

ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ З ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ ВУЗЛА ПРИМИКАННЯ НА ТЕРМІЧНИЙ ОПІР ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЛІ

Вінницький національний технічний університет

Підвищення енергоефективності будівлі досягається зменшенням значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі є актуальним напрямком в контексті збільшення термічного опору огорожувальних конструкцій для підвищення енергоефективності будівлі. Сучасні технології та теплоізолюючі матеріали відкривають нові можливості для покращення конструкції вузлів примикання, роблячи даний напрямок актуальним для впровадження енергозберігаючих заходів.

У статті розглядаються чинники, що впливають на конструктивне виконання вузлів примикання будівлі та їх вплив на термічний опір огорожувальних конструкцій. Виникнення "містків холоду" напряму пов'язане із матеріалами, що використовуються при влаштуванні, та особливостями конструкції. Характеристики теплоізолюючого матеріалу мають великий вплив на покращення термічного опору зовнішніх огорожувальних конструкцій. На сьогодні існують різноманітні теплоізолюючі матеріали, що володіють різними властивостями та різняться вартістю. Тому, зважаючи на це, необхідно обрати найбільш оптимальну конструкцію вузла примикання. У зв'язку із чим, проведено планування багатофакторного експерименту на дослідження впливу конструктивного виконання вузла примикання на термічний опір конструкції.

Обрано найбільш вагомі фактори, що впливають на термічний опір теплоізоляційної конструкції: товщина теплоізоляційного матеріалу, його коефіцієнт теплопровідності, товщини та теплопровідність матеріалу стіни. Досліджено вплив виду теплоізоляційного матеріалу та його властивостей на значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі.

Ключові слова: енергоефективність, вузол примикання, містки холоду, енергозбереження, багатофакторний експеримент, утеплювач, теплоізоляційний матеріал, термічний опір.

Вступ

Впровадження енергоефективних заходів передбачає зменшення впливу вузлів примикання на термічний опір огорожувальних конструкцій. Це є важливим напрямком у сучасному будівництві, адже нормативні вимоги щодо термічного опору зростають [1]. Теоретичні дослідження та експертні тепловізійні обстеження будівель вказують на негативний вплив вузлів примикання на енергозберігаючий стан не лише на старого житлового фонду, а й на сучасні будівлі [2, 3, 4]. Такі обставини зумовлюють доцільність вдосконалення технології конструктивного виконання вузлів примикання для зменшення значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі та, як наслідок, підвищенню термічного опору огорожувальних конструкцій.

Мета дослідження

Метою даного дослідження є вибір найбільш оптимальної теплоізоляційної конструкції вузлів примикання, за результатами багатофакторного експерименту дослідження чинників, які впливають на термічний опір зовнішніх огорожувальних конструкцій та параметри мікроклімату приміщень будівлі.

Аналіз останніх досліджень

Із підвищенням вимог щодо енергозбереження у будівельній галузі, збільшилась кількість наукових праць щодо різних методів підвищення енергоефективності будівлі. Особлива увага приділяється вузлам примикання будівлі, які створюють «містки холоду» та зменшують термічний опір теплоізоляційної оболонки будівлі [2]. Виконані дослідження дозволяють використовувати нові конструктивні технології влаштування даних вузлів [5, 6].

Використання енергоефективних конструктивних рішень у зоні примикання огорожувальних конструкцій, у поєднанні з іншими будівельними заходами, сприятиме підвищенню енергоефективності будівель та зменшенню витрат на оплату теплопостачання в опалювальний сезон. Також це дозволить скоротити обсяги шкідливих викидів в атмосферу завдяки зниженню споживання енергоресурсів для обігріву будівель у холодний період.

Основну роль для підвищення термічного опору конструкції виконують властивості теплоізолюючого матеріалу, його товщина, а також основний матеріал огорожувальної конструкції.

