

УДК 669.7+697.7

І.І.Пуховий, докт.техн.наук, М.С.Хандусь, О.О.Хруленко (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Сонячне опалення типу "стіна Тромба-Мішеля" з розширеною буферною зоною і прозорою стелею при роботі без традиційного опалення реального будинку

Досліджено температурні режими пасивної системи сонячного опалення з розширеною до 1,2 м буферною зоною між вітражем і південно-західною стіною будинку з отворами. Температура стіни з цегли на початку травня досягала 46°C, поверхні підлоги – 58°C. За час роботи у прилеглу до стіни кімнату входило біля 2 кВт·год теплоти на квадратний метр стіни. Найбільша швидкість повітря в отворах становила 1,6 м/с, а ККД системи був біля 0,5-0,6.

Ключові слова: пасивна система сонячного опалення, стіна Тромба-Мішеля, температура повітря в отворах, температура стіни і підлоги, ККД системи, акумулювання теплоти, вимірювання швидкостей повітря в отворах.

Исследованы температурные режимы пассивной системы солнечного отопления с расширенной до 1,2 м буферной зоной между остеклением и юго-западной стеной с отверстиями. Температура стены в начале мая достигала 46°C, поверхности пола – 58°C. За время работы в прилегающую к стене комнату поступало около 2 кВт·ч теплоты на квадратный метр стены. Наибольшая скорость воздуха в отверстиях составляла 1,6 м/с, а КПД системы был около 0,5-0,6.

Ключевые слова: пассивная система солнечного отопления, стена Тромба-Мишеля, температура воздуха в отверстиях, температура стены и пола, КПД системы, аккумулялирование теплоты, измерение скоростей воздуха в отверстиях.

Вступ. Пасивні системи сонячного опалення (ПС) відрізняються дешевизною і використовуються в різних географічних зонах завдяки тому, що можуть як самостійно, так і в комбінації з традиційними джерелами енергії забезпечувати потрібні температурні характеристики. Стіна Тромба-Мішеля (СТМ) початково була задумана для недопущення зниження температури нижче нуля в замських дачних будівлях (наприклад, щоб не допустити замерзання квітів та води). Основним її елементом є товста стіна, яка виконує роль акумулятора теплоти, а отвори в стіні забезпечують циркуляцію повітря. Буферна зона (БЗ), що утворюється між стіною і склом (вітражем), у згаданій системі має ширину біля 150-200 мм, щоб направити падаюче сонячне випромінювання на стіну. При експлуатації системи виявилось, що зовнішня нагріта поверхня стіни будинку вночі випромінює багато теплоти в атмосферу. Останні модифікації системи передбачають теплоізоляцію стіни з метою акумулювання теплоти всередині приміщення і установку металевого абсорбера на невеликій відстані від стіни для забезпечення подвійної площі теплообміну з повітрям.

Недоліком СТМ є мала ширина БЗ, що ускладнює очищення скла і не дозволяє використовувати буферну зону (теплиця, місце відпочинку тощо). В реальному будинку біля м. Києва перед стіною з отворами для циркуляції повітря було збудовано широку буферну зону для проведення натурних досліджень. Таку систему опалення ми назвали розширеною СТМ (РСТМ).

Стан проблеми та постановка задачі дослідження. Пасивні системи сонячного опалення досліджувалися в інституті "КиївЗНДЦЕП" [1] та в НТУУ "КПІ" [2–5]. В останніх джерелах експериментально і теоретично було досліджено пасивну систему типу "засклена лоджія". Отримано залежності для визначення ККД і теплових потоків. Також проведено експериментальні дослідження температур в об'ємі БЗ як по висоті, так і по ширині. На основі вимірювань температур знайдено, що взимку в просторі буферної зони, особливо біля вітражів, температура повітря є негативною при температурах атмосфери, нижчих за мінус 7-10°C в залежності від термічного опору стін житлової зони. Це дозволяє вночі підігрівати повітря в БЗ низькотемпературними теп-

лоносіями і особливо теплотою кристалізації води, що вимагає мінімальної витрати води [3,4].

