

УДК: 004.896:624

*Х.М. Чуприна., ас. м. Київ***МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЛІ В ВІМ**

Запропоновано моделі і методи, що автоматизують процеси проектування енергоефективних будівель шляхом визначення теплопровідності та енергоефективності огороджувальних конструкцій на етапі проектування.

Ключові слова: енергоефективність, ВІМ, тепловий баланс будівлі, теплопровідність огороджувальних конструкцій, показник енергоефективності.

Постановка проблеми. Рациональне використання енергоресурсів є важливою проблемою в усіх галузях сучасного життя, зокрема в будівництві. Отже, необхідність широкого впровадження енергозберігаючих технологій у будівництві є актуальною проблемою.

З розвитком інформаційних технологій, з'явився принципово новий підхід в архітектурно-будівельному проектуванні, який полягає в створенні комп'ютерної моделі будівлі, що містить в собі всі відомості про майбутній або вже реалізований проект. При такому підході знання про технічні характеристики будівлі зберігаються в інформаційній моделі будівлі (ВІМ). Параметри будівель, що формують їх енергоефективність, закладаються вже на стадії проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема розробки програмного забезпечення для проектування енергоефективних будівель полягає в тому, що більшість методів розв'язання проблем енергоефективності будівлі швидко втрачають актуальність, в зв'язку з появою нових матеріалів, та технологій їх виробництва. Методи сертифікації енергоефективних будівель для багатьох країн різні, а отже використання одних і тих же методів європейськими, американськими країнами і Україною – неможливе. Одним із сучасних напрямків вирішення даної проблеми є розробка моделей, методів і технологій, що автоматизують процеси проектування енергоефективних будівель.

Значний внесок в окремі аспекти зазначених напрямків внесли вітчизняні та закордонні вчені.

Методологічною основою для вибраного напрямку дослідження є праці таких вчених: Городецький А.С., Підгорний О., Горшков А.С., Плоский В. О., Сергейчук О.В., Трутнева М.С., Самарін О.Д., Михайленко В.М., Бутовський І.М., Табунщиков Ю.А., Богуславський Л.Д., Кашенко Т.О., Барабаш М.С., Савицький М.В., Фаринюк Г.Г., В. Треттон, А. Пасоян та інші.

Метою дослідження є створення методів, орієнтованих на підвищення енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель на стадії проектування та їх використання в ВІМ. В статті запропоновано метод визначення теплопровідності та енергоефективності огороджувальних конструкцій будівлі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для неоднорідних огороджувальних конструкцій, що містять вентилявані або замкнуті повітряні прошарки, а також джерела тепла, при визначенні математичної моделі теплопередачі будемо вважати що:

- теплотехнічні характеристики матеріалів шарів не залежать від вологості і температури матеріалу;
- відсутній вплив стиків, зовнішніх кутів, теплопровідних включень на деформацію температурного поля;
- температурне поле конструкції можна вважати одномірним;
- теплопередача через конструкцію відбувається за рахунок теплопровідності і фільтрації повітря [3].

За наведених вище умов, модель теплопровідності можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \text{div} \lambda \nabla T \pm C_R F \frac{\partial T}{\partial y} + P \quad (1)$$

$$\vec{E} = \int_0^T [cg + \delta(\xi - T^1) i_{mel} w \rho_w] dt \quad (2)$$

T^1 – температура фазового переходу вода – лід, °С;

w – вагова вологість матеріалу, долі одиниці;

g_w – щільність води, кг/м³;

i_{mel} – питома теплота фазового переходу, Дж/кг;

$\delta(\xi - T^1)$ – дельта-функція Дираку;

F – витрата повітря через одиницю поверхні огороження, кг/(м²·ч);

P – питома потужність джерел теплонадходжень в огороженні, Вт/м³;

C_R – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·°С);

C – питома теплоємність Дж/(кг·°С),

g – густина матеріалів шарів огорожі, кг/м³.

