УДК 697.4:621.58

І.І. Пуховий

ВИКОРИСТАННЯ ЛЬОДЯНОЇ СТІНИ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ БУФЕРНОЇ ЗОНИ БУДІВЛІ ТЕПЛОТОЮ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ВОДИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЇЇ ПЛАВЛЕННЯ В ПЕРІОД ВІДЛИГ

The paper considers the application of the ice wall in the buffer zone of the building to reduce heat losses from the residential area while water crystallization moving in a film on the inside or outside of the watering ice surface is described. The construction does not require the periodic ice removal. Furthermore, we calculate the temperatures and other thermal characteristics under the conditions with and without watering. When the thermal resistance of heat transfer from the residential area increases, the efficiency of heat water crystallization usage rises. Through experiments conducted and calculations made, we determine the time of heating and melting of the walls during thaw. The calculations under the conditions of free convection give the results understated for more than 2 times relating to the thickness of the molten ice layer. Moreover, we examine the experimental sample of the ice wall on the water irrigation in winter.

Вступ

У світі спостерігається доволі швидкий перехід до використання відновлюваних джерел енергії. Одним з них є теплота фазового переходу води в лід, яка називається теплотою кристалізації (ТК). Скористатися цією теплотою можуть лише ті країни, в яких бувають морозні зими. Згадана теплота дає можливість підігрівати повітря в системах вентиляції та забезпечувати до 50–70 % економії традиційної енергії [1], а також підігрівати повітря перед тепловими насосами, що є альтернативою ґрунтовим теплообмінникам [2]. Також у помірному та суворому кліматах ТК може бути ефективно використана [3] для підігрівання повітря буферних зон (БЗ) біля фасадів будівель, які утворюються при встановленні прозорих огорож пасивних систем сонячного опалення тощо. Ці пасивні системи розміщуються лише зі сторони освітлених сонцем фасадів, але утворення БЗ і на північних та інших фасадах без інсоляції теж зменшує теплові втрати будівель, що мають житлову зону (ЖЗ) із температурою t_d, завдяки додатковому термічному опору огорож БЗ та конвективній тепловіддачі R_b. Залежно від термічних опорів стін ЖЗ R_d температура повітря в БЗ t_b підвищується на 5–10° порівняно з атмосферною t_A, що позитивно впливає на зменшення теплових втрат із ЖЗ в буферну.

У комбінації з пасивними системами сонячного опалення ТК можна використовувати для опалення БЗ лише вночі при відсутності сонячного випромінювання. Під час використання ємнісних кристалізаторів виникають проблеми видалення примерзлого льоду; замороження води в краплях, які утворюються розпилювальними пристроями при температурах t_b до –10––15 °С, неможливе через переохолодження крапель і відсутність центрів кристалізації води. Розпилена вода може замерзнути лише при попаданні на тверду поверхню. Найкращою технологією кристалізації води за згаданих температур є використання бурульок [4], які теж потрібно видаляти, але з меншими проблемами.

Постановка задачі

Метою дослідження є визначення температур у буферній зоні будівлі, яка утворена льодяною стіною без подачі холодної води для її кристалізації та у випадку кристалізації на внутрішній поверхні льодяної стіни; знаходження часу нагрівання і плавлення стіни в умовах відлиг без впливу сонячного випромінювання.

Температурні режими будівлі з льодяною буферною зоною

У [5] запропоновано як теплообмінник для підігрівання ТК повітря чи стіни БЗ використати стіну, виготовлену з льоду (рис. 1), по поверхні якої гравітаційно подають плівку води з однієї чи двох сторін. Льодова стіна одночасно може слугувати й огорожею БЗ, зокрема на північному фасаді. Така огорожа може бути встановлена як тимчасова на період сильних морозів або на весь холодний період. Щоб збільшити виробництво льоду та спростити відведення незамерзлої води, періодично або постійно може бути включена форсунка зі сторони навколишнього середовища. При цьому (див.

