

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ ПОВІТРО- І ТЕПЛООБМІНУ В ПОМЕШКАННЯХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ ЗА РОЗРАХУНКОВИХ УМОВ

© Жуковський С.С., Кінаш О.В., 2007

Запропоновано математичну модель оцінювання процесів повітротеплообміну помешкань, яка враховує їх теплообмін із зовнішнім середовищем, повітрообмін за дії природних чинників і особливостей прилягання помешкань до фасадних стін будинку, та втрати тепла на підігрівання притікального (зовнішнього) повітря.

The mathematical model of an estimation processes air heat exchange of premises which considers their heat exchange with an environment, air exchange is offered at action of natural factors and features of conformity premises to front walls of a building, and also loss of heat on warming up of incoming (external) air.

Аналіз математичних моделей і методів їх реалізації. Більшість математичних моделей стосуються процесів, які відбуваються в окремих приміщеннях. Є лише декілька математичних моделей, які уможливають дослідження цих процесів у виокремлених об'ємах будинку, наприклад в помешканні, в межах окремого поверху тощо. Незалежно від початкових умов і методів реалізації таких моделей майже всі вони не враховують взаємовплив теплообміну і масообміну, що пов'язаний з повітрообміном [1, 2].

Повітрообмін трактується як певна означена і незмінна величина, а в кращому випадку описується незмінною функціональною залежністю, встановленою на основі вимірювань або теоретичного аналізу фізичних явищ в групі будинків, окремого об'єкті і навіть у приміщенні. Найчастіше процеси повітрообміну взагалі не враховуються, а розглядається теплообмін внутрішнього повітря (в межах всього будинку або окремого приміщення) з зовнішнім повітрям із врахуванням теплонадходжень від внутрішніх і зовнішніх (енергія сонячного випромінювання) джерел і термічних опорів зовнішніх огорож [3, 4].

Визначення повітрообміну механічно вентиляованих приміщень не є проблемним. Фактом є те, що за відповідного добору витратно-тискових характеристик такого вентилявання вплив природних чинників, якими є термічний напір і тиск вітру, є обмежений і відчутно на повітрообмін не впливає. Інакше це відбувається за найчастіше вживаного у житловому будівництві природного (гравітаційного) вентилявання.

Одна група математичних моделей повітрообміну трактує будинок як цілісний об'єкт, обмежений вертикальними і горизонтальними зовнішніми огороженнями (зовнішніми стінами і надпідвальними та горищними перекриттями). Враховуючи узагальнені інфільтраційні характеристики для кожного з цих огорожень (віднесені до їх одиничної поверхні), розрахунки зводяться до визначення усередненого тиску повітря всередині будинку. Перевагами таких моделей є простота і можливість використання доступних невеликих комп'ютерів, а кінцевим результатом – визначення повітрообміну будинку загалом і пов'язаних з ним теплових потреб [5, 6].

В іншій групі математичних моделей повітрообміну будинок розглядається як просторова мережа нелінійних опорів, які пов'язані із місцями перетікань повітря (наприклад, щільними отворами вікон і балконних дверей, вентиляційними трубопроводами тощо). Створена на цій фізичній основі система нелінійних рівнянь є основою математичної моделі, яка реалізується за допомогою комп'ютерної техніки [5, 7].

Математична модель тепло- і повітрообміну помешкань житлових будинків за розрахункових умов. Задачею реалізації математичної моделі є визначення закономірностей досліджуваного процесу із врахуванням умов однозначності. Кінцево це означає встановлення математичних залежностей тепло- і повітрообміну помешкання із врахуванням повітропроникності його зовнішніх і внутрішніх огорожень, наявності вентиляційних отворів і трубопроводів із врахуванням перепадів тиску назовні і всередині помешкання з причини термічного напору і вітрового тиску (чи дії вентиляторів). Розрахунки зводяться до застосування засад балансування тепловтрат помешкання і теплонадходжень в нього від систем обігрівання (СО) із врахуванням витрат тепла на підігрівання зовнішнього повітря, яке притікає до помешкання, за умови рівності масових витрат притікального і витікального повітря.

За природного вентилявання внутрішній простір помешкання можна розглядати як єдине ціле, оскільки у внутрішніх дверях окремих приміщень передбачаються отвори для перетікання повітря, а у санвузлах і кухнях – отвори для витікання забрудненого і зужитого повітря в атмосферу, які поєднані переважно із внутрішньостіновими каналами. Притікання зовнішнього повітря у помешкання нерегульоване через нещільності вікон і балконних дверей, а у разі ущільнених зовнішніх огорожень – “частково” регульоване через віконні провітрювачі чи засоби мікровентиляції. Очевидно, що цей процес є нерегульованим (некерованим), тому що він залежить від природних чинників (температур внутрішнього і зовнішнього повітря, швидкості і напрямку вітру, впливу мешканців тощо).