Зважаючи на різноманітний вибір будівельних та теплоізоляційних матеріалів, що різняться як ціною так і властивостями, необхідно підібрати найбільш оптимальний варіант. Для цього розглянемо чинники, що впливають на конструктивне виконання вузлів примикання будівлі та їх вплив на термічний опір огорожувальних конструкцій на основі багатофакторного експерименту. Із параметрів, що мають найбільший вплив на термічний опір, обрано товщину теплоізоляційного матеріалу, коефіцієнт теплопровідності утеплювача та коефіцієнт теплопровідності матеріалу стіни.

Необхідно встановити кількісні взаємозв'язки показників конструктивних систем зовнішнього утеплення з їх впливом на термічний опір огорожувальної конструкції, для визначення ефективних заходів модернізації. З огляду на це, актуальним є дослідження нових конструктивних рішень щодо підвищення енергоефективності будівель.

Результати дослідження

Взявши до уваги попередні експериментальні дослідження було проведено багатофакторний експеримент. За параметр оптимізації обрано термічний опір огорожувальної конструкції. Найбільш вагомими факторами, що впливають на термічний опір теплоізоляційної конструкції обрано:

δ – товщина утеплювача, мм;

λ_u – коефіцієнт теплопровідності утеплювача, Вт/(м·К);

$\lambda_{ст}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стіни, Вт/(м·К).

Отже, термічний опір зовнішньої конструкції є функцією від 3 параметрів

$$R = f(\delta, \lambda_u, \lambda_{ст}) \quad (1)$$

Дослідження впливу наведених вище факторів на термічний опір огорожувальної конструкції при проведенні однофакторних експериментів дуже трудомісткі, тому проведення багатофакторного експерименту для отримання рівнянь регресії є більш доцільним.

Для встановлення діапазонів варіювання факторів у функції (1) проведено пошукові експерименти, основною вимогою яких було забезпечення того, щоб усі фактори в межах передбачених експериментальним планом діапазонів могли бути чітко реалізовані та не приводили до протиріч [7]. Кожен фактор характеризувався такими значеннями: X_{j0} – базовий рівень фактора; X_{jmax} і X_{jmin} – відповідно верхній та нижній рівні; αX_{jmax} і αX_{jmin} – верхній і нижній зіркові рівні; α – зіркове плече; I_j – інтервал варіювання.

Кодування факторів, проведене для отримання поверхні відгуку цих функцій, наведено лінійним перетворенням факторного простору

$$x_j = \frac{(\bar{X}_j - \bar{X}_{j0})}{I_j} \quad (2)$$

Умовна шкала використана для фіксації значень рівнів факторів: мінімальний -1 , середній 0 , максимальний $+1$ та зіркові значення $-1,682$, $+1,682$. Основні рівні, інтервали варіювання та межі області експериментальних досліджень наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	$-1,682$	-1	0	$+1$	$+1,682$	
x_1 – товщина утеплювача, м	0,100	0,125	0,150	0,175	0,100	0,025
x_2 – коефіцієнт теплопровідності утеплювача, Вт/(м·К)	0,044	0,038	0,032	0,026	0,020	-0,006
x_3 – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стіни, Вт/(м·К)	0,81	0,656	0,504	0,352	0,20	-0,152

Для визначення точкових оцінок $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$ використовувався метод найменших квадратів [7]:

$$B = Y\Phi^{-1}, \quad (3)$$

де $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}$ – матриця, що містить коефіцієнти регресії;

$\Phi = F^T F$ – інформаційна матриця Фішера;

$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix}$ – матриця, що містить результати експериментів за матрицею планування;

$F = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,k} \\ 1 & x_{2,1} & \dots & x_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{N,1} & \dots & x_{N,k} \end{bmatrix}$ – матриця, що містить значення факторів $x_{i,j}$ (де i – номер дослідів за матрицею планування; j – номер фактора); k – кількість факторів; N – кількість дослідів.

Перевірка адекватності регресійних моделей визначається за критерієм Фішера [7]:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{eidm}^2} \leq [F(f_1, f_2)], \quad (4)$$

де S_{ad} – дисперсія адекватності;

S_{eidm} – дисперсія відтворюваності;

$[F(f_1, f_2)]$ – критичне значення критерію Фішера;

$f_1 = N - d$ – кількість ступенів вільності дисперсії адекватності;

$f_2 = n - 1$ – кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності;

d – кількість значимих коефіцієнтів регресії;

n – число попередніх повторних дослідів, які проведено для середнього (нульового) рівня факторів.