Дослідження СТМ виконані в кандидатській дисертації М.А.Айзена і ввійшли до рекомендацій [1]. В цьому джерелі також рекомендується зробити більшу відстань між стіною та вітражем в СТМ, але така система (РСТМ) недосліджена.

В [6] було проведено комп'ютерне моделювання СТМ для умов січня. Помилково середню температуру січня було прийнято $1,1^{\circ}\text{C}$, в той час коли вона нижча на $4-5^{\circ}\text{C}$. Змінювалась відстань між віртуальною бетонною стіною і вітражем з високим термічним опором. Отримано об'ємне зображення температурних полів, з якого видно, що максимальна температура в БЗ досягає 20°C опівдні. Найвища розрахована температура має місце при ширині БЗ біля $0,5$ м. Автори змінювали ширину БЗ до 1 м і відзначають, що при широкій БЗ поблизу вітража є нерухомий шар повітря, який перешкоджає теплообміну з атмосферою. Відзначимо, що в кліматичній зоні півночі України зимою стіна Тромба з відкритими отворами не може працювати при необхідності мати комфортну температуру в приміщенні 20°C . При цьому СТМ чи РСТМ можуть виконувати тільки допоміжну роль для традиційної системи опалення приміщення при відсутності повітрообміну між БЗ і приміщенням.

Метою нашого дослідження є визначення температурних і енергетичних характеристик РСТМ на реальній будівлі в період, коли циркуляція повітря через отвори РСТМ є ефективною (весна і осінь).

Конструктивні характеристики будівлі та вітражів РСТМ. ПС виготовлена при південно-західній стіні будинку з попередньо передбаченими для РСТМ отворами, що забезпечуватимуть циркуляцію повітря між буферною зоною ПС та кімнатою цього будинку, яка розташована на 1 поверсі і всередині має масивну грубу типу "лежанка". Зовнішня цегляна стіна кімнати, яка виходить на південно-західну сторону, була запроектована спеціально під пасивну систему типу "стіна Тромба-Мішеля". У стіні наявні 5 отворів (три у верхній і два – в нижній частині), де також передбачені засувки, які закриваються на

нічний період у холодну пору і від перегрівання приміщення влітку. Менша кількість отворів внизу обумовлена більшою густиною холоднішого повітря.

Розміри кожного з отворів $0,25 \times 0,25$ м. Між двома нижніми отворами відстань $0,75$ м, між верхніми – $0,62$ м, вони розташовані симетрично до середини стіни по горизонталі і знаходяться на відстані $2,1$ м по висоті. Стіна, яка безпосередньо виходить до кімнати, має розміри $3,5 \times 2,5$ м = $8,75$ м². Частина стіни будинку, яка входить у буферну зону, тобто контактує з нагрітим повітрям, складає $3,9 \times 3,55$ м = $13,84$ м², тобто вона ширша і вища (останнє за рахунок того, що в БЗ частково входить стіна цокольного поверху).

До згаданої вище стіни прибудована буферна зона шириною $1,2$ м. Для цього використані дерев'яні рами з однією шибкою розміром $1,5 \times 1,3$ м, встановлені одна над другою у два ряди паралельно до стіни будівлі, а також по дві вужчі рами – $1,5 \times 1,1$ м перпендикулярно до стіни. Накривають БЗ послідовно лежачі під нахилом біля 15 град. до горизонту в сторону руху Сонця рами, які мають розмір $1,5 \times 1,3$ м (частина рами зі склом звисає для стікання дощової води, а тому ширина нахиленої стелі БЗ дорівнює $1,4$ м, і при довжині $3,9$ м поверхня стелі становить біля $5,5$ м², а прозорої частини – біля 5 м². Також із одного з торцевих боків на південно-східній стороні ПС встановлені дерев'яні двері $2,1 \times 0,7$ м, аби у створену БЗ можна було зайти. Таким чином, система дещо нагадує тип пасивної системи "оранжерея", але без прозорої внутрішньої стіни [1]. Основна стіна приміщення з отворами виконана таким чином. Послідовно, починаючи з БЗ, в сторону кімнати розміщені: цегла товщиною 125 мм, теплоізоляція з перліту 60 мм, цегла 65 мм, фольга на цеглі, повітряний проміжок 20 мм, гіпсокартон 10 мм, з термічними опорами відповідно $0,16$; $0,6$; $0,08$; $0,14$ і $0,02$ (м²·К)/Вт (без врахування ефекту фольги). Загальний термічний опір теплопровідності складає 1 (м²·К)/Вт. При коефіцієнтах тепловіддачі з двох боків стіни біля 5 Вт/(м²·К) загальний опір теплопередачі від повітря буферної зони до повітря в кімнаті складе $1,4$ (м²·К)/Вт. Таким чином, стіна передбачена

