

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-369-29>

УДК 697.1:697.9:004.94

ДЖЕДЖУЛА В'ЯЧЕСЛАВ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2740-0771>

e-mail: djedjula@vntu.edu.ua

ПАЦУКЕВИЧ ВЛАДИСЛАВ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0005-6109-0382>

e-mail: vladislav.patsukevich@gmail.com

МОНІТОРИНГ МІКРОКЛІМАТУ ТА УТОЧНЕННЯ ТЕПЛОВОЇ МОДЕЛІ ГРОМАДСЬКОЇ БУДІВЛІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАНЬ

Статтю присвячено методиці уточнення теплової моделі громадської будівлі за результатами моніторингу, яка поєднує натурні вимірювання параметрів мікроклімату й енергоспоживання, кількісне оцінювання невизначеності вхідних даних і калібрування розрахункової моделі. Запропоновано програму вимірювань і спрощену погодинну RC-модель теплового режиму будівлі (схема 3RIC), для якої виконано розрахунок поширення невизначеності методом Монте-Карло та глобальний аналіз чутливості за індексами Соболя. Для типового чотириповерхового навчального корпусу встановлено, що невизначеність дев'яти вхідних параметрів зумовлює розкид річної потреби в теплоті на опалення від 92 до 137 кВт·год/м² (5–95 %), причому 64 % дисперсії припадає на кратність інфільтрації. Показано, що одночасне калібрування всіх впливових параметрів за даними теплотічильника призводить до взаємної компенсації їх похибок, і запропоновано двоетапну процедуру: пряма фіксація виміряних величин і подальше уточнення решти. На віртуальному експерименті процедура зменшила помісячну похибку NMBE з 14,5 % до 1,0 % і відновила коефіцієнт теплопередачі стін з похибкою менше 3 %.

Ключові слова: мікроклімат, тепловий режим будівлі, натурні вимірювання, невизначеність, калібрування моделі, аналіз чутливості, індекси Соболя, ASHRAE Guideline 14.

DZHEJZHULA VIACHESLAV, PATSUKEVYCH VLADYSLAV
Vinnytsia National Technical University

INDOOR CLIMATE MONITORING AND REFINEMENT OF THE THERMAL MODEL OF A PUBLIC BUILDING BASED ON MEASUREMENT DATA

The article presents a methodology for refining the thermal model of a public building based on indoor climate monitoring and energy consumption measurements. The relevance of the study stems from the uncertainty of the actual thermal properties of existing buildings and the operating conditions of their heating and ventilation systems, which may lead to substantial discrepancies between calculated and measured energy consumption. The aim is to develop and validate an integrated approach combining on-site measurements, uncertainty quantification, sensitivity analysis, and model calibration. A simplified hourly resistance–capacitance (RC) model using a 3RIC scheme is proposed for simulating the thermal regime of a typical four-storey educational building in Vinnytsia, Ukraine. The uncertainty of nine input parameters is assessed using the Monte Carlo method, while global sensitivity analysis is performed using Sobol indices. The results indicate that the annual space heating demand ranges from 92 to 137 kWh/m² within the 5–95% uncertainty interval. The infiltration air change rate is identified as the dominant parameter, accounting for 64% of the variance in heating demand. Wall thermal transmittance and the indoor temperature setpoint have substantially smaller effects, whereas solar gains and internal heat gains play an important role in determining overheating conditions.

The study demonstrates that simultaneous calibration of all influential parameters against heat meter data may produce physically unrealistic parameter estimates due to the compensation of errors. To overcome this limitation, a two-stage calibration procedure is proposed. First, directly measured parameters, including infiltration, ventilation airflow, and indoor temperature, are fixed in the model. The remaining influential parameters are then adjusted through calibration. In a virtual experiment, this approach reduced the monthly normalized mean bias error (NMBE) from 14.5% to 1.0% and reproduced the wall thermal transmittance with an error of 2.6%.

The proposed methodology improves the reliability of building energy simulations and provides a basis for substantiated decisions concerning thermal modernization and the optimization of heating and ventilation systems.

Keywords: indoor climate, building thermal regime, on-site measurements, uncertainty, model calibration, sensitivity analysis, Sobol indices, ASHRAE Guideline 14.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.09.2026

Прийнята до друку / Accepted 01.10.2026

Опубліковано / Published 15.10.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Джеджула В'ячеслав, Пацукевич Владислав

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Рішення щодо термомодернізації громадських будівель і модернізації їх систем опалення та вентиляції ухвалюють здебільшого на підставі розрахунків енергоспоживання. Проте розрахункова модель існуючої будівлі завжди спирається на неточні дані: фактичні теплотехнічні характеристики огорожень після десятиліть експлуатації відрізняються від проектних, повітропроникність вікон і стиків панелей невідома, а режими експлуатації систем мікроклімату суттєво відхиляються від нормативних. Унаслідок цього розрахункове енергоспоживання може відрізнятися від фактичного на 20–30 % і більше [9, 10], що знецінює техніко-економічне обґрунтування заходів.

