВОК). Результати розрахунків наведені на рис.5.



Довжина повітряного каналу, м

Довжина повітряного каналу, м

Рис. 5. Розрахункові графіки:

а) для схеми рис. 4; б) – у разі розміщення заслінки; 1- температура повітря біля масивної стіни; 2 – температура повітря біля скляної стіни;

3 – температура поверхні стіни; 4 – температура поверхні стіни; 5 – температура скла; 6 – температура заслінки

Запропоновані математичні моделі можна використовувати для розрахунків ВОК для випадків поєднання повітряного каналу як з зовнішнім, так і з внутрішнім повітрям (у приміщенні).

У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень, метою яких було порівняння емпіричних даних з розрахунковими та формування рівнянь граничних умов для запропонованих математичних моделей. Експериментальні дані процесу теплообміну в непрозорих ВОК отримано в результаті реалізації дослідів на реальному об'єкті.

Конструкція ВОК складалася з металевого даху, дерев'яних строп, шару утеплення. Металевий дах являв собою практично безінерційну частину конструкції. Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 6.

На рисунку нанесено точки, які отримані в результаті розрахунків за допомогою математичної моделі:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 k_1(T_i - T_1(x))dx \cdot b = \varphi_{1-2}\varepsilon_{1-2}c_0 \left[\left(\frac{T_1(x)+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(x)+273}{100} \right)^4 \right] dx \cdot b - \\
 \quad - 2\varphi_{3-1}\varepsilon_{3-1}c_0 \left[\left(\frac{T_3(x)+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1(x)+273}{100} \right)^4 \right] dx \cdot a + \\
 \quad + hc_1(T_1(x) - T_a(x))dx \cdot b, \\
 k_2(T_2(x) - T_e)dx \cdot b = \varphi_{1-2}\varepsilon_{1-2}c_0 \left[\left(\frac{T_1(x)+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(x)+273}{100} \right)^4 \right] dx \cdot b + \\
 \quad + 2\varphi_{3-2}\varepsilon_{3-2}c_0 \left[\left(\frac{T_3(x)+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(x)+273}{100} \right)^4 \right] dx \cdot a + \\
 \quad + hc_2(T_a(x) - T_2(x))dx \cdot b, \\
 k_3(T_{attic} - T_3(x))dx \cdot a = \varphi_{3-1}\varepsilon_{3-1}c_0 \left[\left(\frac{T_3(x)+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1(x)+273}{100} \right)^4 \right] dx \cdot a + \\
 \quad + \varphi_{3-2}\varepsilon_{3-2}c_0 \left[\left(\frac{T_3(x)+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(x)+273}{100} \right)^4 \right] dx \cdot a + \\
 \quad + hc_3(T_a(x) - T_3(x))dx \cdot a, \\
 cGdT_a(x) = hc_1(T_1(x) - T_a(x))dx \cdot b - hc_2(T_a(x) - T_2(x))dx \cdot b + \\
 \quad + 2hc_3(T_a(x) - T_3(x))dx \cdot a
 \end{array} \right. \quad (6)$$

Аналізуючи дані, що представлені на рис. 6 можна зробити висновок про те, що математична модель дає достатню точність розрахунку процесів теплообміну у ВОК для холодного періоду року у разі, якщо дах є безінерційним. Для теплого періоду року отримано також задовільну збіжність розрахункових та емпіричних даних як для горизонтальної, так і для вертикальної ВОК.

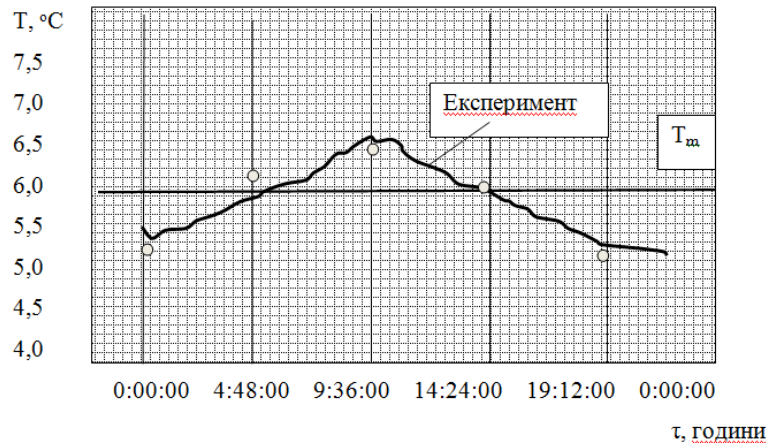


Рис. 6. Середня температура повітря на даху: o- розрахунок

Тепломасообмін у вертикальних ВОК досліджувався у кліматичній камері кафедри будівельної фізики та відновлюваної енергії Келецького технологічного університету згідно з умовою про стажування автора. Дослідна схема представлена на рис. 7.

