

4. Сафонов А.П. Автоматизация систем централизованного теплоснабжения. - М.: "Энергия", 1974. – 272 с.
5. Экономико-математические методы и модели принятия решений в энергетике / Т.В.Лисочкина, Э.М.Косматов, А.И.Ирешова и др.; Под ред. П.Долгова, И.Климы. – Л.: ЛГУ, 1991. – 224с.
6. Сергеев С.А., Гринченко А.А. Экспертная система для идентификации качества теплоснабжения бытовых потребителей // Вісник НТУ "ХП": 36. наук. праць. Тематичний вип. «Електроенергетика і перетворююча техніка». Вип.36. – Харків: НТУ "ХП", 2005. – С.111-118.
7. Кушнарєв Ф.А., Надтока И.И., Почебут Д.В. Моделирование бытового электропотребления // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – №4. – С.87-90.
8. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» // Под. ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. – СПб: Пресском, 1997. – 307 с.
9. Любчик Л.М., Мирошніченко А.А. Применение сингулярно-спектрального анализа для статистического мониторинга сложных технических систем // Вісник НТУ "ХП": 36. наук. праць. Тематичний вип. «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Вип.18. – Харків: НТУ "ХП", 2005. – С.131-138.
10. Любчик Л.М., Мирошніченко А.А. Мониторинг динамических процессов на основе сингулярно-спектрального анализа // Вісник НТУ "ХП": 36. наук. праць. Тематичний вип. «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Вип.59. – Харків: НТУ "ХП", 2005. – С.3-8.
11. Программный продукт "Caterpillar" // <http://www.gistatgroup.com>.

Получено 19.03.2007

УДК 697.14

А.Ф.СТРОЙ, д-р техн. наук, Л.В.ГИРМАН

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ДІАПАЗОН ОПТИМІЗАЦІЙ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОВІТРЯНИХ ПРОШАРКІВ

Аналізуються існуючі методи розрахунку повітряних прошарків у зовнішніх огороджуючих конструкціях. Обґрунтовано їхню невідповідність стосовно функціонального призначення прошарків. Розроблена математична модель та алгоритм знаходження діапазону змін температур та коефіцієнта теплопередачі огороджуючих конструкцій при влаштуванні в них повітряних прошарків.

Досить часто як при новому будівництві, так і при реконструкції існуючих будинків, зокрема при їх утепленні, для покращення тепловологісного стану зовнішніх огороджуючих конструкцій передбачають в них повітряні прошарки. Різні фірми, які випускають матеріали для зовнішнього утеплення стін, рекомендують різну конструкцію та різні розміри повітряних прошарків. При цьому розміри повітряного прошарку не обґрунтовуються. Можна передбачити, що в деяких випадках вони далеко неоптимальні, а також не повністю відповідають своєму функціональному призначенню.

З метою визначення впливу на теплотехнічні характеристики огороджуючих конструкцій повітряних прошарків розглянемо їх більш детально.

Повітряні прошарки в огороджуючих конструкціях можуть бути замкнуті або розімкнуті (рис.1).

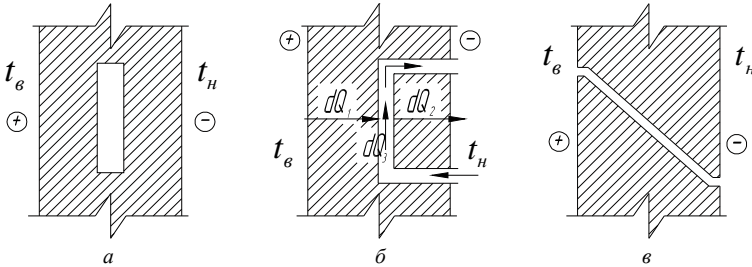


Рис.1 – Повітряний прошарок в огороджуючій конструкції:

a – замкнутий; *б* – розімкнутий, вертикальний; *в* – розімкнутий, похилий; $t_{в}$ – температура внутрішнього повітря; $t_{н}$ – температура зовнішнього повітря.