Вимоги ДБН В.2.6-31:2021 [2] та методи розрахунку за ISO 52016-1 [4] орієнтовані на проектні умови і не містять процедури узгодження моделі з результатами вимірювань. Для закладів освіти, які працюють за змінним графіком, питання набуває особливої ваги: помилкова оцінка інфільтрації чи внутрішніх тепловиділень

приводить до неправильного вибору потужності обладнання й очікуваної економії. Отже, потрібна інженерна методика, що дає змогу за обмеженим набором вимірювань отримати відкалібровану модель будівлі й оцінити довіру до її результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методи узгодження моделей будівель з вимірними даними систематизовано в оглядах Coakley D., Raftery P., Keane M. [9] та Chong A., Gu Y., Jia H. [10]; автори розрізняють ручне калібрування, оптимізаційні та байєсівські підходи і наголошують на проблемі неоднозначності розв'язку. Критерії прийнятності калібрування (NMBE і CV(RMSE)) встановлено в ASHRAE Guideline 14 [8]. Вплив невизначеності вхідних даних на результати моделювання досліджували Hopfe C. J., Hensen J. L. M. [11], а огляд методів аналізу чутливості в енергетиці будівель наведено в праці Tian W. [12]. Варіаційні індекси Соболя та ефективні оцінювачі для них запропоновано Saltelli A. та співавторами [13]. Методи натурного визначення коефіцієнта теплопередачі огорожень і повітрообміну регламентовано ISO 9869-1 [6] та ISO 12569 [15], вимоги до приладів — ISO 7726 [7]. Питання розрахунку й організації повітрообміну громадських будівель висвітлено в роботі [1]. У попередній роботі [16] запропоновано стохастичну багатокритеріальну оптимізацію систем мікроклімату з урахуванням невизначеності вхідних параметрів; її достовірність залежить від того, наскільки вихідна модель будівлі відповідає реальному об'єкту.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття

Більшість відомих робіт розглядають вимірювання, аналіз невизначеності та калібрування окремо. Бракує узгодженої методики, у якій програма вимірювань формується з урахуванням чутливості моделі, а результати вимірювань використовуються так, щоб уникнути взаємної компенсації похибок параметрів. Для громадських будівель в умовах України таку методику розроблено недостатньо.

Формулювання цілей статті

Метою статті є розроблення методики уточнення теплової моделі громадської будівлі за результатами моніторингу мікроклімату та енергоспоживання, що включає програму натурних вимірювань, оцінювання невизначеності вхідних параметрів, аналіз чутливості та калібрування розрахункової моделі, а також перевірка цієї методики на прикладі типового навчального корпусу.

Виклад основного матеріалу

Загальну структуру методики подано на рис. 1. Вона складається з шести етапів: від натурних вимірювань до перевірки відкаліброваної моделі за нормованими критеріями. Результати аналізу чутливості використовуються у зворотному зв'язку: вони визначають, які величини потрібно виміряти безпосередньо, а які можна уточнювати калібруванням.