рис. 1) t_4 буде 0 °С, а при стаціонарному режимі t_3 може досягти плюсових значень і стіна за деяких умов почне танути.

На систему з льодяною стіною отримано охоронний документ України [5] і досі ніяких досліджень такого варіанта опалення нам не відомо. Переваги льодяної стіни порівняно із традиційною огорожею такі:

- ТК можна використовувати при менших значеннях мінусових температур атмосфери, враховуючи, що t_3 нижча t_b;
- не потрібно періодично видаляти лід;
- термічний опір стіни зростає протягом зими завдяки намерзанню льоду.

Розглянемо стаціонарний процес теплопередачі через систему, що складається з двох стін, одна з яких є огорожею ЖЗ та зроблена із традиційних будівельних матеріалів, а друга розташована на відстані від першої і виконана з льоду.

Для знаходження повних термічних опорів огорож потрібно, крім товщини та коефіцієнтів теплопровідності, знати коефіцієнти теплообміну α_1, α_2, α_3 та α_4 (нумерація на рис. 1 за ходом теплового потоку з ЖЗ у БЗ та в навколишнє середовище). Перші три коефіцієнти були розраховані на ЕОМ із використанням формул для вільної конвекції в будівлях (В.Н. Богословський). Для згаданих умов отримано, що залежно від температур величина цих α змінюється від 2,5 до 5 Вт/(м^2·К). При теплопередачі із ЖЗ в буферну основним термічним опором є опір теплопровідності стіни $R_\lambda = R_{ж.с}$ (див. рис. 1) при $R_\lambda > 0,5 - 1$ (м^2·К)/Вт. За менших R_λ термічні опори теплообміну дуже важливі й можуть становити до 50–100 % від R_d. Термічні опори конвективного теплообміну огорож БЗ відіграють основну роль у загальному значенні R_b для БЗ. Якщо α_3 не сильно відрізняється від α_1 та α_2, то α_4 може зростати за наявності вітру.

Проведено розрахунки впливу товщини льодяної стінки на її термічний опір. Беручи значення $\alpha_3 = 5$ Вт/(м^2·К), а при вітрі в атмосфері $\alpha_4 = 15$ Вт/(м^2·К), отримали, що при зміні товщини стінки від 0,02 до 0,2 м загальний термічний опір змінюється від 0,25 до 0,33 (м^2·К)/Вт (коефіцієнт теплопередачі $K_b = 3,08$ Вт/(м^2·К) при теплопровідності льоду 2,2 Вт/(м·К)).

Розглянемо вплив повних термічних опорів теплопередачі через стіну ЖЗ R_d при різних його значеннях від 0,2 до 7 (м^2·К)/Вт на густину теплового потоку із ЖЗ в атмосферу. Густину теплового потоку через стіни житлової та буферної зон знаходимо за рівнянням

$$q = \frac{1}{R_{сум}} \Delta t,$$

де Δt – різниця температури всередині приміщення t_d та температури навколишнього середовища t_A; беручи $\Delta t = (20 - (-20)) = 40$ °С, отримаємо, що при зміні загального опору теплопередачі від повітря ЖЗ до атмосфери в межах 0,5–7,33 (м^2·К)/Вт) (остання величина є сумою максимальних значень R_d та R_b), значення q змінюються від 80 до 5 Вт/м^2 при зазначених вище величинах R_d; $R_{сум}$ – сума термічних опорів теплопровідності та тепловіддачі. Вплив товщини льодяної стіни на q помітний лише до R_d, які менші 1 (м^2·К)/Вт.

