

## РОЗРОБКА НЕСТАЦІОНАРНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ОГОРОДЖЕНЬ БУДІВЛІ

*В.І. Дешко, д-р техн. наук, професор;*

*М.М. Шовкалюк, асистент,*

*Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ»*

*Розроблено нестационарну модель, що описує теплові режими в приміщенні, яка дозволяє отримувати значення тепловтрат, температурних полів в огорожувальних конструкціях, теплових потоків на поверхнях конструкцій. Проведені розрахунки для різних граничних умов та різного ступеня теплового захисту огорожень.*

**Ключові слова:** *тепловтрати, температурне поле, температура приміщення, тепловий потік.*

*Разработана нестационарная модель, описывающая тепловые режимы в помещении, которая позволяет получать значения теплотерь, температурных полей в ограждающих конструкциях, тепловых потоков на поверхностях конструкций. Проведены расчеты для разных граничных условий и разной степени тепловой защиты ограждений.*

**Ключевые слова:** *теплотери, температурное поле, температура помещения, тепловой поток.*

### ВСТУП І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідження теплового стану в приміщеннях та розроблення заходів щодо підвищення енергоефективності і покращання комфортних умов потребує великої кількості експериментів. Розрахунок теплових втрат за методикою СНіП в основному призначений для визначення середнього рівня тепловтрат будівель, що проектуються, з метою знаходження необхідної кількості енергії для подачі в будівлю. Програми щодо розрахунків теплових втрат [1, 2] також реалізують дану методику. Але режими експлуатації приміщень характеризуються істотною нерівномірністю теплової обстановки, тому для підвищення енергоефективності в умовах зростання рівня теплового захисту виникає необхідність замінювати стаціонарні розрахунки за методикою СНіП моделюванням, яке є ефективним способом дослідження теплових режимів будівель.

**Метою** даної роботи є розроблення математичної моделі і аналіз за її допомогою теплових режимів та розподілу температур в огороженнях приміщень різних типів будівель (житлові або громадські).

**Об'єкт дослідження** – приміщення з розмірами 4x4x2,5 м. Теплообмін приміщення через огороження пов'язаний з теплопровідністю, сонячною радіацією, повітрообміном та з побутовими теплонадходженнями (див. рис. 1).

Зовнішні огорожувальні конструкції кімнати включають стіни, що складаються з декількох шарів, та вікна. Кожен шар стіни задається такими параметрами: товщина  $\delta$ , м; коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , Вт/(м·К); питома теплоємність  $c$ , Дж/(кг·К); густина  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>. Для внутрішніх огорожувальних конструкцій передбачено лише один шар. В огорожувальних конструкціях розглядається кондуктивний теплообмін.

Розрахунки проводилися для будівлі типу «хрущівка» з термічним опором стін 0,796 (м<sup>2</sup>·К)/Вт та будівлі з посиленою теплоізоляцією відповідно до сучасних норм [3]. Для цього до зовнішнього шару було

введено додатковий шар ізоляції і термічний опір стін склав 2,8 (м<sup>2</sup>·К)/Вт. Джерело теплоти – нагрівальний прилад, площа якого визначалася після моделювання теплообміну в розрахунковому режимі (t<sub>р.о.</sub>=-22 °С, t<sub>вн</sub>=18 °С). У даному випадку взято чавунні радіатори типу М-140-АО з кількістю секцій 7 шт.