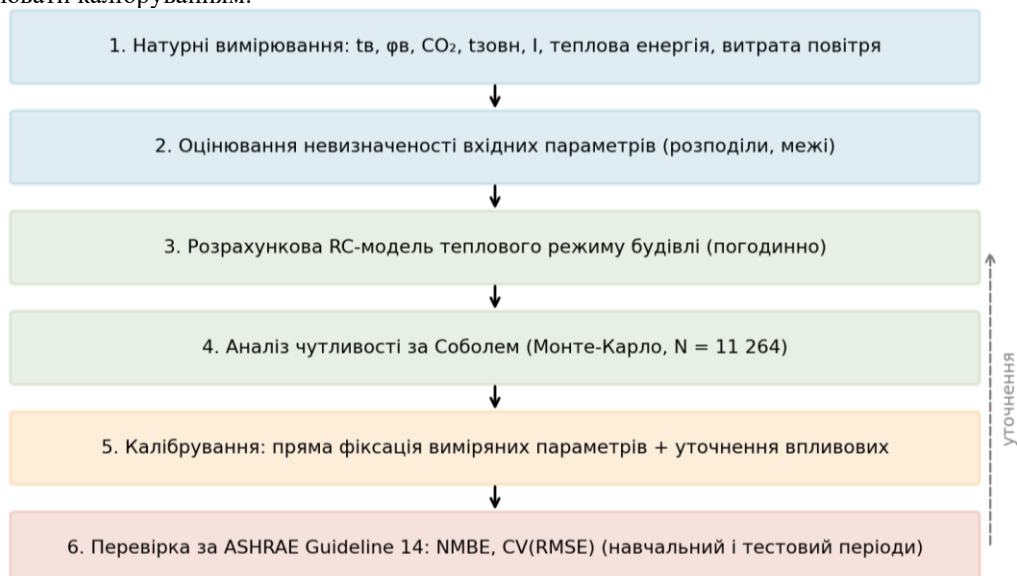


Рис. 1. Структурна схема методики експериментально-розрахункового дослідження

Об'єкт і програма натурних вимірювань

Розрахунковим об'єктом прийнято типовий чотириповерховий навчальний корпус забудови 1970–1980-х рр. у м. Вінниця: опалювана площа $A_f = 3000 \text{ м}^2$, опалюваний об'єм 9000 м^3 , площа зовнішніх стін 1436 м^2 , вікон 478 м^2 (25 % фасаду), покриття і підлоги по 750 м^2 . Навчальні заняття тривають у будні з 8:00 до 18:00; опалення працює з 6:00 до 18:00 із нічним і вихідним зниженням температури до 16°C , опалювальний період триває з 15 жовтня до 15 квітня. Кліматичні дії задано погодинним рядом, синтезованим за середньомісячними значеннями температури зовнішнього повітря та сонячної радіації для м. Вінниця [3] з накладанням випадкових міждобових відхилень; річна сума сонячної радіації на горизонтальну поверхню становить близько $1090 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$.

Програму вимірювань (табл. 1) сформовано так, щоб прямо визначити величини, які найбільше впливають на результат (див. аналіз чутливості нижче), і отримати дані для калібрування: погодинне споживання теплоти та температуру повітря в приміщеннях.

Таблиця 1

Програма натурних вимірювань

Параметр	Метод, прилад	Похибка	Інтервал запису
Температура і відносна вологість повітря в приміщеннях	Автономні логери, 12 точок на різних поверхах і фасадах	$\pm 0,3$ °C; ± 3 %	10 хв
Концентрація CO ₂	NDIR-сенсори в 6 аудиторіях	$\pm(50 \text{ ppm} + 3 \text{ \%})$	5 хв
Температура зовнішнього повітря, сонячна радіація	Метеостанція з піранометром на покрівлі	$\pm 0,3$ °C; ± 5 %	10 хв
Теплова енергія на опалення	Теплолічильник ІТП	клас 2	1 год
Витрата припливного повітря	Балометр, термоанемометр	$\pm 3\text{--}5$ %	разово за сезон
Кратність інфільтрації	Спад концентрації індикаторного газу (CO ₂) у неробочий час [15]	$\pm 10\text{--}15$ %	серія дослідів
Коефіцієнт теплопередачі стін	Метод тепломіра [6], тепловізійне обстеження	$\pm 10\text{--}15$ %	10 хв, 7–14 діб

Оцінювання невизначеності вхідних параметрів

До розрахунку введено дев'ять параметрів, значення яких для існуючої будівлі відомі неточно. Теплотехнічні характеристики огорожень описано нормальним розподілом, центр якого відповідає оцінці за конструкцією, а стандартне відхилення — розкиду натурних даних для подібних будівель. Для параметрів, про які відомі лише межі (інфільтрація, повітрообмін, тепловиділення, уставка температури, теплоємність, коефіцієнт пропускання сонячної радіації), прийнято рівномірний розподіл (табл. 2).

Таблиця 2

Вхідні параметри моделі та їх розподіли

Параметр	Позначення	Розподіл	Значення
Коефіцієнт теплопередачі стін, Вт/(м ² ·К)	$U_{\text{ст}}$	нормальний	$0,90 \pm 0,12$
Коефіцієнт теплопередачі вікон, Вт/(м ² ·К)	$U_{\text{вк}}$	нормальний	$2,50 \pm 0,25$
Коефіцієнт теплопередачі покриття, Вт/(м ² ·К)	$U_{\text{пк}}$	нормальний	$0,60 \pm 0,09$
Кратність інфільтрації, год ⁻¹	n_{inf}	рівномірний	$0,25 \dots 0,75$
Питома витрата вентиляційного повітря, м ³ /(год·м ²)	$L_{\text{вент}}$	рівномірний	$1,5 \dots 3,0$
Внутрішні тепловиділення в робочі години, Вт/м ²	q_{int}	рівномірний	$6 \dots 14$
Уставка температури повітря, °C	$t_{\text{в,зад}}$	рівномірний	$19 \dots 22$
Питома теплоємність будівлі, кДж/(м ² ·К)	c_m	рівномірний	$110 \dots 260$
Коефіцієнт пропускання сонячної енергії вікон	g	рівномірний	$0,40 \dots 0,65$