лише для короткотермінового акумулювання теплоти зі сторони БЗ, щоб не було значних втрат уночі на випромінювання від стіни.

Враховуючи значну ширину БЗ, Сонце також освітлює підлогу, тому вона для попередження втрат у ґрунт виконана з дощок товщиною 25 мм, покладених з повітряним проміжком від ґрунту 50 мм, покритих додатково фанерою і ковром. Частка прозорих огорож, що зайнята непрозорими рамами і конструкціями БЗ, складає біля 7%. Тому площу паралельного стіні вертикального застелення прийматимемо рівною 12 м².

Особливістю ПС є наявність затінення південно-західного фасаду горою з лісом, тому час її роботи складає 4-5 годин. Бокові поверхні практично не дають вкладу в опалення (двері та північно-західна орієнтація).

Методика проведення дослідів та прилади.

У отворах на різних від підлоги рівнях розташовувались термометри і використовувались інші прилади (вимірювач температури поверхні Infrared Thermometr DT-810, електронний прилад "Тесто-2" для вимірювання температури і швидкості потоку). Знаходились також температури всередині буферної зони, кімнати і оточуючого повітря. Житлова зона не опалювалась традиційними джерелами теплоти.

Вимірювання проводилися з 11-ї години дня літнього часу, коли Сонце починало потрапляти на верхній вітраж. У кінці квітня і в травні значна частина сонячної енергії потрапляє через прозорий дах БЗ. Двері установки при цьому були зачинені, щоб нагріте повітря не виходило, отвори у стіні також були закриті. Після першого вимірювання температури в герметичній буферній зоні засувки в отворах відкривались, і повітря починало циркулювати, виходячи холодним із нижніх отворів і заходячи теплим до верхніх отворів у кімнату. Показники температур знімалися через деякі проміжки часу, доки на скло потрапляло сонячне проміння (затінення з 16-17-ї години в залежності від висоти Сонця через наявність гори навпроти і дерев на ній). Вимірювання проводилися при чистому небі у квітні та травні, коли ще потрібне підігрівання повітря в

кімнаті. Відомо, що для котеджних будівель опалювальний сезон продовжується на 15-30 днів у порівнянні з багатоповерховими міськими будівлями, де більші внутрішні тепловиділення в квартирах, менша поверхня зовнішніх стін (у 3-4 рази) та вища температура повітря в місті на 2-4°C.

