

**В. В. Швець**  
**М. А. Максименко**  
**В. Ю. Козак**

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОХОДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ КРИЗЬ ФОЛЬГОВАНІ ТЕРМОПАНЕЛІ МЕТОДОМ КОРЕЛЯЦІЙНО-РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ

Вінницький національний технічний університет

*Спостерігається відсутність об'єктивної інформації по теплозахисних властивостях екранної теплоізоляції, а наявна інформація, яку, як правило, надають виробники даної продукції, носить вельми суперечливий характер. Тому в даний час виникає необхідність в детальному вивченні властивостей екранної ізоляції в сукупності з невентильованими повітряними прошарками, яке дасть можливість найбільш правильного і ефективного застосування подібних матеріалів в будівництві.*

*Експериментальне дослідження є основним джерелом отримання достовірної інформації по теплофізичних характеристик екранної теплової ізоляції. З метою визначення властивостей подібної ізоляції було проведено багато експериментальних досліджень. Експериментальне дослідження є основним джерелом отримання достовірної інформації по теплофізичних характеристик екранної теплової ізоляції. З метою визначення властивостей подібної ізоляції було проведено багато експериментальних досліджень.*

*Розглянуто методику розрахунку коефіцієнтів теплопровідності теплоізоляційних матеріалів і проведення вимірювань теплопровідності на лабораторній установці, експериментальне визначення коефіцієнта теплопровідності різних плоских матеріалів.*

*Ключові слова: теплопровідність, енерговідбиваючий екран, термічний опір.*

### Вступ

Для одержання оптимальних параметрів будівельного теплоізоляційного виробу із екранованими повітряними прошарками використовується принцип оптимізації термічного опору будівельного виробу в залежності товщини повітряного прошарку та матеріалу, що оточує його. Задача вибору оптимального рішення складна й актуальна. Розрізняють дві задачі оптимізації:

Досягнення поставленої мети (максимальний термічний опір) при мінімальній витраті ресурсів;

Одержання найбільшого ефекту (максимальний термічний опір) при заданих ресурсах.

Для оптимізації процесу системи необхідний критерій ефективності, яким визначається ступінь досягнення поставленої мети. Він приймає при найбільш вигідних умовах мінімальне чи максимальне значення, що характеризуються термічним опором ( $R$ ).

$R$  – термічний опір будівельного виробу;

Значення величини термічного опору  $R$  є функцією 2-х параметрів:

$$R = f(x_m, \lambda_m), \quad (1)$$

де  $x_m$  – товщина повітряного прошарку, мм;

$\lambda_m$  – теплопровідність відповідного матеріалу, МПа;

Вибір діапазонів варіювання факторів функцій (1) проводився таким чином, щоб будь-яка їх сукупність в передбачених планом експерименту діапазонах могла бути реалізована і не приводила до протиріч. Для цього було проведено пошукові експерименти для визначення області, в якій необхідні нам сполучення рівнів факторів були б стійко реалізовані.

Всі фактори, які входять в функції (1), є величинами, що мають різну розмірність, а значення цих величин факторів мають різні порядки. Тому для отримання поверхні відгуку цих функцій було проведено операцію кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору [4]. Встановлено наступні значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний – 1, середній 0, максимальний +1 та зіркові значення –1,682, +1,682.

Істинні значення факторів встановлені на основі проведення пошукових експериментів і наведені в табл. 1.

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	-1.682	-1	0	+1	+1.682	
x1 – товщина повітряного прошарку, мм	10	15	20	25	30	5
x2 – теплопровідність матеріалу виробу, Вт/(м·К)	0,0159	0,05	0,1	0,15	0,1841	0,05

Таким чином, з метою визначення залежності структурних елементів від факторних ознак було використано лінійну модель багатфакторної регресії, яка має узагальнений вигляд:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6$$

де  $y$  – показник результативності технологічних інновацій, коеф.;

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$  – фактори, що впливають на результативний показник (це відповідно данні з таблиці);

$a_0$  – постійний показник, який не залежить від впливу факторів;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  – коефіцієнти багатфакторної регресії.

Слід зазначити, що кожна побудована модель повинна бути статистично значущою та адекватною, а інакше її використання в подальшому дослідженні буде необґрунтованим, а результати – незначними.