Розрахункова модель теплового режиму будівлі

Для багаторазових розрахунків, яких потребують аналіз невизначеності та калібрування, використано спрощену погодинну RC-модель (рис. 2). Вона є спрощенням схеми 5R1C погодинного методу ISO 13790 [5] (у чинній системі стандартів цей метод замінено методами ISO 52016-1 [4]): вузол внутрішніх поверхонь об'єднано з повітряним, у результаті чого отримано схему 3R1C. Будівлю подано двома вузлами: температурою повітря T_i і температурою теплоємних конструкцій T_m . Баланс теплоти для масивного вузла:

$$C_m \cdot \frac{dT_m}{dt} = H_{ms}(T_i - T_m) + H_{em}(T_e - T_m) + \Phi_m, \quad (1)$$

для повітряного вузла (квазістаціонарно):

$$0 = (H_{ve} + H_w)(T_e - T_i) + H_{ms}(T_m - T_i) + \Phi_{ia} + \Phi_h, \quad (2)$$

де C_m — теплоємність будівлі, Дж/К; $H_{ms} = 9,1 \cdot A_m$ — коефіцієнт теплообміну між повітрям і масою, Вт/К ($A_m = 2,5 \cdot A_f$); H_{em} — коефіцієнт теплопередачі від масивного вузла до зовнішнього повітря, Вт/К, визначений за формулою (3); H_{op} — коефіцієнт теплопередачі непрозорих огорожень (стіни, покриття, підлога по ґрунту з $U = 0,4$ Вт/(м²·К) і поправковим коефіцієнтом 0,6), Вт/К; $H_w = U_{\text{вк}} \cdot A_{\text{вк}}$ — коефіцієнт теплопередачі вікон, Вт/К; T_e — температура зовнішнього повітря, °C; Φ_m, Φ_{ia} — частки (0,6 і 0,4) внутрішніх і сонячних теплонадходжень, віднесені до масивного і повітряного вузлів (розподіл прийнято), Вт; Φ_h — теплова потужність системи опалення, Вт.

$$H_{em} = \frac{1}{\frac{1}{H_{op}} - \frac{1}{H_{ms}}}, \quad (3)$$

Коефіцієнт теплопередачі вентиляцією та інфільтрацією:

$$H_{ve} = 0,34 \cdot (n_{inf} \cdot V + L_{вент} \cdot A_f \cdot \delta_{occ}), \quad (4)$$

де 0,34 — об'ємна теплоємність повітря, Вт·год/(м³·К); V — опалюваний об'єм, м³; δ_{occ} — ознака робочих годин (1 — вентиляція ввімкнена, 0 — ні).

Сонячні теплонадходження визначено як $\Phi_{sol} = 0,7 \cdot g \cdot A_{BK} \cdot I_B$, де 0,7 — коефіцієнт затінення рамою та відкосами, I_B — середня інтенсивність сонячної радіації на вертикальні фасади, прийнята 0,55 від радіації на горизонтальну поверхню. Внутрішні тепловиділення поза робочими годинами прийнято 1 Вт/м².

Рівняння (1) розв'язано неявною схемою Ейлера з кроком 1 год. Потужність Φ_h на кожному кроці визначається з умови $T_i = t_{в,зад}$ у години роботи опалення (з обмеженням 120 Вт/м²). Модель реалізовано векторизовано на Python, що дає змогу розраховувати річний режим для понад 10 тис. наборів параметрів за кілька секунд.

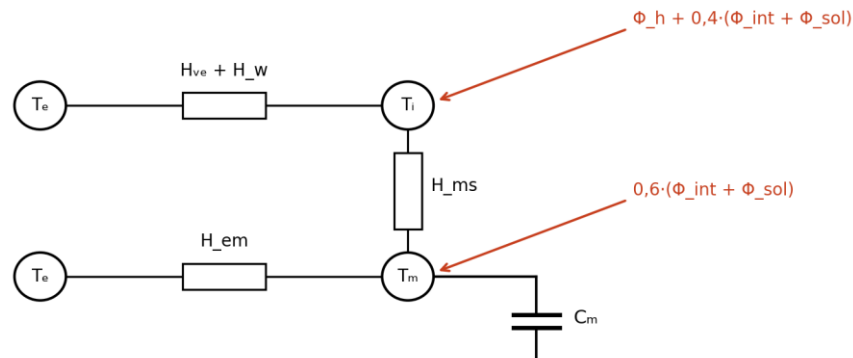


Рис. 2. Теплова RC-схема будівлі (3R1C)

Поширення невизначеності та аналіз чутливості

Поширення невизначеності оцінено методом Монте-Карло: 1000 наборів параметрів сформовано латинським гіперкубом за розподілами табл. 2. Для номінальних параметрів річна потреба в теплоті на опалення становить 113,8 кВт·год/м². З урахуванням невизначеності середнє значення дорівнює 114,5 кВт·год/м², коефіцієнт варіації — 12,2 %, а інтервал 5–95 % — від 91,9 до 136,8 кВт·год/м² (рис. 3). Відносний розкид найбільший у перехідні місяці: у квітні та жовтні межі 5–95 % відхиляються від медіани на 21–26 % проти ± 18 % у січні, оскільки тоді теплові втрати майже врівноважуються теплонадходженнями.

