

new one (model 4) is 0,91 dBA. Model 4 insignificantly overrates the real noise value (0,00063 %). However, comparing with the overrating while using the base formula (3,7 %), the error is negligible.

#### REFERENCE

1. **Osipov G. L.** Snizhenie shuma v zdaniyah i zhilyih rayonah / G. L. Osipov, E. Y. Yudin, G. Hyubner i dr. – Pod red. G. L. Osipova, E. Yu. Yudina. – M.: Stroyizdat, 1987. – 558 p.
2. **Yudin E. Y.** Metod rascheta shuma poezda na primagistralnoy territorii / E. Y. Yudin, I. D. Kotova // Zashchita ot shuma v zdaniyah i na territorii zastroyki: sb. nauch. tr. pod red. E. Y. Yudina. – M.: NIISF, 1987. – 143 p.
3. **Karagodina I. L.** Gorodskie i zhilishno-kommunalnyie shumyi i borba s nimi / I. L. Karagodina, G. L. Osipov, I. A. Shishkin. – M.: Meditsina, 1964. – 231 p.
4. **Kovrigin S. D.** Arhitekturno-stroitel'naya akustika. – I: Vysshaya shkola, 1980 g. – 184 p.
5. **Samoylyuk E. P.** Borba s shumom v gradostroitel'stve / E. P. Samoylyuk. – Kiev, «BudIvelnik», 1975 g. – 128 p.
6. **Alekseev S. P.** Borba s gorodskimi i zavodskimi shumami / S. P. Alekseev, Y. I. Shneyder. – M.; L.: Gosstroyizdat, 1939. – 196 s.: il., tabl. – 325 p.
7. **Pospelov P. I.** Model rasprostraneniya shuma ot odinochnogo avtomobilya // Povyishenie transportnykh kachestv avtomobilnykh dorog / P. I. Pospelov, V. N. Pokidko – M., 1986. – pp. 114–125.
8. **Pospelov P. I.** Borba s shumom na avtomobilnykh dorogah / P. I. Pospelov. – M. – Transport, 1981. – 88 p.
9. **Yuichi K.** Issledovanie transportnykh шумов / K. Yuichi, O. Ryuichi, Y. Shizuma. – Nihon onkyo gakkaiishi: J. Acoust. Soc. Jap., 2001. – № 3. – p. 184–191.
10. **Yudin E. Y.** Spravochnik proektirovshchika. Zashchita ot shuma. – M.: Stroyizdat, 1974. – 134 p.
11. **Samoylyuk E. P.** Issledovanie i primeneniye shumozashchitnykh ekraniruyuschih sooruzheniy v gradostroitel'stve. – Dis. kand. tehn. nauk. – Kiev, 1968. – 125 p.
12. **Ivanov N. I.** Teoriya i praktika borbyi s shumom: uchebnik / Ivanov N. I. – M.: Universitetskaya kniga. – Logos, 2008. – 424 p. – p. 103.
13. Prikladnaya mnozhestvennaya regressiya / Korrelyatsionnyj analiz dlya povedencheskix nauk / [Koen Y., Koen P., Leona S. Ajken; Stiven H.]. – L. Erlbaum Associates, ISBN 0-8058-2223-2, 2003.

УДК 628. 89

#### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕННЯ

*В. О. Ужеловський, к. т. н., доц., В. Б. Глінкін, магістр*

**Ключові слова:** математичне моделювання, мікроклімат, імітаційне моделювання, температура, вологість

**Постановки проблеми.** Для покращення роботи системи управління мікрокліматом приміщень, необхідно мати адекватну математичну модель будівлі. З цією метою виконується математичний опис його параметрів. Математична модель будівлі є багат шаровою структурою і будується у вигляді субблока, що складається зі стін, даху, підлоги, вікон, внутрішніх джерел тепла, системи вентиляції приміщення.

**Аналіз літератури.** У роботах сучасних фахівців в галузі управління мікрокліматом приміщень вже склалося стійке та якісне уявлення про керування температури та вологості. Зокрема, Е. В. Сазонов стверджує, що у автоматизації технологічного процесу мікроклімату в приміщеннях вирішальну роль відіграє створення адекватної математичної моделі. Саме правильна математична модель в сукупності з елементами системи автоматики, в значній мірі, визначають якість регулювання параметрів мікроклімату [9].

