

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ОПОРУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЗАМКНУТИХ ПОВІТРЯНИХ ПРОШАРКІВ В ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Розроблений на основі математичної моделі алгоритм розрахунку розподілу температур по перерізу конструкції при влаштуванні в ній замкнутого повітряного прошарку та опору теплопередачі. Проаналізований характер зміни опору теплопередачі прошарку й огородження при різних температурах зовнішнього повітря.

Разработан на основе математической модели алгоритм расчета распределения температур по сечению конструкции при встраивании в ней замкнутого воздушного прослойка и сопротивления теплопередачи. Проанализирован характер изменения сопротивления теплопередачи прослойки и ограждения при разных температурах наружного воздуха.

The algorithm for calculation of temperature distribution through a structure cross-section by arranging in them a closed air interlayer and the resistance to heat transfer on basis of a mathematical model has been worked out. The character of changes in resistance to heat transfer of the interlayer and of the enclosure at different temperatures of outer air has been analysed.

Ключові слова: математична модель, повітряний прошарок, ізоляція, алгоритм.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Вибір матеріалу для теплоізоляції стіни відіграє досить важливу роль. На цей вибір впливає температурний режим огороджувальної конструкції. Установка повітряного прошарку є найпоширенішим прийомом теплової ізоляції. Наявність у конструкціях герметичних повітряних прошарків зменшує відтік теплоти. При цьому ступінь впливу залежить від опору теплопередачі основних конструктивних шарів огородження і від конструктивних характеристик повітряного прошарку. У той же час відсутня достатньо обґрунтована методика розрахунку повітряних прошарків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У підручнику проф. В.М. Богословського наводяться дані опору теплопередачі герметичного повітряного прошарку [1, с.178, табл.ІІІ.4]. Якщо проаналізувати дані табл.ІІІ.4, то ми побачимо, що зі зниженням різниці температур на поверхнях прошарку збільшується опір його теплопередачі. При цьому відсутні пояснення, як визначений коефіцієнт, що характеризує збільшення опору теплопередачі прошарку і наскільки він відповідає дійсності. З іншого боку, дані, які наведені в літературних джерелах, не дають змоги проаналізувати розподіл температур і визначити вплив конструктивних характеристик на опір теплопередачі повітряного прошарку.

Виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми. Існує безліч рекомендацій відносно конструювання замкнутих прошарків, наприклад роботи [1, 2]. Ці дані одержані експериментально і не характеризують повністю весь процес передачі теплоти крізь огорожувальну конструкцію. Вони не дозволяють оцінити кількісно ступінь цього впливу.

Мета роботи – розробити алгоритм розрахунку повітряного прошарку, проаналізувати характер змін опору теплопередачі замкнутого повітряного прошарку та огорожувальної конструкції в цілому.

Виклад основного матеріалу. Для більш глибокого аналізу фізичних процесів, які відбуваються при перенесенні теплоти через замкнутий повітряний прошарок, розглянемо сам фізичний процес та математичну модель [3], що описує теплообмін у такій конструкції. Схема теплових потоків, на основі якої розроблена математична модель, зображена на рис.1.

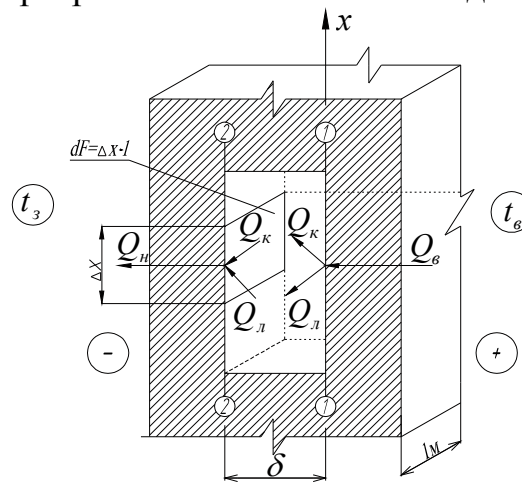


Рис. 1 – Схема теплових потоків в огорожувальній конструкції із замкненим повітряним прошарком:

1-1, 2-2 – відповідно поверхня 1 та 2 повітряного прошарку; Q_{κ} – конвективний тепловий потік; Q_{λ} – променевий тепловий потік; $Q_{в}$ – тепловий потік від внутрішнього повітря до повітряного прошарку; $Q_{н}$ – тепловий потік від повітряного прошарку назовні; t_6 – температура внутрішнього повітря; t_3 – температура зовнішнього повітря

Щоб визначити опір теплопередачі повітряного прошарку, необхідно розробити алгоритм вирішення математичної моделі:

