

**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ СТИНИ
БАГАТОПОВЕРХОВОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ
ТЕРМОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ**

**DETERMINATION OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF THE
WALL OF A MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDING BY THE
THERMOMETRIC METHOD**

Боднар Ю.І., к.т.н., доцент, (Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені Степана Гжицького (північний кампус), м. Дубляни), <https://orcid.org/0000-0002-7196-2157>;

Босецький М.В., аспірант (Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені Степана Гжицького (північний кампус), м. Дубляни), <https://orcid.org/0009-0005-2311-3862>

Bodnar Yu., candidate of technical sciences, associate professor, (Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv (north campus), Dublyany), <https://orcid.org/0000-0002-7196-2157>;

Bosetskyi M., PhD student, (Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv (north campus), Dublyany), <https://orcid.org/0009-0005-2311-3862>

Здійснено експериментальне натурне вимірювання на протязі певних періодів з заданим часовим інтервалом температур внутрішнього середовища, зовнішнього середовища, внутрішньої поверхні стіни житлового будинку. На цій основі визначено коефіцієнт теплопередачі стіни із використанням термометричного методу (ТНМ). Коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні стіни прийнято згідно ДСТУ. Виконано аналіз впливу різних факторів, зокрема інтервалів вимірювань, на значення коефіцієнта теплопередачі.

During thermal modernization of existing buildings and assessment of energy parameters of new housing, there is a need for experimental in-kind determination of the heat transfer coefficient (heat transfer resistance). In our opinion, the optimal method for determining it is the thermometric method (THM). Its equipment is cheaper, the sensors do not disturb the measured heat flow, and temperature measurement is affected by fewer factors than when using a thermal imager. The thermometric method is not standardized, but along with this, it is widely used to measure the heat transfer coefficient during energy audits, in commercial devices. During the research, experimental in-kind measurements were carried out over certain periods of the temperatures of the internal environment, external environment, and

internal wall surface. Before taking measurements, the internal wall surface was examined with a thermal imager to select an area with minimal impact of heat-conducting inclusions. The wall surface temperature in the room was measured by three type K thermocouples placed at a distance of approximately 15 cm from each other and recorded by a recorder at a specified interval. The thermocouples were placed so that they were not on the same horizontal or vertical line. Average temperature values were entered into the calculation. The temperature of the environment inside the room was measured by a temperature recorder, which was placed at a distance of approximately 30 cm from the wall surface at a height of 1.5 m, the same as the height of the thermocouples on the surface. The temperature of the outside environment is recorded by a logger. Thermologgers recorded the temperature of the air environment at a given interval. Using the temperatures measured at a given interval, the heat transfer coefficient of the wall of a residential building was calculated using the thermometric method (THM). The heat transfer coefficient of the inner surface of the wall is adopted according to DSTU. An analysis of the influence of various factors, in particular measurement intervals, on the value of the heat transfer coefficient was performed.

Ключові слова: коефіцієнт теплопередачі, опір теплопередачі, натурні вимірювання, конструкції, термомодернізація будівель, термометричний метод, температура.

heat transfer coefficient, heat transfer resistance, field measurements, building structures, thermal modernization of buildings, thermometric method, temperature.

Вступ. На житлові будівлі в Україні припадає 33% загального кінцевого споживання енергії. Житло є другим за величиною після промисловості споживачем енергії. Питоме споживання теплової енергії багатопверхових житлових будинків складає 175-250 кВт·год/м² на рік [1], що є вдвічі-втричі більше за споживання в Європі. Це вказує на потребу термомодернізації існуючих житлових будинків та будівництва нових енергоефективних. Для вирішення цієї проблеми Кабінетом міністрів України у грудні 2023 року схвалена Довгострокова стратегія термомодернізації будівель на період до 2050 року. У лютому 2025 року затверджені наказом Міністерства розвитку громад та територій України нові вимоги до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії, що дозволяє сертифікувати будівлі за стандартом NZEB (Nearly Zero Energy Building – будівлі з майже нульовим споживанням). При термомодернізації та оцінці енергетичних параметрів новозбудованого житла виникає необхідність експериментального натурального визначення коефіцієнта теплопередачі (опору теплопередачі).

Аналіз останніх досліджень.