Для створення математичної моделі прийемо, що внутрішні огороження помешкання і його вхідні двері є повітронепроникними.

Теплопродуктивність СО помешкання без врахування теплонадходжень від внутрішніх і зовнішніх (сонячне випромінювання) джерел запишемо у вигляді балансової рівності

$$\dot{Q}_{c.o.} = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{вент} \quad \text{Вт}, \quad (1)$$

де \dot{Q}_{mp} – трансмісійні тепловтрати із врахуванням додаткових тепловтрат за дії вітру, Вт; $\dot{Q}_{вент}$ – вентиляційні (інфільтраційні) тепловитрати, Вт.

Величину \dot{Q}_{mp} можна вирахувати за формулою

$$\dot{Q}_{mp} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot F_i (t_{в.сеп} - t_3) \cdot n \cdot \beta \quad \text{Вт}, \quad (2)$$

де K_i , F_i – відповідно коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м² К), і площа теплового контуру i -ї зовнішнього огороження помешкання; $t_{в.сеп}$ – усереднена температура внутрішнього повітря, °С; t_3 – температура зовнішнього повітря, °С (за розрахункових умов $t_e = t_{x.5}$, де $t_{x.5}$ – середня температура найбільш холодної п'ятиденки); n – поправковий коефіцієнт на різницю температур ($t_{в.сеп} - t_3$), який приймають: $n=1$ – за безпосереднього контакту огороження із зовнішнім повітрям; $n \leq 1$ – в інших випадках [8]; β – коефіцієнт підвищення тепловтрат за дії вітру: $\beta=1,05$ – за розрахункової швидкості вітру ≤ 5 м/с; $\beta=1,1$ – за розрахункової швидкості вітру ≥ 5 м/с.

Витрати тепла на підігрівання притікального (зовнішнього) повітря можна вирахувати за формулою

$$\dot{Q}_{вент} = 0,278 \cdot G_{вент} \cdot c_p \cdot (t_{в.сеп} - t_3) \quad \text{Вт}, \quad (3)$$

де $G_{вент}$ – сумарна кількість зовнішнього повітря, що притікає до помешкання, кг/год; c_p – питома вагова теплоємність повітря за сталого тиску, кДж/(кг К), $c_p=1,005$.

Кількість зовнішнього повітря, яке повинно притікати до помешкання за розрахункових умов, повинна відповідати сумарному нормативному витоку із кухні і санвузла, тобто ≥ 140 м³/год (≥ 90 м³/год – з кухні, за розміщення в ній тільки чотирипальникової газової плити; 50 м³/год – із суміщеного санвузла) [9].

Якщо зовнішнє повітря притікає в приміщення через нещільності вікон (щілини вікон) чи віконні отвори, то його кількість можна визначити за алгоритмом тискового методу. Розглянемо це на прикладі помешкання, яке прилягає до одного з фасадів будинку (рис. 1).

За відсутності вітру ($v_s=0$) всередині і ззовні помешкання виникає перепад (різниця) напорів зовнішнього і внутрішнього повітря, спричинена їх відмінною густиною, і прямо пропорційно залежна від висот h і h^* .

Згідно з рис. 1, за наявності балконних дверей висота h приблизно дорівнює відстані від низу вікна до верхівки вентиляційного трубопроводу, а висота h^* – відстані від центра за стельового отвору для витоку внутрішнього повітря у вентиляційний трубопровід (канал) до його верхівки, м.

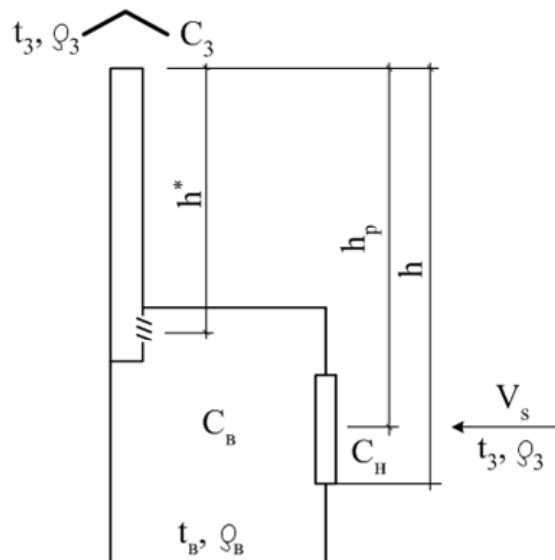


Рис. 1. Характеристична схема для оцінювання природних тискових впливів на помешкання, яке прилягає до однієї фасадної стіни будинку

Отже, розрахункова висота h_p для визначення величини перепаду гравітаційних тисків Δp_{gp} (гравітаційного напору)

$$h_p = (h + h^*)/2 \text{ м,} \quad (4)$$

тобто приблизно дорівнює вертикальній відстані від центра вікна до верхівки вентиляційного трубопроводу (каналу) або навіть дещо менша (за відсутності балконних дверей).