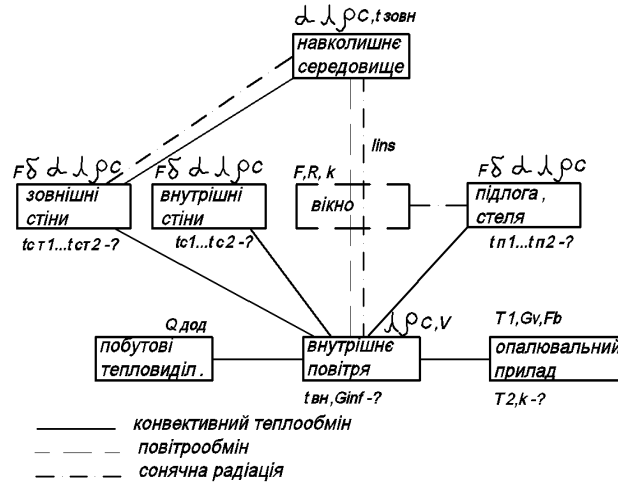


Рисунок 1 - Схема теплових зв'язків у приміщенні

### МАТЕМАТИЧНЕ ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ

Теплопровідність у конструкціях стін, підлоги, стелі описується рівнянням

$$c_j \rho_j \frac{\partial t_i(x)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_j \frac{\partial t_i(x)}{\partial x} \right); \quad t = t(\tau), \quad x \in (0, \delta_j), \quad (1)$$

де  $c$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  - відповідно теплоємність, густина та коефіцієнт теплопровідності  $j$ -го шару;

- $x$  - просторова координата;
- $t$  - температура  $i$ -го вузла;
- $\tau$  - час.

Скінченно-різницевий аналог рівняння (1) за неявною схемою для множини внутрішніх вузлів  $\omega_x$  кожного шару конструкції:

$$c_j \rho_j \frac{t_i^{p+1} - t_i^p}{\Delta \tau} = \lambda_j \left( \frac{t_{i+1}^{p+1} - 2t_i^{p+1} + t_{i-1}^{p+1}}{\Delta x_j^2} \right), \quad i \in (2, n-1), \quad j \in (1, nn),$$

де  $i$  – номер вузла за координатою, для якого складається баланс енергії;

- $j$  - шар, що розглядається;
- $h_j$  - товщина  $j$ -го шару, (м);
- $n$  – кількість вузлів,  $p$  - часовий рівень;

$\Delta \tau$  - квант часу;  $\Delta x_j$  - квант відстані.

Для границь конструкції стін/вікон, що межують із зовнішнім повітрям, задаються граничні умови:

$$\begin{cases} \alpha_{зовн}(t_{зовн} - t_{n,j}) + I_{ins} \cdot \eta = -\lambda_j \frac{\partial t_j}{\partial x}, \\ t_z = G_1(\tau), \quad I_{ins} = G_2(\tau), \end{cases}$$

де  $\alpha_{зовн}$  - ефективний коефіцієнт тепловіддачі із зовнішнього боку конструкції;

$t_{зовн}$  - температура зовнішнього повітря;

$I_{ins}$  - інтенсивність сонячного випромінювання, що падає на огороження;

$\eta$  - коефіцієнт поглинання поверхні огороження.

На осі внутрішніх стінок, підлоги та стелі встановлюються адіабатичні умови. Для вікон задаються умови теплопередачі та проникнення сонячної радіації, включаючи коефіцієнт відносного проникнення  $k$ . Початковий розподіл температур в усіх вузлах моделі визначається після моделювання у стаціонарному режимі. Для нагрівального приладу задаються розрахункова постійна витрата та температура подачі теплоносія, обчислена за температурним графіком [4].

Коефіцієнт теплопередачі нагрівального приладу з повітрям у приміщенні за умови конвективно-радіаційного теплообміну визначається за формулою

$$k_{bat} = m \Delta t^n (G_v / (k_{pr} \cdot F_b))^p,$$

де  $m, n, p$  - дослідні коефіцієнти, вибираються залежн від виду приладу;

$G_v$  - витрата води, кг/год;

$\Delta t$  - розрахункова різниця температур опалювального приладу та повітря в приміщенні, °C;

$k_{pr}$  - коефіцієнт зведення витрати води;

$F_b$  - площа опалювального приладу.

Повітрообмін у приміщенні визначався двома способами: через кратність повітрообміну або враховуючи розрахункову різницю тиску на поверхні вікон:

$$Q_{inf} = 0,28 G_{inf} \cdot c (t_{вн} - t_{зовн}) k_{inf},$$

де  $G_{inf} = \Delta p^{0,67} / R$  - кількість повітря, що надходить у приміщення через нещільності;

$\Delta p$  - перепад тиску на поверхні вікон;

$R$  - опір повітропроникності огороження;

$t_{вн}$  і  $t_{зовн}$  - відповідно температури внутрішнього та зовнішнього повітря.