Функціональне призначення замкнутих повітряних прошарків – зменшити втрати теплоти через огороджуючу конструкцію. Розімкнуті повітряні прошарки збільшують втрати теплоти через огороджуючу конструкцію, але при цьому вони зменшують вологість огороджуючої конструкції, за рахунок її «привітрювання». Таким чином замкнуті і розімкнуті повітряні прошарки мають різне функціональне призначення. Виходячи з функціонального призначення повинні розроблятися і відповідні методи розрахунку. Для розімкнутих повітряних прошарків метод розрахунку повинен давати можливість визначити кількість вологи, яка відводиться з огородження, для замкнутих – як конструкція повітряного прошарку впливає на коефіцієнт теплопередачі. Аналізуючи існуючі методи розрахунку можна зробити висновок, що як для замкнутих, так і для розімкнутих повітряних прошарків відсутні методи, які б повністю могли дати відповіді на всі питання, згідно з функціональним призначенням повітряного прошарку. Зокрема, для розімкнутих повітряних прошарків є метод розрахунку, запропонований В.Д.Мачинським [4], який дає змогу відповісти на запитання, як зміняться втрати теплоти через огороджуючу конструкцію в тому випадку, коли в ній розташований розімкнутий повітряний прошарок. В основу методу покладено рівняння теплового балансу (рис.1, *б*), яке має вигляд:

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3,$$

де dQ_1 – елементарний тепловий потік від внутрішнього повітря до повітряного прошарку; dQ_2 – тепловий потік від повітряного прошарку назовні; dQ_3 – тепловий потік, який підігріває повітря в прошарку.

Якщо підставити в диференційне рівняння замість теплових потоків їх значення виражені через параметри та проінтегрувати це рівняння, одержимо вираз, який дає змогу визначити температуру повітря в будь-якій точці повітряного прошарку, а також середню температуру повітря в прошарку і втрати теплоти через огорожуючу конструкцію. Визначити, яка кількість вологи відводиться з конструкції стіни, за допомогою розімкнутого вертикального повітряного прошарку, цей метод не дає можливості. Метод розрахунку, запропонований для похилих повітряних прошарків, розроблений з метою оцінки нагрівання повітря, яке надходить в приміщення для його вентиляції.

Для замкнутих повітряних прошарків в роботах [1, 2, 5] є рекомендації щодо визначення опору теплопередачі залежно від товщини повітряного прошарку. Ці рекомендації розроблені на основі експериментальних досліджень і не дають змоги проаналізувати, як впливають конструктивні характеристики, зокрема розміри прошарку на опір теплопередачі.

Для більш глибокого вивчення фізичних процесів, які відбуваються при перенесенні теплоти через замкнутий повітряний прошарок, розглянемо цей фізичний процес та математичну модель, яка описує теплообмін в такому прошарку. Схема теплових потоків, на основі якої розроблена математична модель (рівняння (1)-(4)), наведена на рис.2.

$$\left\{ \begin{array}{l} k_e(t_e - t_1) = \alpha_{k1}(t_1 - t_{cp1}) + c_0 \epsilon_{np} \left[\left(\frac{273 + t_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_2}{100} \right)^4 \right], \quad (1) \\ \alpha_{k2}(t_{cp2} - t_2) + c_0 \epsilon_{np} \left[\left(\frac{273 + t_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_2}{100} \right)^4 \right] = k_n(t_2 - t_n), \quad (2) \\ \alpha_{k1}(t_1 - t_{cp1}^x) \Delta x_1 = W_1 c \Delta t_{x1}, \quad (3) \\ \alpha_{k2}(t_{cp2}^x - t_2) \Delta x_1 = W_2 c \Delta t_{x2}. \quad (4) \end{array} \right.$$

Рівняння (1) і (2) характеризують тепловий баланс першої та другої поверхні, тобто поверхні 1-1 та 2-2 (рис.2). Рівняння (3) і (4) харак-

теризують тепловий баланс повітря біля цих поверхонь.

