

УДК 614.21:[699.86:697.14]-048.34

А. В. РАДКЕВИЧ^{1*}, М. М. ЛЯХОВЕЦЬКА-ТОКАРЄВА^{2*}, С. В. ГАВРИЛЮК^{3*}

^{1*}Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517

^{2*}Каф. «Опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання», Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (097) 923 47 73, ел. пошта lyakhovetsky-tokareva@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-0338-4930

^{3*}ТОВ «Енергоефективні рішення» Компанія «Climatech», вул. Набережна Заводська, 44, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (096) 718 89 17, ел. пошта s.v.gavr28@gmail.com, ORCID 0009-0001-6827-7722

Оптимізація енергоефективності будівлі багатопрофільного медичного центру

Мета. Підвищення теплової ефективності будівлі багатопрофільного медичного центру шляхом оптимізації архітектурно-планувальних рішень, врахування кліматичних умов та вдосконалення параметрів інженерних систем. Будівля розглядається як єдина енергосистема, ефективність якої визначається взаємодією зовнішніх і внутрішніх чинників. **Методика.** Базується на математичному моделюванні тепломасообміну, аналізі кліматичних даних та розрахунках енерговитрат відповідно до чинних нормативів. У роботі враховано вплив інсоляції, вітрового навантаження, температури зовнішнього повітря, інфільтрації та теплозахисту огорожувальних конструкцій. Запропоновано показник ефективності проєктного рішення, що оцінює його відхилення від енергетично оптимального варіанту. **Результати.** Отримано на прикладі багатопрофільного медичного центру в місті Дніпро. Проведено аналіз інсоляції за орієнтацією фасадів, розраховано теплові надходження через прозорі й непрозорі елементи, визначено теплові навантаження на опалення й охолодження. Враховано сезонну змінність клімату, теплоємність матеріалів і режим експлуатації. Дослідження підтвердило, що орієнтація будівлі, площа скління, ефективність вентиляційної системи та якість інженерного обладнання істотно впливають на енергоспоживання. Запропоновано методику вибору габаритів будівлі з урахуванням місцевих кліматичних даних і потенціалу сонячної енергії. **Наукова новизна.** Полягає в обґрунтуванні системного підходу до енергоефективного проєктування, що поєднує кліматичні чинники, архітектурні обмеження та теплотехнічні характеристики в єдину модель. Запропоновано коефіцієнт, що оцінює проєктне рішення за рівнем його енергоефективності. **Практична значимість.** Полягає у формуванні рекомендацій щодо зменшення енергоспоживання. Запропоновані рішення дозволяють знизити теплове навантаження на інженерні системи на 20...25 %, скоротити експлуатаційні витрати та підвищити комфорт. У досліджуваному об'єкті впроваджено систему вентиляції з рекуперацією тепла (до 85 %) і тепловий насос із коефіцієнтом ефективності (COP) 3,5, що забезпечило значне зниження енергоспоживання. Результати підтверджують ефективність поєднання архітектурного проєктування з сучасним інженерним обладнанням та кліматичною адаптацією. Методика може бути використана для широкого спектра громадських і житлових будівель. **Висновки.** Комплексне енергоефективне проєктування потребує інтеграції архітектури, енергетики та кліматології. Запропонований підхід дозволяє формувати проєкти, які не лише відповідають нормативам, а й забезпечують мінімальне енергоспоживання в реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: енергоефективність; тепловий баланс; кліматичні умови; теплопередача; інсоляція; вентиляція

Вступ

Мета спорудження енергоефективних будівель полягає в раціональному використанні енергоресурсів, що витрачаються на їхнє функціонування. Це досягається завдяки впровадженню сучасних інноваційних рішень, які є технічно здійсненними, економічно виправданими, екологічно безпечними та соціально прийнятними без порушення при цьому звич-

ного ритму життя. Під час вибору енергозберігаючих технологій пріоритет надається тим технічним рішенням, які одночасно покращують мікроклімат у приміщеннях і зменшують негативний вплив на довкілля.

Процес проєктування енергоефективної будівлі повинен базуватися на системному підході, в якому будівля розглядається як цілісна енергетична система. Розгляд окремих інноваційних рішень як незалежних одне від одного

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

суперечить принципам системності й може знизити загальну ефективність проекту. Системний аналіз у проектуванні таких споруд включає три основні етапи [1]:

1) створення математичної моделі процесів тепломасообміну в будівлі, тобто представлення цих процесів у математичній формі;

2) визначення цільової функції, що включає встановлення обмежень і формулювання задачі оптимізації відповідно до поставленої мети (наприклад, мінімізація енергоспоживання на опалення, зменшення необхідної потужності

обладнання, скорочення річних витрат на кліматизацію тощо);

3) розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі з урахуванням заданих умов і обраних критеріїв ефективності.

Згідно з принципами системного підходу, у процесі проектування енергоефективної будівлі доцільно розглядати дві окремі, але взаємопов'язані енергетичні підсистеми (рис. 1): 1) зовнішнє середовище, яке виступає джерелом енергії; 2) саму будівлю, що функціонує як цілісна енергетична система.



Рис. 1. Енергетичні підсистеми будівлі

Fig. 1. Energy subsystems of a building

Детальний аналіз першої підсистеми дозволяє оцінити енергетичний потенціал навколишнього клімату та обрати ефективні способи його залучення для забезпечення будівлі теплом або холодом [2]. У свою чергу, дослідження другої підсистеми дає змогу охарактеризувати будівлю з точки зору її архітектурно-конструктивних, теплотехнічних та енергетичних параметрів як єдиного узгодженого механізму [1, 2].