З рівняння теплового балансу для теплообміну повітря в приміщенні з внутрішніми поверхнями огорожувальних конструкцій і з нагрівальним приладом з урахуванням внутрішніх побутових надходжень від людей, що перебувають у приміщенні, працюючих приладів та надходжень від сонячної радіації визначаються температура внутрішнього повітря та значення теплових потоків окремих елементів системи.

Наведена модель реалізована на алгоритмічній мові C++ для розрахунків температурних полів в огорожувальних конструкціях методом скінченних різниць. Проведені розрахунки для стаціонарних умов порівнювались з моделюванням на тривимірній чисельній моделі

[5], розрахунки проводилися у програмному середовищі Fluent. Визначено, що розподілення температури  $t_{вн}$  по об'єму приміщення порівняно рівномірне (крім зони над нагрівальним приладом), що дозволяє брати однакове значення  $t_{вн}$  при розрахунку теплообміну. Відмінність середньої температури становить менше 8%, що дає можливість використання одновимірної моделі для аналізу процесів приміщення кінцевих розмірів.

### РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Розрахунки були проведені для перехідного періоду (Київ, кінець жовтня 2008) за фактичними даними [6]. Вихідні дані, прийняті для розрахунків, наведено на рис. 2: температура зовнішнього повітря ( $t_{зовн}$ ), сонячна радіація ( $I_{ins}$ , південна стіна) та додаткові тепловиділення громадських або житлових будівель ( $Q_{дод}$ ).

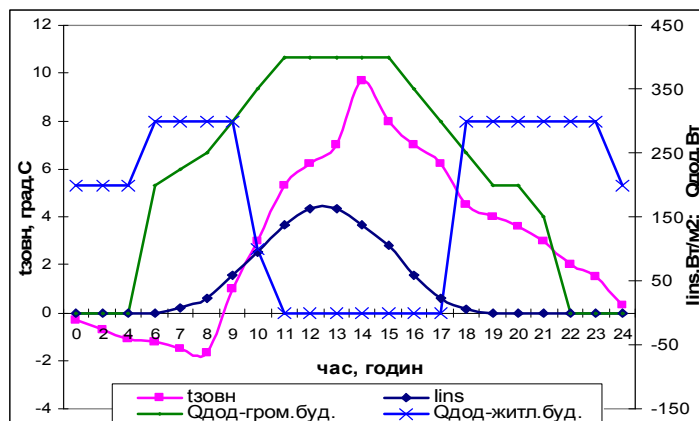


Рисунок 2 - Вихідні дані для розрахунків

Розрахункові параметри огорожувальних конструкцій стін наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Шар	Зовнішня стіна без ізоляції				Зовнішня стіна ізольована			
	$\delta$ , м	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , Дж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\delta$ , м	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , Дж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Цегла	0,52	0,75	879	1800	0,52	0,75	879	1800
Утеплювач	-	-	-	-	0,1	0,053	840	125
Штукатурка	-	-	-	-	0,01	0,8	837	1800
Розчин	-	-	-	-	0,01	0,52	837	1700

Вікно площею 2 м<sup>2</sup> має подвійне скління у спарених рамах, опір теплопередачі  $R=0,47$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Як показали результати, температура неізольованого приміщення становить приблизно 18,5 С, а завдяки ізоляції огороження температура приміщення може підвищитися на 3-4 °С при тих самих параметрах теплоносія і розмірах опалювального приладу, що надасть можливість економії енергоресурсів при введенні регулювання.

На рис. 3 показано зміну температури у приміщенні з однією зовнішньою стіною без урахування побутових тепловиділень та сонячної інсоляції та враховуючи їх.