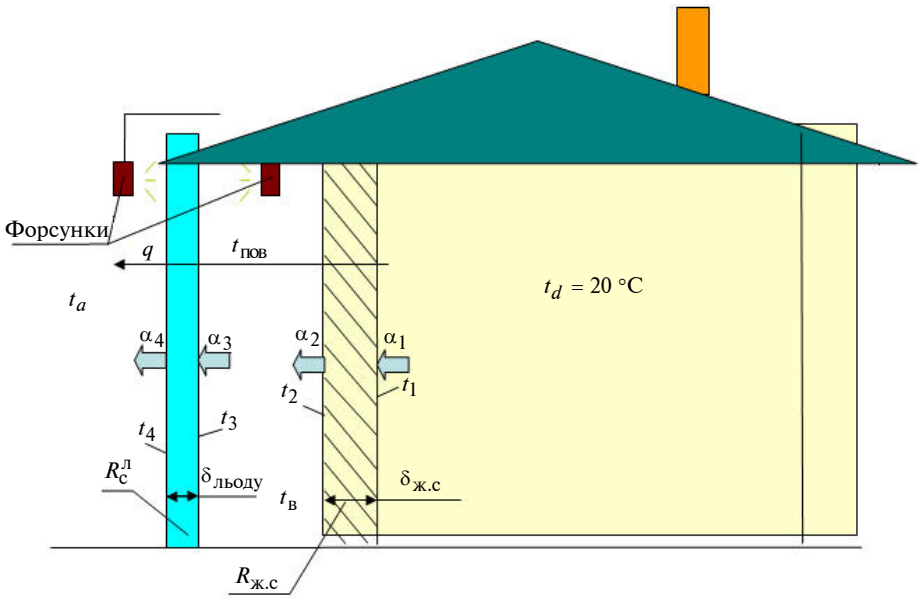


Рис 1. Будинок з буферною зоною, утвореною льодяною огорожею

Температуру в БЗ за відсутності сонячного випромінювання та інфільтрації можна знайти за рів-

нянням [6], в якому відношення термічних опорів $\varphi = \frac{R_d}{R_b}$ та поверхонь БЗ і ЖЗ $\omega = \frac{F_b}{F_d}$ дорівнює

$$t_b = \frac{t_d + \varphi\omega t_A}{1 + \varphi\omega}. \quad (1)$$

Це рівняння отримано розв'язанням задачі теплопередачі через дві послідовно розміщені за ходом теплового потоку стіни для умов стаціонарного режиму, враховуючи повільну зміну температур навколишнього середовища в часі. Рівняння дає змогу знайти температуру t_b буферних зон, які прилеглі як до стін будівлі, так і до стелі (на горищі). Термічний опір теплопровідності стін сучасних будинків, що відповідають вимогам "нульового опалення" чи "пасивних будинків", доходить до $R_\lambda = 7–20$ (м^2·К)/Вт.

Наприклад, при відношенні термічних опорів $\varphi = 3{,}5$ і $\omega = 1$ у випадку зміни температури навколишнього середовища від –10 до –15 °С температура в БЗ зміниться від –3,3 до –6,4 °С, а при $\omega = 2$ – від –6 до –10,6 °С. Збільшення φ, яке відбувається при зростанні R_d, діє аналогічно зростанню ω. При ω = 1, R_d = 7,33 та R_b = 0,33 маємо $\varphi = 21{,}3$ і за температури атмосфери –10 °С матимемо t_b = –8,6 °С, а при ω = 1,5 та таких самих значеннях термічних опорів при t_A = –20 °С температура у БЗ буде вищою від атмосферної приблизно на 1°.

Температура повітря в БЗ при заданих величинах термічних опорів огорож зменшується під час падіння температури атмосфери та за збільшення площі поверхні БЗ за рахунок бокових стінок при зростанні відстані між огорожами ЖЗ та БЗ. *Наявність низьких температур у БЗ та (або) низької температури внутрішньої поверхні льодяної огорожі є необхідною умовою використання ТК.*

На основі знайдених вище питомих теплових потоків і коефіцієнтів теплообміну можна зробити висновок, що при великих термічних опорах R_d стін ЖЗ температура на поверхнях льодяної стіни буде відрізнятися менше ніж на 1°, а при малих – ця різниця може сягати 5–8°. Зі збільшенням термічного опору теплопровідності ЖЗ температура льодяної огорожі наближатиметься до температури атмосфери.

