

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ДОСЛІДЖЕННІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Національний університет „Львівська політехніка”, Україна

Методом математичного моделювання теплотехнічних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій житлових будівельних об'єктів проведено оцінку показників енергоефективності за критерієм мінімізації питомого енергоспоживання при використанні гравітаційної та механічної систем вентиляції.

Постановка проблеми. Будівельні об'єкти житлового призначення потребують значних енерговитрат як на їх створення, так і на подальшу експлуатацію. Понад 40% всієї виробленої у світі енергії витрачається у будівлях та спорудах на опалення та кондиціонування і призводить до суттєвих викидів парникових газів. Сучасні тенденції і перспективи будівництва та реконструкції житлових будівельних об'єктів першочергово стосуються забезпечення показників їх енергоефективності, що визначає раціональне використання енергії на всіх етапах життєвого циклу, комфортний мікроклімат в приміщеннях та зменшення впливу на довкілля.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Оцінка енергетичної ефективності будівель та енергетична сертифікація, що широко використовуються у світовій практиці, набуває розповсюдження й в Україні і передбачає зміни в енергоспоживанні при проведенні заходів з підвищення енергоефективності. Проте методика оцінювання енергоефективності будівельних об'єктів в Україні для проєктованих та існуючих будівель базується на розрахунку теплоспоживання лише на опалення [1-2].

Основний вплив на формування теплового режиму і, відповідно, енергетичного статусу будинку (енергетичних витрат на забезпечення необхідного теплового режиму) здійснює його теплоізоляційна оболонка. Основні втрати теплоти відбуваються через зовнішні огорожувальні конструкції, що пов'язано з їх недостатнім показником опору теплопередачі. За даними енергетичних обстежень типових житлових будинків 30-40 % тепловтрат відбувається через стіни, 15-25% через вікна та двері, 15-20 % через дах і 10-15 % через підлогу [2].

Об'ємно-планувальне рішення будинку та конструктивні принципи теплоізоляційної оболонки обумовлюють ступінь його енергоспоживання та корисного використання енергії сонця при кліматизації внутрішнього простору і визначає найбільший потенціал в підвищенні енергоефективності будівель житлового та громадського призначення. Методологія проєктування енергоефективних будівельних об'єктів полягає в системному аналізі, направленому на пошук альтернативних рішень, та кількісному обґрунтуванні

оптимальних їх варіантів, що дозволяє оцінювати інвестиційну привабливість будівництва, реконструкції та експлуатації будинків [3-5].

У зв'язку з цим, метою роботи є математичне моделювання теплофізичних показників теплоізоляційної оболонки будівельних об'єктів для оптимізації їх енергоефективності та мінімізації шкідливого впливу на довкілля.

Об'єкт та методика досліджень. Як розрахункову модель будівлі – математична модель будівлі, що використовується для розрахунку її енергопотреб, вибрано індивідуальний житловий двоповерховий будинок з мансардою (базовий варіант) опалювальною площею $F_h = 232 \text{ м}^2$.

Для створення математичних моделей енергоефективних будівель проведено математичне планування, змінними факторами якого прийнято товщину теплоізоляційного шару з пінополістиролу при утепленні зовнішніх стін ($\delta_{із}$) та коефіцієнт теплопередачі вікон ($U_{вік}$). Для проведення аналізу впливу даної факторної моделі на показники енергоефективності будівельних об'єктів (приведений ($k_{\Sigma пр}$) та загальний ($k_{буд}$) коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки, питомі тепловитрати на опалення - $q_{буд}$, розрахункові витрати теплової енергії - $Q_{рік}$) виконано розрахунки у відповідності з планом двофакторного трирівневого моделювання (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика плану математичного моделювання

Характеристика	Параметри планування	
	X_1 ($\delta_{із}$, см)	X_2 [$U_{вік}$, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)]
Головний рівень “0”	10	1,7
Нижній рівень “-1”	0	2,7
Верхній рівень “+1”	20	0,7

Для визначення енергетичних показників будинку використано методологію складання енергетичного паспорта згідно з ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 «Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції».

Результати досліджень. Основним енергетичним показником будинку, що визначає його енергоефективність, є значення питомих тепловитрат на опалення - $q_{буд}$, що для базового варіанту становить $q_{буд} = 176,7 \text{ кВт} \cdot \text{год}/(\text{м}^2 \cdot \text{рік})$, при цьому $[(q_{буд} - E_{\max})/E_{\max}] \cdot 100\% = 46,6 \%$, що відповідає класу енергетичної ефективності “Е”. З метою зниження трансмісійних тепловитрат через стінові огорожувальні конструкції запроєктовано систему фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками. Конструкції зовнішніх стін індивідуального будинку з фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатурками А.2.1.1-П038-100-КД-ДСТУ Б В. 2.6-36: 2008 та А.2.1.1-П038-200-КД-ДСТУ Б В. 2.6-36: 2008 задовольняють санітарно-гігієнічні вимоги ($\Delta t_{пр} < \Delta t_{ср}$), умову

теплостійкості ($\tau_{\text{vmin}} > t_{\text{min}}$) при розрахункових умовах зовнішнього повітря та умову сприятливого вологісного режиму ($\Delta w \leq \Delta w_{\text{д}}$).

