

УДК 631.22

Г. С. Ратушняк, *канд. техн. наук, проф.*,
О. Г. Чухряєва, *магістрант*
Вінницький національний
технічний університет

БАГАТОФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТЕРМОРЕНОВАЦІЇ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ ЛІНГВІСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Україна приблизно на 50% може забезпечити потреби в паливі за рахунок національних запасів, тоді як втрати паливно-енергетичних ресурсів в комунально-побутовій сфері досягають 50–60% [1,2]. Зменшити витрати енергоресурсів можливо шляхом використання ефективних теплоізоляційних матеріалів. Ці матеріали дають змогу здійснювати термореновацію будівель, які мають термічний опір зовнішньої огорожі більше ніж передбачено діючими санітарно-гігієнічними нормами [3]. Дослідженням [4] рекомендуються залежності економічно доцільного термічного опору від вартості теплоізоляційних матеріалів для всіх чотирьох кліматичних зон України. На сьогоднішній день відсутня науково-обґрунтована методика багатофакторного аналізу теплоізоляційних матеріалів для термореновації будівель з врахуванням їх кількісних та якісних параметрів.

Існуючі теплоізоляційні матеріали характеризуються крім економічних показників також кількісними та якісними художньо-естетичними, теплофізичними й екологічними параметрами. Порівняльна характеристика показників теплопровідності матеріалу для забезпечення нормованого опору теплопередачі та вартості матеріалу найбільше використовуваних теплоізоляційних матеріалів наведена в табл. 1.

Проектування, технологія влаштування й умови експлуатації зовнішніх огорож будівель вимагають пошуку оптимального рішення термореновації будівель на базі багатофакторного аналізу характеристик теплоізоляційних матеріалів. Вирішити цю задачу на

етапі техніко-економічного обґрунтування можна з використанням теорії нечітких множин та лінгвістичної змінної за результатами віртуального експерименту [5].

Таблиця 1

Порівняльна характеристика показників теплопровідності, витрат та вартості теплоізоляційних матеріалів

Теплоізоляційний матеріал	Теплопровідність, Вт/(м ² К)	Необхідна товщина матеріалу для забезпечення опору теплопередачі 1,2 (м ² К)/Вт, мм	Вартість, грн/м ³
Скловата	0,03...0,04	40	130...150
Полістирол	0,03...0,04	46	150...160
Мінеральна вата	0,04...0,07	67	130...160
Газопінобетон	0,1...0,4	348	220...240
Керамзитобетон	0,2...0,7	490	120...140
Цегла глиняна	0,5...0,8	672	300...500
Цегла силікатна	0,7...0,9	840	500...600

Моделювання багатофакторного впливу параметрів теплоізоляційних матеріалів на прийняття рішення по його вибору для термомодернізації будівель виконано на основі методу ідентифікації нелінійних об'єктів нечіткими базами знань. Спочатку будувались структурні залежності еколого-економічної доцільності (Y) теплоізоляційного матеріалу від впливаючих художньо-естетичних (X_1), теплофізичних (X_2), екологічних (X_3) та економічних (X_4) факторів з застосуванням експертних правил “якщо-то”. На етапі структурної ідентифікації виконувався узагальнений елемент в вигляді дерева логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на вибір теплоізоляційного матеріалу. Корінь дерева логічного висновку відповідає еколого-економічній доцільності теплоізоляційного матеріалу, а висячі вершини – фактори, що впливають на прийняття рішення. Логічний висновок описує залежність $Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$ між причинами $X_i (i = \overline{1, n})$ та наслідком у вигляді системи нечітких логічних висловлювань [5].

$$\text{якщо } \bigcup_{p=1}^{K_j} [\bigcap_{i=1}^n (x_i = X_i^{jp})], \text{ то } y = Y_p, \quad j = \overline{1, m}. \quad (1)$$

де Y_j – нечіткий терм для оцінки j -го рівня вихідної змінної, m – кількість термів для оцінки Y ; $X_i^{j^n}$ – нечіткий терм для оцінки вхідної змінної x_j в p -му рядку матриці знань, що відповідає терму Y_j $p \in \overline{1, K_j}$; K_j – кількість рядків, що відповідає терму Y_j ; $\cup(\cap)$ – символ операції АБО (І).