– рівняння, які характеризують тепловий баланс першої та другої поверхні, тобто поверхні 1-1 і 2-2, мають вигляд

$$k_{\kappa}(t_6 - t_1) = \alpha_{k1}(t_1 - t_{cp1}) + c_0 \varepsilon_{np} \left[\left(\frac{273 + t_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_2}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

$$\alpha_{k2}(t_{cp2} - t_2) + c_0 \varepsilon_{np} \left[\left(\frac{273 + t_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_2}{100} \right)^4 \right] = k_{\lambda}(t_2 - t_3), \quad (2)$$

де k_{κ} – коефіцієнт теплопередачі від повітря в приміщенні до поверхні 1, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$; t_6 – температура повітря в приміщенні, $^\circ C$; t_1 – температура поверхні

1, $^{\circ}\text{C}$; α_{k1} – коефіцієнт конвективного теплообміну біля поверхні 1, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$; t_{cp1} – середня температура повітря біля поверхні 1, $^{\circ}\text{C}$; c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $c_0 = 5,77 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ град}^4}$; ε_{np} – приведений ступінь чорноти; α_{k2} – коефіцієнт конвективного теплообміну біля поверхні 2, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$; t_{cp2} – середня температура повітря біля поверхні 2, $^{\circ}\text{C}$; k_n – коефіцієнт теплопередачі від поверхні 2 до зовнішнього повітря, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$; t_3 – температура зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$.

Для визначення впливу конструктивних розмірів повітряного прошарку на тепловий потік крізь огорожувальну конструкцію, тобто на зміну коефіцієнта теплопередачі як основної теплотехнічної характеристики огорожувальної конструкції, розглянемо рівняння (1) і (2) разом із рівнянням, яке характеризує рівність теплових потоків при стаціонарній теплопередачі і має вигляд

$$k_e(t_e - t_1) = k_n(t_2 - t_3). \quad (3)$$

За допомогою рівнянь (1), (2) та (3) ми можемо знайти діапазон змін температур на поверхні 1 та 2 [4]. Для цього необхідно задатись температурою t_1 і визначити з рівняння (3) температуру t_2 . Потім на основі рівнянь (1) та (2) обчислити температури t_{cp1} і t_{cp2} . Аналіз усіх чотирьох температур дає змогу визначити діапазон, у якому вони відображають процес теплопередачі, тобто саме той діапазон температур, котрий задовольняє рівняння (1), (2) та (3) і не суперечить фізичним процесам, які відбуваються в прошарку при перенесенні теплоти.

Для подальшого розроблення алгоритму розрахунку математичної моделі прийемо спрощуючу передумову, що температура внутрішньої поверхні прошарку t_1 не змінюється з його висотою. Така спрощуюча передумова цілком допустима для замкнутих повітряних прошарків, розташованих у конструкціях стін. Додатковою умовою є те, що $t_1 > t_{cp1}$, $t_2 < t_{cp2}$, $t_1 > (t_{cp1}, t_{cp2}) > t_2$.

Гравітаційний тиск у прошарку можна визначити за допомогою рівнянь:

$$\Delta P_{ep} = gh(\rho_{cp1} - \rho_{cp2}), \quad (4)$$

з іншого боку

$$\Delta P = \left(\sum \xi_1 + \lambda_1 \frac{l}{d_{екв}} \right) \frac{v_{cp1}^2}{2} \rho_{cp1} + \left(\sum \xi_2 + \lambda_2 \frac{l}{d_{екв}} \right) \frac{v_{cp2}^2}{2} \rho_{cp2}, \quad (5)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; l – висота повітряного прошарку, м ; ρ_{cp1}, ρ_{cp2} – середня густина повітря відповідно біля поверхні 1 та 2; $\sum \xi_1, \sum \xi_2$ – сума коефіцієнтів місцевого опору для потоку повітря

відповідно біля поверхні 1 і 2; λ_1, λ_2 – коефіцієнт тертя, який виникає внаслідок руху повітря відповідно біля поверхні 1 та 2; $d_{екв}$ – еквівалентний діаметр потоку повітря; v_{cp1}, v_{cp2} – швидкість повітряного потоку біля цих поверхонь.