Тоді математична модель теплопередачі запишеться як:

$C g = C_H(y) g_H(y)$ при $T \geq T^*$ и $C g = C_L(y) g_L(y)$ при $T < T^*$

$$C(y)g(y), \lambda(y) = \begin{cases} C_1g_1, \lambda_1 & \text{при } 0 \leq y \leq \delta_1 \\ C_2g_2, \lambda_2 & \text{при } \delta_1 \leq y \leq \delta_2 \\ \dots & \dots \\ C_{n-1}g_{n-1}, \lambda_{n-1} & \text{при } \delta_{n-2} \leq y \leq \delta_{n-1} \\ C_n g_n, \lambda_n & \text{при } \delta_{n-1} \leq y \leq \delta_n \end{cases} \quad (3)$$

C_1g_1 – добуток питомої теплоємності матеріалу шару огороження, на його щільність, ($i=1,2,3,\dots,n$); λ_1 -коефіцієнт теплопровідності матеріалу шару огороження, ($i=1,2,\dots,n$);
 $\delta = \delta_n$ – товщина огорожі, м;
 δ_1 – відстань від зовнішньої поверхні огороження

до кінця i -го шару, м. ($i=1,2,\dots,n$).

Гранична умова на внутрішній поверхні огороження включає кількість тепла, переданого поверхнею в результаті променевого і конвективного теплообміну джерела тепла, обумовленого фазовими переходами і має вигляд:

$$\lambda \frac{dT}{dy} = h_c^{in} (T_{in SF} - T_R) + \sum_i C_0 (T_{in SF} - T_1) - (1 - g_1) - q_{RAD} - q_{Ph}^{in SF} \quad (4)$$

де h_c^{in} – коефіцієнт конвективного теплообміну між внутрішньою і зовнішньою поверхнею огорожі;

$T_{in SF}, T_R, T_I$ – відповідно, середня температура внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції при розгляді внутрішньої поверхні i -ї огорожувальної конструкції приміщення і внутрішнього повітря;

q_{RAD} – потужність джерел тепла на поверхні, зумовлених впливом променевого теплообміну, між внутрішньою поверхнею огорожі і джерелом тепла в приміщенні;

$q_{Ph}^{in SF}$ – потужність джерела тепла на поверхні, обумовлене фазовими переходами.

Величина потужності джерела тепла, обумовлена сонячною радіацією, що поглинається поверхнею q_{sol} , визначається за формулою:

$$q_{sol} = \rho J \quad (5)$$

де ρ – коефіцієнт поглинання загальної сонячної радіації матеріалом внутрішньої поверхні огороження;

J – загальна випадкова сонячна радіація на внутрішню поверхню.

На основі запропонованої моделі створено функціональна структура математичної моделі теплового режиму будівлі, що забезпечує її ефективне застосування для визначення показника енергоефективності огорожувальних конструкцій (рис.1). На основі запропонованої моделі необхідно розробити метод визначення теплопровідності огорожувальних конструкцій будівлі з урахуванням впливу зовнішніх і внутрішніх факторів як крайових умов, для визначення показника енергоефективності огорожувальних конструкцій будівлі.