На сьогоднішній день для експериментального визначення опору теплопередачі (коефіцієнта теплопередачі) огорожувальної конструкції

будівель в натурних умовах можуть бути застосовані: метод теплового потоку (HFM method) [2], методи які базуються на вимірюванні трьох температур - температури в приміщенні, температури зовнішнього середовища, температури поверхні огорожувальної конструкції (method THM) [3],[4] та метод інфрачервоної термографії (IRT) який базується на вимірюваннях з допомогою тепловізора [5, 6].

Для застосування методу HFM необхідним є датчик теплового потоку який є відносно дорогим і нестабільним, а також потребує спеціального обладнання для вимірювання. Загальна вартість обладнання може складати декілька тисяч євро для кожної точки вимірювання. Крім цього для досягнення умов стаціонарності тривалість випробування повинна перевищувати 3 дні, а нерідко складає від 7 до 14 днів, або навіть для важких конструкцій більше місяця. Враховуючи тривалість та значну вартість при вимірюванні в багатьох точках метод є нераціональним при термомодернізації [7]. Методи інфрачервоної термографії мають перевагу тим, що вимірювання температури стіни здійснюється на поверхні, а не в окремих точках. Але методи мають і багато недоліків, зокрема висока вартість тепловізора, вплив на результати вимірювань багатьох факторів (коефіцієнта випромінювання матеріалу, відстані від об'єкта, параметрів навколишнього середовища та ін.).

Обладнання для методу THM є дешевшим, датчики не вносять збурення у тепловий потік, що вимірюється. Термометричний метод (THM) не стандартизований, але поряд з цим широко використовується для вимірювання коефіцієнта теплопередачі при енергоаудиті. Він є одним з найбільш використовуваних методів в Іспанії [3], використовується у комерційних приладах, зокрема у комплекті для вимірювання коефіцієнту теплопередачі Testo 635-2 [8].

У працях [5,9,10] представлено огляд експериментальних підходів до натурних визначень коефіцієнта теплопередачі огорожувальних конструкцій будівель, наведено їх порівняльний аналіз, оцінено переваги та недоліки. У [3, 4, 8] детально розглянуто застосування термометричного методу, його переваги.

Постановка мети і задач досліджень.

У роботі необхідно експериментально визначити коефіцієнт теплопередачі (опір теплопередачі) стіни реального житлового будинку, дослідити можливість застосування термометричного методу, вплив вибору різних факторів (часу вимірювань, тривалості вимірювань) на результат.

Методика досліджень. Перед проведенням вимірювань внутрішня поверхня стіни обстежувалась тепловізором для вибору ділянки з мінімальним впливом теплопровідних включень. Схема вимірювань подана на рис.1. Температура поверхні стіни у приміщенні вимірювалась трьома термопарами типу К розміщеними на віддалі приблизно 15 см одна від одної та фіксувалась реєстратором. Розміщення термопар не повинно бути на одній

горизонталі чи вертикалі (рис.2) із-за умови забезпечення розміщення на шві розчину муру. Температура записувалась реєстратором (рис.3) з заданим інтервалом (точність $\pm 0.1\% + 0.3^{\circ}\text{C}$). У розрахунки вводимо середнє значення температури ($T_{si} = (T_{si1} + T_{si2} + T_{si3})/3$).

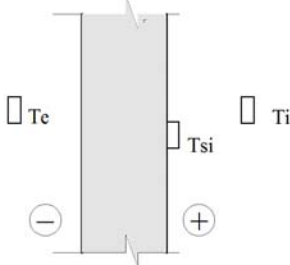


Рис. 1. Схема вимірювань : T_i, T_e, T_{si} - логери для реєстрації вимірювань температур внутрішнього середовища, зовнішнього середовища та поверхні стіни

Температура середовища всередині приміщення (T_i) вимірювалась реєстратором температури (точність $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($-20^{\circ}\text{C}/+40^{\circ}\text{C}$)), що розміщувався на віддалі приблизно 30 см від поверхні стіни (рис.2). Оскільки, як відомо, температура повітря в приміщенні змінюється за висотою, то термологер розміщувався на висоті 1.5м однаковій із висотою розміщення термопар на поверхні. Для зменшення сторонніх впливів на результати вимірювань вікна зашторені, обігрівальні прилади закриті екраном.



Рис. 2. Логер для реєстрації температури внутрішнього середовища та розміщення термопар для вимірювання температури поверхні стіни

Температура зовнішнього середовища (T_e) фіксується логером (точність $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), який розміщується в зручному місці ззовні, оскільки ззовні, як правило, відсутня зміна температури від висоти при незначних змінах висоти. Термологери фіксували температуру повітряного середовища з заданим інтервалом.