У частині № 1 створюються умови навколишнього середовища (температура датчик 6, вологість, швидкість повітря, опади).

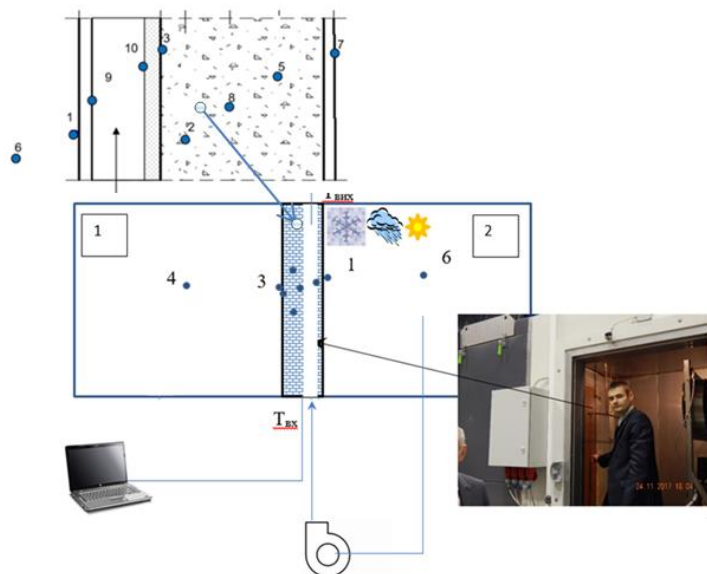


Рис.7. Дослідження ТМО у кліматичній камері: 1) - камера моделювання зовнішніх погодних умов; 2) – камера моделювання внутрішніх умов; 3) - фізична модель ВОК з датчиками

В частині №2 кліматичної камери відтворюються умови внутрішнього приміщення, фіксуються температура (датчик 4) та вологість повітря. Між камерами 1 та 2 у спеціальному вікні встановлюється два досліджувані фрагменти ВОК висотою 3000 мм, шириною 500 мм, товщиною 400 мм. Один з них виконаний без вентиляційного каналу (суцільним). Схеми розміщення датчиків однакові. В ході експериментів задавалися температури у камерах і вологість, швидкість руху

повітря у ВОК, контрольовані параметри – температури, що показували датчики № 1, 9, 10, 3, 2, 8, 5 та вологість. Основним елементом дослідного стенду був багатоточковий електронний реєструючий термометр AVT5330 з відповідним програмним забезпеченням для роботи у середовищі Windows. Це дозволило автоматизувати вимірювання в інтервалі часу від 2 секунд до 24 годин. До реєстратора може бути підключено орієнтовно до 8 датчиків температури DS18B20, кожен з яких підключений до реєстратора кабелем довжиною близько 2 м і ізольований термоусадочною оболонкою. Перед розміщенням в точці вимірювань датчики пройшли калібрування в спеціалізованій лабораторії. Датчики були розміщені всередині огорожжувальної конструкції в каналах діаметром 8 мм на фіксованій глибині (рис 7). Як приклад, наведено результати вимірів для доби, в яких падіння зовнішньої температури до $-2,0^{\circ}\text{C}$ було зареєстровано в 6:37:07 (рис. 8). На рисунку наведено вибрані графіки розподілу температури, що характеризують весь цикл вимірювань.

Із отриманих даних випливає, що температура в огорожжувальній конструкції ВОК на $1,5 - 2^{\circ}\text{C}$ вища, ніж у звичайній. Вологість зменшується суттєво. З наших досліджень на натурному об'єкті можна зробити висновок, що волога в зовнішніх невентильованих огорожжувальних конструкціях починає накопичуватись у середньому наприкінці року, тобто з початком холодного періоду – в листопаді чи грудні, за три-чотири місяці набуває максимального значення і потім конструкція починає сохнути. Проте визначення річного розподілу вологи огорожжувальної конструкції протягом року ще не дає відповіді на питання, як волога поводить себе у товщі шарів багат шарової конструкції.