Для детального аналізу впливу різних факторів на нагрівання повітря, що переміщується вздовж ізотермічної поверхні, розглянемо процес теплообміну між повітрям та поверхнею 1-1. Тобто розглянемо випадок, коли біля поверхні відбувається нагрівання повітря і воно переміщується знизу вгору. Кількість теплоти, яка надходить до елементарного об'єму $\Delta V = \frac{\delta}{2} \cdot 1 \cdot \Delta x$, де δ – товщина повітряного прошарку (див. рис.1), змінює температуру повітря в елементарному об'ємі на величину Δt_{cp1} . Таким чином, рівняння теплового балансу для елементарного об'єму повітря має вигляд

$$\alpha_{k1}(t_1 - t_{\tilde{\theta}1}(\delta)) \cdot \Delta x1 = \tilde{n}W_1 \cdot \Delta t_{\tilde{\theta}1}, \quad (6)$$

де α_{k1} – коефіцієнт конвективного теплообміну між повітрям та поверхнею 1-1, $\frac{Вт}{(м^2 \cdot ^\circ C)}$; t_1 – температура ізотермічної поверхні 1-1 повітряного прошарку, $^\circ C$; $t_{cp1}(x)$ – середня температура повітря в прошарку біля елементарної площадки поверхні 1-1, $^\circ C$; c – теплоємність повітря, $c = 1,005 \frac{кДж}{кг \cdot ^\circ C}$; Δt_{cp1} – зміна температури повітря в процесі його нагрівання, $^\circ C$; $W_1 = \rho_{\tilde{\theta}1} \cdot F \cdot v$ – витрата повітря, яке переміщується біля поверхні 1-1, $\frac{кг}{с}$; F – площа поперечного перерізу повітря, що переміщується при нагріванні біля поверхні 1-1, $F = \frac{\delta}{2} \cdot 1$, $м^2$; v – швидкість повітря в прошарку, $м/с$; ρ_{cp1} – середня густина повітря в прошарку, $кг/м^3$; 1 – довжина повітряного прошарку, $м$ (див. рис.1).

Якщо перейти до нескінченно малих величин, то рівняння (6) можна записати у вигляді

$$\alpha_{k1}(t_1 - t_{cp1}(x))dx1 = cW_1 dt_{cp1}. \quad (7)$$

Після інтегрування диференційного рівняння та певних алгебраїчних перетворень одержимо кінцеву формулу, яка характеризуватиме зміну температури повітря при його переміщенні вздовж поверхні прошарку 1-1,

$$t_{cp1}(x) = t_1 - \frac{C_1}{e^{\frac{\alpha_{k1}x}{cW_1}}}. \quad (8)$$

Якщо розглядати протилежну поверхню прошарку, то біля цієї поверхні відбувається охолодження повітря, і воно переміщується згори вниз. Рівняння матиме аналогічний вигляд, тільки нижній індекс “2” характеризує той факт, що всі параметри визначають процес, який відбувається біля поверхні 2-2,

$$\alpha_{k2}(t_{cp2}(x) - t_2)dx = cW_2 dt_{cp2}, \quad (9)$$

$$t_{cp2}(x) = t_2 + \frac{C_2}{e^{\frac{\alpha_{k2}x}{cW_2}}}. \quad (10)$$

Рівняння (8) і (10) практично збігаються з рівняннями, котрі наведені в роботах [2] або [5], але граничні умови, які характеризуються коефіцієнтами C_1, C_2 , в замкнутих повітряних прошарках мають особливість, притаманну тільки цим прошаркам. Для визначення постійних інтегрування, тобто коефіцієнтів C_1, C_2 , використаємо рівняння (8) і (10):

– при $x = 0$ рівняння (8) та (10) мають вигляд

$$t_{cp1}(0) = t_1 - C_1, \quad t_{cp2}(0) = t_2 + C_2;$$

– при $x = h$ (h – висота повітряного прошарку) рівняння (8) і (10) можна записати так:

$$t_{cp1}(h) = t_1 - C_1 e^{-\frac{\alpha_{k1}h}{W_1c}}, \quad t_{cp2}(h) = t_2 + C_2 e^{-\frac{\alpha_{k2}h}{W_2c}}.$$

Середню температуру повітря прошарку біля поверхні 1 можна визначити як середнє арифметичне значення, тобто

$$t_{cp1}^n = \frac{t_{cp1}(0) + t_{cp1}(h)}{2} = \frac{t_1 - C_1 + t_1 - C_1 e^{-\frac{\alpha_{k1}h}{W_1c}}}{2},$$

і з цього рівняння випливає, що C_1 дорівнює

$$C_1 = \frac{2(t_1 - t_{cp1}^n)}{1 + e^{-\frac{\alpha_{k1}h}{W_1c}}}. \quad (11)$$

Аналогічно знаходимо C_2

$$C_2 = \frac{2(t_{cp2}^n - t_2)}{1 + e^{-\frac{\alpha_{k2} h}{W_2 c}}}. \quad (12)$$

Щоб знайти рішення системи рівнянь, яка складається із чотирьох лінійних рівнянь ((1), (2), (3), (5)) і двох диференціальних ((7), (9)), необхідно використати ще одну умову, а саме, що $t_{cp1}(0) \approx t_{cp2}(h)$ та $t_{cp1}(h) \approx t_{cp2}(0)$.