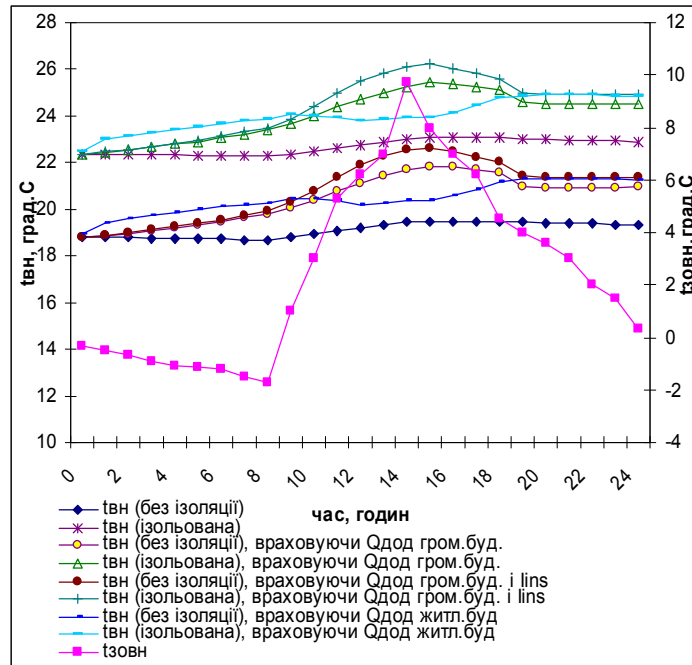


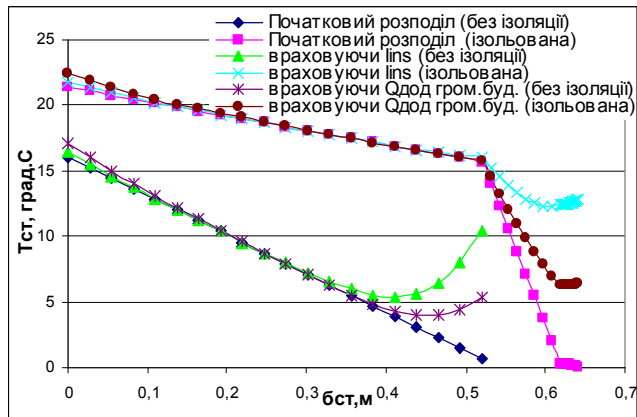
Рисунок 3 - Зміна температури у приміщенні з однією зовнішньою стіною

Як бачимо, температура приміщення за добу змінюється менше ніж на  $1^{\circ}\text{C}$  ( $18,7-19,5^{\circ}\text{C}$  - неутеплена та  $22,3-23,1^{\circ}\text{C}$  - утеплена будівля), хоча коливання температури зовнішнього повітря при цьому становлять  $11,4^{\circ}\text{C}$ . Але якщо враховувати інші фактори, то коливання внутрішньої температури вже більш значні. Зокрема, завдяки додатковим тепловиділенням температура приміщення може збільшитися на  $3^{\circ}\text{C}$ , а враховуючи ще й сонячну інсоляцію, що проникає через вікно та нагріває зовнішню поверхню стіни, – на  $4^{\circ}\text{C}$ . Крім того, для громадських будівель максимальна інтенсивність сонячної радіації збігається з піком додаткових тепловиділень, тобто при введенні регулювання теплового потоку від опалювального приладу в цих будівлях будемо мати більший ефект, ніж для житлових, для яких у денний період тепловиділення відсутні.

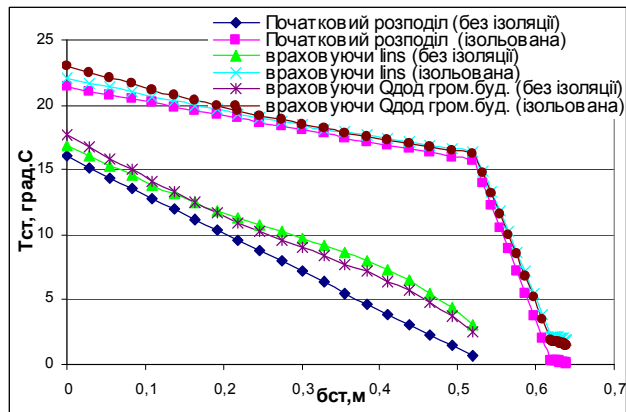
На рис. 4а, 4б для різних моментів часу наведено розподіл температур у зовнішніх огорожувальних конструкціях будівлі без ізоляції та з покращеною ізоляцією.