Температура поверхні, при якій відбувається кристалізація води, 0 °С. За такої температури льодяної поверхні температура у БЗ залежить від розмірів площ звичайних та льодяних огорож БЗ, що зсередини зрошуються та не зрошуються водою. При малих зрошуваних площах, де відбувається кристалізація води, температура в БЗ може бути мінусовою. Тоді водяна плівка охолоджуватиметься з двох сторін і на стіні намерзатиме більше льоду.

Вода на зрошення льодяної стіни надходить із плюсовою температурою близько 3–5 °С. Це може призвести до плавлення верхньої частини стіни, тому льодяна стіна зверху захищається металевою пластиною, що встановлюється при контакті нижнього краю пластини з льодом, а верхнього – з повітряним проміжком між пластиною і льодом. Розрахунками встановлено, що густина зрошення на один метр периметра стіни має бути залежно від температур навколишнього середовища та товщини стіни в середньому для умов України від 0,5 до 1,5 г/с. Висота пластини, на якій вода охолоджуватиметься до 0° становитиме від 0,3 до 0,8 м, що знайдено шляхом розрахунку тепловіддачі в повітря, яке оточує пластину з двох сторін. Точне розв'язання задачі можливе лише для конкретних умов.

Збільшення теплоізоляції будівлі покращує умови використання ТК. Запропонована система конкурентна тепловому насосу [6].

Нагрівання та танення вертикальної льодяної стіни (пластини)

У країнах з помірним кліматом бувають відлиги, тому товщина льодяних стін (огорож БЗ) має витримувати підвищення температури протягом 5–10 днів до наступних морозів. У кінці опалювального сезону, або в інших випадках, стінка з льоду руйнується, а лід може бути закладений для літнього холодопостачання. В багатьох країнах будуються льодяні споруди як із туристичною метою, так і для практичних цілей, тому отримані результати будуть корисними і для інших льодяних споруд.

Далі проведемо експериментальне визначення часу нагрівання і плавлення стіни та порівняємо із розрахунками.

Експериментальне дослідження. Для виготовлення дослідного зразка [7] була використана форма з нержавіючої сталі розмірами 0,3 м×0,4 м×0,03 м. Виробництво зразка відбу-

валось при температурі навколишнього повітря –9––11 °С. Сам процес наповнення форми водою відбувався поетапно, за кожний етап приріст товщини льодяної стінки становив 5–7 мм.

Для зменшення похибки дослідження зразу ж після виготовлення готовий зразок було поміщено в середовище з низькою температурою (–9 °С) на 48 год з метою досягнення рівномірного розподілу полів температур.