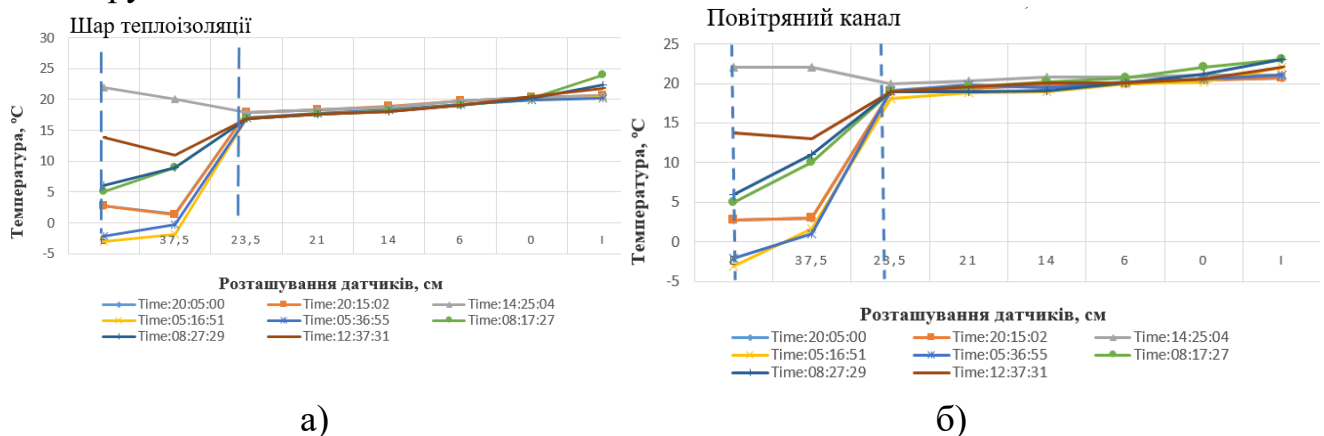


Рис. 8. Розподіл температури для обраних інтервалів вимірювань: а) в стіні без ВОК; б) в стіні з ВОК

ВОК суттєво впливають на розподіл вологи всередині стіни. При контакті повітря з холодною поверхнею каналу при певних умовах може відбуватися конденсація. Поверхневі шари каналу висушуються, проте волога може проникати в шари конструкції. Для порівняння на рис. 9 наведені

емпіричні дані розподілу вологи всередині стіни, де можна побачити, що у ВОК кількість вологи значно менша. Графіки свідчать про суттєве зменшення кількості вологи в огорожуючій конструкції при застосуванні ВОК. Температури стіни у цьому випадку будуть більшими, оскільки вологість стіни зменшується, зменшується також коефіцієнт теплопровідності.

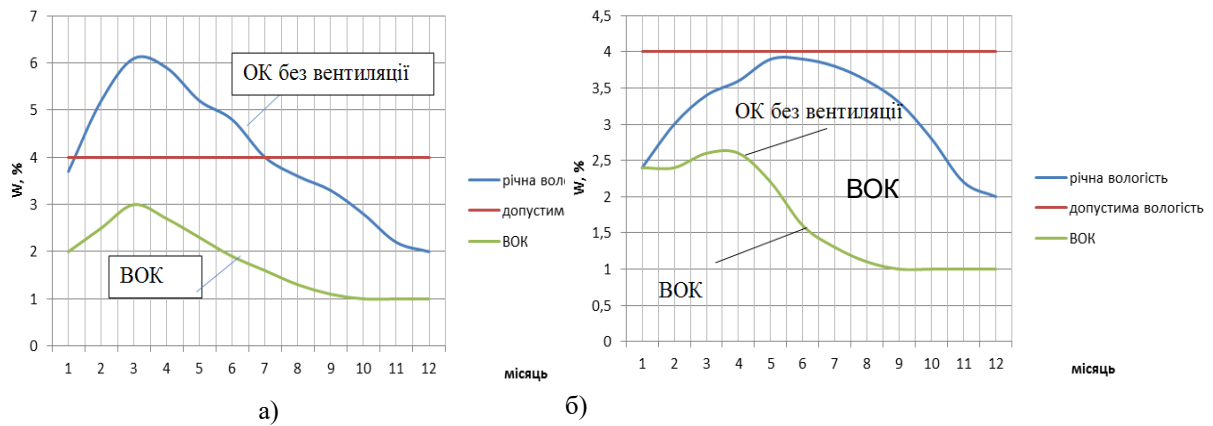


Рис. 9. Розподіл вологи всередині ВОК: а) без утеплення; б) з зовнішнім утепленням

Для розрахункового аналізу процесів теплообміну у вентилятованих повітряних каналах, а також для формування граничних умов математичних моделей на представленому вище стенді виконувалися дослідження із застосуванням метода планованого математичного експерименту.

