

УДК 658.29:504

Г. С. Ратушняк, к. т. н.;  
О. Г. Чухряєва, бакалавр

## ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТЕРМОРЕНОВАЦІЇ БУДІВЕЛЬ

*Запропоновано структурну модель еколого-економічного моніторингу теплоізоляційних матеріалів для багатофакторного аналізу їх параметрів з використання експертно-лінгвістичної інформації. За результатами моделювання залежності еколого-економічної доцільності матеріалу за напрямками, що характеризують теплофізичні, економічні й лінгвістичні змінні, отримано систему нечітких логічних рівнянь, які після визначення функції належності оцінок вхідних знань та шляхом їхньої дефазифікації, дозволяють визначити доцільність конкретного матеріалу для термореновації будівель.*

### Вступ

Енергоефективність є однією з нагальних соціально-економічних проблем та елементом світової культури раціонального природокористування. Україна задовольняє потреби в паливно-енергетичних ресурсах за рахунок власного їх видобування приблизно на 50 %. На опалення 100 м<sup>2</sup> загальної площі житлових будинків щорічно витрачається приблизно 6...9 т. умовного палива, що в 1,5 рази більше, ніж в США та 3 рази більше, ніж у Швеції [1, 2, 3]. Значні перевитрати паливно-енергетичних ресурсів є причиною забруднення навколишнього середовища викидами у повітря парникових газів, зокрема діоксиду вуглецю, чадного газу, оксидів сірки та азоту тощо, які утворюються внаслідок згорання органічного палива для одержання теплової енергії, і значною мірою спричиняють парниковий ефект [4].

Зменшити витрати енергоресурсів можливо за рахунок запровадження новітніх технологій модернізації систем теплопостачання та термореновації будівель шляхом підвищення теплоізоляційної здатності огорожувальних конструкцій будівель. З метою зниження в 1,5...2 рази витрат тепла в Україні введені в дію наближені до сучасного рівня нормативи опору теплопередачі захисних конструкцій, які повинні становити 2...2,5 м<sup>2</sup>·К/Вт [4, 5]. На сьогоднішній день відсутня науково обґрунтована методика вибору на ринку послуг теплоізоляційних технологій та матеріалів, які за своїми властивостями та вартістю відповідали б оптимальним еколого-економічним вимогам [2, 6].

### Постановка задачі

Наявні на ринку послуг теплоізоляційні матеріали характеризуються кількісними та якісними характеристиками. Основними теплофізичними характеристиками, що визначають їх еколого-економічну привабливість, є теплопровідність, щільність, міцність на стискання, водопоглинання, сорбційна вологість, морозостійкість та паропроникність [6]. Основними економічними показниками теплоізоляційних матеріалів є вартість матеріалу та трудомісткість робіт з теплореновації будівель та довговічність.

Екологічну безпечність матеріалів для термореновації будівель становлять вогнетривкість, хімічна і біологічна стійкість та шкідливість. Вибір теплоізоляційного матеріалу з урахуванням природнокліматичних умов району будівництва, архітектурно-конструктивних рішень з формування фасадів та архітектурно-планувальних рішень всередині будівель і властивостей матеріалів повинен виконуватися у відповідності до структурної моделі еколого-економічного моніторингу (рис. 1).

Для розв'язання поставленої задачі реалізація моніторингу (рис. 1) передбачає ство-

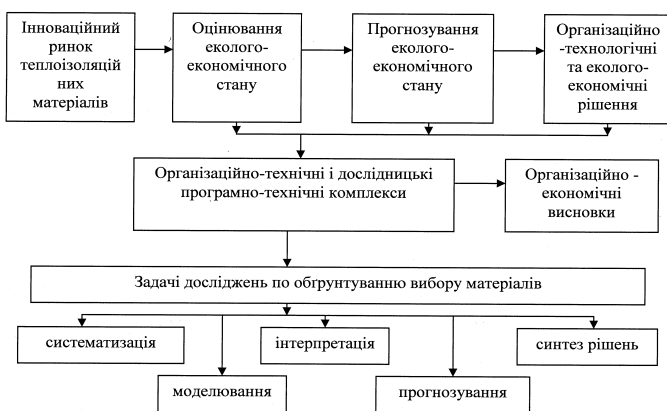


Рис. 1. Структурна модель еколого-економічного моніторингу теплоізоляційних матеріалів

© Г. С. Ратушняк, О. Г. Чухряєва, 2005

рення експертно-моделювальної системи багатофакторного аналізу параметрів теплоізоляційних технологій матеріалів з метою інтелектуальної підтримки прийняття оптимального еколого-економічного рішення.

### Результати дослідження

Еколого-економічна доцільність термореновації будівель визначається тим, що затрати на реалізацію високоефективних енергоощадних заходів протягом розрахункового терміну їх експлуатації повинні бути мінімальними

$$S = \left( \sum_{i=1}^n S_i X_i + \sum_{j=1}^n C_j Y_j \right) \rightarrow \min, \tag{1}$$

де  $S_i$  – сумарні одноразові та поточні витрати на реалізацію варіанта енергоощадних заходів, грн.;  $X_i$  – шукані параметри з  $i$ -го енергоощадного заходу;  $C_j$  – витрати на відшкодування екологічних збитків, грн.;  $Y_j$  – шукані параметри з  $j$ -го екологічного збитку.