Визначимо вектор оцінок коефіцієнтів в регресії. Згідно методу найменших квадратів, вектор  $Y(x)$  отримуємо за формулою:

$$Y(x) = (X^T X)^{-1} \cdot (X^T Y)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1,00 & 63,80 & 66,00 & 51,80 & 50,40 & 32,00 & 22,50 & 21,70 \\ 1,00 & 59,30 & 61,30 & 52,10 & 51,00 & 32,40 & 22,80 & 21,30 \\ 1,00 & 57,30 & 59,30 & 51,90 & 50,30 & 32,70 & 23,00 & 21,50 \\ 1,00 & 55,30 & 57,40 & 51,20 & 50,30 & 32,90 & 23,30 & 21,50 \\ 1,00 & 66,40 & 68,10 & 50,70 & 49,50 & 33,10 & 23,70 & 21,40 \\ 1,00 & 58,50 & 60,50 & 50,60 & 49,60 & 33,20 & 24,00 & 21,50 \\ 1,00 & 56,60 & 58,70 & 50,60 & 49,80 & 33,30 & 24,00 & 21,50 \\ 1,00 & 55,20 & 57,20 & 50,60 & 49,60 & 33,50 & 24,00 & 21,50 \\ 1,00 & 67,10 & 68,30 & 50,60 & 49,30 & 33,60 & 24,00 & 21,50 \\ 1,00 & 59,00 & 60,80 & 49,90 & 49,10 & 33,50 & 24,10 & 21,50 \\ 1,00 & 56,90 & 58,10 & 49,90 & 49,10 & 33,60 & 24,10 & 21,50 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} 26,90 \\ 27,30 \\ 27,60 \\ 27,90 \\ 28,10 \\ 28,20 \\ 28,40 \\ 28,50 \\ 28,50 \\ 28,60 \\ 28,70 \end{bmatrix}$$

Матриця  $X^T$

$$X^T = \begin{bmatrix} 1,00 & 1,00 & 1,00 & 1,00 & 1,00 & 1,00 & 1,00 & 1,00 & 1,00 & 1,00 & 1,00 \\ 63,80 & 59,30 & 57,30 & 55,30 & 66,40 & 58,50 & 56,60 & 55,20 & 67,10 & 59,00 & 56,90 \\ 66,00 & 61,30 & 59,30 & 57,40 & 68,10 & 60,50 & 58,70 & 57,20 & 68,30 & 60,80 & 58,10 \\ 51,80 & 52,10 & 51,90 & 51,20 & 50,70 & 50,60 & 50,60 & 50,60 & 50,60 & 49,90 & 49,90 \\ 50,40 & 51,00 & 50,30 & 50,30 & 49,50 & 49,60 & 49,80 & 49,60 & 49,30 & 49,10 & 49,10 \\ 32,00 & 32,40 & 32,70 & 32,90 & 33,10 & 33,20 & 33,30 & 33,50 & 33,60 & 33,50 & 33,60 \\ 22,50 & 22,80 & 23,00 & 23,30 & 23,70 & 24,00 & 24,00 & 24,00 & 24,00 & 24,10 & 24,10 \\ 21,70 & 21,30 & 21,50 & 21,50 & 21,40 & 21,50 & 21,50 & 21,50 & 21,50 & 21,50 & 21,50 \end{bmatrix}$$

Перемножаємо матрицю  $X^T$  та матрицю  $X$ , маємо:

$$X^T X = \begin{bmatrix} 11,00 & 655,40 & 675,70 & 559,90 & 548,00 & 363,80 & 259,50 & 236,40 \\ 655,40 & 39231,14 & 40434,97 & 33361,93 & 32647,32 & 21672,92 & 15458,40 & 14085,36 \\ 675,70 & 40434,97 & 41677,47 & 34396,68 & 33660,02 & 22343,15 & 15936,22 & 14521,68 \\ 559,90 & 33361,93 & 34396,68 & 28504,65 & 27897,56 & 18513,87 & 13204,41 & 12032,72 \\ 548,00 & 32647,32 & 33660,02 & 27897,56 & 27304,06 & 18121,08 & 12924,66 & 11776,93 \\ 363,80 & 21672,92 & 22343,15 & 18513,87 & 18121,08 & 12034,62 & 8585,37 & 7818,31 \\ 259,50 & 15458,40 & 15936,22 & 13204,41 & 12924,66 & 8585,37 & 6125,29 & 5576,82 \\ 236,40 & 14085,36 & 14521,68 & 12032,72 & 11776,93 & 7818,31 & 5576,82 & 5080,54 \end{bmatrix}$$