У якості керуючих факторів прийняті: X_1 – Число Рейнольдса для повітря в каналі ВОК; X_2 – температура повітря на вході в канал за показниками датчика № 6; X_3 – температура внутрішнього повітря за показниками датчика №4. Для дослідів вибрано ортогональний композиційний план другого порядку.

Розрахунки виконувалися за допомогою програми Statgraphics Plus 5.0. Модель побудована на основі ортогонального факторного експерименту 2^3 з зірковими точками для трьох факторів.

Датчики температури встановлювалися на вході в канал вкінці зони змішування, за якою температура поверхні практично не змінювалася.

Рівняння для визначення температури поверхні в залежності від температури зовнішнього повітря, температури внутрішнього повітря та числа Рейнольдса виглядає наступним чином

$$T_1 = 17,74 - 3,82 \cdot X_1 + 18,97 \cdot X_2 + 6,52 \cdot X_3 + 6 \cdot X_1 X_2 - 3,5 \cdot X_1 X_3 - 4,9 \cdot X_2^2 - 4,5 \cdot X_2 X_3 \quad (7)$$

На рис. 10 показані парето-графік для досліджуємої залежності та графік залежності температури поверхні від факторів.

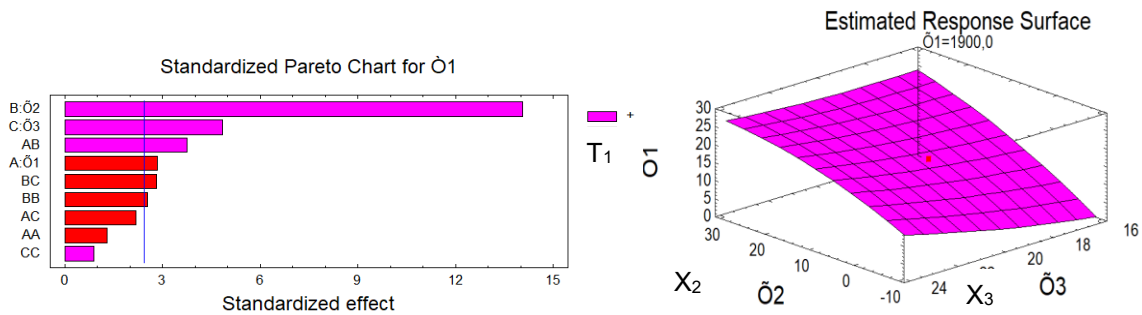


Рис. 10. Розрахункові графіки залежності температури поверхні від температури внутрішнього та зовнішнього повітря

Всі фактори впливу виявилися значимими. Як і очікувалося найбільший вплив має температура зовнішнього повітря, але при великих числах Рейнольдса. При малих значеннях Re всі фактори впливають на температуру майже однаково.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи виконувалася оцінка впливу різних факторів на процес теплообміну у ВОК. Дана задача розглядалася на прикладі існуючої ВОК за допомогою розробленої математичної моделі, що описує теплообмін для холодної пори року. Із отриманих у попередньому розділі результатів випливає, що інтенсивність теплообміну у ВОК можна оцінювати по керуючих факторах: числу Re , зовнішній та внутрішній температурах. Якщо у реальних умовах зовнішня температура не може бути керованою і залежить від кліматичних умов, а внутрішня визначається умовами комфорту у приміщеннях, то число Re можна змінювати шляхом керування швидкістю повітря у ВОК. Отримані експериментальні дані свідчать про те, що завдяки такому керуванню можна змінювати у бажаному напрямі розподіл температур в огорожуючій конструкції, а також її теплову інерційність. Ці ефекти дозволяють більш ефективно впроваджувати програмоване теплопостачання у будинки.

На рисунку 11 представлені графіки зміни теплового потоку, який разом з нагрітим повітрям втрачається у зовнішнє середовище (конвективний потік Q_a) в залежності від випромінювальної здатності ВОК і її ширини. Представлено також графіки зміни теплового потоку, який втрачається у навколишньому середовищі через теплопровідність Q_e і графіки сумарного теплового потоку $\Sigma Q = Q_a + Q_e$.