Дослідження температурних характеристик. Найбільший інтерес викликають температури повітря у верхніх і нижніх отворах, від яких залежить інтенсивність циркуляції повітря природним шляхом за рахунок різниці густини і висоти. Крім того, важливими є температури всередині буферної зони, кімнати (на відстані від стіни з отворами 2 м посередині висоти) та атмосфери. Зміна згаданих температур протягом часу роботи РСТМ 16 квітня показана на рис. 1. Як видно, температура в усіх точках поступово зростає з плином часу до певного моменту. При перпендикулярному розміщенні Сонця по відношенню до стіни біля 14:20 літнього часу температури мають пікове значення, як це помітно в усіх кривих на графіку, крім зовнішньої температури. Найбільше зростання температур помітне у верхньому отворі – до 26°C, оскільки за години сонячної активності тепле розігрите повітря піднімається вгору і енергія акумулюється в стіні. У процесі вимірювання з нижніх отворів відчувається сильний струмінь потоку холодного повітря з кімнати в буферну зону. За час роботи РСТМ повітря в кімнаті нагрілося лише на 3°C, враховуючи, що всі огорожі і предмети в кімнаті початково були холодними. Після 17-20-ї години температура в нижньому отворі стає нижчою від температури в кімнаті, що свідчить про зміну напрямку циркуляції: тепле повітря виходить у БЗ, а холодне з БЗ заходить знизу в кімнату. Таким чином, для виходу на комфортний режим опалення від РСТМ після зими без традиційного джерела потрібно декілька днів. У випадку розміщення РСТМ на південному фасаді час виходу на режим комфорту буде майже удвічі меншим, а графіки ходу температур повинні бути схожими, але пікові значення були на період з 12:30 до 13-ї години астрономічного часу [5].

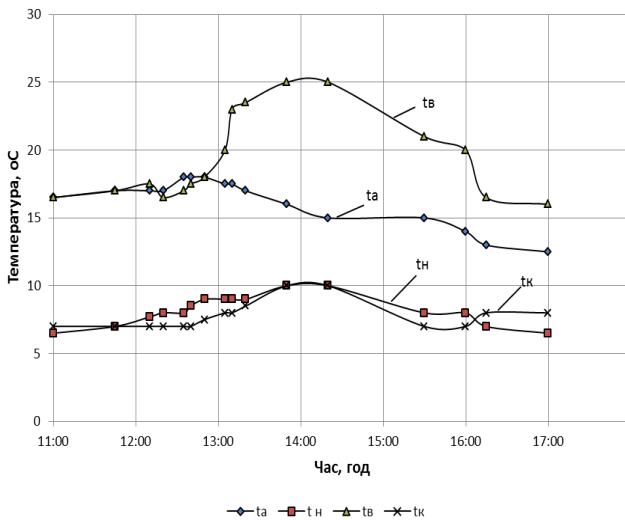


Рис. 1. Зміна температури повітря в отворах, атмосфері та кімнаті 16 квітня: *ta* – температура атмосферного повітря; *tn* – температура повітря у нижньому отворі; *tv* – температура повітря у верхньому отворі; *tk* – температура кімнати.

Наступні вимірювання проводились у травні більш детально. За допомогою електронних пристроїв була виміряна не лише температура повітря, а й поверхонь скла, цегляної стіни, а також стелі та підлоги.

Дослідження 2 травня показує, що РСТМ здатна підтримувати комфортну температуру 20-22°C (рис. 2) при температурі атмосфери 10-15°C. Це видно з того, що з нижніх отворів (лінії 1н і 2н) виходить повітря з температурою біля 20°C, бо температура в кімнаті вища від 20°C, і у верхні отвори поступає повітря з температурою 26-33°C.

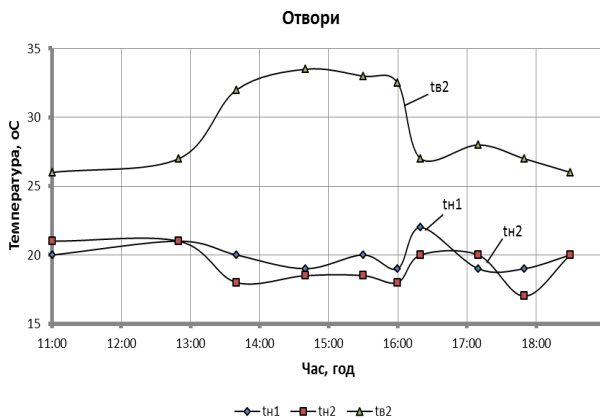


Рис. 2. Зміна температур в отворах РСТМ протягом часу 2 травня: *tn1* – температура у першому нижньому отворі, *tn2* – температура у другому нижньому отворі, *tv2* – температура у другому верхньому отворі.