Відповідно до описаного алгоритму був виконаний розрахунок для огорожувальної конструкції, яка складається із цегляної кладки товщиною у 120 мм з боку зовнішнього повітря, а з боку приміщення – 250 мм (див. рис.2), коефіцієнт теплопровідності цегляної кладки $\lambda = 0,77 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$.

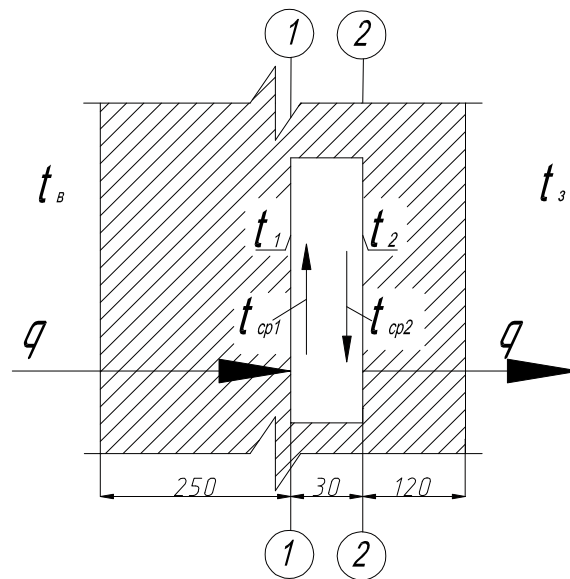


Рис. 2 – Огороджувальна конструкція із цегляної кладки з повітряним прошарком: 1-1 – внутрішня поверхня прошарку, тобто поверхня 1; 2-2 – зовнішня поверхня прошарку, поверхня 2; → – напрямок руху в повітряному прошарку; q – тепловий потік

Товщина повітряного прошарку $\delta_{в.п.} = 30$ мм, висота $h = 2$ м. Температура внутрішнього повітря $t_с = +18^\circ C$, температура зовнішнього повітря при розрахунках змінювалась у діапазоні від $+10$ до $-23^\circ C$ (див. табл.1).

Результати розрахунків наведені в табл.1 та на рис.3.

Таблиця 1 – Зміна параметрів у повітряному прошарку залежно від температури зовнішнього повітря

Параметри в повітряному прошарку та опір теплопередачі	Температура зовнішнього повітря $t_3, ^\circ C$				
	-23	-10	0	+8	+10
$t_1, ^\circ C$	-3,23	3,328	8,495	12,695	13,755
$t_2, ^\circ C$	-13,37	-3,35	4,31	10,41	11,92
$t_{cp1}, ^\circ C$	-8,13	0,096	6,49	11,61	12,91
$t_{cp2}, ^\circ C$	-8,29	0,0042	6,39	11,53	12,79
$t_{cp1}(0), ^\circ C$	-13,00	-3,09	4,53	10,69	12,14
$t_{cp1}(h), ^\circ C$	-3,26	3,28	8,45	12,62	13,69
$t_{cp2}(0), ^\circ C$	-3,25	3,30	8,41	12,48	13,6
$t_{cp2}(h), ^\circ C$	-13,33	-3,29	4,37	10,5	12,0
Q_T, Bm	48,30	33,38	21,62	12,07	9,66
$Q_{np.}, Bm$	37,74	27,24	18,31	10,58	8,57
$Q_{к.}, Bm$	10,56	6,14	3,32	1,49	1,09
$R_{в.п.}, \frac{M^2 \circ C}{Bm}$	0,21	0,2	0,19	0,19	0,19
$R_0, \frac{M^2 \circ C}{Bm}$	0,85	0,84	0,83	0,83	0,83

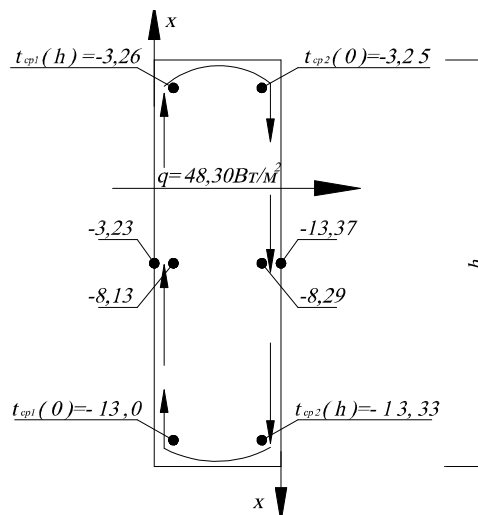


Рис. 3 – Розподіл температур повітря в прошарку при температурі зовнішнього повітря $t_3 = -23^\circ C$

Графік зміни опору теплопередачі повітряного прошарку залежно від температури зовнішнього повітря поданий на рис.4.