Особливості та характеристики створення математичної моделі мікроклімату широко розглянуті в публікаціях А. А. Калмакова, Ю. А. Кувшинова, С. С. Романова [3]. Проте, серед них недостатньо інформації про створення та реалізацію математичних моделей мікроклімату в приміщеннях. Такі відомості можна знайти в дослідженнях суміжних тем И. Г. Мяскового [7], Ж.-Л. Лионе [6].

**Мета статті.** Розробка математичної моделі мікроклімату в приміщеннях, для забезпечення комфортних умов і економічних режимів експлуатації.

**Виклад матеріалу.** При розробці математичного опису мікроклімату в приміщеннях будівель і споруд необхідно враховувати мінливі зовнішні і внутрішні параметри.

Змінними зовнішніми параметрами є: температура зовнішнього повітря; сонячний теплоприток; внутрішній теплоприток від допоміжного обладнання; кількість тепла, що генерується системою.

До змінних внутрішніх параметрів відносяться: об'єм приміщення; конструкція стін і підлоги; елементи стін, їх теплоємність і питомий опір.

Є два типи стін: з високою теплоємністю – капітальні споруди; з низькою теплоємністю – легкі конструкції.

Для створення математичного опису стін з високою і низькою теплоємністю з довідника з фундаментів ASHRAE [10] були обрані значення повного і ємнісного опорів.

Вихідні параметри імітаційної моделі: температура внутрішнього повітря, підлоги і зовнішніх стін; теплоємність і охолоджуюча здатність.

Температура повітря всередині будівлі залежить від інфільтрації повітря, вентиляції і описується певним рядом величин. До них відноситься: (питомий) тепловий потік, що входить в кімнату через стіни, вікна та дах, внутрішній теплоприток. Рівняння енергетичного балансу температури повітря в приміщенні:

$$m_a c_a \frac{dT_i}{dt} = Q_{\text{кон}} + Q_{\text{вент}} + Q_{\text{інф}} + Q_{\text{ст}} + Q_{\text{вн}}, \quad (1)$$

де  $m_a$  – маса повітря;

$c_a$  – питома теплоємність повітря;

$Q_{\text{кон}}$  – конвекційний теплопереніс;

$Q_{\text{вент}}$  – тепловіддача від природної вентиляції;

$Q_{\text{інф}}$  – потік тепла внаслідок інфільтрації;

$Q_{\text{ст}}$  – кондукційний теплопереніс крізь стіни;

$Q_{\text{вн}}$  – тепловіддача від внутрішніх джерел тепла (кількість чоловік і вид діяльності, тип освітлення і апаратура).

$$Q_{\text{кон}} = \sum_{i=1}^n A h_{ci} (T_i - T_e), \quad (2)$$

де  $T_i$  – температура повітряної зони;

$T_e$  – температура повітря зовні;

$h_{ci}$  – коефіцієнт теплопередачі між внутрішніми поверхнями і повітрям в приміщенні;

$A$  – площа стіни.

$$Q_{\text{вент}} = \Phi \rho_{\text{пов}} c_{\text{пов}} (T_i - T_e), \quad (3)$$

де  $\Phi$  – потік повітря внаслідок природної вентиляції;

$\rho_{\text{пов}}$  – щільність повітря;

$c_{\text{пов}}$  – питома теплоємність повітря;

$V$  – об'єм повітря, причому

$$\Phi = \frac{nV}{3600}, \quad (4)$$

$$Q_{\text{інф}} = 1300 V_r (T_i - T_e), \quad (5)$$

де 1300 – коефіцієнт об'ємного нагрівання повітря;

$V_r$  – рівень вентиляції.

Рівень вентиляції можна визначити по зміні параметрів повітря в годину.

$$Q_{\text{ст}} = \frac{\Delta T}{\sum R_{\text{ТО}}} = UA(T_i - T_e), \quad (6)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}, \quad (7)$$

де  $R_{\text{ТО}}$  – термічний опір;

$U$  – загальний термічний опір;

$L$  – товщина шару;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

– коефіцієнт внутрішнього і зовнішнього конвективного теплообміну, відповідно.

Теплоприток від внутрішніх джерел тепла залежить від: кількості чоловік в приміщенні та виду діяльності; типу освітлення; виду апаратури (комп'ютери, копіювальні машини і т. д.).