Якісний нечіткий терм є лінгвістичною змінною, значення якої виражається словом. Всі фактори впливу на вибір теплоізоляційного матеріалу для термореновації будівель розглядаються як лінгвістичні змінні, що задані на відповідних універсальних множинах і оцінюються нечіткими термами, в якості яких прийняті кількісні вирази “низька” (н), “нижче середньої” (нс), “середня” (с), “вище середньої” (вс) та “висока” (в). Використання нечітких термів дає змогу побудувати експертні нечіткі бази знань, які віддзеркалюють зв’язки між вхідними та вихідними змінними. Змістовна інтерпретація параметрів, що впливають на еколого-економічні параметри теплоізоляційних матеріалів, та відповідні множини лінгвістичних оцінок (термів) наведені в таблиці 2.

У вузлах дерева логічного висновку для багатофакторного аналізу теплоізоляційних матеріалів для термореновації будівель представлені формули, що описують за допомогою лінгвістичних змінних співвідношення між факторами впливу:

$$Y = f_y (X_1, X_2, X_3, X_4), \quad (2)$$

$$X_1 = f_{X_1} (X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}), \quad (3)$$

$$X_2 = f_{X_2} (X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}), \quad (4)$$

$$X_3 = f_{X_3} (X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{34}), \quad (5)$$

$$X_4 = f_{X_4} (X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}). \quad (6)$$

Фактори впливу – як лінії вісигнічнї зміннї

Параметри	Позначення та назва лінгвістичної змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
Художньо-естетичні	X ₁₁ – яскравість	1...10 балів	низька, середня, висока
	X ₁₂ – кольоровість	1...10 балів	низька, середня, висока
	X ₁₃ – тональність	1...10 балів	низька, середня, висока
	X ₁₄ – фактурність	1...10 балів	низька, середня, висока
	X ₁₅ – колір	1...10 балів	низька, середня, висока
Теплофізичні	X ₂₁ – теплопровідність	0,03...0,9 Вт/(м К)	низька, менше середньої, середня, більше середньої, висока
	X ₂₂ – густина	10...1700 кг/м ³	низька, середня, висока
	X ₂₃ – паропроникність	0,01...0,06 г(м·год Па)	низька, середня, висока
	X ₂₄ – гігроскопічність	0...100 %	низька, середня, висока
	X ₂₅ – морозостійкість	200...500 циклів	низька, середня, висока
	X ₂₆ – стискуваність	0,05...4,0 м ² /МН	низька, середня, висока
	X ₂₇ – міцність на стискування	0,02...20 Мпа	низька, середня, висока
	X ₂₈ – звукопоглинання	10...40 дБ	низька, середня, висока
Екологічні	X ₃₁ – вогнетривкість	300...1400 °С	низька, середня, висока
	X ₃₂ – хімічна стійкість	0...80 %	низька, середня, висока
	X ₃₃ – біологічна стійкість	0...10 умовних одиниць	низька, середня, висока
	X ₃₄ – шкідливість	0...5 умовних одиниць	низька, середня, висока
Економічні	X ₄₁ – вартість матеріалу	110...1000 грн/м ³	низька, середня, висока
	X ₄₂ – вартість робіт	60...300 грн/м ³	низька, середня, висока
	X ₄₃ – трудомісткість робіт	15–35 людино-годин/м ³	низька, середня, висока
	X ₄₄ – довговічність	50...100 років	низька, середня, висока

Експертна матриця знань для багатофакторного оцінювання матеріалів для термореновації будівель від впливаючих факторів побудована за методикою [5] і на системному рівні наведена в табл. 3. Аналогічно будуються матриці нечіткої бази знань для художньо-естетичних, теплофізичних, екологічних та економічних факторів, що впливають на вибір теплоізоляційних матеріалів.