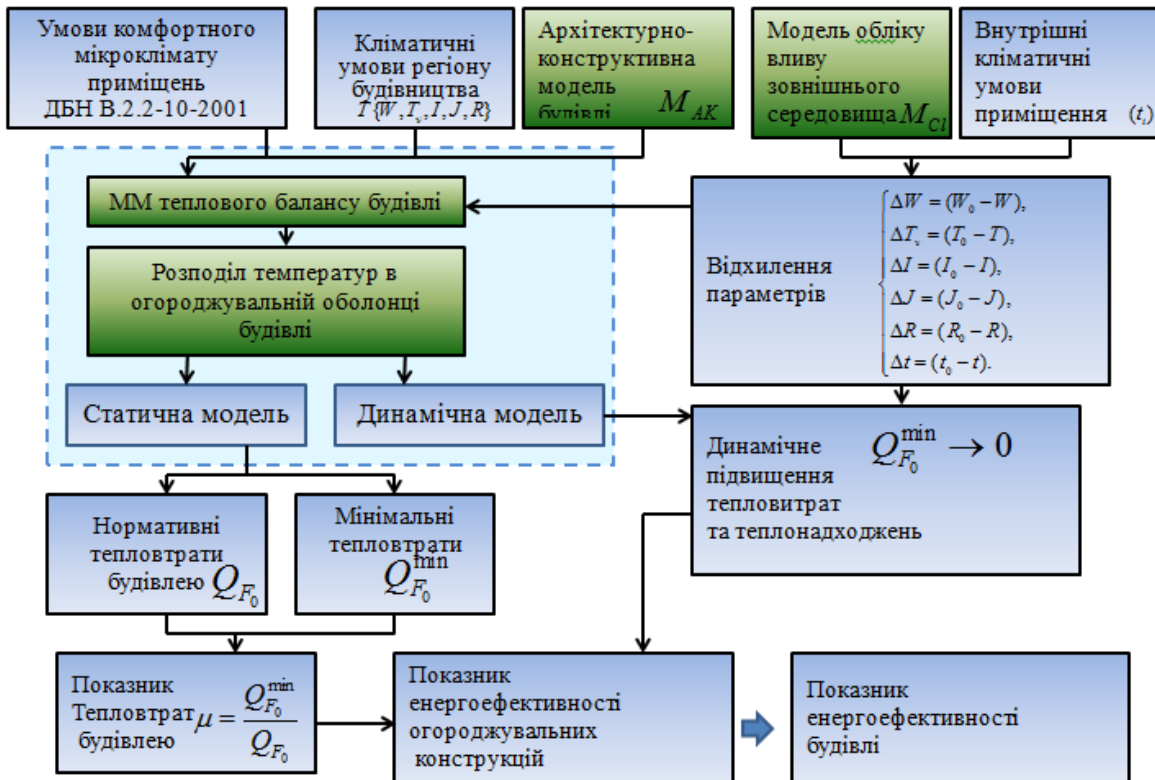


Рис. 1. Функціональна структура математичної моделі теплового балансу будівлі

Зазначені в функціональній структурі архітектурно-конструктивна та модель обліку впливу зовнішнього середовища описані в [2], кліматичні умови регіону будівництва в [1].

Систему диференціальних рівнянь, що описує тепловий баланс будівлі в САПР, принципово можна вирішити, записавши її у вигляді скінчених різниць, тобто замінивши системою алгебраїчних рівнянь. Для отримання рішення систему початкових диференціальних рівнянь потрібно замінити практично нескінченно великим числом алгебраїчних рівнянь. Наприклад, система диференціальних рівнянь, що описує тепловий баланс сучасного багатоповерхового будинку, повинна бути замінена системою більше мільйона алгебраїчних рівнянь.

Ідея запропонованого алгоритму полягає в тому, що, комбінуючи відповідним чином різниці рівняння повної системи, можна виключити велике число невідомих і звести вирішення задачі до обмеженої (рівну числу внутрішніх огорожень) системи алгебраїчних рівнянь.

Для прикладу розглянемо одновимірне рівняння теплопровідності для ізоляованого тонкого стержня довжиною L :

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (0 \leq x \leq L) \quad (6)$$

Оскільки функція $T(x, \tau)$ залежить від двох

змінних x і τ , то використовуємо сітку прямокутного типу.

Завдання наближеного чисельного інтегрування рівняння (6) за методом сіток полягає в знаходженні наближеного значення функції T в кожному вузлі сітки. Позначимо через $T_{i,k}$ справжнє значення температури в точці стержня $x=ih$ в момент $\tau=kl$.

Замінімо часткові похідні $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ і $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ в точці (ih, kl) через різниці відносини, тобто покладемо:

$$\frac{\partial T_{i,k}}{\partial \tau} = \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{l} + \varepsilon_1; \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 T_{i,k}}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1,k} - 2T_{i,k} + T_{i+1,k}}{h^2} + \varepsilon_2 \quad (8)$$

де ε_1 і ε_2 - залишкові члени, які наближаються до нуля при наближенні до нуля l і h . Тоді у вузлі (ih, kl) диференціальне рівняння (6) заміниться наступним співвідношенням:

$$\frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{l} + \varepsilon_1 = \frac{T_{i-1,k} - 2T_{i,k} + T_{i+1,k}}{h^2} + \varepsilon_2 \quad (9)$$

або

$$T_{i,k+1} = \left(1 - \frac{2la}{h^2}\right) T_{i,k} + \frac{la}{h^2} (T_{i-1,k} + T_{i+1,k}) + lR, \quad (10)$$

де $R = a\varepsilon_2 - \varepsilon_1$.