Визначення енергетичних показників проводили для будинків із гравітаційною та механічною системами вентиляції з рекуперацією теплоти ($\eta=70\%$) при змінних параметрах огорожувальних конструкцій. На основі проведених розрахунків (табл. 2) отримано математичні моделі енергетичних показників індивідуального будинку з гравітаційною та механічною системою вентиляції у вигляді рівнянь регресії:

$$q_{\text{буд грав}} = 84,82 - 41,93X_1 - 15,75X_2 - 2,23X_1 X_2 + 35,05X_1^2 + 1,89X_2^2, \text{ [кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})]$$

$$q_{\text{буд мех}} = 32,12 - 43,43X_1 - 14,25X_2 - 0,02X_1 X_2 + 33,54X_1^2 + 0,39X_2^2, \text{ [кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})].$$

Таблиця 2

Результати математичного планування енергетичної ефективності житлового будівельного об'єкта

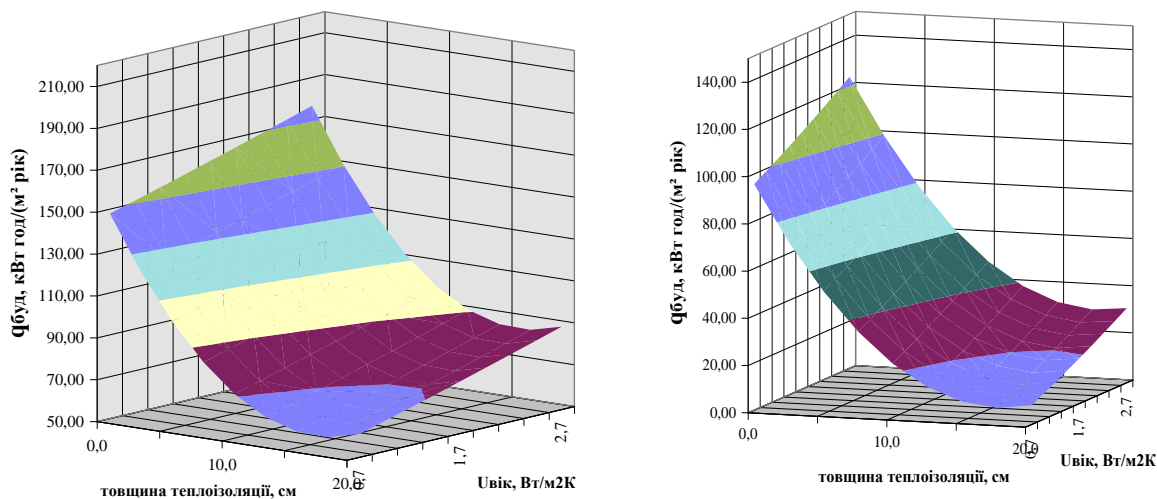
Матриця планування		Гравітаційна система вентиляції		Механічна система вентиляції	
X_1	X_2	$q_{\text{буд}}$, кВт·год ($\text{м}^2\cdot\text{рік}$)	Клас енергетичної ефективності	$q_{\text{буд}}$, кВт·год ($\text{м}^2\cdot\text{рік}$)	Клас енергетичної ефективності
-1	-1	176,67	Е	123,97	Д
-1	0	161,14		108,44	С
-1	+1	148,34	Е	95,64	В
0	-1	99,47	В	46,77	А
0	0	85,24	В	32,54	А
0	+1	70,53	В	17,83	А
+1	-1	89,33	В	36,63	А
+1	0	75,16	В	22,46	А
+1	+1	61,09	В	8,39	А

Математична модель пошуку оптимального проекту енергоефективної будівлі формулюється з умови мінімізації питомих енерговитрат на опалення протягом року. При цьому обмеженням задач оптимізації було порівняння питомих витрат на опалення з:

- показником згідно з діючими нормами $q_{\text{буд}} \leq E_{\text{max}}$ (для розрахункової моделі $E_{\text{max}} = 120,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2\cdot\text{рік}$);
- стандартами енергоощадного будинку $q_{\text{буд}} \leq 75 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2\cdot\text{рік}$;
- стандартами пасивного будинку $q_{\text{буд}} \leq 15 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2\cdot\text{рік}$.