З урахуванням цих міркувань

$$\Delta p_{gp} = h_p \cdot (\rho_3 - \rho_6)g, \text{ Па,}$$

де ρ_3 , ρ_6 – густини відповідно зовнішнього і внутрішнього повітря, які залежать від температур зовнішнього (t_3) і середньої температури внутрішнього ($t_{в.сеп.}$) повітря.

Густину повітря можна вирахувати за формулою

$$\rho = 1,2 \cdot \frac{p_{атм}}{101325} \cdot \frac{293}{(273 + t)} \text{ кг/м}^3 \quad (5)$$

або дещо наближено за формулою

$$\rho = \frac{353}{273 + t} \text{ кг/м}^3.$$

Маючи чисельну величину Δp_{gp} , за експериментально визначеною для відповідного типу віконної конструкції залежністю $\dot{Q}_{вент}^* = f(\Delta p)$ можна знайти одиничну витрату повітря $\dot{Q}_{вент}^*$ ($\dot{Q}_{інф}^*$), м³/(год 1 м), а потім і сумарну кількість притікального в помешкання зовнішнього (інфільтраційного) повітря

$$\dot{Q}_{\text{вент}} = \dot{Q}_{\text{вент}}^* \cdot \Sigma l \text{ м}^3/\text{год}; \quad (7)$$

$$G_{\text{вент}} = \dot{Q}_{\text{вент}} \cdot \rho_3 \text{ кг/год}, \quad (8)$$

де Σl – сумарна довжина щілинних отворів віконної конструкції, м.

Потім за формулою (3) можна вирахувати витрати тепла на підігрівання притікального (зовнішнього) повітря. Очевидно, що за природного вентилявання помешкання відповідна кількість теплоти переноситься із витікальним повітрям в атмосферу, що вказує на істотний недолік застосування природного вентилявання (з погляду енергоощадності).

За дії вітру зі швидкістю v_s в прифасадних і придахових повітряних зонах будинку виникають надлишкові додатні (в навітряних зонах) і надлишкові від’ємні (розрідження) тиски, які в нормативній літературі [10] оцінені осередненими безрозмірними величинами, так званими “аеродинамічними коефіцієнтами”:

$$C_H = \frac{p_H}{\rho_3 \cdot v_s^2 / 2}; \quad (9)$$

$$C_3 = \frac{p_3}{\rho_3 \cdot v_s^2 / 2}, \quad (10)$$

де p_H, p_3 – усереднені надлишкові статичні тиски відповідно в навітряній і завітряній зонах (чи міні-зонах), які межують із зовнішніми огородженнями будинку.

Приклад 1. Згідно з рис. 1 за умови $C_H = +0,8$ і $C_3 = -0,8$ – $C_B = 0$ (C_B – внутрішній аеродинамічний коефіцієнт за дії вітру), де

$$C_B = \frac{p_B}{\rho_3 \cdot v_s^2 / 2}. \quad (11)$$

Із залежності (11) зрозуміло, що за $C_B=0$ внутрішній надлишковий тиск $p_B=0$.

За швидкості вітру $v_s=5$ м/с і $\rho_3 = 1,3$ кг/м³:

$$p_H = +0,8 \cdot \frac{1,3 \cdot 5^2}{2} = 13 \text{ Па},$$

а перепад тисків, спричинених вітром:

$$\Delta p_s = p_H - p_3 = 13 - 0 = 13 \text{ Па}.$$

Сумарний перепад гравітаційних напорів і вітрових тисків на вікнах помешкання дорівнює

$$\Delta p = \Delta p_{gp} + \Delta p_s, \text{ Па}. \quad (12)$$

Далі за залежністю $L_{\text{вент}}^* = f(\Delta p)$ можна визначити одиничну витрату повітря, а потім за формулами (7) і (8) – його загальну витрату, а за формулою (3) – витрату тепла на його підігрівання.

Характеристичну схему для оцінювання природних тискових впливів на помешкання, яке прилягає до двох фасадних стін будинку, зображено на рис. 2.

Маючи числові значення C_H, C_3, C_3^* , методом послідовних наближень визначаємо величину C_B , а за нею і величину внутрішнього надлишкового тиску за дії вітру:

$$p_B = C_B \cdot \frac{\rho_3 \cdot v_s^2}{2}, \text{ Па}.$$

Якщо $C_3^* < C_B < C_H$ і $C_3^* < C_3$, то за дії лише вітрових тисків зовнішнє повітря затікатиме через щілини (отвори) вікон навітряної фасадної стіни, інтенсивно витікатиме назовні через вентиляційні трубопроводи і в меншій кількості – через щілини вікон завітряного фасаду.