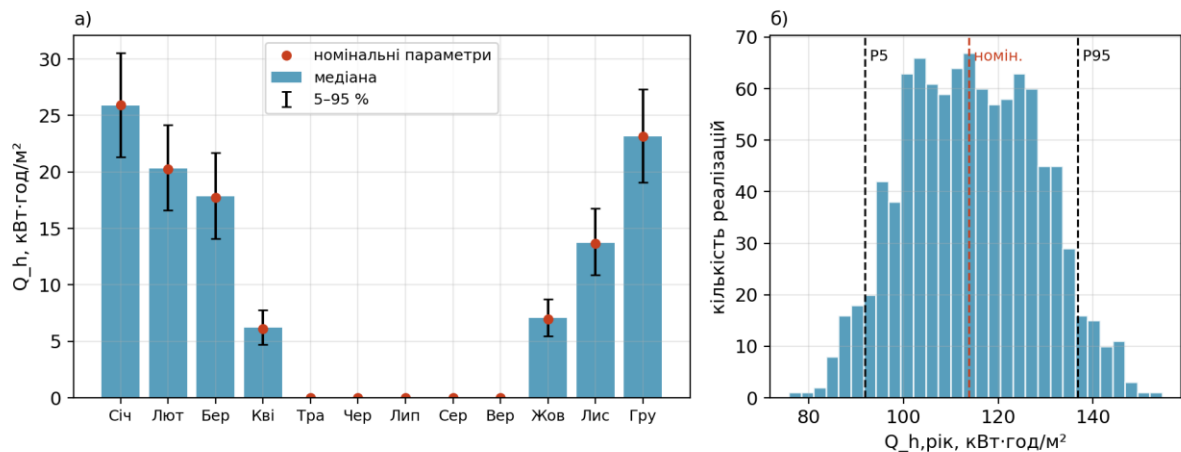


Рис. 3. Помісячна (а) і річна (б) потреба в теплоті на опалення з урахуванням невизначеності вхідних параметрів

Для ранжування параметрів обчислено індекси Соболя першого порядку S_i і повні індекси S_{Ti} :

$$S_i = \frac{V[E(Y|X_i)]}{V(Y)}, \quad S_{Ti} = \frac{E[V(Y|X_{-i})]}{V(Y)}, \quad (5)$$

де Y — вихідна величина моделі; X_i — i-й вхідний параметр; X_{-i} — усі параметри, крім i-го; V, E — дисперсія та математичне сподівання.

Індекси оцінено за схемою Saltelli [13] (11 264 розрахунки) з використанням бібліотеки SALib [14]. Розглянуто дві вихідні величини: річну потребу в теплоті на опалення та кількість робочих годин із температурою повітря понад 26 °C протягом року, без виключення канікул (рис. 4).