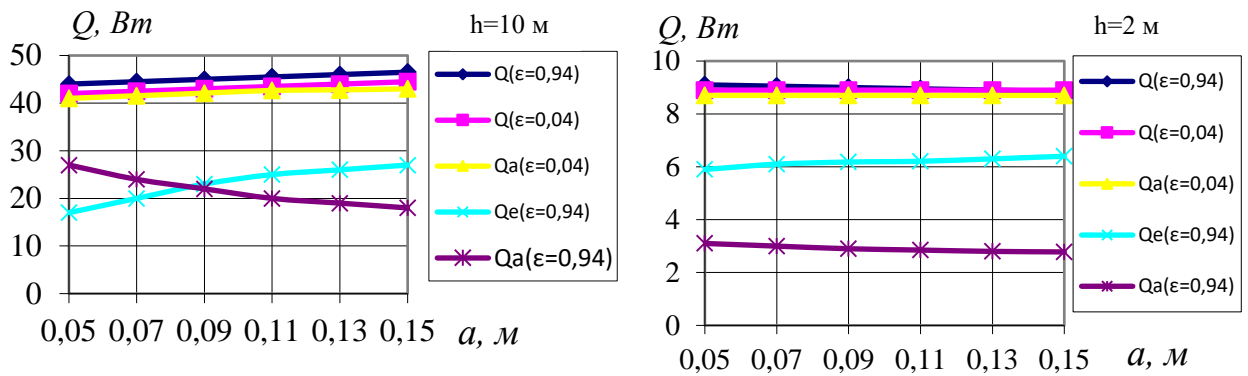


Рис. 11. Графіки зміни теплового потоку в залежності від випромінювальної здатності та довжини ВОК

Як випливає з графіків рис. 11, для довжини 10 м при низькій випромінювальній здатності поверхні ВОК втрачається практично все тепло, що надходить з приміщення, на нагрівання повітря, яке рухається у каналі ВОК. Тільки незначна кількість тепла (близько 5%) втрачається через фасад будівлі. Такий розподіл теплових потоків існує незалежно від товщини повітряного прошарку. При максимальній випромінювальній здатності поверхні ВОК розподіл теплових потоків змінюється:

- якщо товщина повітряного прошарку змінюється в межах від 0,03 м до 0,1 м, то конвективний тепловий потік перевищує потік тепла теплопровідністю;

- при ширині повітряного прошарку близько 0,1 м теплові потоки теплопровідністю і конвекцією будуть рівними;

- при товщині повітряного прошарку більше ніж 0,08 м витрати тепла на нагрівання повітря будуть зменшуватися, в той же час тепловий потік теплопровідністю збільшуватиметься;

- втрати тепла зменшуються при збільшенні довжини повітряного прошарку ВОК, а також при зменшенні товщини повітряного каналу і випромінювальної здатності поверхонь ВОК;

- густина теплового потоку збільшується при збільшенні товщини повітряного прошарку з 0,05 до 0,07 м; водночас при збільшенні товщини з 0,13 до 0,15 м зміна теплового потоку незначна;

- вплив довжини та ширини повітряного прошарку на густину теплового потоку збільшується при зменшенні випромінювальної здатності;

- вплив товщини повітряного прошарку на густину теплового потоку буде найбільшим при максимальній довжині.

На основі отриманих даних в п'ятому розділі розроблено рекомендації для зменшення надходження тепла через ВОК у теплий період року та втрат тепла у холодний період року. Всі ці напрацювання використані у новій методиці регулювання енергозабезпечення будинку в залежності від зовнішніх умов.

Дана методика була перевірена шляхом порівняльного аналізу результатів

розрахунків на основі математичної моделі з експериментальними результатами, виконаними для одного і того ж об'єкта. У досліджуваній будівлі був використаний метод регулювання часу роботи теплового вузла з метою зниження енергоспоживання для опалення. Також регулювалася швидкість руху повітря у ВОК (числа Re).

Для додаткової економії теплової енергії може бути використано регулювання центрального опалення. Ми можемо враховувати регулювання в залежності від погодних умов, тобто теплова потужність котла або теплового пункту буде залежати від зміни температури зовнішнього повітря і інтенсивності сонячного випромінювання. Проте можна адаптувати це корегування споживання тепла до рівня необхідного використання об'єктом теплової енергії в різні години доби. Це доцільно реалізувати в нежитлових будинках, де нерозумно тримати постійно однакову температуру, особливо вночі і в неробочі дні. Тому виникає проблема контролю умов теплового комфорту в залежності від зовнішньої температури, як домінуючого фактора впливу на кількість поданої на опалення теплової енергії.

Використання запропонованих у даній роботі науково обгрунтованих пропозицій суттєво підвищує теплову інерцію огорожуючих конструкцій, завдяки чому при вимкненні системи опалення будинок повільно охолоджується і нагрівається відносно швидко. Таким чином ми отримуємо заощадження, оскільки конструктивні елементи будівлі накопичують тепло. Суть оптимального регулювання температури полягає в тому, щоб контролювати подачу теплової енергії в приміщення в такий спосіб, щоб відповідна внутрішня температура повітря була досягнута протягом певного часу.