Розрахункове значення критерію F порівнювалося з критичним і при $F > [F]$ регресійна модель вважалася неадекватною.

Дисперсія відтворюваності визначалася за відомою формулою:

$$S_{eidm}^2 = \frac{1}{f_2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (5)$$

де y_i – результат i -го повторного дослідів;

$\bar{y}$ – середнє арифметичне значення результатів n повторних дослідів.

Кількість дослідів для дрібнофакторного експерименту при квадратичній регресії визначалась за формулою [8]:

$$N = 2^{k-1} + 2k + N_0, \quad (6)$$

де k – кількість факторів;

2 – кількість рівнів;

N_0 – кількість дослідів в центрі плану, $N_0 = f(k) = f(3) = 10$ згідно з [9].

Отже, $N = 2^{3-1} + 2 \cdot 3 + 10 = 20$ дослідів.

Для проведення повнофакторного експерименту було складено матрицю планування експериментів, яка наведена в табл. 2.

Довірча ймовірність P_r при нормуванні величини результуючої та випадкової похибок знаходиться в діапазоні $0,8 \dots 0,9$. При обчисленні довірчої ймовірності правильності отриманих результатів $P_r = 0,9$, показник достовірності прийнято $t = 1,96$.

Приймаємо показник точності не більше 5% ($P = 0,05$). Зважаючи на це коефіцієнт мінливості коефіцієнта теплопровідності утеплювача в заданих межах не більше 6% ($V = 0,06$).

Матриця планування експерименту для цільової функції– термічного опору

№ досліду	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5,3
2	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	4,6
3	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	4,5
4	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	4,3
5	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	4,8
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	4,4
7	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	4,1
8	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	3,8
9	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	4,1
10	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	5,1
11	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	4,0
12	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	5,3
13	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	4,3
14	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	5,0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,2
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,2
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,3
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,4
bi	0,240	0,335	0,203	0,075	0,025	-0,025	0,104	0,122	0,122	
bei	-40,38	-272,5	-6,652	-500	-6,578	-27,41	166,638	3384,19	5,273	
t	6,27	8,775	5,313	1,499	0,499	-0,499	2,795	3,270	3,27	[t]=2,571

Тоді мінімальна кількість дослідів при однакових умовах їх проведення:

$$n = \frac{0,06^2 \cdot 1,96^2}{0,05^2} = 5,53.$$

Обираємо n = 6. Тоді при зміні будь-якого параметра системи необхідно виконати не менше шести дослідів.

Дисперсія адекватності визначається за формулою [9]

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{f_1} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (7)$$

де y_i – результат і-го дослідів, проведеною за матрицею планування;

$\hat{y}_i$ – результат і-го значення дослідів, передбаченого за допомогою регресійної моделі.

Значимість коефіцієнтів регресії проводилася за t-критерієм Стюдента [9]:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{bidm} \sqrt{c_{i,i}}} > [t(f_2)], \quad (8)$$

де $[t(f_2)]$ – критичне значення t-критерію Стюдента, що рівне значенню розподілу Стюдента;

$c_{i,i}$ – відповідний елемент матриці Ф-1.

Виконувалося порівняння розрахункового значення критерію t_i з критичним. У випадку, якщо $t \leq [t(f_2)]$, тоді-й коефіцієнт регресії вважався незначним.

За результатами багатофакторного експерименту для функції відгуку R рівняння регресії для кодованих значень матиме такий вигляд:

$$R = 4.240 + 0.335x_1 + 0.203x_2 + 0.075x_3 + 0.025x_1x_2 - 0.025x_1x_3 + 0.104x_2x_3 + 0.122x_1^2 + 0.122x_2^2 + 0.0001x_3^2 \quad (9)$$

Причому $S_{відт}^2 = 0,02$; $S_{ад}^2 = 0,04$; $F = 2,12 < [F] = 2,72$, отже регресійна модель (9) є адекватною [9].
Значення коефіцієнта кореляції $R^2 = 0,908$.