Викликають інтерес температури поверхні стіни і скла, що вимірювались лазерним пірометром. Для порівняння ці поверхні ділились на 6 зон: 3 верхні і 3 нижні (нижні на висоті 0,8 м, верхні – 1,6 м). Температури на поверхні стіни (рис. 3) значно вищі, ніж на склі. Це можна пояснити тим, що цегла не є прозорою і акумулює падаюче сонячне проміння. В ідеальному варіанті стінка з цегли повинна мати чорний матовий колір. Ступінь чорноти цегли становить приблизно 0,9. Відзначимо, що різниця температур між верхом і низом стіни до 15:30 не перевищувала 5°C, а біля 16:00-16:30 доходила до 10°C; після 17-ї години різниця була не більше 3-4°C, тому що розпочалося охолодження стіни через відсутність сонячного випромінювання. Лінія 3н відповідає точкам біля дверей БЗ на південний схід, де на початку роботи РСТМ є тінь. Відзначимо, що час у графіках на годину більший від астрономічного (літній час). 19 травня температура стелі в БЗ о 16:00 була найвищою і становила 42°C, а температура поверхні килима на підлозі – 58°C о 14:40.

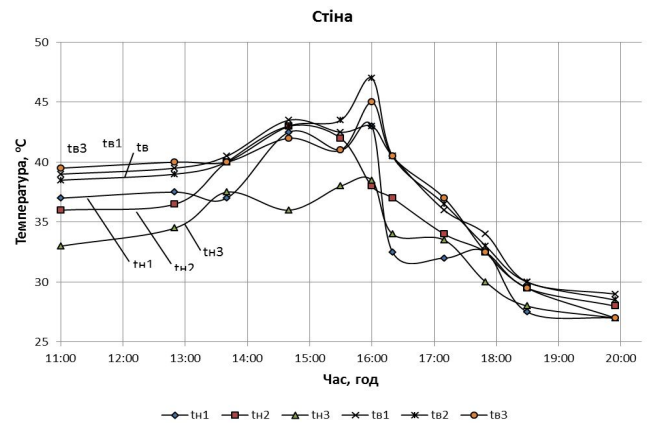


Рис. 3. Зміна температури поверхні стіни по зонах (н – нижня, в – верхня): *tn1* – температура повітря у першому нижньому отворі; *tn2* – температура повітря у другому нижньому отворі; *tn3* – температура повітря у третьому нижньому отворі; *tv1* – температура повітря у першому верхньому отворі; *tv2* – температура повітря у другому верхньому отворі; *tv3* – температура повітря у третьому верхньому отворі.

Для аналізу енергетичних показників опалення слід знати витрату повітря через отвори, для чого були виміряні швидкості повітря (табл. 1) і розрахована секундна витрата.

Таблиця 1. Вимірювання швидкості повітря у верхніх та нижніх отворах

Дата, час	Швидкість потоку повітря, w , м/с					Температура атмосфери t_A , °C	Температура БЗ (верх.) t_B , °C	Температура кімнати (ниж.) t_D , °C
	Верхні отвори			Нижні отвори				
	1	2	3	1	2			
02.05, 16:00	-			1,6		26	35	15
19.05, 18:30	0,39	0,38	0,37	0,68	0,75	22	32	16

Визначимо потужність на опалення за 2 травня 2013 року, що поступало в кімнату приблизно о 16 годині при швидкості через нижні отвори 1,6 м/с, сумарній площі нижніх отворів 0,125 м², густині повітря 1,293 кг/м³, витраті повітря 0,258 кг/с, теплоємності повітря 1 кДж/кг·К та різниці температур внизу і вверху 20°C за відомою формулою нагрівання повітря при постійному тиску. Вважаємо, що витрата повітря через верхні отвори така ж сама, як через нижні. Отримаємо, що о 16 годині в кімнату поступала тепла потужність 5,16 кВт. Звичайно раніше, коли БЗ розігрівалась, потужність була меншою. Якщо оцінювати за виміряними температурами середню потужність біля 3 кВт, то за 4 години в кімнату з повітрям на опалення поступило біля 12 кВт·год.