Алгоритм розрахунку теплопровідності огорожувальних конструкцій будівлі подано на рис.2.

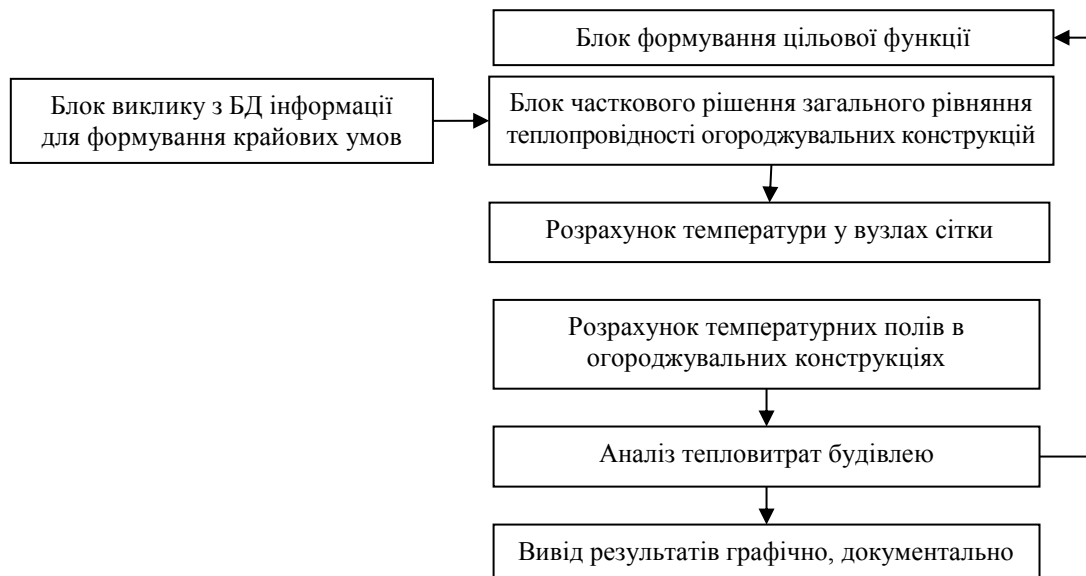


Рис. 2. Схема розрахунку теплопровідності огорожувальних конструкцій будівлі.

Визначення енергоефективності будівлі

Визначення показників температури Q_T в огорожувальних конструкціях з врахуванням впливу зовнішніх факторів виконується для забезпечення необхідного для експлуатації температурно-вологісного режиму всередині будівлі.

Для визначення кількості теплоти, що проходить через стіну в рівнянні теплопровідності Фур'є для потоку теплоти

$$Q = \lambda \frac{T_H - T_B}{b} At, \quad (11)$$

вираз $\lambda \frac{T_H - T_B}{b} A$ і є значенням Q_T . Отже:

$$Q = Q_T t. \quad (12)$$

де Q – кількість теплоти;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу огороження;

T_H, T_B – температура ззовні і всередині;

A – площа огороження;

t – час процесу теплопроведення;

b – товщина огороження.

Для будівлі, що має n -огороджувальних поверхонь, загальна кількість тепла, що втрачається через огорожувальні конструкції, визначається за формулою:

$$Q_0 = t \sum_{i=1}^n Q \rightarrow \min \quad (13)$$

Така кількість тепла повинна надходити від системи опалення для забезпечення нормальних умов експлуатації будівлі. Визначення показника енергоефективності теплових характеристик стіни відповідає мінімальній сумі вартості його зведення і витрат на опалення під час експлуатації.

Вартість зведення огорожувальної конструкції:

$$C_{m_s} = \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^n A_i b_i \bar{C}_{m_i} \quad (14)$$

де C_{m_s} – вартість огороження на i -й ділянці ($i = 1 \dots n$), прошарку s ($s = 1 \dots n$) з поверхнею A_i і товщиною b_i .

