

# ТЕОРІЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ

*Наводиться приклад використання математичної моделі процесу тепловтрат у житловому багатопверховому будинку з метою пошуку варіантів енергозбереження.*

© Д.В. Левчій, В.А. Заславський,  
Е.І. Ненахов, 2012

УДК 519.85

Д.В. ЛЕВЧІЙ, В.А. ЗАСЛАВСЬКИЙ, Е.І. НЕНАХОВ

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОПАЛЕННЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

**Вступ.** Актуальність проблеми енергозбереження обумовлюється високою енергоємністю економіки та житлово-комунального сектора, а також значною залежністю України від імпорту енергоносіїв. Рівень споживання енергії на опалення в Україні в 5 – 8 разів вищий за середньоєвропейські норми, а енергоємність внутрішнього валового продукту (ВВП) – у 3,2 рази вища порівняно з розвиненими країнами; у 3,6 рази – порівняно з країнами ЄС та на 9% – порівняно з Російською Федерацією [1].

Причиною високої енергоємності є застаріле та енерговитратне обладнання значної частини вітчизняних підприємств та опалювальні прилади у соціально-побутовій сфері; відсутність достатніх фінансових ресурсів для модернізації обладнання та заміни опалювальних приладів.

Вирішення проблеми стимулювання енергозбереження вимагає комплексного підходу до її розв'язання. Необхідними є економічні, політичні та соціальні механізми стимулювання енергозбереження. Протягом останніх років у рамках гармонізації національної нормативно-правової бази з вимогами Європейського Союзу та реалізації «Енергетичної стратегії України до 2030 р.» зроблено ряд важливих кроків у напрямку покращення енергоефективності будівельної галузі України, зокрема щодо енергоефективності будівель [2, 3]. Проте вимоги діючих нормативів по енергозбереженню в будівництві стосуються головним чином теплотехнічних характеристик огорожуючих конструкцій і не окреслюють інших напрямків енергозбереження, таких як щільність будівлі та

та ступінь інфільтрації, архітектура будівлі, розмір і розміщення вікон, тип системи опалення та ступінь її автоматизації тощо. Зміна будь-якого з цих параметрів може суттєво вплинути на параметри енергоспоживання будинку.

Одним із напрямків енергозбереження щодо промислових та комунальних об'єктів будівництва є оптимізація на етапі проектування геометричних параметрів будівлі. Ця оптимізація може бути реалізована за рахунок сучасних комп'ютерних технологій за допомогою математичного моделювання процесів, що відбуваються, наприклад під час опалення приміщень. Нами розроблена математична модель процесу теплових витрат, що відбуваються в житловому будинку під час опалення.

Для визначення величини тепловитрат використана методика, що передбачена СНіП 2.04.05-91\*У [4]. Згідно з цією методикою тепловитрати, які мають бути скомпенсовані системою опалення, визначаються за формулою:  $Q_1 = (Q_a + Q_b)$ , де  $Q_a$  – тепловий потік через огорожуючі конструкції,  $Q_b$  – витрати тепла на підігрів зовнішнього повітря, що надходить завдяки вентиляції та інфільтрації. Тепловий потік через огорожуючі конструкції для кожного конструктивного елемента визначається за формулою:

$$Q_a = \left(\frac{1}{R}\right) \cdot A \cdot (t_b - t_n) \cdot (1 + \sum b) \cdot n \cdot 10^{-3},$$

де  $A$  – розрахункова площа конструктивного елемента,  $m^2$ ;  $R$  – опір теплопередачі огорожуючих конструкцій,  $m^2 \cdot C^0 / \text{Вт}$ ;  $t_b$  – розрахункова температура всередині приміщень,  $C^0$ ;  $t_n$  – температура зовнішнього повітря,  $C^0$ ;  $n$ ,  $b$  – коефіцієнти, що враховують додаткові витрати тепла в залежності від орієнтації стін та сили вітру.

Завдяки розробленій математичній моделі, змінюючи у вхідних даних співвідношення геометричних розмірів будівлі, виконано ряд розрахунків потужності системи опалення та сумарних річних витрат на опалення. Як вхідні дані площі огорожуючих конструктивних елементів (стіни, вікна, двері, дах, підлога) вводилися дані, отримані з реально існуючого 3-поверхового житлового будинку в передмісті Києва. Перевірка математичної моделі проводилася шляхом співставлення розрахункових витрат на опалення з фактичними витратами такого будинку. Відхилення результатів були в межах 1.5 – 3%.