На основі одержаних результатів побудовані поверхні відгуку для питомих тепловтрат на опалення будинку (рис. 1). Аналіз отриманих математичних залежностей, а також їх графічна інтерпретація дозволяють визначити оптимальний варіант енергоефективного будинку. Для будинку з

гравітаційною системою вентиляції мінімальний рівень досягається при значенні $q_{\text{буд min}} = 61,09 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$, тобто тепловитрати зменшуються в 2,9 рази порівняно з розрахунковою моделлю. Модель житлового будівельного об'єкта при значеннях змінних факторів нижнього рівня варіювання за показником питомого теплоспоживання відповідає стандарту енергоощадного будинку.



а б
Рис. 1. Математичні моделі питомих тепловитрат на опалення будинку з гравітаційною (а) та механічною (б) системою вентиляції

Оптимальним варіантом для енергоефективної будівлі є раціональне поєднання конструктивних та інженерно-технологічних складових енергетичної ефективності, що дозволить одержати мінімальні сукупні витрати на будівництво та експлуатацію об'єкта. Одним з основних елементів енергоощадності та забезпечення якості повітря в приміщеннях є використання механічної вентиляції з рекуперацією теплоти. В роботі проведені розрахунки для механічної системи вентиляції з рекуперацією теплоти ($\eta=70\%$).

При використанні механічної системи вентиляції максимальний рівень питомих тепловитрат на опалення будинку становить $q_{\text{буд max}} = 123,97 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$, а мінімальний – $q_{\text{буд min}} = 8,39 \text{ кВт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\cdot\text{рік})$ при співвідношенні між ними 14,8. Будинки з механічною вентиляцією, крім базового варіанту, задовольняють нормований мінімальний рівень енергоефективності (клас енергетичної ефективності не нижче «С») Комплексний підхід в проектуванні та використання енергоефективних технологій дозволили досягнути витрат теплової енергії на опалення, що відповідають критеріям енергоощадного будинку і відносяться до класу енергоефективності «А». Варіант будинку, визначальні фактори якого відповідають верхньому рівню варіювання, характеризується мінімальними значеннями витрати теплоти на опалення $q_{\text{буд}}=8,39 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2\cdot\text{рік}$ та задовольняє вимоги стандарту пасивного будинку.

Висновки. Моделювання параметрів теплоізоляційної оболонки та системи вентиляції житлових будівельних об'єктів дозволяє повести оцінку багатьох варіантів будівель, що відрізняються за ступенем енергоефективності, встановити показники зовнішніх огорожувальних конструкцій, що відповідають нормованому мінімальному рівню енергоефективності, дає можливість розробити проектні рішення енергоефективного житла та систему керування параметрами енергоощадності на всіх етапах життєвого циклу будинку.

Оптимальним варіантом будівельних об'єктів за критерієм енергоефективності є раціональне поєднання конструктивної й інженерно-технологічної складової енергетичної ефективності будівлі, що дозволить одержати мінімальні витрати теплової енергії при його експлуатації.

Література

1. *Саницький М.А.*, Енергозберігаючі технології в будівництві [Навч. посібник] / М.А. Саницький, О.Р. Позняк, У.Д. Марущак. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 248 с.

2. *Фаренюк Г.Г.* Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій / Фаренюк Г.Г. – К.: Гама-Принт, 2009. – 216 с.

3. Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implantation / J. Kurnitski, A. Saari, T. Kalamees et al. // Energy and building. - 2011. – № 43. – P. 3279-3288.

4. Методи оцінки енергетично-екологічних показників будинків індивідуальної забудови / М.А. Саницький, У.Д. Марущак, Р. Секрет, М. Вуйцікевич, В.В. Гоц // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Будівельні конструкції” – К.: НДІБК, 2013. – Вип. 77 – С. 323-327.

5. *Sekret R.* Relation between energy characteristics and cost for single family buildings / Sekret R., Sanytsky M., Wojcikewicz M. // proceedings of the 4th International conference on contemporary problems in architecture and construction, September 24-27, 2012. – Czestochowa, 2012. – P. 220 - 226.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

М. А. Саницкий, М. В. Котив, У. Д. Марущак

Методом математического моделирования теплотехнических параметров внешних ограждающих конструкций строительных жилищных объектов проведено оценку показателей энергоэффективности по критерию минимизации удельного энергопотребления при использовании гравитационной и механической систем вентиляции.

**MATHEMATICAL MODELING IN RESEARCH OF BUILDING OBJECT
ENERGY EFFECTIVENESS**

M. Sanytsky, M. Kotiv, U. Marushchak

The assessment of energy effectiveness performance of residential building object with using gravitational and mechanical ventilation is carried out by the mathematical modeling method of the thermal parameters of external walling constructions by the criterion of specific energy minimizing.