Об'єктом розрахунків є визначення динаміки змін внутрішньої температури в досліджуваному будинку, в якому застосовувалося двоступеневе регулювання часу експлуатації теплового пункту. Мета полягає у визначенні найнижчої досяжної температури всередині об'єкта і швидкості повернення температури до початкового значення з моменту етапу охолодження.

У п'ятому розділі викладено методіку регулювання та відповідні математичні залежності, що дозволяють визначити основні теплотехнічні показники ВОК та звичайної утепленої стіни для порівняння.

У реальних умовах відносна теплова потужність системи опалення під час нагрівання охолодженого об'єкту вище номінальної. Під час включення циркуляційних насосів спостерігається значний зріст теплової потужності ($J_{наг}=1,5$) внаслідок значної різниці температур води на подачі і на поверненні. Тому в запропонованій методиці було скориговане її значення для перших годин нагрівання приміщень до заданих умов. У наступні години підтримувався нормальний рівень відносної теплової потужності системи, $J_{наг} = 1$. Якщо порівнювати отримані результати для звичайної утепленої стіни та

ВОК, то нагрівання огороження з ВОК триватиме у двічі коротший час, або теплова потужність може бути зменшена.

На основі розрахунків створено діаграму (рис. 12) зміни внутрішньої температури в досліджуваному об'єкті.

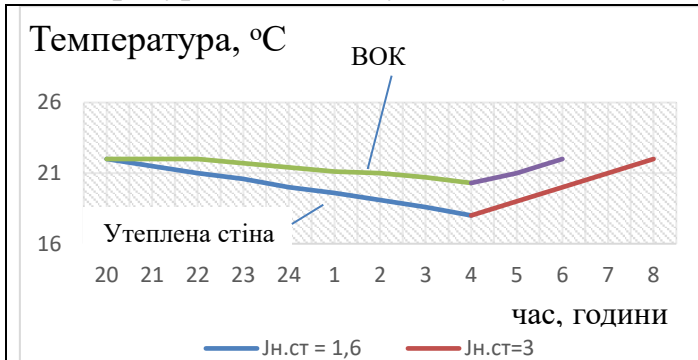


Рис. 12. Графік зміни температури у приміщенні

Для перевірки розрахункових даних у дослідженому приміщенні були встановлені датчики температури - термомпари, розміщені на висоті 1,5 м від підлоги і на відстані 0,15 м від внутрішніх стінок. Також встановлена тер-мопара посередині кімнати і одна зовні. Вимірювання проводили між

20:00 і 7:00. В обох експериментах о 13/14.01.20107 та 16/17.01.2017 тепловий вузол був повністю вимкнений (з 20:00 до 5:00), а потім включений у звичайному. У першому експерименті середня температура становила - 4 ° С, у другому 2 ° С. Результати вимірювань температури (для прикладу)представлені на рис. 13 для експерименту I.

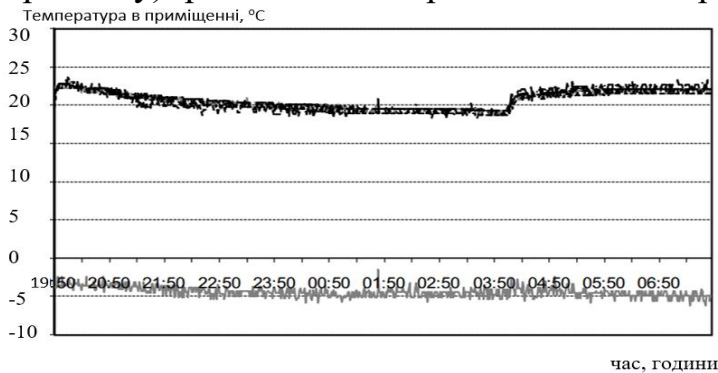


Рис.13. Результати вимірювань температури : — зовнішня температура — внутрішня температура

Розрахунки, виконані за новою методикою, порівнювали (рис. 14) з результатами двох серій наведеного вище експерименту.