Перемножаємо матриці ( $X^T Y$ ):

$$X^T Y = \begin{bmatrix} 308,70 \\ 18388,42 \\ 18956,92 \\ 15708,77 \\ 15375,78 \\ 10212,59 \\ 7285,86 \\ 6634,16 \end{bmatrix}$$

Знаходимо обернену матрицю  $(X^T X)^{-1}$ :

$$(X^T X)^{-1} = \begin{bmatrix} 59988,17 & -101,72 & 87,88 & 47,69 & -498,30 & -245,38 & -200,63 & -1120,48 \\ -101,72 & 4,01 & -4,12 & ,99 & ,90 & -5,43 & 5,40 & 3,41 \\ 87,88 & -4,12 & 4,26 & -1,14 & -,68 & 5,75 & -5,60 & -3,25 \\ 47,69 & ,99 & -1,14 & 4,29 & -4,03 & -4,02 & 4,44 & -1,20 \\ -498,30 & ,90 & -,68 & -4,03 & 7,97 & 3,39 & -,32 & 8,85 \\ -245,38 & -5,43 & 5,75 & -4,02 & 3,39 & 16,72 & -14,15 & 1,51 \\ -200,63 & 5,40 & -5,60 & 4,44 & -,32 & -14,15 & 15,80 & 5,03 \\ -1120,48 & 3,41 & -3,25 & -1,20 & 8,85 & 1,51 & 5,03 & 26,44 \end{bmatrix}$$

Вектор оцінок коефіцієнтів регресії:

$$Y(x) = \begin{bmatrix} 9,30 \\ -,04 \\ 0,04 \\ -,18 \\ 0,03 \\ 0,91 \\ -,01 \\ -,16 \end{bmatrix}$$

Рівняння регресії має вигляд:

$$Y = 9,3 - 0,04x_1 + 0,04x_2 - 0,18x_3 + 0,03x_4 + 0,91x_6 - 0,01x_7 - 0,16x_8$$

Перейдемо до статистичного аналізу отриманого рівняння регресії: перевірці значимості рівняння і його коефіцієнтів, дослідженню абсолютних і відносних помилок апроксимації

Для незміщеної оцінки дисперсії проробимо наступні обчислення:

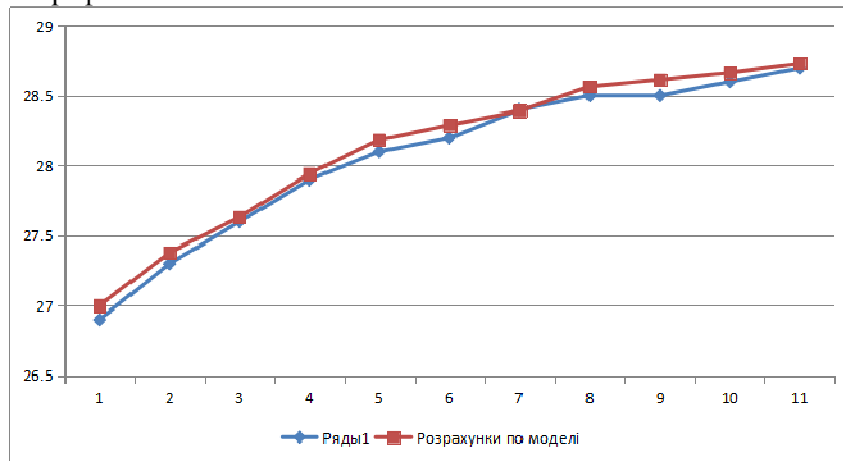
$$\text{Незміщена помилка } \varepsilon = Y - Y(x) = Y - X * s$$

Усі данні занесемо до таблиці 2

Статистичний аналіз отриманого рівняння регресії

$Y$	$Y(x)$	$\varepsilon = Y - Y(x)$	$\varepsilon^2$	$(Y(x) - Y_{cp})^2$	$\left  \frac{\varepsilon}{Y} \right $
26,9	27,00	-0,10	0,0100	1,1236	0,0037
27,3	27,38	-0,08	0,0064	0,4624	0,0029
27,6	27,63	-0,03	0,0009	0,1849	0,0011
27,9	27,94	-0,04	0,0016	0,0144	0,0014
28,1	28,19	-0,09	0,0081	0,0169	0,0032
28,2	28,29	-0,09	0,0081	0,0529	0,0032
28,4	28,39	0,01	0,0001	0,1089	0,0004
28,5	28,57	-0,07	0,0049	0,2601	0,0025
28,5	28,62	-0,12	0,0144	0,3136	0,0042
28,6	28,67	-0,07	0,0049	0,3721	0,0024
28,7	28,73	-0,03	0,0009	0,4489	0,0010
				3,3587	0,0261