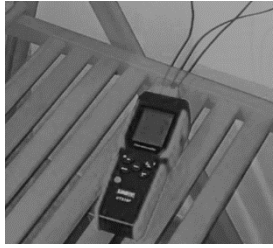


Рис. 3. Логер для реєстрації температури поверхні стіни

Враховуючи залежність між коефіцієнтом теплопередачі та тепловим потоком при стаціонарному процесі, а також закон охолодження Ньютона можна записати формулу, яка лежить в основі вимірювань коефіцієнта теплопередачі термометричним методом:

$$U = h_{si} \frac{(T_i - T_{si})}{(T_i - T_o)}$$

де T_i - температура повітря в приміщенні, T_o - температура повітря на вулиці, T_{si} - температура поверхні стіни у приміщенні, h_{si} - коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні стіни.

Використовуючи процедуру прогресивного усереднення отримаємо формулу для визначення коефіцієнта теплопередачі:

$$U = h_{si} \frac{\sum_{j=1}^n (T_{i,j} - T_{si,j})}{\sum_{j=1}^n (T_{i,j} - T_{o,j})}$$

де n - кількість вимірювань у часі.

Проводились два цикли вимірювань на зовнішній стіні восьмого поверху дев'ятиповерхового житлового будинку. Стіна складається з таких шарів: облицювання силікатною цеглою, мур із керамічної цегли товщиною 380 мм та вапняно-піщана штукатурка. Розрахунковий опір теплопередачі стіни рівний 0,963 м²К/Вт (коефіцієнт теплопередачі 1,04 Вт/м²К).

Перший цикл здійснювався 03.03.2025 року з 11:00 до 18:00. Температура зовнішнього середовища змінювалась в інтервалі від 4,8°C до 7,0°C (зміна на 2,2°C), температура внутрішнього середовища - від 23,0°C до 23,3°C (зміна на 0,3°C). Мінімальна різниця між внутрішньою та зовнішньою температурою складала 16,1°C. День був похмурий.

Другий цикл здійснювався протягом 84 години (17.03.2025, 19:15 - 21.03.2025, 7:00). 18.03 - 20.03 мала місце сонячна погода, що впливало на результати вимірювань. Для виключення цього впливу з аналізу виключались періоди 07:00 - 19:00. Інтервал зміни температури зовнішнього середовища визначити не має змоги із-за значного впливу сонця на зовнішній термолігер.

Максимальний інтервал зміни зовнішньої температури в періоді 19:00-07:00 складає $6,5^{\circ}\text{C}$ і має місце у останній період циклу. Температура внутрішнього середовища змінювалась від $21,6^{\circ}\text{C}$ до $24,2^{\circ}\text{C}$ (зміна на $2,6^{\circ}\text{C}$).

Результати досліджень. У першому циклі вимірювань температури реєструвались з інтервалом 1 хв. та осереднювались на інтервалі 10 хв. Тривалість вимірювань 7 годин. На рис.4 показано графіки зміни температур у часі