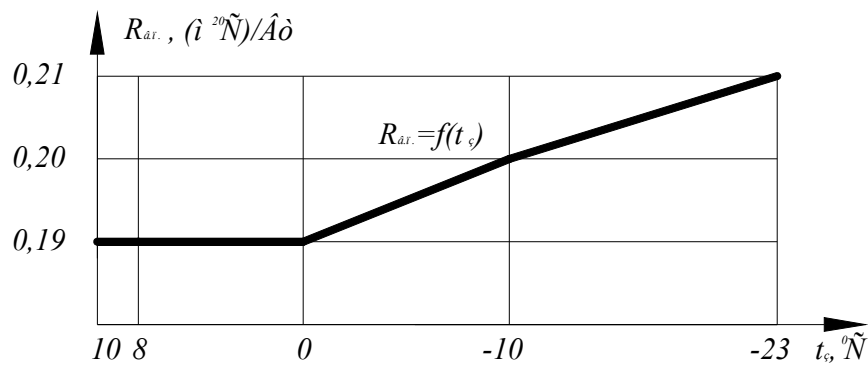


Рис. 4 – Зміна опору теплопередачі повітряного прошарку залежно від температури зовнішнього повітря

Таблиця 2 – Зміна опору теплопередачі повітряного прошарку залежно від температури зовнішнього повітря

Температура зовнішнього повітря	Різниця температур на поверхнях прошарку	Опір теплопередачі, визначений за допомогою математичної моделі	Опір теплопередачі, дані [1, 2]	Процент розходження даних
$t_3, ^\circ C$	$t_1 - t_2, ^\circ C$	$R_{в.м.}, \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Bm}$	$R_{Табл.}, \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Bm}$	$\eta, \%$
-23	10,14	0,21	0,16	31,25
-10	6,678	0,2	0,173	15,6
0	4,185	0,19	0,198	-4,04
+8	2,285	0,19	0,221	-14,03
+10	1,835	0,19	0,224	-15,179

У табл.2 наведені дані для порівняння значень опору теплопередачі, які одержані на основі розробленої математичної моделі, і дані, подані в працях [1, 2].

Аналізуючи дані, наведені в таблицях 1 і 2, можна зробити такі **висновки**:

- при зменшенні різниці температур між поверхнями замкнутого повітряного прошарку опір теплопередачі практично не змінюється, тому що конвективний тепловий потік значно менший, ніж променевий;

- при зниженні температури зовнішнього повітря опір теплопередачі прошарку, за даними автора, збільшується, але не суттєво, а за даними джерела [1] – зменшується;

- підвищення опору теплопередачі при зниженні температури зовнішнього повітря можна пояснити зміною співвідношення між променевим і конвективним тепловим потоком та збільшенням впливу конвективного теплового потоку на процес теплопередачі при зниженні температури зовнішнього повітря.

Таким чином, розроблений алгоритм розрахунку математичної моделі дає змогу визначити розподіл температур по перерізу конструкції при влаштуванні в ній замкнутого повітряного прошарку.

Література

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика/В.М.Богословский. – М.: Высш. школа, 1982. – 415 с.
2. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий/К.Ф.Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
3. Строй А.Ф. Розрахунок замкнених повітряних прошарків в огорожувальних конструкціях/А.Ф. Строй, Л.В. Гирман//ВІСНИК Теорія і практика будівництва: збірник статей. – Л.: Видавн. Національного університету “Львівська політехніка”, 2007. – №600. – С. 297 – 301.
4. Строй А.Ф. Діапазон оптимізації теплотехнічних характеристик огорожуючих констру-кцій за допомогою повітряних прошарків/А.Ф. Строй, Л.В. Гирман//Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн.сб. – К.: Техніка, 2007. – №76. – С. 247 – 250.
5. Строй А.Ф. Нагрівання повітря при переміщенні його вздовж ізотермічної поверхні/А.Ф.Строй//Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн.сб. – К.: Техніка, 2007. – №79. – С. 247 – 250.

Надійшла до редакції 6.11.2008

© Л.В. Гирман