Еколого-економічна доцільність визначається також тим, що затрати на термореновацію повинні забезпечувати мінімальні витрати теплової енергії через огорожувальні конструкції, Вт

$$Q = \frac{\lambda \Delta t F}{\delta} \rightarrow \min, \tag{2}$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплозахисних огорожувальних конструкцій, Вт/м·К;  $\Delta t$  – різниця температур зовнішньої і внутрішньої поверхонь огорожувальної конструкції, К;  $F$  – площа огорожувальних конструкцій, м<sup>2</sup>;  $\delta$  – товщина матеріалу огорожувальних конструкцій, м.

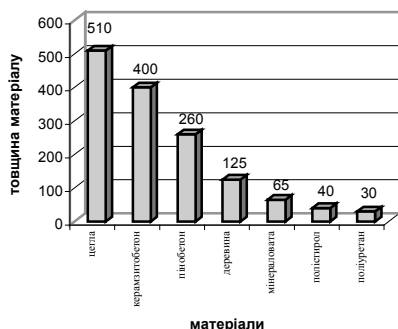


Рис. 2. Діаграма товщини матеріалів, які забезпечують еквівалентні теплоізоляційні характеристики

Аналіз формул (1) та (2) свідчить, що в даних природно-кліматичних умовах та для відповідних архітектурно-конструктивних рішень будівель, затрати на термореновацію  $S_i$  визначаються кількістю матеріалів, що витрачаються на влаштування теплозахисних огорожувальних конструкцій, його вартістю та вартістю технологічного процесу з їх влаштування. Кількість матеріалу на одиницю площі огорожувальної конструкції визначається його теплопровідністю та товщиною (рис. 2).

Характеристики теплоізоляційних властивостей та економічних показників матеріалів, які переважно застосовуються для термореновації будівель у вітчизняній та закордонній практиці, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

#### Порівняльна характеристика теплоізоляційних властивостей та цін теплоізоляційних матеріалів

Показник	Цегла	Керамзитобетон	Пінобетон	Мінераловата	Скловата	Полістерон
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,4...0,9	0,2...0,7	0,1...0,4	0,04...0,07	0,03...0,04	0,03...0,004
Ціна матеріалу, грн/м <sup>2</sup>	200...1000	110...130	220...240	130...160	130...150	150...160

Порівняльний аналіз параметрів, що зумовлюють еколого-економічну доцільність термореновації будівель (вирази (1), (2) та рис. 2 і табл. 1) свідчать, що реалізація структурної моделі еколого-економічного моніторингу теплоізоляційних матеріалів (див. рис. 1) потребує багатофакторного аналізу з використанням експертно-лінгвістичної інформації. Реалізація цієї задачі можлива з використанням математичного апарату, що базується на теорії нечіткої логіки [7]. Для встановлення ієрархічних зв'язків параметрів, що впливають на вибір теплоізоляційного матеріалу, виконана їх класифікація та оцінювання значень лінгвістичних змінних за допомогою систем якісних термів (табл. 2).

## Фактори впливу – як лінгвістичні змінні

Параметри	Позначення та назва змінної	Універсальна множина	Терми для оцінювання
Теплофізичні	$X_1$ – теплопровідність	0,03...0,9 Вт/(м·К)	мала, менше середньої, середня, більше середньої, висока
	$X_2$ – густина	10...1700 кг/м <sup>3</sup>	мала, менше середньої, середня, більше середньої, висока
	$X_3$ – паропроникність	0,01...0,06 г (м·год Па)	мала, середня, висока
	$X_4$ – гігроскопічність	0...100 %	мала, середня, висока
	$X_5$ – морозостійкість	200...500 циклів	мала, середня, висока
	$X_6$ – стискуваність	0,05...4,0 м <sup>2</sup> /МН	мала, менше середньої, середня, більше середньої, висока
	$X_7$ – міцність та стискання	0,05...20 МПа	низькоміцні, середньо міцні, високоміцні
Екологічні	$Y_1$ – вогнетривкість	300...1400 °С	вогнетривкі, тугоплавкі, легкоплавкі
	$Y_2$ – хімічна стійкість	0...80 %	низька, середня, висока
	$Y_3$ – біологічна стійкість	0...10 умовних одиниць	відсутня, часткова, повна
	$Y_4$ – шкідливість	0...5 умовних одиниць	відсутня, часткова
Економічні	$Z_1$ – вартість матеріалу	110...1000 грн/м <sup>3</sup>	мала, середня, висока
	$Z_2$ – вартість робіт	60...300 грн/м <sup>3</sup>	мала, середня, висока
	$Z_3$ – трудомісткість робіт	15–35 людино годин/м <sup>3</sup>	мала, середня, висока
	$Z_4$ – довговічність	50...100 років	мала, середня, висока