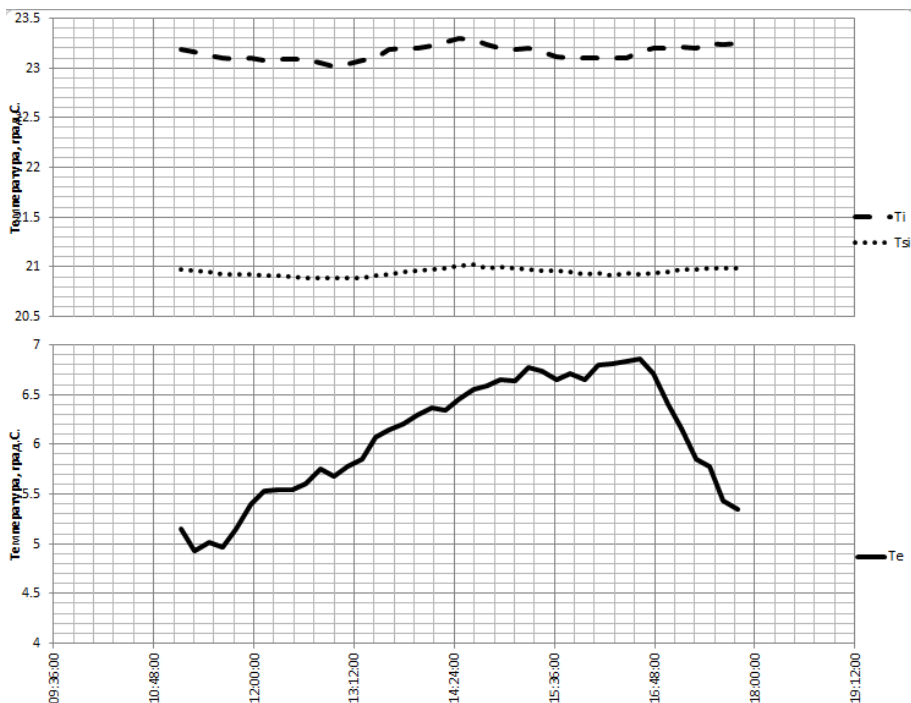


Рис.4 Графік зміни температур в часі. T_e - температура ззовні, T_i - температура всередині, T_{si} - температура внутрішньої поверхні стіни.

За результатами підрахунків на інтервалі 7 годин отримали коефіцієнт теплопередачі рівним 1,12 (опір теплопередачі 0,893). На рис.5 показано зміну отриманого коефіцієнта теплопередачі залежно від інтервалу результатів вимірювань прийнятих для обчислень.

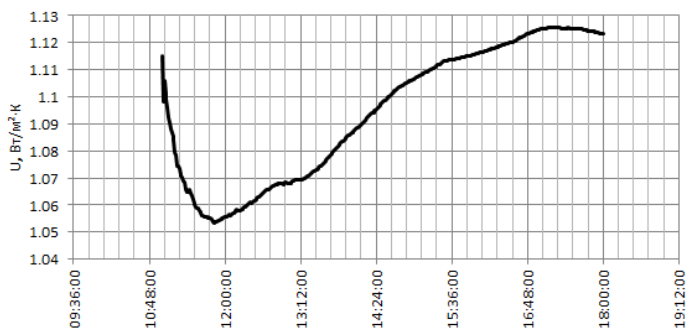


Рис.5 Графік зміни коефіцієнта теплопередачі залежно від інтервалу вимірювань прийнятого для обчислень

У другому циклі вимірювань температури реєструвались з інтервалом 30 сек. та осереднювались на інтервалі 5 хв. На рис. 6 показано якісну картину зміни температур

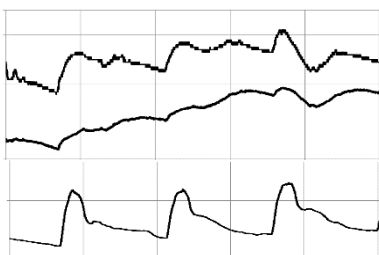


Рис.6 Графік зміни температур в часі (зверху вниз: всередині, на поверхні, ззовні)

На рис. 7- рис.9 показано зміну температур у інтервалах часу 19:00 - 7:00.