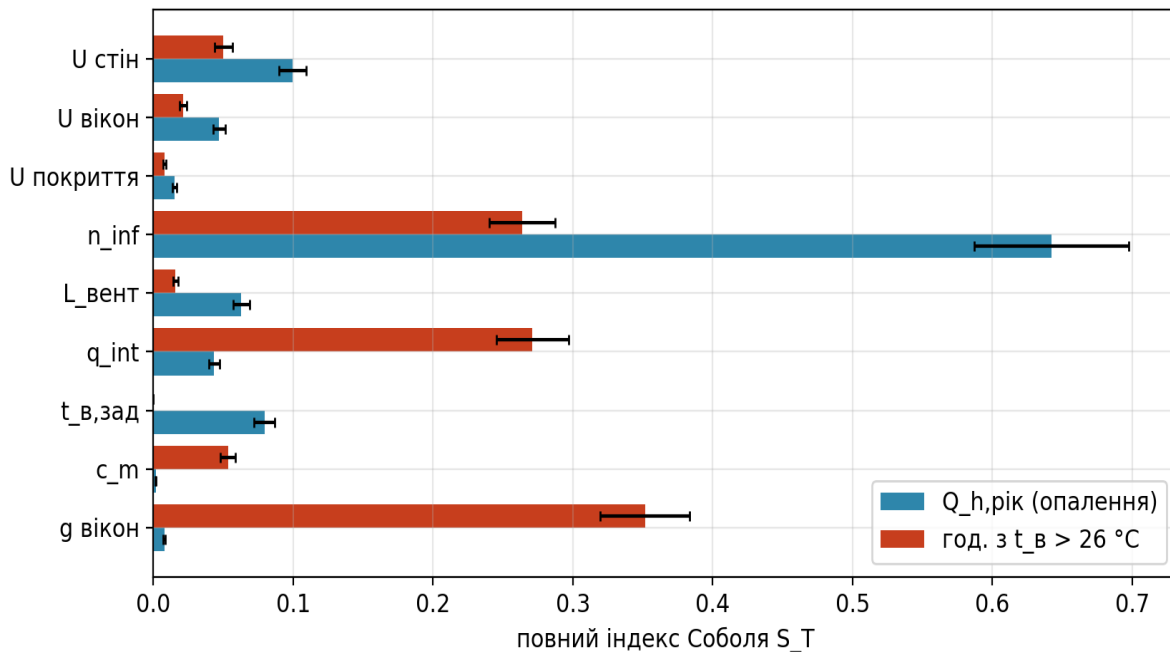


Рис. 4. Повні індекси Соболя для потреби в теплоті на опалення і тривалості перегріву приміщень

Для потреби в теплоті визначальним є кратність інфільтрації ($S_T = 0,64$). Далі йдуть коефіцієнт теплопередачі стін (0,10), уставка температури (0,08), вентиляційний повітрообмін (0,06), коефіцієнт теплопередачі вікон (0,05) і внутрішні тепловиділення (0,04). Вплив теплоємності будівлі та коефіцієнта g на річну потребу в теплоті не перевищує 1 %. Сума індексів першого порядку близька до одиниці (1,00), тобто взаємодія параметрів незначна. Перегрів приміщень, навпаки, визначають сонячні теплонаходження (g , $S_T = 0,35$), внутрішні тепловиділення (0,27) та інфільтрація (0,26), а теплоємність будівлі тут уже помітна (0,05). Практичний висновок: кратність інфільтрації потрібно вимірювати безпосередньо, а не приймати за довідковими даними.

Калібрування моделі

Якість узгодження моделі з вимірюваннями оцінено за критеріями ASHRAE Guideline 14 [8]:

$$NMBE = \frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)}{(n-p) \cdot \bar{y}} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

$$CV(RMSE) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}{n-p}} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

де y_j , $\hat{y}_j$ — виміряне і розраховане значення; $\bar{y}$ — середнє виміряне значення; n — кількість значень; p — кількість параметрів (прийнято $p = 0$). Модель вважається відкаліброваною, якщо помісячно $|NMBE| \leq 5 \%$ і $CV(RMSE) \leq 15 \%$, а погодинно $|NMBE| \leq 10 \%$ і $CV(RMSE) \leq 30 \%$.

Щоб перевірити саму процедуру калібрування, виконано віртуальний експеримент. Модель з відомими «істинними» параметрами, що відрізнялися від номінальних ($U_{ст} = 1,02$ Вт/(м²·К), $n_{inf} = 0,63$ год⁻¹, $t_{в,зад} = 21,2$ °С, $L_{вент} = 2,0$ м³/(год·м²) тощо), згенерувала еталонні «виміряні» дані. На них накладено похибки приладів: 8 % для погодинних показів теплотічильника і $\pm 0,3$ °С для датчиків температури. На відміну від реальних даних, такий підхід дає змогу перевірити, чи відновлює калібрування істинні значення параметрів, а не лише зменшує розбіжність. Навчальним періодом були січень–лютий, тестовим — березень, листопад і грудень.

На першому кроці випробувано одночасне калібрування чотирьох найвпливовіших параметрів (n_{inf} , $U_{ст}$, $t_{в,зад}$, q_{int}) методом найменших квадратів за погодинним споживанням теплоти. Статистичні критерії виконано з запасом (погодинно $NMBE = 0,3 \%$, $CV(RMSE) = 9,9 \%$), проте значення параметрів виявилися хибними: кратність інфільтрації залишилася на рівні 0,50 год⁻¹ замість 0,63 год⁻¹, а коефіцієнт теплопередачі стін досяг верхньої межі 1,30 Вт/(м²·К) замість 1,02. Похибка одного параметра компенсувалася похибкою іншого: за даними лише теплотічильника втрати теплоти через огороження та з повітрям не розрізняються. Така модель збігається з вимірюваннями, але дасть неправильний прогноз ефекту утеплення стін чи ущільнення вікон.

Тому запропоновано двоетапну процедуру. На першому етапі безпосередньо виміряні величини фіксують у моделі: кратність інфільтрації за спадом концентрації CO₂ (0,64 год⁻¹), уставку температури як медіану виміряної температури повітря в робочі години (21,2 °С), витрату вентиляційного повітря за балометром (1,97 м³/(год·м²)). На другому етапі калібруванням уточнюють лише коефіцієнт теплопередачі стін і внутрішні тепловиділення; решту параметрів залишають номінальними. Результати наведено в табл. 3 і на рис. 5.