19 травня в період відсутності сонячного випромінювання (після 18 годин) були зафіксовані показники швидкостей в усіх отворах, аби порівняти, наскільки активний рух повітря в такий час, коли використовується акумульована в стіні енергія і скільки тепла вона може давати.

Середня швидкість повітря у нижніх отворах буде 0,75 м/с, у верхніх – 0,4 м/с. Площа верхніх 3-х отворів 0,188 м², 2-х нижніх – 0,125 м². З урахуванням меншої густини повітря вверху розрахунок дає масову витрату біля 0,11 кг/с, а внизу – біля 0,1 кг/с (похибка не більше 10%). Отримана потужність о 18 годині складає 1,6 кВт за рахунок акумулюючої здатності стіни. Можна передбачити, що акумульованої енергії для підтримання циркуляції вистачало приблизно до 20-ї години.

В кінці процесу експозиції стіни завдяки значній температурі її поверхні можлива передача теплоти в приміщення шляхом теплопровідності через стіну. Розрахований термічний опір стіни становить 1 (м²·К)/Вт, тоді при температурах 40 і 25°C на поверхнях можливий тепловий потік

складатиме біля 15 Вт/м² і для всієї стіни максимум 150 Вт протягом 3-6 годин, що дає за час роботи не більше 1 кВт·год теплоти, яка, в порівнянні з надходженням через отвори, складає менше 10% від загальної кількості підведеної в приміщення теплоти.

Оцінимо кількість енергії, що попадає на південно-західний фасад у травні з 11-ї до 15-ї години астрономічного часу при коефіцієнті орієнтації 1,1 [7] по відношенню до південного напрямку. Об 11:00 (10:00 – астрономічний час) починав освітлюватись нахилений скляний дах БЗ. На південний фасад до 11:00 попало б від сходу Сонця 849, а до 15:00 – 3098 Вт·год/м² [8]. Різниця складе 2249 Вт·год/м². При площі прозорих вертикальних поверхонь (без рам) 12 м² отримана на південно-західний фасад енергія складе біля 27 кВт·год, а з урахуванням коефіцієнта орієнтації – біля 30 кВт·год.

Для нахиленої поверхні стелі площею 5 м² розрахунок зробити важко, не маючи даних щодо інсоляції, тому, враховуючи знижену висоту Сонця в порівнянні з південною орієнтацією, прийmemo 2000 Вт·год/м² і на всю площу – 10 кВт·год.

За отриманих максимум 15 кВт·год (12-14 через отвори плюс 1 через стіну) і акумульованих у стіні 5 кВт·год (середнє значення 1,6 кВт, помножене на 3 години додаткової циркуляції повітря), відношення максимального надходження теплоти (20 кВт·год) до отриманої скляними огорожами (40 кВт·год) складе 0,5. Це і є приблизний можливий ККД для РСТМ у травні, який потрібно надалі виміряти і розрахувати точніше протягом усіх весняних та осінніх місяців.

Нагадаємо, що площа вертикальних вітражів більша від площі поверхні стіни в кімнаті у співвідношенні 13,84/8,75 = 1,58, а враховуючи верхній прозорий дах БЗ, відношення площі вітражів

(вертикального і даху БЗ) до площі стіни, що виходить у БЗ, складе: $(13,84 + 5,5)/13,84 = 1,4$. Таким чином частково нагрівались також і сусідні приміщення будинку, що дозволяє оцінювати загальний ККД біля 0,6.

При теплоті згоряння дров 12 МДж/кг і ККД труби 0,8 отримана кількість енергії 54 МДж (15 кВт·год) відповідає спаленим біля 5,5 кг дров. Якщо вважати, що система працює 5 годин, то отримана енергія буде еквівалентною спаленим біля 6 кг дров. Не слід забувати, що кімната має ще 3 масивні стіни і масивну трубу, які вимагають теплоту від повітря для розігрівання без роботи традиційної системи опалення.