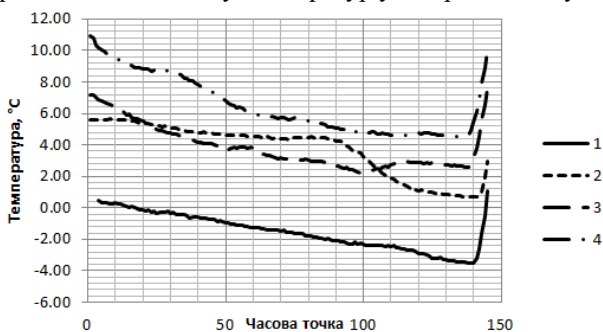


Рис.7 Графік зміни температури зовнішнього повітря

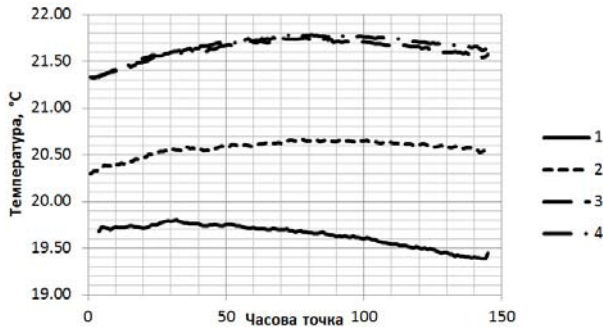


Рис.8 Графік зміни температури внутрішньої поверхні стіни

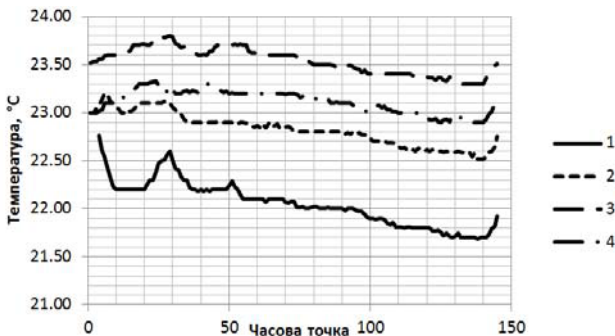


Рис.9 Графік зміни температури внутрішнього повітря

За результатами підрахунків для другого циклу вимірювань з виключенням з розгляду інтервалів із 7:00 до 19:00 отримано коефіцієнт теплопередачі рівний $0,88 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Висновки. 1. При дотриманні певних вимог до умов проведення вимірювань, а саме різниці температур зовнішнього та внутрішнього повітря не менше 15°C , зміна температури в період експерименту всередині не більше 2°C , ззовні - не більше 5°C , відсутність впливу на температуру сонячного опромінення, можна вважати умови проведення експерименту квазістаціонарними і отримати термометричним методом достовірні значення коефіцієнту теплопередачі за незначний період (в даному випадку 6-7 годин). Про це свідчать результати вимірювань першого циклу із мінімальною різницею між виміряним та теоретичним значенням коефіцієнта теплопередачі (різниця $+8\%$).

2. За результатами підрахунків за весь період другого циклу вимірювань отримали завищене значення коефіцієнта теплопередачі рівним $1,29 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, що мабуть пов'язано із впливом сонячного опромінення. Якщо виключити з розгляду інтервали із 7:00 до 19:00 то отримаємо коефіцієнт теплопередачі рівним $0,88 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Залишається відкритим питання величини інтервалів.

3. Якщо визначати коефіцієнт теплопередачі для окремих інтервалів другого циклу вимірювань із 0:00 до 7:00 годин отримаємо 0,98 Вт/м²К; 1,14 Вт/м²К; 0,91 Вт/м²К; 0,80 Вт/м²К. Середнє значення рівне 0,96, що також добре узгоджується із теоретичним значенням коефіцієнта теплопередачі (різниця -8%).

1. Додаток 2 до Довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року. Огляд національного фонду будівель.

Dodatok 2 do Dovhostrokovoi stratehii termomodernizatsii budivel na period do 2050 roku. Ohliad natsionalnoho fondu budivel.

https://mtu.gov.ua/files/2.2._%D0%94%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%B%D0%BA_2.pdf

2. ISO 9869-1:2014. Thermal insulation - Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method. Edition 1

3. Bienvenido-Huertas, D., Rodríguez-Álvaro, R., Moyano, J., Rico, F., & Marín, D. (2018). Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations. *Energies*, 11(2), 360. <https://doi.org/10.3390/en11020360>

4. Kim, S.-H., Kim, J.-H., Jeong, H.-G., & Song, K.-D. (2018). Reliability Field Test of the Air–Surface Temperature Ratio Method for In Situ Measurement of U-Values. *Energies*, 11(4), 803. <https://doi.org/10.3390/en11040803>

5. Teni, M., Krstić, H., & Kosiński, P. (2019). Review and Comparison of Current Experimental Approaches for In-situ Measurements of Building Walls Thermal Transmittance. *Energy and Buildings*, 109417. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109417>

6. Albatici, R., & Tonelli, A. M. (2010). Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, 42(11), 2177–2183. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.010>

7. J. M. Andújar M'arquez, M. 'A. Martínez Boh'orquez, S. G'omez Melgar. (2017). A new metre for cheap, quick, reliable and simple thermal transmittance (U-Value) measurements in buildings, *Sensors (Basel)*, vol. 17, no. 9, <https://doi.org/10.3390/s17092017>.

8. Testo. Be sure. <https://www.testo.kiev.ua/ua/>

9. Somin Park, Jisoo Shim, Doosam Song. (2023). A comparative assessment of in-situ measurement methods for thermal resistance of building walls under mild climate conditions. *Journal of Building Engineering*. Vol.77, 15 October 2023, Page 107417, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107417>

10. B. Mobaraki, F.J. Castilla Pascual, , A. M. García , M. A. Mellado Mascaraque, B. F. V'azquez, C. Alonso. (2023). Studying the impacts of test condition and nonoptimal positioning of the sensors on the accuracy of the in-situ U-value measurement, *Heliyon* 9 (2023) e17282, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17282>