Таблиця 3

Матриця нечіткої бази знань на системному рівні

ЯКЩО				ТО
X_1	X_2	X_3	X_4	Y
1	2	3	4	5
Низькі (н)	Низькі (н)	Низькі (н)	Низькі (н)	Низькі (н)
Нижче середніх (нс)	Низькі (н)	Низькі (н)	Низькі (н)	
Низькі (н)	Низькі (н)	Середні (с)	Низькі (н)	
Низькі (н)	Нижче середніх (нс)	Низькі (н)	Низькі (н)	
Низькі (н)	Низькі (н)	Низькі (н)	Середні (с)	
Низькі (н)	Нижче середніх (нс)	Середні (с)	Середні (с)	Нижче середніх (нс)
Середні (с)	Нижче середніх (нс)	Низькі (н)	Низькі (н)	
Середні (с)	Нижче середніх (нс)	Середні (с)	Низькі (н)	
Середні (с)	Нижче середніх (нс)	Низькі (н)	Середні (с)	
Середні (с)	Середні (с)	Низькі (н)	Низькі (н)	
Середні (с)	Нижче середніх (нс)	Середні (с)	Середні (с)	Середні (с)
Середні (с)	Нижче середніх (нс)	Середні (с)	Високі (в)	
Середні (с)	Нижче середніх (нс)	Високі (в)	Середні (с)	
Середні (с)	Середні (с)	Середні (с)	Середні (с)	
Середні (с)	Середні (с)	Середні (с)	Середні (с)	
Високі (в)	Вище середніх (вс)	Низькі (н)	Середні (с)	Вище середніх (вс)
Високі (в)	Вище середніх (вс)	Середні (с)	Низькі (н)	
Низькі (н)	Вище середніх (вс)	Середні (с)	Середні (с)	
Середні (с)	Вище середніх (вс)	Середні (с)	Середні (с)	
Високі (в)	Вище середніх (вс)	Середні (с)	Середні (с)	
Середні (с)	Вище середніх (вс)	Високі (в)	Середні (с)	
Середні (с)	Вище середніх (вс)	Середні (с)	Високі (в)	
Високі (в)	Середні (с)	Середні (с)	Середні (с)	
Високі (в)	Вище середніх (вс)	Середні (с)	Середні (с)	
Середні (с)	Високі (в)	Високі (в)	Високі (в)	
Високі (в)	Вище середніх (вс)	Високі (в)	Високі (в)	Високі (в)
Високі (в)	Вище середніх (вс)	Середні (с)	Високі (в)	
Високі (в)	Вище середніх (вс)	Високі (в)	Середні (с)	
Високі (в)	Високі (в)	Високі (в)	Високі (в)	

Математичною моделлю прогнозованого матеріалу для термореновації будівель за оптимальними еколого-економічними показниками виступає система нечітких логічних рівнянь. Нечіткі логічні рівняння ізоморфні базам знань та отримуються з них заміною лінгвістичних термів функціями належності і заміною логічних операцій “І” і “АБО” на операції знаходження, відповідного мінімуму (Λ) й максимуму (V). Нечіткі логічні рівняння для вибору еколого-економічного матеріалу для термореновації будівель, що відповідають факторам впливу як лінгвістичними змінними (табл. 2) та нечіткій базі знань (табл. 3) мають вигляд:

$$\mu_H(Y) = \mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \vee \mu_{HC}(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \vee \mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \vee \mu_H(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \vee \mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_C(X_4), \quad (7)$$

$$\mu_{HC}(Y) = \mu_H(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_H(X_4), \quad (8)$$

$$\mu_C(Y) = \mu_C(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_{HC}(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4), \quad (9)$$

$$\mu_{BC}(Y) = \mu_B(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \vee \mu_H(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_C(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4), \quad (10)$$

$$\mu_B(Y) = \mu_C(X_1) \wedge \mu_B(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_{BC}(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_B(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \wedge \mu_B(X_4). \quad (11)$$

Система нечітких логічних рівнянь (7–11) дає змогу уявити поверхню належності змінних (X_1, X_2, X_3, X_4) за відповідними термами щодо кожного лінгвістичного висловлювання. Щоб перейти від отриманих нечітких множин до кількісної оцінки матеріалів для термореновації будівель необхідно виконати процедуру дефазифікації, тобто перетворення нечіткої інформації в чітку.

Висновки

1. Виконано класифікацію факторів впливу як лінгвістичних змінних, що впливають на прийняття рішення за результатами багатофакторного аналізу якісних та кількісних параметрів теплоізоляційних матеріалів.

2. Результати моделювання за доступною експертно-лінгвістичною інформацією можуть бути використані при виборі теплоізоляційного матеріалу для термореновації будівель за оптимальними еколого-економічними показниками.

Використана література

1. *Жовтянський В.* Енергозбереження – пріоритет в Україні // Ринок інсталяцій. – 2004. – № 11. – С. 7–8.

2. *Ратушняк Г. С., Попова Г. С.* Енергозбереження та експлуатація систем теплопостачання – Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004. – 136 с.

3. *Мацієвська О.* Матеріали для термореновації будинків // Ринок інсталяцій. – 2003. – № 12. – С. 11–13.

4. *Росковцєнко Ю. К., Степанов М. В.* Мінімальний опір теплопередачі будівельних огорожувальних конструкцій // Будівництво України. – 2005. – № 2. – С. 41–44.

5. *Митюшкин Ю. І., Мокін Б. І., Ротштейн А. П.,* Soft Computing: ідентифікація закономірностей нечіткими базами знань. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2002. – 145 с.