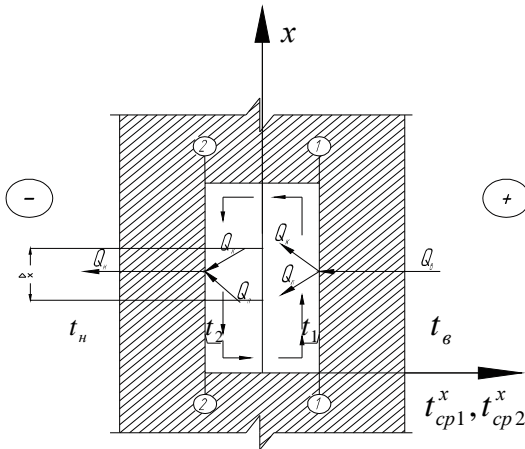


Рис.2 – Схема теплових потоків в огорожуючій конструкції із замкненим повітряним прошарком:

1-1, 2-2 – поверхні відповідно перша і друга поверхня повітряного прошарку.

У системі рівнянь, тобто в математичній моделі, яка характеризує теплообмін в замкнутому повітряному прошарку прийняті такі умовні позначення: t_{cp1}^x, t_{cp2}^x – середня температура повітря в прошарку відповідно біля поверхні 1 і 2 (рис.2); $k_в$ – коефіцієнт теплопередачі від повітря в приміщенні до поверхні 1-1; $t_в$ – температура повітря в приміщенні; t_1 – температура поверхні 1-1; t_n – температура зовнішнього повітря; α_{k1} – коефіцієнт конвекційного теплообміну біля поверхні 1-1; t_{cp1}^x – середня температура повітря на елементарному прошарку Δx біля поверхні 1-1; c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; ε_{np} – приведена ступінь чорноти; t_2 – температура поверхні 2-2; α_{k2} – коефіцієнт конвекційного теплообміну біля поверхні 2-2; t_{cp2}^x – середня температура повітря на елементарному прошарку Δx біля поверхні 2-2; k_n – коефіцієнт теплопередачі від поверхні 2-2

до зовнішнього повітря; W_1, W_2 – витрата повітря відповідно біля поверхні 1-1 та 2-2; c – теплоємність повітря; Δt_{x1} – різниця температур, на яку нагрівається повітря на елементарному прошарку Δx ; Δt_{x2} – різниця температур, на яку охолоджується повітря на елементарному прошарку Δx .

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

$$k_{\epsilon}(t_{\epsilon} - t_1) = k_H(t_2 - t_H). \quad (5)$$

Якщо повітряний прошарок в огорожуючій конструкції відсутній, то рівняння (5) має вигляд:

$$k_{\epsilon}(t_{\epsilon} - t_1) = k_H(t_1 - t_H). \quad (6)$$

З останнього рівняння одержимо:

$$t_1 = \frac{k_{\epsilon}t_{\epsilon} + k_Ht_H}{k_H + k_{\epsilon}}. \quad (7)$$

Це рівняння дає можливість визначити мінімальну температуру на поверхні 1, яку можна спостерігати в огорожуючій конструкції при відсутності повітряного прошарку. Якщо передбачити повітряний прошарок, то температура на поверхні 1 буде підвищуватись. Зв'язок між температурою на поверхні 1 та на поверхні 2 характеризує рівняння (5).