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку R має вигляд:

$$R = 8.761 + 13.400\delta + 33.833\lambda_{ут} + 0.493\lambda_{ст} + 114.035\lambda_{у\lambda_{ст}} + 195.2\delta^2 + 3388.89\lambda_{у\lambda_{ст}}^2 \quad (10)$$

Отримане рівняння регресії дозволяє провести параметричну оптимізацію величини термічного опору огорожувальних конструкцій з врахуванням “містків холоду” (рис. 1-3).

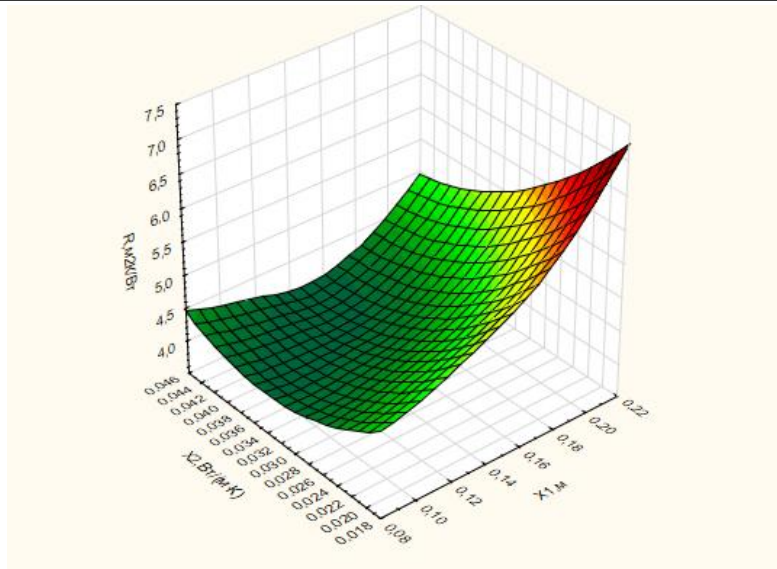


Рисунок 1— Поверхня відгуку залежності термічного опору від товщини утеплювача та коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційного матеріалу

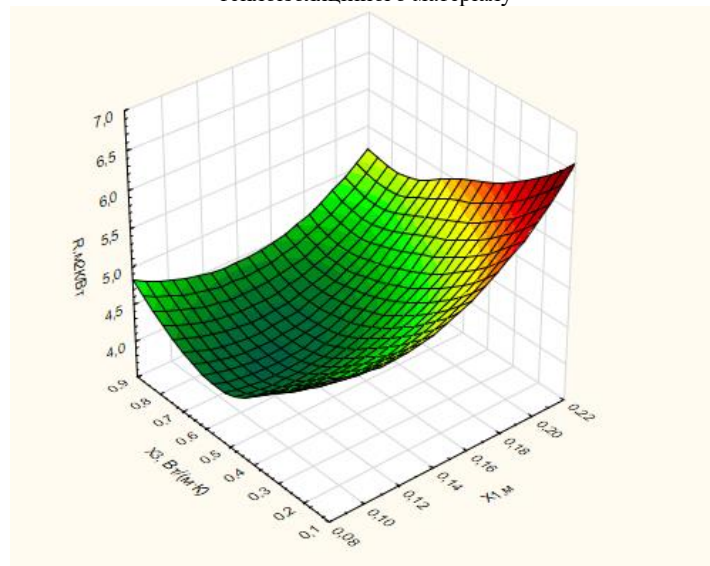


Рисунок 2 – Поверхня відгуку залежності термічного опору від товщини утеплювача та коефіцієнта теплопровідності основного матеріалу огорожувальної конструкції