Згідно з нормами, у залежності від розташування будівлі, співвідношення розмірів кімнат, характеристик скла та рам, необхідна площа вікон змінюється від 10% до 20% площі приміщень. При площі вікон, що складає 10% площі приміщень, житловий будинок площею 624 кв. м. споживає на опалення 4963 куб. м. газу на рік. При збільшенні площі вікон до 20% споживання газу зростає до 7733 куб. м. газу на рік (збільшення в 1.56). Враховуючи тарифну сітку ціни на газ, у залежності від об'ємів споживання, збільшення витрат на опалення складе  $1.56 \cdot 2,2482 / 1,098 = 3.19$  рази. Аналогічні приклади впливу геометричних характеристик можна навести і для співвідношень площі даху, зовнішніх стін та кількості поверхів [5].

На графіку (рис. 1) показана залежність витрат за сплату електроенергії для приводу теплового насоса та витрат за сплату газу в залежності від рівня зовнішньої температури, вище якої вмикається повітряний тепловий насос, при площі вікон 20% від площі приміщень. Графік показує, що вмикаючи тепловий насос при зовнішній температурі вище  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  отримуємо суттєве зростання витрат за рахунок як зростання витрат газу, так і за рахунок переходу в іншу цінову категорію вартості газу. Також з розрахунків випливає, що без використання теплового насоса витрати на опалення становитимуть 17370 грн., а при використанні теплового насоса, починаючи з зовнішньої температури вище за  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , – 8727 грн., що в 1,99 раз менше. Окупність капіталовкладень на повітряний тепловий насос у даному випадку становитиме 9,2 років.

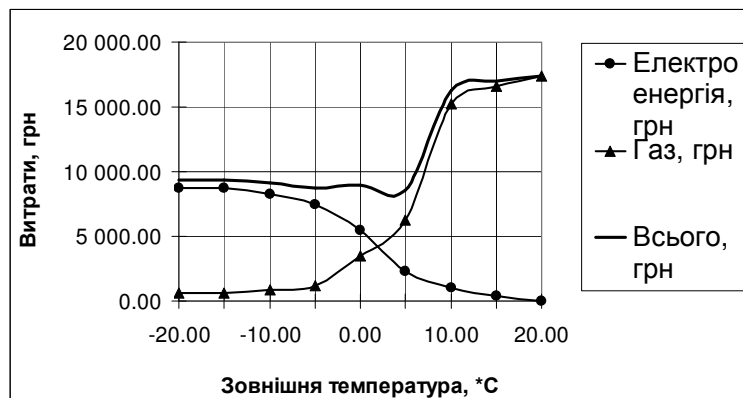


РИС. 1. Залежність витрат за сплату електроенергії та газу від температурного параметра вмикнення теплового насоса для площі вікон 20%

Одноповерховий будинок у порівнянні з 3-поверховим буде споживати газу в 1.51 раз більше. Вартість спожитого газу 1-поверховим будинком зростає у 3.1 рази. При цьому, мова йде лише про залежність витрат тепла від архітектури та поверховості будівлі, всі інші витрати на побудову та експлуатацію будинку в даних розрахунках не враховані. Для врахування більшості з цих факторів існує ряд міжнародних стандартів, на зразок Green Building XML ([www.greenbuilding.com](http://www.greenbuilding.com)), та програмних продуктів, типу Autodesk Ecotect Analysis (<http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis>), розроблених для допомоги у проектуванні сучасних будівель. У розвинутих країнах виконання подібних економічних та екологічних стандартів будівництва суворо контролюється державою.

При зменшенні площі вікон до 10% від площі приміщень економічний ефект використання теплового насоса майже відсутній (рис. 2). Це можна пояснити загальним зниженням витрат та переходом на нижчий тариф вартості газу. Щодо даного житлового будинку, то при витратах газу до 6000 куб. м. на рік встановлення теплового насоса економічно не доцільне, а в деяких випадках збиткове.