Порівняльний графік



Середня похибка апроксимації

$$A = \frac{\sum \left| \frac{\varepsilon}{Y} \right|}{n} 100\% = \frac{0,0261}{11} 100\% = 0,2373\%$$

Оцінка дисперсії:

$$s_e^2 = (Y - X*Y(X))^T (Y - X*Y(X))$$

$$s_e^2 = 0,4037$$

Незміщена оцінка дисперсії:

$$s^2 = \left| \frac{s_e^2}{n - m - 1} \right| = \frac{0,4037}{11 - 7 - 1} = 0,1346$$

Оцінка середньоквадратичного відхилення (стандартна похибка для оцінки  $Y$ ):

$$S = \sqrt{s^2} = \sqrt{0,1346} = 0,3668$$

**Множинний коефіцієнт кореляції.**

Ступінь спільного впливу факторів на результат оцінює індекс множинної кореляції, він приймає значення від 0 до 1 .

Тому R не може бути використаний для інтерпретації напрямку зв'язку. Чим щільніше фактичні значення  $y_i$  розташовуються відносно лінії регресії , тим менше залишкова дисперсія  $i$ , отже , більше величина  $R_y (x_1 , \dots , x_m )$ .

Таким чином, при значенні  $R$  близькому до 1, рівняння регресії краще описує фактичні дані і фактори сильніше впливають на результат. При значенні  $R$  близькому до 0 рівняння регресії погано описує фактичні дані і фактори чинять слабкий вплив на результат.

$$R = \sqrt{1 - \frac{s_e^2}{\sum (y - y_{cp})^2}} = 0.937979044$$

Зв'язок між  $Y$  та факторами  $X$  сильний.

**Оцінка значущості рівняння множинної регресії** здійснюється шляхом перевірки гіпотези про рівність нулю коефіцієнту детермінації розрахованого за даними генеральної сукупності. Для її перевірки використовують  $F$ -критерій Фішера.

$$R^2 = 0.9379^2 = 0,8798$$

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{n - m - 1}{m} = 3,1370$$

Табличне значення  $F_{кр}(11;7) = 3.09$ .

### Висновки

Оскільки фактичне значення  $F > F_{кр}$ , то коефіцієнт детермінації статистично значущий, а отже, отримане рівняння регресії статистично надійно. Це означає, що його можна використовувати для прогнозу і подальшого аналізу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сапарев М. Е. Исследование теплового режима утепленных ограждающих конструкций зданий и воздухопроводов с применением экранной тепловой изоляции: дис. ... канд. техн. наук. Самарский государственный архитектурно-строительный университет, Самара, 2015
2. Аркадьев Л.В., Поволоцкий В.А. Исследование многоэкранный изоляции // Изв. вузов. Сер. Энергетика. 1964. №1. С. 12-15.
3. Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель: ДБН В 2.631:2006. - [Чинний від 2006-09-09]. - К.: Міррегіонбуд України, 2007. - 71 с. - (Національний стандарт України). Зі Зміною №1 від 01.07.2013 р.
4. Петрук В.Г., Володарський Є.Т., Мокін В.Б. Основи науково-дослідної роботи. Навчальний посібник / Під ред. д.т.н., проф. Петрука В. Г. – Вінни-ця: ВНТУ, 2005. – 143 с.
5. Спиридонов А.А. Планирование ксперемента при исследовании технологических процессов. - Москва 1981р. – ст.87-90
6. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / М. А. Сологуб, І. О. Рожнецький, О. І. Некоз та ін.; За ред. М. А. Сологуба. — 2-ге вид., перероб. і допов. — К.: Вища школа, 2002. — 374 с