- де – норма вироблення тепла на людину;
- кількість осіб в приміщенні;
- норма виробництва тепла на лампу;
- кількість ламп.

Диференціальне рівняння, що включає (питомий) тепловий потік крізь стіну, дах і підлогу, можна записати у вигляді:

- де – маса стіни, кг;
  - питома теплоємність стіни;
  - інтенсивність радіаційного теплообміну, яка розраховується як
- (10)

- де – сонячне випромінювання;
- площа поверхні скла;
- коефіцієнт сонячного випромінювання (

- де – передана сонячна енергія;
- енергія прямої радіації;
- енергія розсіяння.

Теплова модель приміщення побудована за аналогією простої електричної схеми, що містить резистори і конденсатори [2].

Розглянута в роботі динамічна модель включає в себе 5 резисторів і 4 конденсатора. Електрична схема заміщення моделі представлена на рисунку 1. Чотири резистора з'єднують величини зовнішньої температури з внутрішніх температурних вузлів [4].

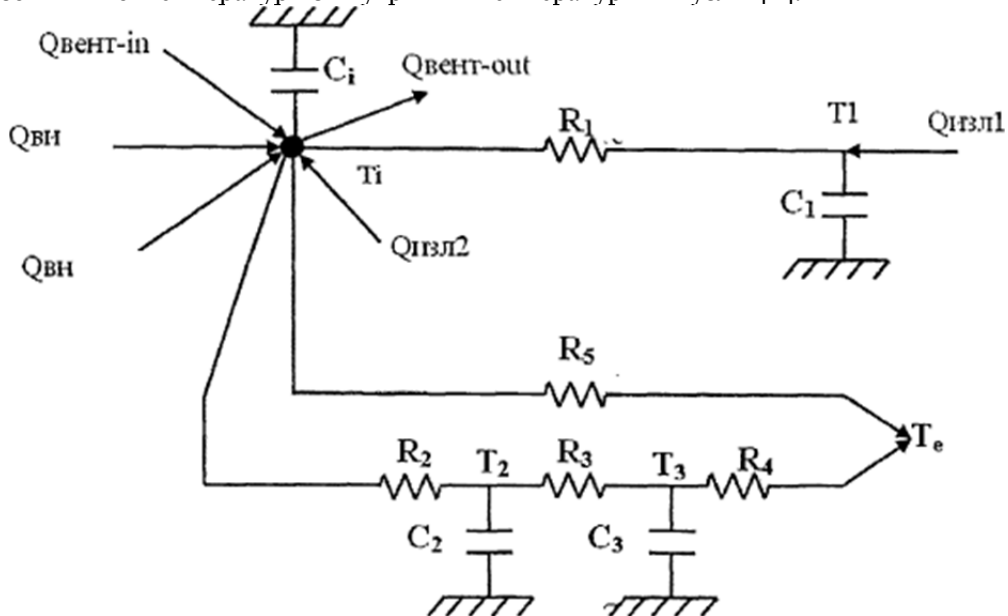


Рис. 1. Електрична схема динамічної моделі приміщення:

- нагрів фасаду будівлі за рахунок сонця;
- тепло від сонця всередині приміщення;
- кількість тепла від внутрішніх джерел;

- $Q_{\text{ви}}$  – зігриваюча / охолоджуюча енергія;  
 $Q_{\text{вент-in}}$  – теплопереніс внаслідок вентиляції всередині приміщення;  
 $Q_{\text{вент-out}}$  – теплопереніс внаслідок вентиляції поза приміщенням;  
 $T_1$  – температура повітряної зони;  
 $T_2$  – температура внутрішньої сторони конструкції;  
 $T_3$  – температура зовнішньої сторони конструкції;  
 $T_4$  – температура зовнішнього повітря;  
 $C_i$  – теплоємність повітря всередині приміщення;  
 $C_1$  – теплоємність фасаду будівлі;  
 $C_2$  – теплоємність конструкції всередині;  
 $C_3$  – теплоємність конструкції зовні;  
 $R_1$  – конвективний опір фасаду будівлі;  
 $R_2$  – конвективний опір внутрішньої сторони конструкції;  
 $R_3$  – конвективний опір конструкції;  
 $R_4$  – конвективний опір зовнішнього боку конструкції;  
 $R_5$  – сумарний термічний опір через скло (повна термостійкість скла).