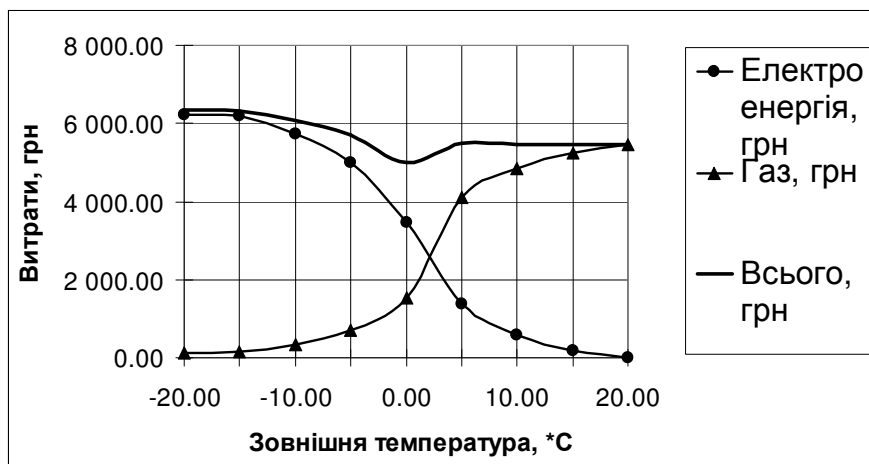


РИС. 2. Залежність витрат за сплату електроенергії та газу від температурного параметра ввімкнення теплового насоса для площі вікон 10%

**Математичне моделювання системи опалення житлового будинку на базі двох опалювальних пристроїв.** Як уже було сказано в попередньому розділі, у залежності від площі будинку та від параметрів теплового насоса (його ККД і діапазону зовнішньої температури, при якому він може працювати), використання теплового насоса як альтернативного джерела тепла може бути як дуже вигідним, так і зовсім не вигідним. Отже постає задача розрахунку економічної доцільності встановлення альтернативного джерела тепла, в даному випадку – теплового насоса, для кожного конкретного будинку. Розглянемо цю задачу.

Вхідні дані: на вхід задачі маємо надати характеристики будинку, обох опалювальних пристроїв і, звичайно, вартість енергоресурсів і її залежність від обсягів споживання. Характеристики будинку зводяться до встановлення залежності між зовнішньою температурою і споживанням тепла. Дану залежність можна виразити наступним співвідношенням:

$$P = k(T_0 - T), \quad P \geq 0,$$

де  $P$  – потреба тепла,  $T_0$  – зовнішня температура при якій вимикається опалення,  $T$  – фактична зовнішня температура,  $k$  – коефіцієнт, що залежить від розмірів будинку, його теплоізоляції і внутрішньої температури.

Основні характеристики газового котла як опалювального пристрою можна задати наступною системою:

$$P_1 = v_1 * 10.7 * A_1, \quad 0 \leq P_1 \leq P_{1\max},$$

де  $P_1$  – поточна теплопродуктивність газового котла,  $P_{1\max}$  – максимальна потужність газового котла,  $v_1$  – об'єм спаленого газу,  $A_1$  – ККД котла.

Як видно з системи, ККД котла, на відміну від теплового насоса, ні від чого не залежить, тобто постійний. Опишемо основні параметри теплового насоса:

$$P_2 = v_2 * A_2, \quad A_2 = 1.7 + 0.05(T + 22), \quad T \geq T_{\min}, \quad 0 \leq v_2 \leq v_{2\max},$$

де  $P_2$  – поточна теплопродуктивність теплового насоса,  $v_2$  – об’єм спожитої за годину електричної енергії,  $v_{2\max}$  – встановлена електрична потужність компресора теплового насоса,  $A_2$  – ККД теплового насоса,  $T$  – фактична зовнішня температура,  $T_{\min}$  – мінімальна зовнішня температура, при якій може працювати тепловий насос.

Далі розглянемо фінансову сторону побудови системи. Задамо вартість побудови системи опалення і вартість енергоресурсів. Спочатку розглянемо вартість побудови та експлуатації газового котла:

$$I_1 = 30000 + P_{1\max} * 3000, \quad S_1 = \frac{C_1}{10.7A_1},$$

де  $I_1$  – вартість інсталяції системи опалення, грн.  $S_1$  – вартість вироблення 1 кВт\*год. тепла, грн.,  $C_1$  – вартість 1 м<sup>3</sup> газу, грн.