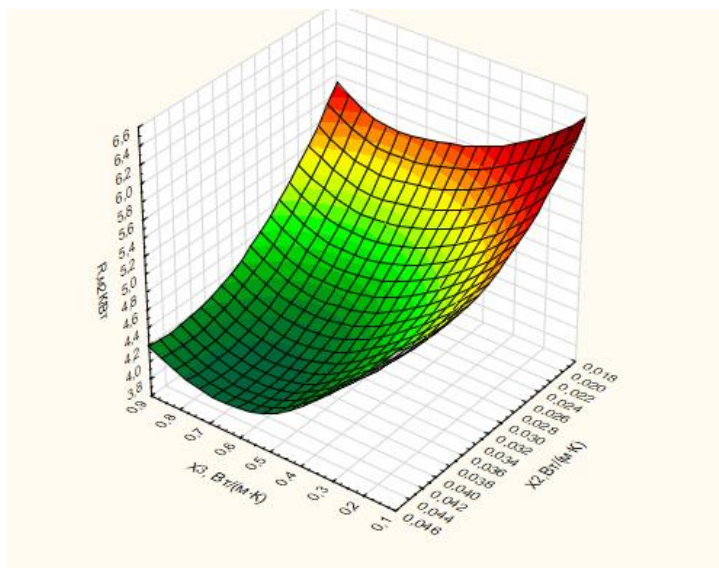


Рисунок 3 – Поверхня відгуку залежності термічного опору від товщини утеплюючого матеріалу та його коефіцієнта теплопровідності

Отже, як бачимо з поверхонь відгуку, оптимальними для конструктивного виконання є дотримання таких параметрів: товщина теплоізоляції 0,18-0,2 м, коефіцієнта теплопровідності утеплюючого матеріалу менше 0,038 Вт/(м·К) та коефіцієнта теплопровідності основного матеріалу стін менше 0,5 Вт/(м·К).

Висновки

В результаті аналізу впливу різноманітних теплоізоляційних матеріалів для покращення конструкції вузлів примикання. Використання результатів проведеного багатофакторного експерименту дозволить оптимально підбирати конструкцію вузлів примикання. Правильний підбір товщини та характеристик тепло ізолюючих матеріалів забезпечує збільшення термічного опору конструкції, що позитивно впливає на енергоефективність будівлі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний від 1.09.2022]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2022. 23 с.
2. Ратушняк Г.С., Очеретний А. М., Материнська О. Ю. Підвищення енергоощадності багатоповерхових будинків шляхом вдосконалення вузлів примикання огорожувальних конструкцій. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2017. №2. С. 8.
3. Панкевич О. Д., Миколаєнко В. В., Панкевич В. В. Вплив конструктивних рішень вузових з'єднань (місць примикання конструкцій) на енергоефективність будівлі. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2019. с. 20-29.
4. Ратушняк Г. С., Материнська О. Ю., Очеретний А. М. Шляхи зменшення негативного впливу теплопровідних включень при експлуатації будівлі : матеріали наук.-технічн. конф., м. Вінниця, 14-23 березня 2018 р., Вінниця, 2018. С. 2251-2253.
5. Спосіб утеплення вузла примикання балконної плити: пат. 142300 Україна. № у 2019 12113; заявл. 21.12.2019; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10. 4 с.
6. Спосіб утеплення вузла примикання перекриття на технічному горищі: пат. 139606 Україна. № у 2019 07036; заявл. 24.06.2019; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1. 4 с.
7. Штовба С. Д., Галушчак А. В. Ідентифікація багатофакторних залежностей за допомогою баз знань. Лабораторний практикум : електронний навчальний посібник. Вінниця. ВНТУ, 2015. 96 с
8. Ратушняк Г. С., Горюн О. Ю. Планування експерименту з дослідження чинників, що впливають на термічний опір огорожувальних конструкцій при їх термомодернізації. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2019. №2. С. 66.
9. Голоскоков О. Є. Основи регресійного аналізу. Навчальний посібник. Харків, НТУ «ХПІ», 2008.91 с.