Показники узгодженості моделі з «вимірними» даними

Показник (норматив)	До калібрування: навч. період	До калібрування: тест. період	Після калібрування: навч. період	Після калібрування: тест. період
NMBE помісячно, % ($\leq \pm 5$)	14,5	15,9	1,0	0,6
CV(RMSE) помісячно, % (≤ 15)	14,6	16,0	1,0	0,8
NMBE погодинно, % ($\leq \pm 10$)	14,5	15,9	1,0	0,6
CV(RMSE) погодинно, % (≤ 30)	23,1	26,6	12,0	13,5
RMSE температури повітря, °C	0,78	0,78	0,30	0,31

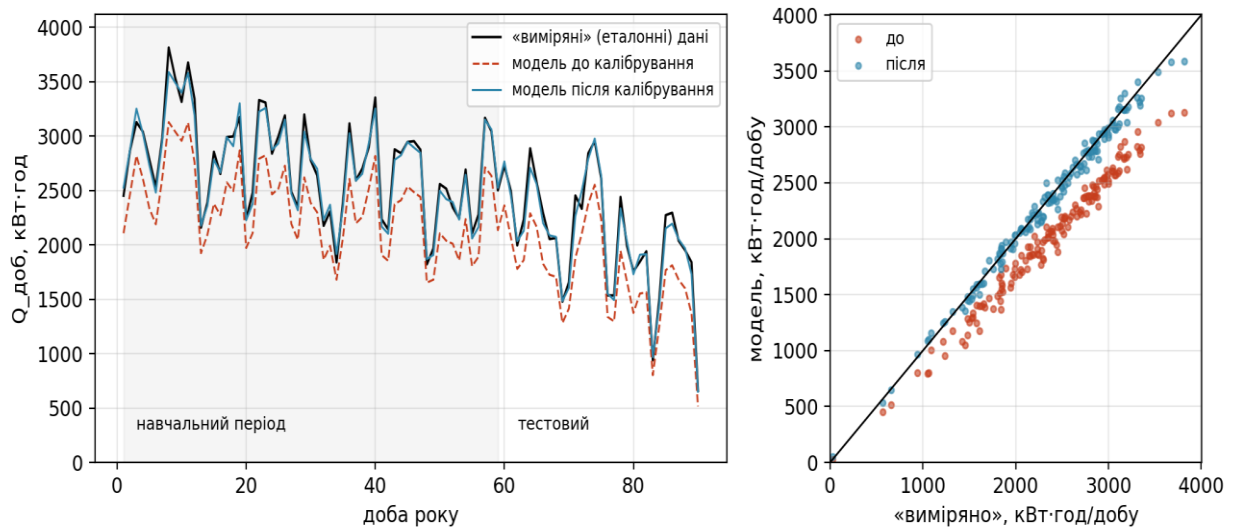


Рис. 5. Добове споживання теплоти на опалення за «вимірними» даними і за моделлю до та після калібрування

Модель із номінальними параметрами занижувала споживання теплоти на 14,5–15,9 % і не відповідала критерію $|NMBE| \leq 5$ %. Після двоетапного калібрування всі критерії ASHRAE Guideline 14 виконано як для навчального, так і для тестового періоду, а похибка температури повітря зменшилася до рівня похибки датчиків. Коефіцієнт теплопередачі стін відновлено зі значенням 0,993 Вт/(м²·К) (істинне — 1,02), тобто з похибкою 2,6 %. Річна потреба в теплоті за відкаліброваною моделлю становить 134,0 кВт·год/м² проти 134,8 кВт·год/м² для «істинної» будівлі та 113,8 кВт·год/м² для номінальної моделі. Внутрішні тепловиділення досягли нижньої межі діапазону (6 Вт/м² проти істинних 8,5 Вт/м²): за зимовими даними цей параметр визначається погано, тому його доцільно оцінювати за окремим обліком електроспоживання будівлі.