Аналогічно, для теплового насоса:

$$I_2 = 5000 + v_2 * 12000, \quad S_2 = \frac{C_2}{A_2},$$

де  $I_2$  – вартість інсталяції системи опалення на базі теплового насоса, грн.,  $v_2$  – електрична потужність компресора теплового насоса, кВт,  $S_2$  – вартість вироблення 1 кВт\*год. тепла, грн.,  $C_2$  – вартість 1 кВт\*год. електроенергії, грн.

Тепер ми можемо сформулювати задачу оптимізації, яка полягає у мінімізації інвестицій на побудову системи опалення та середньої вартості тепла, виробленого обома системами:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + S \cdot P_{365} \cdot Y \rightarrow \min \\ P_1 + P_2 \geq P_{\max} \end{cases},$$

де  $P_{\max}$  – максимальна потреба тепла,  $S$  – середня вартість тепла, виробленого обома системами,  $S_{\text{opt}}$  – бажана ціна 1 кВт\*год. теплової енергії,  $P_{365}$  – річне споживання тепла, кВт\*рік,  $Y$  – розрахунковий період експлуатації системи (у роках).

У даному випадку користувач задає період, близький до строку експлуатації системи чи всієї будівлі (наприклад, 10 – 20 років), протягом якого має бути забезпечена мінімізація вартості експлуатації системи з урахуванням вартості самої системи.

Для врахування ймовірної зміни ціни на енергоресурси вводимо додаткові змінні  $C_1'$  та  $C_2'$ , що позначатимуть майбутні вартості газу та електроенергії відповідно. Тоді можна буде розв'язати систему рівнянь, в якій буде врахована середня вартість експлуатації системи для всіх комбінацій вартостей енергоресурсів.

$$I_1 + I_2 + S' \cdot P_{365} \cdot Y \rightarrow \min$$

$$P_1 + P_2 \geq P_{\max},$$

$$S' = (S(C_1, C_2) + S(C_1', C_2) + S(C_1, C_2') + S(C_1', C_2')) / 4.$$

Розглянемо приклад розв'язання такої задачі.

Вхідні дані:  $k \in [0.6; 151.1]$ ,  $T_0 = 16$ ,  $T \in [-30; 40]$ ,  $A_1 = 0.92$ ,  
 $A_2 = 1.7 + 0.05(T + 22)$ ,  $I_1 = 30000 + P_{1\max} * 3000$ ,  $I_2 = 5000 + P_{2\max} * 12000$ ,

$$C_1 = 0.3608, C_2 = \begin{bmatrix} 0.7254, & Q = [0; 2500) \\ 1.0980, & Q = [2500; 6000) \\ 2.2482, & Q = [6000; 12000) \\ 2.6856, & Q = [12000; \infty) \end{bmatrix}.$$

Результати обчислення бажаної потужності теплового насоса та розрахунок ефективності його використання наведено у таблиці.

ТАБЛИЦЯ. Ефективність використання теплового насоса для об'єктів з різним теплоспоживанням

Пікове навантаження, кВт	Потужність котла, кВт	Потужність теплового насоса, кВт	Сумарні витрати за 15 років, тис. грн.	Витрати без теплового насоса, тис. грн.	Потужність теплового насоса, %	Економія, %
20.00	20.00	0.00	164.69	164.69	0%	0%
30.00	29.10	0.90	241.13	349.40	3%	31%
40.00	36.20	3.80	322.11	455.87	9%	29%
60.00	49.60	10.40	487.55	758.07	17%	36%
80.00	62.50	17.50	655.76	1 000.76	22%	34%
100.00	74.90	25.10	825.96	1 243.45	25%	34%
300.00	202.50	97.50	2 686.53	3 670.34	33%	27%
500.00	309.20	190.80	4 474.01	6 097.23	38%	27%
750.00	417.20	332.80	6 770.15	9 130.85	44%	26%
1 000.00	631.10	368.90	9 069.63	12 164.47	37%	25%
5 000.00	3 155.40	1 844.60	45 208.16	60 702.35	37%	26%