REFERENCES

1. DBN V.2.6-31:2021. Thermal insulation and energy efficiency of buildings. [Actual from 09/01/2022]. Official edition. Kyiv: Minregion of Ukraine, 2022. 23 p..
2. Ratushnyak G.S., Ocheretny A. M., Materynska O. Yu. Increasing energy efficiency of multi-storey buildings by improving the junction points of enclosing structures. Modern technologies, materials and structures in construction.. 2017. No. 2. P. 8.
3. Pankevych O. D., Mykolayenko V. V., Pankevych V. V. The influence of design solutions of nodal connections (places of adjacency of structures) on the energy efficiency of the building. Modern technologies, materials and structures in construction. 2019. p. 20-29.
4. Ratushnyak G. S., Materynska O. Yu., Ocheretny A. M. Ways to reduce the negative impact of heat-conducting inclusions during the operation of the building: materials of the scientific and technical conference, Vinnytsia, March 14-23, 2018, Vinnytsia, 2018. p. 2251-2253.
5. Method of insulating the junction of a balcony slab: pat. 142300 Ukraine. No. u 2019 12113; application. 21.12.2019; publ. 05/25/2020, Bull. No. 10. 4 p.
6. Method of insulation of the junction of the floor in the technical attic: pat. 139606 Ukraine. No. u 2019 07036; appl. 06/24/2019; publ. 01/10/2020, Bull. No. 1. 4 p.
7. Shtovba S. D., Galushchak A. V. Identification of multifactorial dependencies using knowledge bases. Laboratory practical: electronic textbook. Vinnytsia. VNTU, 2015. 96 p.
8. Ratushnyak G. S., Goryun O. Yu. Planning an experiment to study factors affecting the thermal resistance of enclosing structures during their thermal modernization. Modern technologies, materials and structures in construction.. 2019. No. 2. P. 66.
9. Goloskokov O. E. Fundamentals of regression analysis. Textbook. Kharkiv, NTU "KhPI", 2008. 91 p.

Георгій Сергійович Ратушняк – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри ІСБ. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: ratusnak@gmail.com, ORCID 0000-0001-9656-5150.

Оксана Юрійвна Горюн – аспірантка, факультет будівництва будівництва, цивільної та екологічної інженерії. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: oksana718@ukr.net, ORCID 0000-0002-3624-2293.

PLANNING OF AN EXPERIMENT TO STUDY THE INFLUENCE OF THE CONSTRUCTIVE DESIGN OF THE JOINT JOINT ON THE THERMAL RESISTANCE OF BUILDING ENCLOSURES

Vinnytsia National Technical University

Reducing the value of linear heat transfer coefficients is a relevant direction in the context of increasing the thermal resistance of enclosing structures to increase the energy efficiency of the building. Modern technologies and heat-insulating materials open up new opportunities for improving the design of junction nodes, making this direction an integral part of modern construction.

The article examines the factors that affect the constructive design of the junction nodes of the building and their influence on the thermal resistance of enclosing structures. The emergence of "cold bridges" is directly related to the materials used in the junctions and the design features. The characteristics of the thermal insulation material play an important role in improving the thermal resistance of external enclosing structures. Today, there are a large number of insulation materials with different properties and different costs. Therefore, taking this into account, it is necessary to choose the most optimal design of the junction. In this regard, a multifactorial experiment was planned to study the influence of the structural design of the junction on the thermal resistance of the structure.

The most significant factors affecting the thermal resistance of the thermal insulation structure were selected: the thickness of the thermal insulation material, its thermal conductivity coefficient, the thickness and thermal conductivity of the wall material. The influence of the type of thermal insulation material and its properties on the values of linear heat transfer coefficients was studied.

Keywords: energy efficiency, junction, cold bridges, multifactorial experiment, insulation, thermal insulation material, thermal resistance.

Ratusnyak Georgiy – candidate of Technical Sciences, professor, engineering systems in construction, , professor, head of the ISB department, faculty of construction, civil and environmental engineering, Vinnytsia National Technical University,, e-mail: ratusnak@gmail.com, ORCID 0000-0001-9656-5150.

Horiun Oksana – graduate student, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: oksana718@ukr.net, ORCID 0000-0002-3624-2293.