Картина природного повітрообміну і його кількісні параметри можуть змінитись, якщо врахувати дію гравітаційних напорів.

Оскільки помешкання розміщені на різних поверхах будинку, то змінюється величина h_p , а отже, і величина Δp_{gp} .

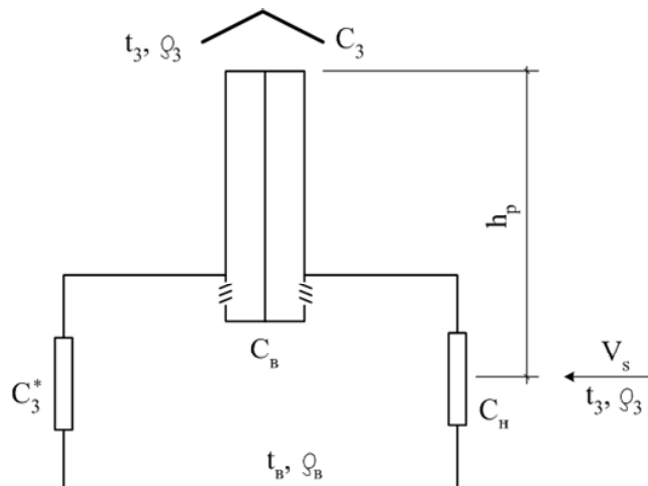


Рис. 2. Характеристична схема для оцінювання природних тискових впливів на помешкання, яке прилягає до двох фасадних стін будинку

Вітрові тиски залежать переважно від геометричних розмірів і вигляду будинку, впливу на нього сусідніх будинків і рельєфу місцевості, напрямку вітру. Якщо впливи геометричних розмірів і конфігурації одного будинку на розподілення вітрових тисків по його поверхнях досліджені добре, то вітрові впливи сусідніх будинків, рельєфу місцевості і її підстелюваних (збурювальних) поверхонь є недостатньо вивченими, а тому і недостатньо прогнозованими.

Для оцінювання умови забезпечення нормативного повітрообміну помешкання ($\geq 140 \text{ м}^3/\text{год}$) його визначають для безвітряної погоди, тобто за дії лише Δp_{zp} . За неможливості забезпечення повітрообміну помешкання природними показниками роблять висновок про задіяння систем (системи) механічної вентиляції.

Теплопродуктивність СО помешкання (Q_{CO}) визначають за сумарної дії гравітаційних напорів і вітрових тисків. Аналізують вплив вентиляційного (інфільтраційного) повітрообміну на сумарні тепловтрати помешкань з малоцільними і ущільненими вікнами, з недостатньо і задовільно утепленими зовнішніми огороженнями.

Висновки: 1. Запропонована доволі проста математична модель оцінювання процесів повітро- і теплообміну помешкань житлових будинків за розрахункових умов, яка враховує їх теплообмін із зовнішнім середовищем, повітрообмін за дії природних чинників і особливостей прилягання помешкань до фасадних стін будинку та відповідно витрати тепла на підігрівання притікального (зовнішнього) повітря.

2. Практичне застосування запропонованої математичної моделі дає змогу достовірніше оцінювати теплопродуктивність систем обігрівання помешкань, а також уможливорює забезпечення повітрообміну природними тисковими впливами.

1. Mehta D.P., Woods J.E. An experimental validation of a rational model for dynamic respons of buildings. ASHRAE Transc., part 2/1980. 2. Mehta D.P. Effects of control dynamics on energy consumption in residential heating system // Energy Engineering. – 1983. – № 3. 3. Kusuda T. Procedure employed by the ASHRAE task group for the determination of heating and cooling loads for building energy analysis. ASHRAE Transc., part 1/1976. 4. Nantka M.B., Majerski S. Metoda analizy rzeczywistych potrzeb cieplnych budynkow mieszkalnych. COW nr.5/1986. 5. Liddament M.W. The Air Infiltration Center's Program of Model Validation. ASHRAE TRANSCATION, 8, 9/1983. 6. Liddament M.W., Thompson C. Mathematical Models of air infiltration. Technical Note AIC, 9/1982. 7. Feustel H., Zuercher Ch. Computer Modelling and Experimental Verification. Energy and Buildings, 8/1985. 8. СНиП II-3-79**. Строительная теплотехника. – М.: Стройиздат, 1986. – 32 с. 9. СНиП 2.08.01-89. Жилье здания // Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 16 с. 10. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1985. – 56 с.