Моделювання системи інтелектуальної підтримки прийняття рішення на системному рівні з вибору доцільного за еколого-економічними критеріями матеріалу виконано за допомогою використання нечітких логічних рівнянь, які пов'язують функції належності різних рівнів вхідних та вихідних змінних. Кожному нечіткому логічному рівнянню передують база знань у вигляді експертних висловлювань про зв'язки нечітких термів вхідних та вихідних лінгвістичних змінних (табл. 2). Оцінка рівня лінгвістичних змінних, що встановлює зв'язок між еколого-економічною доцільністю теплоізоляційних матеріалів для термореновації будівель (ЕЕД) з теплофізичними (X), екологічними (Y) й економічними параметрами (Z), виконана з використанням системи термів:

$T(ЕЕД) = < \text{низька, нижче середньої, середня, вище середньої, висока} >$ ;

$T(X) = < \text{низька, нижче середньої, середня, вище середньої, висока} >$ ;

$T(Y) = < \text{низька, середня, висока} >$ ;  $T(Z) = < \text{низька, середня, висока} >$ .

В результаті моделювання отримані лінгвістичні висловлювання, яким відповідає система нечітких логічних рівнянь

$$\begin{aligned} \mu_n(ЕЕД) = & \mu_n(X) \wedge \mu_n(Y) \wedge \mu_n(Z) \vee \mu_{nc}(X) \wedge \mu_n(Y) \wedge \mu_n(Z) \vee \mu_n(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_n(Z) \vee \\ & \vee \mu_n(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_c(Z) \vee \mu_n(X) \wedge \mu_n(Y) \wedge \mu_c(Z); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mu_{nc}(ЕЕД) = \mu_{nc}(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_n(Z) \vee \mu_{nc}(X) \wedge \mu_{nc}(Y) \wedge \mu_c(Z) \vee \mu_c(X) \wedge \mu_n(Y) \wedge \mu_n(Z); \quad (4)$$

$$\mu_c(ЕЕД) = \mu_{nc}(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_c(Z) \vee \mu_c(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_n(Z) \vee \mu_c(X) \wedge \mu_n(Y) \wedge \mu_c(Z); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mu_{vc}(ЕЕД) = & \mu_{vc}(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_c(Z) \vee \mu_c(X) \wedge \mu_v(Y) \wedge \mu_v(Z) \vee \mu_{vc}(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_v(Z) \vee \\ & \vee \mu_{vc}(X) \wedge \mu_v(Y) \wedge \mu_c(Z) \vee \mu_v(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_c(Z); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mu_v(ЕЕД) = \mu_v(X) \wedge \mu_v(Y) \wedge \mu_v(Z) \vee \mu_v(X) \wedge \mu_c(Y) \wedge \mu_v(Z) \vee \mu_v(X) \wedge \mu_v(Y) \wedge \mu_c(Z). \quad (7)$$

Визначивши функції належності оцінок вхідних знань шляхом їхньої дефазифікації, можна отримати кількісні оцінки еколого-економічної доцільності для вибору теплоізоляційного матеріалу для термореновації будівель.

## Висновки

1. Реалізація структурної моделі еколого-економічного моніторингу теплоізоляційних матеріалів для термореновації будівель можлива шляхом багатofакторного аналізу з використанням експертно-логічної інформації.

2. За результатами моделювання залежності еколого-економічної доцільності матеріалу з урахуванням параметрів, що характеризують теплофізичні, економічні й екологічні лінгвістичні змінні, отримано систему нечітких логічних рівнянь, які після визначення функції належності оцінок вхідних знань та шляхом їхньої дефазифікації, дозволять визначити доцільність конкретного матеріалу для термореновації будівель.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жовтянський В. Енергозбереження — пріоритет в Україні // Ринок інсталяцій. — 2004. — № 11. — С. 7—8.
2. Мхитарен Н. М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве. — К.: Наукова думка, 2000. — 420 с.
3. Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г. Екологічні та економічні аспекти будівництва й експлуатації систем теплозабезпечення індивідуального житла / Індивідуальний житловий будинок. — Вінниця: Континент-Прим, 2001. — С. 129—131.
4. Ратушняк Г. С., Попова Г. С. Энергозбереження та експлуатація систем тепlopостачання. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — 136 с.
5. Пономарчук А. Ф., Ратушняк Г. С., Пономарчук І. А., Рябова І. Ю. Підвищення термічного опору зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель // Вісник ВПІ. — 2001. — № 1. — С. 8—10.
6. Мацієвська О. Матеріали для термореновації будинків // Ринок інсталяцій. — 2003. — № 12. — С. 11—13.
7. Митюшкин Ю. І., Мокин Б. І., Ротштейн А. П., Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. — 145 с.

Рекомендована кафедрою теплогазопостачання

Надійшла до редакції 31.03.05.  
Рекомендована до друку 14.04.05.

**Ратушняк Георгій Сергійович** — завідувач кафедри теплогазопостачання; **Чухряєва Ольга Георгіївна** — магістрант Інституту аспірантури, магістратури та докторантури.  
Вінницький національний технічний університет