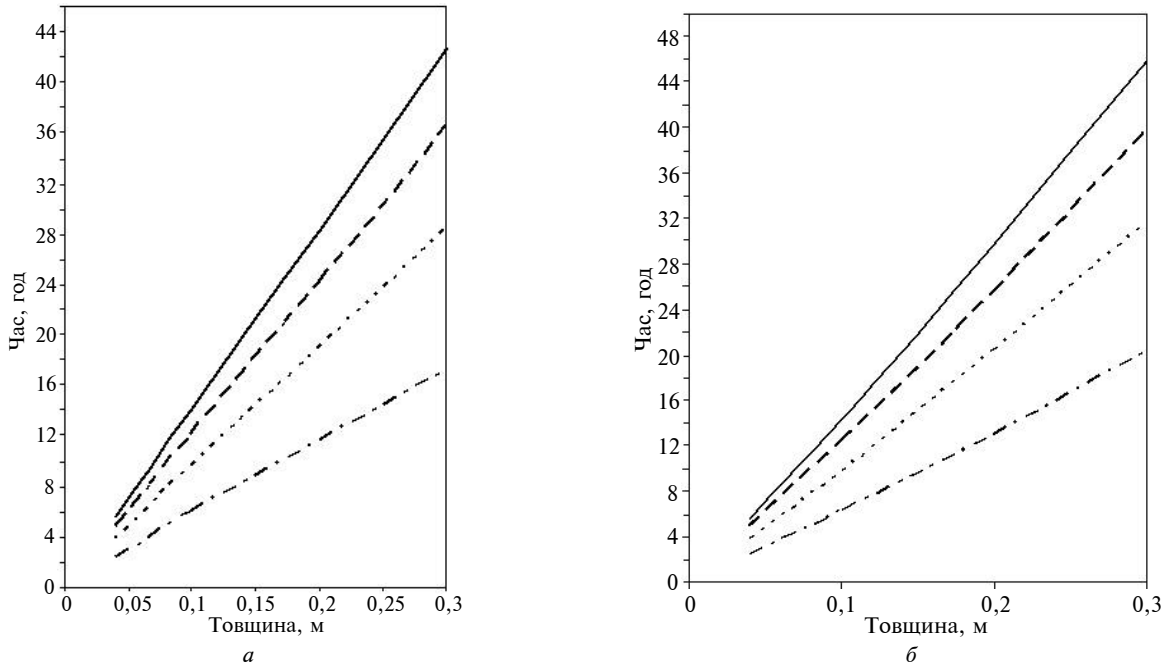
Дослідна установка складалась із ємності для збирання розталої води; решітки, на яку встановлюється дослідний зразок; ізоляційної конструкції для зменшення тепловіддачі з торців дослідного зразка; ємності для виміру об'єму води; термометрів для визначення та контролю температури навколишнього повітря в дослідному приміщенні та хронометра.

Основною метою досліду було вивчення процесу нагрівання поверхні вертикальної льодяної пластини до температури танення льоду (визначення часу нагрівання) та швидкості танення льоду. Для цього в дослідному приміщенні було імітовано відлигу через підтримання в ньому плюсової температури (6 °С) при вільній конвекції. На дослідну установку була встановлена льодяна стінка, після чого було змонтовано ізолюючу конструкцію бокових поверхонь.

Час нагрівання поверхні льодяної пластини з –9 до 0 °С становив 1 год 43 хв. Середня швидкість танення льоду протягом 8 год була близько 0,11 кг/год (з двох сторін), або 0,075 кг/(м^2·К·год). Зменшення товщини пластини за рахунок плавлення льоду з двох її сторін відбувалось зі швидкістю приблизно 1 мм за годину. На один градус різниці температур у 6 °С припадає трохи менше 0,2 мм розплавленого льоду за годину. Таким чином, для максимальних 10 діб відлиги (240 год) потрібно мати приблизно 250 мм льодяної стіни, щоб зберегти її від повного розтавання за умови вільної конвекції та розміщення стіни на північному фасаді, куди не потрапляє сонячне випромінювання. Для більш коротких відлиг можна задовольнитися товщиною 70–150 мм залежно від температури. Нагрівання таких стін до 0 °С йде максимум протягом однієї–двох діб.

Розрахунки нагрівання та танення льодяної стіни. Під час розрахунків розглядався процес нестаціонарного нагрівання льодяної стінки від початкової температури стінки t_c до температури плавлення льоду; було зроблено такі припущення: льодяна стінка вважалась нескінченною пластиною; до уваги брали тільки вільну конвекцію повітря; температура повітря у відлигу – 5 °С.

Були одержані графічні залежності часу нагрівання льодяної пластини від її товщини та початкової температури як на поверхні, так і в



а *б*

Рис. 2. Розрахункові залежності часу нагрівання пластини до 0 °С від її товщини та початкової температури: ——— – при t_c = –20 °С; – – – – – t_c = –15 °С; · · · · · · · · – t_c = –10 °С; – · – · – · – t_c = –5 °С; *а* – на поверхні стінки; *б* – посередині

центрі (рис. 2). Порівняння розрахункових даних з отриманими в експерименті засвідчує їх близькі значення, враховуючи різницю температур повітря на 1° в дослідах і розрахунках.