Динамічний режим будівлі можна змоделювати за допомогою системи звичайних лінійних диференціальних рівнянь. Ці рівняння можна переписати у вигляді матриць, а потім реалізувати динамічну модель. Рівняння для вузлів наступні [5]:

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{R_1} (T_i - T_1) + q_{\text{випр}} A_{\text{скл}} \psi \vartheta, \quad (12)$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{R_2} (T_i - T_2) - \frac{1}{R_3} (T_2 - T_3), \quad (13)$$

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{R_3} (T_2 - T_3) - \frac{1}{R_4} (T_3 - T_4), \quad (14)$$

де показник конвекції

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = Q_{\text{вн}} + Q_{\text{ви}} + q_{\text{випр}} A_{\text{скл}} (1 - \vartheta) + \dot{m} c T_i - \frac{1}{R_1} (T_i - T_1) - \frac{1}{R_2} (T_i - T_2) - \frac{1}{R_5} (T_i - T_e). \quad (15)$$

Якщо  $\vartheta = 0$ , то енергія сонячного випромінювання повністю передається через скління будівлі [1].

Якщо  $\vartheta = 1$ , то вся енергія сонячного випромінювання передається безпосередньо через фасад будівлі. При розв'язку рівнянь (12 – 15) вони будуть мати вигляд:

$$\dot{T}_1 = \left( \frac{1}{R_1 C_1} \right) T_i + \left( -\frac{1}{R_1 C_1} \right) T_1 + \left( \frac{A_{\text{скл}} \psi \vartheta}{C_1} \right) q_{\text{випр}}; \quad (16)$$

$$\dot{T}_2 = \left( \frac{1}{R_2 C_2} \right) T_i + \left( -\frac{1}{R_3 C_3} - \frac{1}{R_3 C_2} \right) T_2 + \left( \frac{1}{R_3 C_2} \right) T_3; \quad (17)$$

$$\dot{T}_3 = \left( -\frac{1}{R_3 C_3} \right) T_2 + \left( -\frac{1}{R_3 C_3} - \frac{1}{R_4 C_3} \right) T_3 + \left( \frac{1}{R_4 C_3} \right) T_e; \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_i = & \left( \frac{1}{C_i} \right) Q_{\text{вн}} + \left( \frac{1}{C_i} \right) Q_{\text{ви}} + \left( \frac{1}{C_i} \right) [q_{\text{випр}} A_{\text{скл}} \psi (1 - \vartheta)] + \left( \frac{\dot{m} c}{C_i} + \frac{1}{R_5 C_i} \right) T_3 + \left( \frac{1}{R_1 C_i} \right) T_1 + \\ & + \left( \frac{1}{R_2 C_i} \right) T_2 + \left( \frac{\dot{m} c}{C_i} - \frac{1}{R_2 C_i} - \frac{1}{R_5 C_i} - \frac{1}{R_1 C_i} \right) T_i. \end{aligned} \quad (19)$$

Рівняння (16 – 19) можна привести до матричного вигляду [8]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu; \\ y &= Cx + Du, \end{aligned}$$

з наступними векторами:

$$x = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}, \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_i \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} T_e \\ Q_{\text{ви}} \\ Q_{\text{вн}} \\ q_{\text{випр}} \end{bmatrix}.$$

Складена модель забезпечує: розрахунок температури і вологості всередині приміщення; теплотехнічний розрахунок огорожень (опір при теплопередачі, паропроникненню, теплова

стійкість, теплосвоєння підлоги і т. д.); розрахунок надходження тепла від сонячної радіації; мінімум інформації, що вводиться (стіни, підлога, стеля, покрівля, вікна, огороження приміщень).

**Висновки.** 1. Математична модель розроблена спеціально для термічного аналізу будівель.

2. Математична модель дозволяє ефективно розраховувати температуру і вологість всередині приміщення, враховуючи тепловтрати через огорожувальні конструкції будівлі (стіни, вікна, стеля, підлога, покрівля).

3. Математична модель може бути основою теплової моделі будівлі, за допомогою якої можуть проводитися відповідні розрахунки. При наявності теплової моделі стає можливою розробка інтелектуальної системи регулювання мікроклімату в будівлях і спорудах.

#### ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Горбаченко В. И.** Вычислительная линейная алгебра с примерами на MATLAB. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 320 с.
2. **Егоров А. И.** Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. – М. : Наука, 1978. — 463 с.
3. **Калмаков А. А.** Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции: учеб. для вузов / Под ред. В. Н. Богословского. — М. : Стройиздат, 1986. — 479 с.
4. **Карпіс Е. Е.** Регулятори для систем кондиціонування повітря. – М. : Енерго, 1974. – 74 с.
5. **Клюев А. С.** Проектирование систем автоматизации технологических процессов. — М. : Энергоатомиздат, 1997. — 464 с.
6. **Лионе Ж.-Л.** Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. М. : Мир, 1972. — 488 с.
7. **Мясковский И. Г.** Тепловой контроль и автоматизация тепловых процессов [Текст] : учеб. для техникумов / ред. Е. А. Ларина; рец. И. П. Баумштейн.; 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1990. — 255 с.
8. **Попович М. Г.** Теорія автоматичного керування: підручник. — К. : Либідь, 1997. — 544 с.
9. **Сазонов Е. В.** Сборник задач по расчету систем кондиционирования микроклимата зданий. – Воронеж: ВГУ, 1988. – 296 с.
10. ASHRAE Handbook CD, Fundamentals, SI Edition, 1997.

#### SUMMARY

**Problem statement.** To improve the indoor climate control system, you must have an adequate mathematical model of the building. For this purpose, a mathematical description of its running parameters.

**Analyzing of the resent research.** In the works of contemporary experts in climate control facilities already had a steady and qualitative representation on the management of temperature and humidity. In particular, E. Sazonov argues that in the process automation indoor environment plays a crucial role to create an adequate mathematical model. That is correct mathematical model in conjunction with elements of automation systems, to a large extent, determine the quality of the control parameters of microclimate

**Research objective.** Development of mathematical model indoor environment, to ensure a comfortable environment and economic modes of operation.

**Conclusions.** 1. Mathematical model is specially designed for thermal analysis of buildings.

2. Mathematical model allows to efficiently calculate the temperature and humidity inside the room, taking into account the heat loss through the building envelope (walls, windows, ceiling, floor, roof).

3. Mathematical model can be the basis of a thermal model of the building, through which can be carried out appropriate calculations. With a thermal model becomes possible to develop intellectual climate control system in buildings.

## REFERENCES

1. **Horbachenko V. Y.** Vychyslytel'naya lyneynaya alhebra s prymeramy na MATLAB. – SPb. : BKhV-Peterburh, 2011. – 320 s.
2. **Ehorov A. Y.** Optymalnoe upravlenye teplovymy y dyffuzyonnymy protsessamy. – M. : Nauka, 1978. — 463 s.
3. **Kalmakov A. A.** Avtomatyka y avtomatyzatsyya system teplohazosnabzhenyya y ventilyatsyy: ucheb. dlya vuzov / Pod red. V. N. Bohoslovskoho. — M. : Stroyzdat, 1986. — 479 s.
4. **Karpis E. E.** Rehulyatory dlya system kondytsionuvannya povitrya. – M. : Enerho, 1974. – 74 s.
5. **Klyuyev A. S.** Proektyrovanye system avtomatyzatsyy tekhnolohycheskykh processov. — M. : Yenerhoatomyzdat, 1997. — 464 s.
6. **Lyone Zh.-L.** Optymalnoe upravlenye systemamy, opysyvaemyu uravnenyyamy s chastnymy proyvodnymy. M. : Myr, 1972. — 488 s.
7. **Myaskovskyy Y. H.** Teplovoy kontrol' y avtomatyzatsyya teplovykh processov [Tekst] : ucheb. dlya tehnykumov / red. E. A. Laryna; rets. Y. P. Baumshteyn.; 2-e yzd., pererab. y dop. — M. : Stroyzdat, 1990. — 255 s.
8. **Popovych M. H.** Teoriya avtomatychnoho keruvannya: pidruchnyk. — K. : Lybid, 1997. — 544 s.
9. **Sazonov E. V.** Sbornyk zadach po raschetu system kondytsyonyrovannya mykroklymata zdanyy. – Voronezh: VHU, 1988. – 296 s.
10. ASHRAE Handbook CD, Fundamentals, SI Edition, 1997.