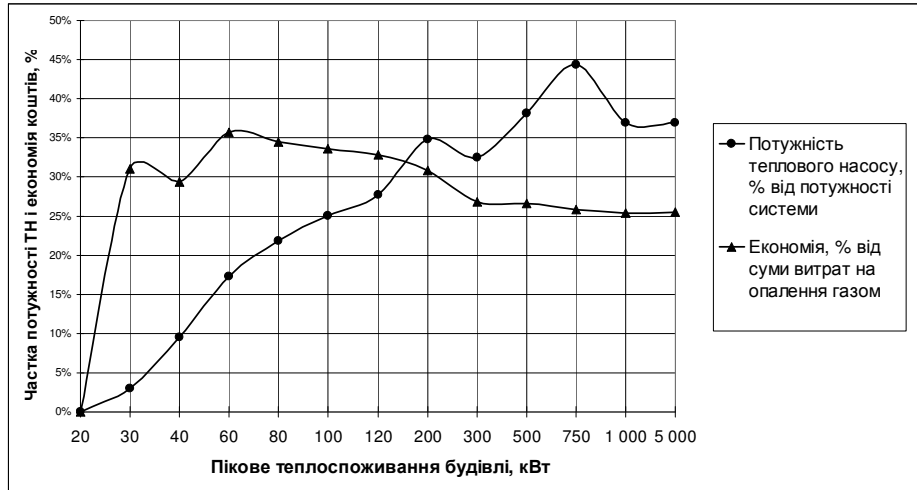


РИС. 3. Залежність частки потужності теплового насоса й економії коштів, від потужності системи опалення будівлі

На базі таблиці побудовано графік залежності потужності теплового насоса та економії коштів від потужності системи опалення будівлі (рис. 3).

Як видно з таблиці та графіка (рис. 3), для об'єктів з піковим теплоспоживанням менше 30 кВт, встановлення теплового насоса недоцільне. Це пов'язано з малим річним споживанням газу, а отже й невисокою його ціною. Встановлення теплового насоса малої потужності може бути економічно недоцільним через великі накладні витрати з монтажу обладнання та розподілу виробленого ним тепла в будинку. Для будинків з піковим споживанням 30 кВт і більше використання теплового насоса дає економію від 25% до 36%. Зокрема, встановлення малопотужного (0.9 кВт) теплового насоса для будинку з піковим теплоспоживанням на опалення 30 кВт (див. рядок 2 таблиці) має сенс, через перехід на нижчий тариф вартості газу, через зменшення його річного споживання до менш ніж 6000 кубічних метрів на рік. У цьому випадку, незважаючи на малу потужність теплового насоса та великі накладні витрати, його встановлення є економічно обґрунтованим.

**Висновки.** Суттєвого зменшення енергоспоживання у житловому будівництві можна досягти не тільки за рахунок застосування сучасних високо-ефективних будівельних матеріалів і технологій будівництва, а також за рахунок оптимізації на етапі проектування. Ця оптимізація повинна стосуватися обґрунтованого вибору геометричних характеристик будівлі та правильного застосування комбінації різних джерел тепла. Як показано в матеріалах цієї статті, завдяки цьому можна досягти зменшення абсолютних витрат на опалення в 2 – 3 рази у грошовому еквіваленті.

*Д.В. Левчий, В.А. Заславский, Э.И. Ненахов*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛОГО ДОМА

Приводится пример использования математической модели процесса теплотерь в жилом многоквартирном доме с целью расчета оптимальной комбинации мощностей газового котла и теплового насоса, с целью минимизировать затраты на установку системы и стоимость эксплуатации на протяжении срока службы.

*D.V. Levchiy, V.A. Zaslavsky, E.I. Nenakhov*

MODELING BUILDING HEATING PROCESSES FOR DETERMINATION WAYS OF ENERGY SAVING

This article provides an example of a mathematical model of process of heat loss in residential high-rise building in order to calculate the optimal combination of power gas-fired boiler and heat pump, in order to minimize the cost of installing the system and operating costs during life cycle.

1. *Енергетична стратегія України до 2030 р.* Розпорядження Кабінету міністрів України від 15.03.2006 р. № 145-р.
2. *ДБН В.1.2-11:2008 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів.* Основні вимоги до будівель і споруд. Економія енергії.
3. *Про затвердження галузевої програми енергоефективності у будівництві на 2010 – 2014 рр.* Міністерство регіонального розвитку та будівництва, наказ № 257 від 30.06.2009.
4. *СНиП 2.04.05-91\*У.* Отопление, вентиляция и кондиционирование.
5. *Леончик Б.И., Данилов О.Л.* Научные основы энергосбережения. Учебное пособие. – М.: МГУПП, 2000. – 398 с.

Одержано 21.05.2012