Для ізольованої стіни розподіл температур в товщі конструкції більш рівномірний, основний перепад температур – в ізоляційному шарі. На рис. 4б для неізольованої стіни при  $\tau = 24$  години можемо спостерігати акумулюючу здатність цегляної конструкції, зовнішній шар якої прогрівся за рахунок сонячної радіації. При  $\tau = 72$  години температура на зовнішній поверхні конструкції неізольованої стіни становить  $3,7^{\circ}\text{C}$  при зовнішній температурі  $1,5^{\circ}\text{C}$ , що майже на  $2^{\circ}\text{C}$  вище, ніж ізольованої стіни за рахунок акумулювання конструкцією теплоти у денний період. При цьому температура внутрішньої поверхні ізольованої стіни на  $4^{\circ}\text{C}$  вище, ніж стіни без ізоляції.

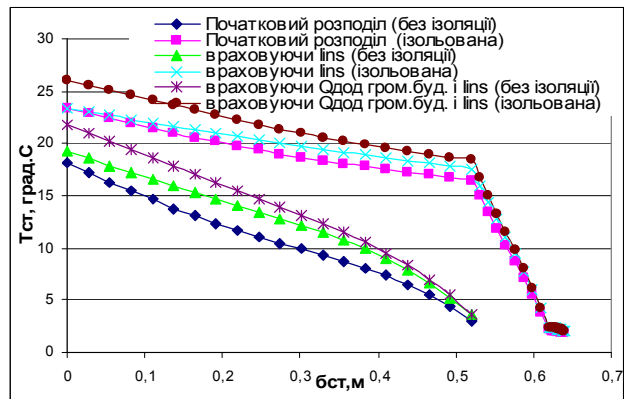
Проведені нами розрахунки протягом декількох діб з однаковими змінами граничних умов показують, що різниця між початковою та кінцевою температурою з часом зменшується. Більш детально зміну температур на поверхнях конструкції за добу показано на рис. 5а, 5б.



4а



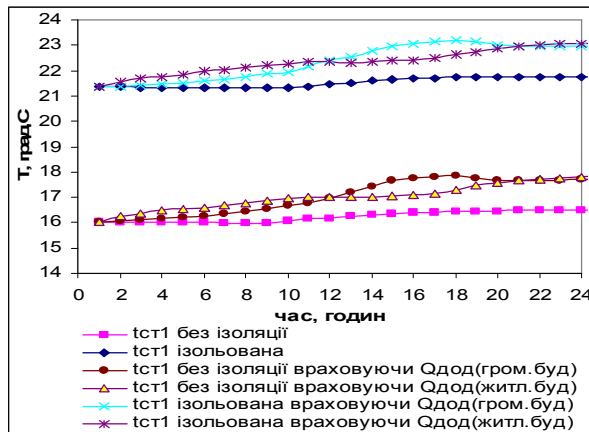
4б



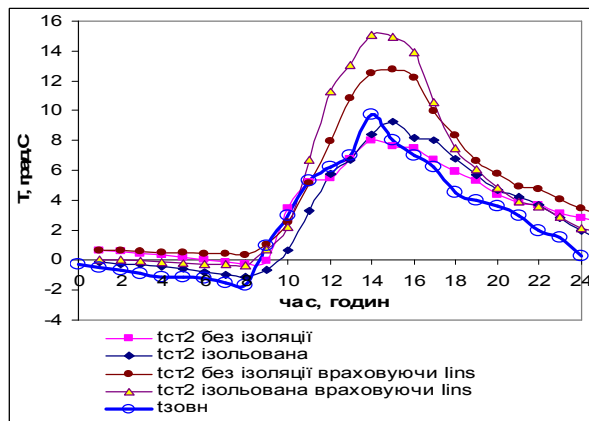
4в

Рисунок 4 - Розподіл температур у зовнішній огорожувальній конструкції:  
 а -  $\tau = 12$  годин; б -  $\tau = 24$  години; в -  $\tau = 72$  години