Витрати на опалення складають:

$$C_Q = Q_0 \bar{C}_Q \quad (15)$$

де C_Q – вартість одиниці тепла з врахуванням облаштування системи опалення, її експлуатації та вартості палива.

Тоді математичну модель енергоефективності можна записати в такому вигляді:

$$Z = C_m + C_Q \rightarrow \min \quad (16)$$

Рішення отримаємо в такому вигляді, розглядаючи ділянку огорожувальних конструкцій з площею $A=1$.

Вартість зведення огороження:

$$C_m = \sum_{i=1}^n Q \bar{C}_m \quad (17)$$

Витрати, обумовлені втратою тепла на цій ділянці

$$C_Q = \frac{Q_T}{A} t \bar{C}_Q \quad (18)$$

Умова енергоефективності приймає вигляд:

$$Z = C_m + C_Q = k_1 \frac{A}{Q} + k_2 \frac{Q}{A} \rightarrow \min \quad (19)$$

де $k_1 = C_m$;

k_2 – коефіцієнт енергоефективності для заданого району будівництва, що визначається експертною системою.

Залежність цільової функції Z від Q подано на рис. 3.

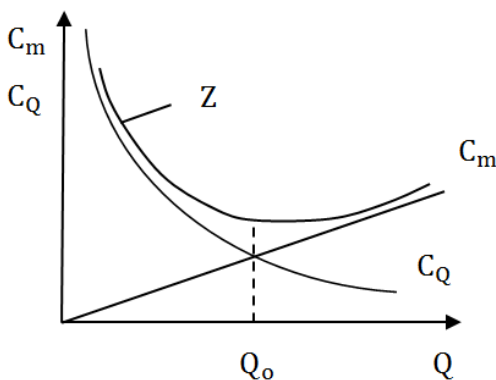


Рис.3. Визначення енергоефективності огорожувальних конструкцій.

За умови $\frac{dZ}{dQ} = 0$ знаходимо енергоефективність огорожувальних конструкцій.

$$Q_0 = \sqrt{\frac{Q_T}{\bar{C}_m}} t \bar{C}_Q \quad (20)$$

Використовуючи запропоновані методи в BIM-технології, ми можемо виконати модифікацію моделі будівлі, розширити параметри та властивості конструктивних елементів, внести в параметри показники теплоємності та визначити характеристики енергоефективності. Завдяки цьому проектувальники мають змогу з BIM-моделі створити енергетичний паспорт будівлі.

Висновки:

1. Розроблено модель теплового балансу будівлі та наведена її декомпозиція.
2. Запропонований метод розрахунку розподілу тепла в стіні, що заснований на розв'язанні диференціального рівняння, яке описує тепло акумульоване об'єктом.
3. Розроблено метод розрахунку теплопровідності методом скінченних різниць шляхом розбиття її на сітку з урахуванням крайових умов.
4. Побудована схема розрахунку теплопровідності огорожувальних конструкцій будівлі, запропоновано її використання в BIM для визначення енергоефективних характеристик конструкцій .

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Чуприна Х.М. Методи підвищення енергоефективності будівлі /В.В.Демченко, Х.М.Чуприна, О.В.Невмержицький// - Управління розвитком складних систем, зб. наук. праць. – К.:КНУБА, 2013. - № 16- С 138-143.
2. Чуприна Х.М. Інтегрована єдина енергетична модель будівлі // - Управління розвитком складних систем, зб. наук. праць. – К.:КНУБА, 2013. -№ 17- С 98-104.
3. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. - 194 с :

АННОТАЦІЯ

Предложены модели и методы, автоматизирующие процессы проектирования энергоэффективных зданий путем определения теплопроводности и энергоэффективности ограждающих конструкций на этапе проектирования.

Ключевые слова: энергоэффективность, BIM, тепловой баланс здания, теплопроводность ограждающих конструкций, показатель энергоэффективности.

ANNOTATION

The models and methods that automates the process of designing energy efficient buildings by defining thermal conductivity and energy efficiency building envelopes in the design phase.

Keywords: energy efficiency, BIM, building heat balance, thermal walling, the rate of energy efficiency.