Для визначення діапазону змін температур t_1 і t_2 , а також середніх температур повітря t_{cp1} і t_{cp2} в повітряному прошарку проаналізуємо результати розрахунків системи рівнянь (1), (2) і (5). При розрахунках будемо задаватись температурою t_1 і визначати з рівняння (5) температуру t_2 . Потім на основі рівнянь (1) і (2) визначимо температури t_{cp1} і t_{cp2} .

$$t_{cp1} = t_1 - \frac{k_{\epsilon}(t_{\epsilon} - t_1) - c_0 \epsilon_{np} \left[\left(\frac{273 + t_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_2}{100} \right)^4 \right]}{\alpha_{k1}}, \quad (8)$$

$$t_{cp2} = t_2 + \frac{k_H(t_2 - t_H) - c_0 \varepsilon_{np} \left[\left(\frac{273 + t_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_2}{100} \right)^4 \right]}{\alpha_{k2}} \quad (9)$$

Виконаємо аналіз всіх чотирьох температур, щоб визначити діапазон, в якому вони логічно відображають процес теплопередачі. Як приклад, відповідно до описаного алгоритму, був виконаний розрахунок для огорожуючої конструкції у вигляді цегляної кладки з повітряним прошарком (рис.3). Розрахунок був виконаний для діапазону температур на поверхні 1-1 від $t_1 = 0^\circ C$ до $t_1 = -5^\circ C$.

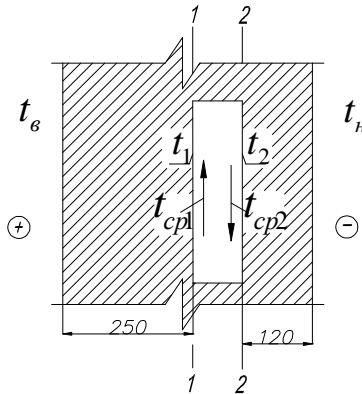


Рис.3 – Схема огорожуючої конструкції з цегляної кладки:
1-1 – поверхня 1; 2-2 – поверхня 2; → – напрям руху повітря.

Результати розрахунків наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Температура на поверхнях та температура повітря в повітряному прошарку

t_1	0	-2	-2,7	-2,8	-3	-4	-4,5	-4,8	-4,9	-5
t_2	-14,736	-13,817	-13,496	-13,45	-13,358	-12,899	-12,669	-12,532	-12,486	-12,44
t_{cp1}	8,19	0,319	-2,616	-3,046	-3,909	-8,413	-10,8	-12,28	-12,782	-13,291
t_{cp2}	-23,23	-16,22	-13,58	-13,2	-12,42	-8,324	-6,142	-4,8	-4,315	-3,845

Аналіз даних табл.1 свідчить, що фізичному смислу, тобто логіці процесу теплопередачі, відповідають дані табл.1, розміщені у виділеному прямокутнику. Дійсно, якщо проаналізувати перший стовпчик табл.1, то можна зробити висновок, що всі наведені в ньому значення температур задовольняють рівняння (1), (2) і (5). Але температура повітря в повітряному прошарку біля поверхні 1 (табл.1, перший стовп-

чик) вища, ніж температура поверхні 1. Це суперечить здоровому глузду. Аналогічно при температурі на поверхні 1 $t_1 = -4,9^\circ C$. У цьому випадку температура повітря біля поверхні 1 нижча ніж температура поверхні 2, тобто $t_{cp1} = -12,782^\circ C < t_2 = -12,486^\circ C$. Повітря охолоджується біля поверхні 2, але його температура не може бути нижчою ніж температура поверхні, біля якої воно охолоджується.

Таким чином, виконаний аналіз дає змогу визначити діапазон можливих температур у замкнутому повітряному прошарку і, як наслідок, діапазон змін опору теплопередачі і теплового потоку залежно від конструктивних характеристик та місця розміщення повітряного прошарку.

Аналогічні розрахунки були виконані для іншої огорожуючої конструкції (рис.4) при різному розташуванні повітряного прошарку відносно зовнішнього повітря.