На зміну температури внутрішньої поверхні зовнішнього огороження, і відповідно теплові потоки, основний вплив мають додаткові тепловиділення. За рахунок впливу цього фактора температура стіни може підвищитися на  $2^{\circ}\text{C}$  (рис. 5а). При врахуванні впливу сонячної радіації температура зовнішньої поверхні стіни збільшується майже на  $5^{\circ}\text{C}$  (рис. 5б). Ізоляція призводить до збільшення коливань температури на зовнішній поверхні.



5а



5б

Рисунок 5 - Зміна температури на поверхнях огороження:  
5а – внутрішня поверхня; 5б – зовнішня поверхня

На зовнішній поверхні стіни при коливаннях температури повітря та наявності/відсутності інсоляції мають місце різні умови теплообміну. Коли температура повітря менша, ніж температура стінки, має місце тепловий потік теплопровідністю в напрямку поверхні стінки та тепловіддачею від поверхні до зовнішнього повітря. Якщо не брати до уваги нагрівання поверхні за рахунок сонця, наприклад, у період часу з 9 до 14 годин (рис. 5б) маємо таку картину: температура зовнішнього повітря перевищує температуру стіни, тепловий потік спрямований від повітря до поверхні стінки і від поверхні в об'єм стінки (теплопровідність). Але при врахуванні сонячної радіації має місце тепловий потік інсоляцією до поверхні, збільшуються конвективні теплові потоки з поверхні стіни за рахунок різниці температур навколишнього середовища та зовнішньої поверхні огороження, а також тепловий потік теплопровідністю спрямований від поверхні до середини стіни. Причому в цьому випадку конвективний тепловий потік з поверхні стіни в денний період більший, ніж у нічний.

### ВИСНОВКИ

1. Розроблено модель, що описує теплові режими в приміщенні, яка дозволяє отримувати значення тепловтрат різних типів приміщень, температурних полів в огорожувальних конструкціях, теплових потоків на поверхнях конструкцій.

2. Проведені розрахунки та проаналізовано розподіл температурних полів та характер теплових потоків залежно від зміни граничних умов та теплового захисту огорожень. Розглянуто вплив коливань побутових тепловиділень у приміщенні, сонячної інсоляції та зміни температури навколишнього середовища протягом однієї доби.

3. За допомогою розробленої моделі можна оцінювати дотримання комфортних умов у приміщеннях будівель різних типів, проводити аналіз шляхів зниження тепловтрат, а також розраховувати ефективність введення регулювання для зниження споживання енергоресурсів.

## SUMMARY

### THEMAL STATE OF BUILDING ENVELOPE UNSTATIONARY MODEL DEVELOPMENT

*V.I. Deshko, M.M. Shovkalyuk*

*An unstationary model, describing the thermal modes in an apartment, is developed, which allows to get the values of thermal losses, temperature fields in building envelope, thermal streams on the surfaces of constructions. Calculations are conducted for different boundary conditions and different level of thermal protection.*

**Key words:** *thermal losses, temperature field, temperature of apartment, heat flow.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. <http://www.ars-ps.com.ua>
2. Програма РТІ. Програма расчета потерь тепла и инфильтрации помещениями зданий. // ВСТ Проект. – 2002. - № 6. – С. 53.
3. ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель».
4. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 360 с.: ил.
5. Числове моделювання як метод дослідження теплових режимів приміщень / Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Лохманець Ю.В., Куран Ю.Р. // Нова тема. - №4. - 2008. - С. 26-30.
6. [www.pogoda.ru](http://www.pogoda.ru)

*Надійшла до редакції 1 вересня 2009 р.*