Висновки

У статті розроблено методику уточнення теплової моделі громадської будівлі за результатами моніторингу мікроклімату та перевірено її на прикладі типового навчального корпусу. Основні результати:

1. Запропоновано програму натурних вимірювань, яка разом із даними для калібрування (погодинне споживання теплоти, температура повітря) передбачає пряме визначення найвпливовіших параметрів: кратності інфільтрації, вентиляційного повітрообміну і коефіцієнта теплопередачі стін.
2. Невизначеність дев'яти вхідних параметрів зумовлює розкид річної потреби в теплоті на опалення від 92 до 137 кВт·год/м² (коефіцієнт варіації 12 %); у перехідні місяці відносний розкид сягає 21–26 %.
3. За індексами Соболя 64 % дисперсії потреби в теплоті припадає на кратність інфільтрації, 10 % — на коефіцієнт теплопередачі стін, 8 % — на уставку температури. Перегрів приміщень визначають сонячні теплонадходження, внутрішні тепловиділення й інфільтрація.
4. Одночасне калібрування всіх впливових параметрів за даними теплотічильника дає формально прийнятну, але фізично хибну модель через взаємну компенсацію похибок. Двоетапна процедура (фіксація вимірних величин, потім уточнення решти) зменшила помісячну похибку NMBE з 14,5 % до 1,0 % і відновила коефіцієнт теплопередачі стін з похибкою 2,6 %.

Подальші дослідження передбачають застосування методики до результатів натурних вимірювань у реальній будівлі та використання відкаліброваної моделі як основи для стохастичної оптимізації параметрів систем опалення і вентиляції.

Література

1. Джеджула В. В. Вентиляція та кондиціонування громадських об'єктів : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2021. 71 с.
2. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ : Мінрегіон України, 2022.
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011.
4. ISO 52016-1:2017. Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 1: Calculation procedures. Geneva : ISO, 2017.
5. ISO 13790:2008. Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling. Geneva : ISO, 2008.
6. ISO 9869-1:2014. Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method. Geneva : ISO, 2014.
7. ISO 7726:1998. Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. Geneva : ISO, 1998.
8. ASHRAE Guideline 14-2014. Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. Atlanta : ASHRAE, 2014.
9. Coakley D., Raftery P., Keane M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 37. P. 123–141. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.007.
10. Chong A., Gu Y., Jia H. Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 253. P. 111533. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111533.
11. Hopfe C. J., Hensen J. L. M. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43, No. 10. P. 2798–2805. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.06.034.
12. Tian W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 20. P. 411–419. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.014.
13. Saltelli A., Annoni P., Azzini I., Campolongo F., Ratto M., Tarantola S. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*. 2010. Vol. 181, No. 2. P. 259–270. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.09.018.
14. Herman J., Usher W. SALib: An open-source Python library for Sensitivity Analysis. *Journal of Open Source Software*. 2017. Vol. 2, No. 9. P. 97. DOI: 10.21105/joss.00097.
15. ISO 12569:2017. Thermal performance of buildings and materials — Determination of specific airflow rate in buildings — Tracer gas dilution method. Geneva : ISO, 2017.
16. Пацукевич В. Г. Стохастична багатокритеріальна оптимізація систем мікроклімату будівель з урахуванням невизначеності вхідних параметрів. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2026. Т. 40, № 1. С. 116–120. DOI: 10.31649/2311-1429-2026-1-116-120.

References

1. Dzhedzhula V. V. Ventyliatsiia ta kondytsiuvannia hromadskykh ob'ektiv : navchalnyi posibnyk. Vinnytsia : VNTU, 2021. 71 p.
2. DBN V.2.6-31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2022.
3. DSTU-N B V.1.1-27:2010. Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivelna klimatolohiia. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2011.
4. ISO 52016-1:2017. Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 1: Calculation procedures. Geneva : ISO, 2017.
5. ISO 13790:2008. Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling. Geneva : ISO, 2008.
6. ISO 9869-1:2014. Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method. Geneva : ISO, 2014.
7. ISO 7726:1998. Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. Geneva : ISO, 1998.
8. ASHRAE Guideline 14-2014. Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. Atlanta : ASHRAE, 2014.
9. Coakley D., Raftery P., Keane M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 37. P. 123–141. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.007.
10. Chong A., Gu Y., Jia H. Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 253. P. 111533. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111533.
11. Hopfe C. J., Hensen J. L. M. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43, No. 10. P. 2798–2805. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.06.034.
12. Tian W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 20. P. 411–419. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.014.
13. Saltelli A., Annoni P., Azzini I., Campolongo F., Ratto M., Tarantola S. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*. 2010. Vol. 181, No. 2. P. 259–270. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.09.018.
14. Herman J., Usher W. SALib: An open-source Python library for Sensitivity Analysis. *Journal of Open Source Software*. 2017. Vol. 2, No. 9. P. 97. DOI: 10.21105/joss.00097.
15. ISO 12569:2017. Thermal performance of buildings and materials — Determination of specific airflow rate in buildings — Tracer gas dilution method. Geneva : ISO, 2017.
16. Patsukevych V. H. Stokhastychna bahatokryterialna optymizatsiia system mikroklimatu budivel z urakhuvanniam nevyznachenosti vkhidnykh parametriv. Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi. 2026. Vol. 40, No. 1. P. 116–120. DOI: 10.31649/2311-1429-2026-1-116-120.