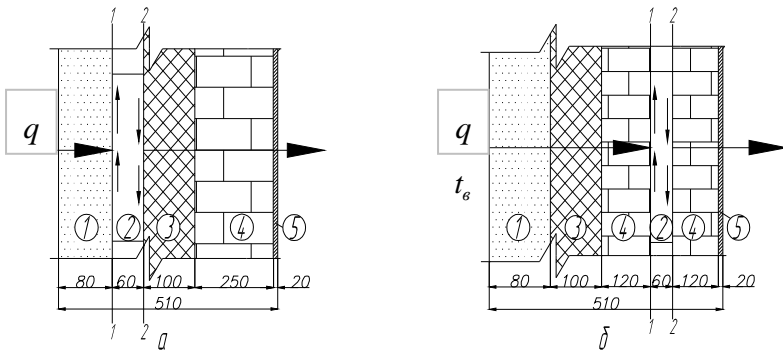


Рис. 4 – Схема огорожуючої конструкції:

a – повітряний прошарок, розташований ближче до внутрішньої поверхні огороження; *б* – прошарок, розташований ближче до зовнішньої поверхні огороження; Конструктивні шари: 1 – гіпсобетонна плита; 2 – повітряний прошарок; 3 – утеплювач (мінераловатні плити); 4 – цегляна кладка; 5 – штукатурка.

Результати розрахунків наведені в табл.2, 3 (для рис.4, *a* і 4, *б* відповідно).

Таблиця 2

t_1	12,7	12,95	13	13,05	13,1	13,3	13,5
t_2	12,052	10,399	10,068	9,738	9,407	8,084	6,761
t_{cp1}	-1,26	10,143	11,534	12,816	14,012	18,199	21,772
t_{cp2}	26,525	13,309	11,587	9,979	8,461	3,005	-1,814

Таблица 3

t_1	-14	-14,4	-14,5	-14,6	-15	-15,5	-15,6	-16
t_2	-19,005	-18,955	-18,942	-18,93	-18,88	-18,817	-18,805	-18,755
t_{cp1}	-12,852	-14,204	-14,549	-14,899	-16,337	-18,242	-18,64	-20,309
t_{cp2}	-20,195	-19,158	-18,9	-18,619	-17,494	-15,975	-15,653	-14,287

Дані табл.2, 3 свідчать, що температура повітря біля поверхні 1 у першому випадку, тобто коли прошарок розташований ближче до внутрішньої поверхні стіни, буде знаходитись в діапазоні від $t_{cp1} = 11,53$ до $t_{cp1} = 12,816$ °С. При цьому тепловий потік буде змінюватись в діапазоні від $q = 15,085$ до $q = 18,816$ Вт/м². У другому випадку, коли прошарок розташований ближче до зовнішньої поверхні стіни, температури знаходяться в діапазоні від $t_{cp1} = -14,549$ до $t_{cp1} = -18,242$ °С, а тепловий потік $q = 13,898 \div 15,475$ Вт/м².

Таким чином, якщо повітряний прошарок розміщений ближче до зовнішньої поверхні, то тепловтрати через огорожуючу поверхню зменшуються, порівняно з огороженням, де прошарок знаходиться ближче до внутрішньої поверхні. Слід також відмітити, що зменшення коефіцієнта теплопередачі зменшує діапазон змін загального опору теплопередачі і теплового потоку за рахунок повітряного прошарку.

Слід зазначити, що запропонований у даній роботі і проілюстрований на прикладах алгоритм дає змогу за допомогою рівнянь (1), (2) і (5) визначити діапазон змін коефіцієнта теплопередачі огороження у випадку, коли передбачається повітряний прошарок в огороженні.

- 1.СНиП II-3-79*. Строительная теплофизика / Госстрой СССР. – М., 1986. – 30 с.
- 2.Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Высш. шк., 1982. – 415 с.
- 3.Маляренко В.А., Чайка Ю.И. Техническая теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений. – Харьков: Рубикон, 2001. – 280 с.
- 4.Мачинский В.Д. Теплотехнические основы строительства. – М.: Стройиздат, 1949. – 325 с.
- 5.Фаренюк Г.Г., Хоменко В.П., Могилат А.И., Чернявский В.В. Методические рекомендации по повышению теплотехнических показателей ограждающих конструкций на стадии их проектирования и изготовления. – К., 1987. – 32 с.

Отримано 04.04.2007