12 жовтня 2014 р. після виведення температури в прилеглий до стіни кімнаті на стаціонарний режим грубою-лежанкою на наступний сонячний день РСТМ забезпечила підігрівання повітря від 19°C вранці до 23°C увечері при температурі атмосфери 11-20°C. Наступного ранку при нічній температурі біля 10°C температура в кімнаті була 19°C, що свідчить про запас акумульованої теплоту в кімнаті і в стінах з попереднього дня.

Висновки.

1. Пасивна система сонячного опалення типу "розширена стіна Тромба-Мішеля" на південно-західному фасаді може забезпечувати компенсацію теплових втрат прилеглого приміщення, виведеного на стаціонарний режим у весняні та осінні місяці без традиційного джерела енергії в сонячні дні. За період роботи системи на опалення отримується до 20 кВт·год теплової енергії, або біля 2 кВт·год на квадратний метр стіни кімнати.

2. При відсутності традиційного джерела в період запуску опалення будівлі (після зими чи після періоду хмарності восени і весною) система не може швидко вийти на стаціонарний режим з комфортною температурою без традиційного джерела, яке забезпечуватиме прогрівання стін і предметів у приміщенні. За південної орієнтації РСТМ прогрівання приміщення з холодного стану до комфортного можливе орієнтовно за тиждень при умові вчасного відкриття і закриття повітряних отворів у стіні.

3. У верхніх отворах системи температура при перпендикулярному падінні сонячних променів на скляну огорожу досягала 30-35°C, а на поверхні стіни до 46°C, що забезпечує передачу деякої кількості теплоту через стіну шляхом теплопровідності в кінці часу освітлення стіни, але кількість переданої теплоту оцінюється біля 15% від загальної теплоту на опалення.

4. Широка буферна зона сприяє значному нагріванню підлоги, температура якої в травні досягала 58°C.

5. Вимірювання швидкостей повітря в отворах стіни дозволило знайти масову витрату повітря і кількість теплоту, яка надходить на опалення прилеглого приміщення. Середній ККД за період роботи системи в травні становив близько 0,5.

1. Ферт А.Р., Айзен М.А., Антонюк Д.И. и др. Рекомендации по проектированию зданий с пассивными системами солнечного отопления. – К.: КиевЗНИИЭП, 1989. – 100 с.

2. Пуховой И.И. Система отопления зданий без теплового насоса с использованием природной холодной воды // Промышленная теплотехника. – 1992. – Том 14. – № 1-3. – С. 57-61.

3. Пуховой И.И. Дослідження та інженерні розрахунки комбінованої пасивної системи сонячного опалення з використанням теплоту кристалізації води для підігріву повітря в буферній зоні // Наукові вісті НТУУ КПІ. – Серія теплоенергетики. – 1997. – № 1. – С. 51-54.

4. Пуховой И.И. Пассивные солнечные системы отопления, использующие теплоту кристаллизации воды // Пром. теплотехника. – 1998. – № 5. – С. 47-51.

5. Пуховой И.И. Температурные режимы и экономия энергии в пассивных системах солнечного отопления типа застекленная лоджия многоэтажных зданий // Экологические технологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 2. – С. 14-18.

6. Губская Е.В., Дубровская В.В., Шкляр В.И., Степаненко О.И. Исследование эффективности работы пассивной гелиосистемы стены Тромба для теплообеспечения здания // Відродження енергетики ХХІ сторіччя. Мат. міжн. конф. – Київ. – 2014. – С. 237-239.

7. Пуховой И.И., Новаківський С.В. Енергія, отримана від сонячного випромінювання в різних кліматично-географічних зонах України з урахуванням хмарності, та її залежність від орієнтації сонячних колекторів // Відродження енергетики. – 2006. – №4. – С. 28-36.

8. Пуховой И.И. Разработка и тепловые расчеты систем солнечного отопления. – Метод. указ. НТУУ "КПИ". – "РОВО Укрвузполиграф". – К., 1992. – 23 с.