Також проведено розрахунки танення льодяної стінки в умовах стаціонарного режиму, коли вся стінка прогріта до температури 0 °С. У результаті із внутрішньої сторони льодяної стінки в умовах природної конвекції коефіцієнт тепловіддачі становить від 3,4 до 3,8, а з зовнішньої від 2 до 3,2 Вт/(м^2·К). За годину при $\alpha = 2{,}5$ Вт/(м^2·К) і $\Delta t = 6$ °С має танути 0,18 мм, а з двох сторін близько 0,36 мм, що в 2,8 разу менше експериментальних даних. Таким чином, коефіцієнт тепловіддачі в дослідах був близько 7 Вт/(м^2·К), що можна пояснити впливом течії води, яка утворюється при таненні. За наявності вітру із зовнішньої сторони швидкість танення льоду може зрости в кілька разів (за $\alpha = 15$ Вт/(м^2·К) – удвічі), що, відповідно, збільшить необхідну товщину льодяної стіни.

Висновки

Огорожа БЗ будівлі з метою її нагрівання чи підігрівання повітря БЗ теплотою кристалізації може бути виконана з льоду.

Товщина льоду майже не впливає на теплові втрати будівлі без подачі води по стіні за термічних опорів стіни ЖЗ, більших 1 (м^2·К)/Вт.

При зростанні термічного опору ЖЗ покращуються умови використання ТК води через зниження температур у БЗ і на стіні, які наближаються до температури атмосфери.

При замерзанні води на всіх поверхнях БЗ температура повітря у ній завжди буде плюсовою за рахунок теплових втрат із ЖЗ.

Нагрівання стіни в повітрі до температури плавлення відбувається менше однієї–двох діб.

За вільної конвекції повітря льодова стіна, що тане у відлигу при температурі повітря 6 °С з двох сторін, втрачає біля 0,2–0,25 мм товщини за годину на 1° різниці температур, а стіна 0,2–0,3 м не розтане повністю за тиждень. При таненні теплообмін з повітрям зростає порівняно з вільною конвекцією біля сухої стіни майже в три рази.

У подальшому слід провести експериментальні дослідження мінімальної густини зрошення вертикальної льодяної стіни водою та пристроїв для зрошення при невеликих витратах води.

1. *Пуховий І.І.* Безпосереднє використання теплоти довкілля в системах тепло- і холодопостачання // Техн. електродинаміка. – 2003. – Тем. вип. – С. 31–33.
2. *Пуховий І.І., Безродний М.К., Мхітарян Н.М., Кудря С.О.* Економія природного газу при заміні котлів тепловими насосами та використання теплоти кристалізації води, як альтернативи теплоті ґрунту // Відновлювана енергетика. – 2006. – № 1. – С. 15–19.
3. *Пуховий І.І.* Аналіз теплообміну в процесі зростання льодяних бурульок, що використовуються для акумулювання природного холоду та підігріву повітря в системах теплопостачання // Відновлювана енергетика. – 2007. – № 1. – С.16–19.
4. *Патент СССР № 1388665А1, F24D 15/00.* Система отопления здания / Пуховой И.И. – Опубл. 14.03.88, Бюл. 14.
5. *Патент України на корисну модель № 46112, F24D 15/00.* Спосіб опалення будівлі під час морозів з використанням холодної води / Пуховий І.І., Приймак К.О. – Опубл. 10.12.2009; Бюл. № 23.
6. *Пуховой И.И.* Система отопления зданий без теплового насоса с использованием природной холодной воды // Промышленная теплотехника. – 1992. – **14**, № 1-3. – С. 57–61.
7. *Дранік Т.В., Пуховий І.І.* Експериментальне дослідження нагрівання та танення льодяної пластини в умовах вільної конвекції // Тези доп. IX Міжнар. наук.-практ. конф "Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики", 18–22 квітня 2011 р., ТЕФ, НТУУ "КПІ". – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – С. 206.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
17 червня 2011 року