### REFERENCES

1. Saparëv M. E. Yssledovanye teplovoho rezhyma uteplennykh ohrazhdayushchykh konstruksyy zdanyy y vozdukhovodov s prymenenyem èkrannoy teplovoy yzolyatsyy: dys. ... kand. tekhn. nauk. Samarskyy hosudarstvennyy arkhitekturno-stroytel'nyy unyversytet, Samara, 2015
2. Arkad'ev L.V., Povolotsky V.A. Yssledovanye mnohoèkrannoy yzolyatsyy // Yzv. vuzov. Ser. Ènerhetyka. 1964. №1. S. 12-15.
3. 3.Konstruksiyi budivel' i sporud. Teplova izolyatsiya budivel': DBN V 2.631:2006. - [Chynnyy vid 2006-09-09]. - K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2007. - 71 s. - (Natsional'nyy standart Ukrayiny). Zi Zminoyu №1 vid 01.07.2013 r.
4. Petruk V.G., Volodarskiy E.T., MokIn V.B. Osnovi naukovy-doslIdnoYi roboti. Navchalniy poslbnik /PID red. d.t.n., prof. Petruka V. G.– VInni-tsy: VNTU, 2005. – 143 s.
5. Spiridonov A.A. Planirovanie kspereamenta pri issledovanii tehnologIcheskih protsesov. - Moskva 1981r. – st.87-90.
6. TehnologIya konstruksIynih materIalIv: PIDruchnik / M. A. Sologub, I. O. Rozhnetskiy, O. I. Nekoz ta In.; Za red. M. A. Sologuba. – 2-ge vid., pererob. I dopov. – K.: Vischa shkola, 2002. – 374c.

**Швець Віталій Вікторович** – к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет. ORCID: 0000-0002-2748-3685. E-mail: vitalshv@i.ua.

**Максименко Марина Аркадіївна** – інженер, Вінницький національний технічний університет. ORCID: 0000-0003-1345-8144. E-mail: iskorka6658@gmail.com

**Козак Вадим Юрійович** – магістр, Вінницький національний технічний університет. E-mail: abram2810@gmail.com.

V. Shvets  
M. Maksymenko  
V. Kozak

## SIMULATION OF HEAT FLOW TRANSMISSION THROUGH FOILED THERMOPANELS BY THE CORRELATION- REGRESSION ANALYSIS METHOD

Vinnytsia National Technical University

*There is a lack of objective information on the heat-shielding properties of screen thermal insulation, and the available information, which is usually provided by manufacturers of this product, is highly controversial. Therefore, now there is a need for a detailed study of the properties of screen insulation in combination with unventilated air layers, which will enable the most correct and effective use of such materials in construction.*

*Experimental research is the main source for obtaining reliable information on the thermophysical characteristics of screen thermal isolation. In order to determine the properties of such isolation, many experimental studies have been carried out. Experimental research is the main source for obtaining reliable information on the thermophysical characteristics of screen thermal isolation. In order to determine the properties of such isolation, many experimental studies have been carried out.*

*The method of calculation of thermal conductivity coefficients of thermal insulation materials and carrying out of measurements of thermal conductivity at the laboratory installation, experimental determination of the coefficient of thermal conductivity of various flat materials is considered.*

*Key words: thermal conductivity, energy reflecting screen, thermal resistance.*

*Vitaliy Shvets* – Ph.D., Associate Professor of Urban Planning and Architecture, Vinnytsia National Technical University.

*Marina Maksymenko* – PhD student Vinnytsia National Technical University.

*Vadim Kozak* – magister Vinnytsia National Technical University.

**В. В. Швец**  
**М. А. Максименко**  
**В. Ю. Козак**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ФОЛЬГИРОВАННОГО ТЕРМОПАНЕЛИ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Винницкий национальный технический университет

*Наблюдается отсутствие объективной информации по теплозащитным свойствам экранной теплоизоляции, а имеющаяся информация, которую, как правило, предоставляют производители данной продукции, носит весьма противоречивый характер. Поэтому в настоящее время возникает необходимость в детальном изучении свойств экранной изоляции в совокупности с невентилируемыми воздушными прослойками, которое даст возможность наиболее правильного и эффективного применения подобных материалов в строительстве.*

*Экспериментальное исследование является основным источником получения достоверной информации по теплофизическим характеристикам экранной тепловой изоляции. С целью определения свойств подобной изоляции было проведено много экспериментальных исследований. Экспериментальное исследование является основным источником получения достоверной информации по теплофизическим характеристикам экранной тепловой изоляции. С целью определения свойств подобной изоляции было проведено много экспериментальных исследований.*

*Рассмотрена методика расчета коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных материалов и проведения измерений теплопроводности на лабораторной установке, экспериментальное определение коэффициента теплопроводности различных плоских материалов.*

*Ключевые слова: теплопроводность, энергоотражающий экран, термическое сопротивление.*

*Швец Виталий Викторович* – канд. техн. наук, доцент кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры, Винницкий национальный технический университет.

*Максименко Марина Аркадьевна* – инженер, факультет строительства теплоэнергетики и газоснабжения, Винницкий национальный технический университет.

*Козак Вадим Юрьевич* – магистр, винницкий национальный технический университет.