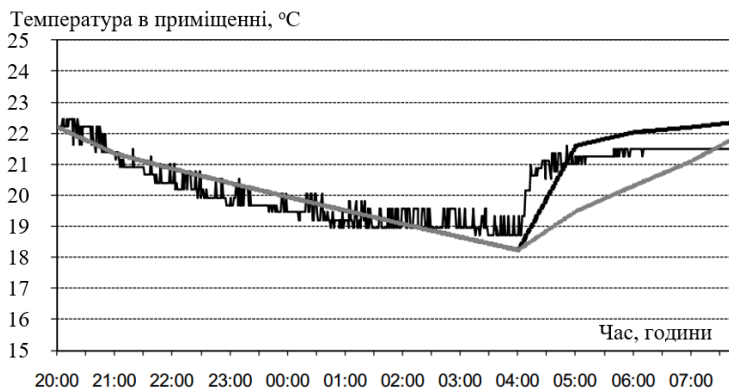


Рис.14. Порівняння розрахункових та експериментальних даних: — експеримент; — розрахунок за новою методикою; — збільшення потужності при пуску теплового вузла

Розроблена методика описує зміну температури в приміщенні досліджуваного об'єкта та спрямована на визначення найнижчого досяжного рівня температур і

швидкості повернення до початкових теплових умов. Звичайно, методика враховує зміну теплової інерції будинку у разі використання ВОК та зміну зовнішніх кліматичних умов.

Модель з постійною відносною тепловою потужністю теплового пункту, як і модель з початковим надлишком потужності дають гарне співпадіння результатів з експериментальними даними. Перша визначає повільне підвищення температури повітря. Друга – встановлює тепловий режим нагрівальної установки вищій номінального для швидкого підвищення температури всередині досліджуваного приміщення.

У додатку наведено відомості щодо актів впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу існуючих теорій і методів розрахунків процесів теплообміну у повітряних прошарках огорожуючих конструкцій показано відсутність цілісного підходу до аналізу теплообмінних процесів у повітряних каналах, при цьому аналіз цих процесів у ВОК взагалі не розглядався. У зв'язку з цим розроблені методологія оцінки теплообмінних процесів, яка включає аналіз теплових потоків у запропонованих ВОК різних конструкцій та рекомендації до теплового захисту будинків і споруд.

2. Проведено комплекс експериментальних досліджень для встановлення розподілу температур в повітряних каналах при різних числах Re та зовнішніх температурах, що дозволило отримати рівняння для визначення температур поверхні повітряних каналів різних конфігурацій та сформулювати граничні умови, що покладені в основу математичного моделювання процесів теплообміну у ВОК. Нові математичні моделі, на відміну від існуючих, що створені для замкнених невентильованих каналів, враховують розподілення температур стінок каналів в залежності від числа Рейнольдса для повітря та рух повітря в каналі.

3. Розроблено фізичну модель й експериментально досліджені процеси енергообміну у ВОК в залежності від числа Рейнольдса та зовнішніх температур, що дозволило визначити раціональні конструкції вентильованих каналів, їх розміри $3,2 \times 3,6 \times 0,07$ м, вплив вологи на інтенсивність теплообміну та теплові втрати конструкції. Розрахунки свідчать, що до приміщення потрапляє 21 Вт тепла. Без використання ВОК у приміщення надходило б 293 Вт, тобто у 15 разів більше тепла. Фізична модель дозволяє змінювати значення Re від 200 до 3600, температуру повітря на вході в канал від -18 °С. Встановлено, що використання ВОК дозволяє підвищувати при таких режимах руху повітря температуру повітря до $2,5-3$ °С на 5 метрах каналу.

4. Розроблені математичні моделі процесу теплообміну в ВОК, які на відміну від існуючих враховують рух повітря, зміну температур поверхні ВОК,

надходження тепла випромінюванням та втрати тепла, розроблено методики визначення основних конструктивних параметрів каналів.

Із отриманих даних випливає, що температура в огорожуючих конструкцій ВОК на 1,5 - 2 °С вища, ніж у звичайній. Але вологість зменшується суттєво.

Встановлено експериментальним та розрахунковим шляхом за допомогою математичних моделей залежності температур повітря та стінок каналу від швидкості руху повітря в ВОК. Використання ВОК в огорожуючих конструкціях дозволяє скоротити втрати тепла на 50%, у порівнянні з закритими каналами, та на 30% у порівнянні з використанням ізольованих усередині конструкцій стін.

5. Виконані дослідження були основою для створення перспективних технологій теплового захисту будівель. А саме для зменшення втрат тепла через дах взимку (математична модель ТО у горизонтальному каналі при малих швидкостях руху повітря); зменшення надходжень теплоти влітку (математична модель ТО у горизонтальному каналі при малих швидкостях руху повітря); використання нагрітого повітря взимку для теплового насосу (математична модель ТО у вертикальній ВОК); використання охолодженого у ґрунтовому теплообміннику повітря для охолодження стіни насосу (математична модель ТО у вертикальній ВОК).

Використання нагрітого повітря для повітряних теплових насосів, що можуть бути встановлені, наприклад, на даху дозволить суттєво підвищити COP насосу до 8 при середніх гарантованих значеннях 4,5.

Застосування яких дозволило отримати економічний ефект у розмірі 1106584 грн. на рік, що підтверджується відповідними актами про використання результатів дисертаційної роботи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лимаренко О.М. Вплив вентильованих огорожуючих конструкцій на регулювання енергозабезпечення будинку / О.М. Лимаренко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: 2019. – № 2. – С. 27 – 30.

2. Лимаренко О.М. Моделювання процесів теплообміну у вентильованих огорожуючих конструкціях в стаціонарних умовах / О.М. Лимаренко // Технологический аудит и резерви производства. – Харків: 2017. – № 8. – С. 42 – 57.

3. Лимаренко О.М. Моделювання процесів теплообміну у вентильованих огорожуючих конструкціях для теплої пори року / О.М. Лимаренко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: 2018. – № 3. – С. 29 – 37.

4. Лимаренко О.М. Експериментальні дослідження процесів теплообміну

у вертикальних вентиляваних каналах / О.М. Лимаренко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: 2019. – № 3. – С. 37 – 30.

5. Lymarenko, O. Development of nontraditional renewable energy sources in Ukraine / Lymarenko, // Problem of energy saving and nature use – Budapest . 2014. – С.42 – 46.

6. Lymarenko O. Modeling of the process of microclimate formation / O. Lymarenko // Journal of New Technologies in Environmental Science. – 2017. – № 3. – P. 120-124.

АНОТАЦІЯ

Лимаренко О.М. ТЕПЛОМАСООБМІН У ВЕНТИЛЬОВАНИХ ШАРАХ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДИНКІВ І СПОРУД. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2021.

Дисертація присвячена теоретичному та експериментальному дослідженню процесів тепломасообміну, що відбуваються в огороджуючих конструкціях будинків та споруд, а саме: дослідженню процесів нагрівання, елементів вентиляваних каналів; визначенню втрат тепла в цих елементах; обґрунтуванню вибору способу теплового захисту огороджуючих конструкцій; розробці математичних моделей процесу теплообміну та методики визначення основних технологічних параметрів; розробці перспективних технологій теплового захисту будівель та енергетичного обладнання; розробці комплексної методики теплового захисту та енергозберігання будинків і споруд.

Експериментально досліджені процеси теплообміну та вологопроникнення в різних огороджуючих конструкціях, як в натурних об'єктах, так і на спеціально створених лабораторних стендах. Розроблена експериментальна установка, яка дозволила визначити основні закономірності теплопередачі у вертикальних вентиляваних каналах, на основі яких отримані дані, що дозволяють здійснити оцінку теплообмінних характеристик цих каналів, необхідних для технологічних розрахунків. Створена комплексна математична модель тепловологісного режиму будівлі, а також методика керування енергозабезпеченням будинків, що дає можливість визначити основні енергетичні характеристики.

Ключові слова: тепломасообмін, математичне моделювання, тепловологісний режим будівель, керування енергозабезпеченням будинків, енергоощадність.

ABSTRACT**Lymarenko O.M. HEAT AND MASS TRANSFER IN VENTILATED LAYERS OF PROTECTIVE STRUCTURES OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. - As a manuscript.**

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.14.06 - technical thermophysics and industrial power engineering. - National University "Lviv Polytechnic", Lviv, 2021.

The thesis is devoted to theoretical and experimental research of heat and mass transfer processes occurring in the protective structures of buildings and constructions, namely: the study of heating processes, elements of ventilated channels; determination of heat loss in these elements; justification of the choice of the method of thermal protection of enclosing structures; development of mathematical models of the heat transfer process and methods for determining the basic technological parameters; development of promising technologies for thermal protection of buildings and power equipment; the development of an integrated method of thermal protection and energy saving of buildings and structures.

The processes of heat transfer and moisture penetration in various enclosing structures, both in real locations and specially created laboratory stands, have been experimentally studied. An experimental facility has been developed, which allowed defining the basic laws of heat transfer in vertical ventilated channels, on the basis of which data were obtained that allowed assessment of the heat transfer characteristics of these channels, necessary for technological calculations. A complex mathematical model of the heat-moisture regime of the building was created, as well as the method of managing the energy supply of houses, which makes it possible to determine the main energy characteristics.

Keywords: heat and mass transfer, mathematical modeling, heat and moisture regime of buildings, energy management of houses, energy saving.

Підписано до друку Формат 60x84.
Папір офсетний. Умов. друк. арк. 1.1
Тираж 100 прим. Замов. № _____
Полтавська область, м. Миргород,
вул.