Мета

Метою дослідження є оптимізація енергоефективності будівлі багатoproфільного медичного центру в місті Дніпро за рахунок інтегровано

ваного підходу до вибору архітектурно-планувальних та інженерних рішень з урахуванням локальних кліматичних умов. Будівля розглядається як цілісна енергетична система, ефективність якої визначається взаємодією зовнішніх факторів (сонячна інсоляція, температура повітря, вітер) та внутрішніх технічних параметрів (теплові характеристики огорожень, системи вентиляції, теплові насоси).

У процесі практичного проектування енергоефективної будівлі вибір найкращого поєднання взаємопов'язаних інноваційних архітектурно-планувальних й інженерних рішень часто обмежується певними фіксованими умовами, так званими «дисциплінуючими обмеженнями». Ці умови визначаються ще на початкових

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

етапах і не підлягають зміні – наприклад, це може бути встановлена кількість поверхів або довжина будівлі.

У таких умовах проєктувальники вирішують задачу оптимізації в межах заданих обмежень, прагнучи досягти найкращого результату з урахуванням наявних обмежень [3].

Методика

У контексті наявності обмежень, але прагненні досягнути найкращого результату при вирішенні задачі, доцільно запровадити коефіцієнт проєктного рішення η . Коефіцієнт вводиться для відображення відхилення запроєктованої будівлі від максимально ефективного в теплотехнічному плані варіанту:

$$\eta = \frac{W_{win}}{W}, 0 < \eta \leq 1, \quad (1)$$

де W_{win} – мінімальні витрати теплової енергії для підтримання режиму в будівлі, яка є зразком максимальної теплоефективності, Вт; W – фактичні теплові витрати на забезпечення температурного режиму у варіанті будівлі, що взята в якості основи для проєктування, Вт.

Виходячи з рівняння (1) найвищий рівень теплової ефективності буде досягнуто, коли коефіцієнт дорівнює одиниці ($\eta = 1$).

Відповідно до уявлення будівлі як єдиної енергетичної системи, трьома основними енергетично взаємопов'язаними підсистемами показник теплової ефективності проєктного рішення може бути записаний як:

$$\eta = \eta_1, \eta_2, \eta_3; \\ 0 < \eta_i \leq 1, i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

де η_1 – показник теплової ефективності, який характеризує рівень оптимального врахування кліматичних умов зовнішнього середовища; η_2 – показник, що відображає ефективність у виборі системи, що відповідає за підтримання теплового режиму в будівлі; η_3 – показник, який оцінює ефективність теплозахисту огорожувальних конструкцій з точки зору оптимального проєктного рішення [4].

Під час проєктування будівлі архітектор прагне максимально ефективно використати сприятливі особливості зовнішнього клімату та

зменшити його негативний вплив на тепловий баланс споруди [6].

У свою чергу, інженер зосереджується на створенні кліматичної системи, яка забезпечує комфортні умови в приміщеннях при мінімальному споживанні енергії.

Природно постає запитання: наскільки ефективно архітектор і інженер реалізували свої завдання в контексті енергоефективного проєктування?

Суб'єктивна оцінка результату навряд чи задовольнить вимогливого замовника, оскільки він очікуватиме на точну кількісну характеристику досягнутого рівня ефективності. Одним із таких об'єктивних показників може бути питома теплова характеристика будівлі, розрахована для певного кліматичного періоду.

Цей параметр дозволяє порівнювати проєкт із наявними аналогами, але не дає відповіді на ключове питання: чи можливо було досягти кращого результату і наскільки?

Очевидно, що ідеальним результатом роботи архітектора та інженера є будівля, яка досягає максимальної енергоефективності, тобто забезпечує необхідний мікроклімат із мінімальними енергетичними витратами [7].

Саме сучасні методи математичного моделювання та системного аналізу дозволяють знаходити оптимальні архітектурні й інженерні рішення при проєктуванні таких споруд.

Характеризуватимемо енергетичну ефективність будівлі з оптимальними архітектурними та інженерними рішеннями через витрати енергії на її кліматизацію, позначаючи цю величину як W_{win} . Цей критерій, без сумніву, задовольнить вимоги замовника, оскільки дозволить йому оцінити, наскільки успішно було обрано виконавців – архітектора та інженера, а також наскільки ефективно вони врахували його побажання щодо мінімізації витрат на кліматизацію будівлі.

Величина η змінюється в межах від 0 до 1. Чим ближче η до 1, тим більше архітектурні та інженерні рішення наближаються до оптимальних і тим вище рівень майстерності архітектора та інженера.

Згідно з системним підходом до проєктування енергоефективної будівлі величину η можна записати так:

$$\eta = \eta_E \cdot \eta_A; \quad (3)$$

$$\eta_A = \frac{Q_{\min}^A}{Q}; \quad (4)$$

$$\eta_E = \frac{Q_{\min}^E}{Q}, \quad (5)$$

де $Q_{\min}^A$ – обсяг енерговитрат на кліматизацію будівлі за умов оптимальних архітектурних рішень; $Q_{\min}^E$ – обсяг енерговитрат на кліматизацію будівлі за умов оптимальних інженерних рішень.

У такому випадку, показник η_A можна розглядати як індикатор професійної майстерності архітектора, а η_E – як показник майстерності інженера [2–4].

Результати

Відомо, що інтенсивність сонячної радіації, швидкість і напрямок вітру, а також температура зовнішнього повітря значно варіюються залежно від географічного розташування, оро-

графічних особливостей, мікрорельєфу місцевості та пори року [5].

Вплив зовнішнього клімату на огорожувальні конструкції будівлі доцільно описувати за допомогою метеорологічного градієнта, який враховує напрямок, величину та частоту прояву кліматичних чинників.

Статистичний аналіз зовнішнього клімату як сукупності залежних або незалежних випадкових величин свідчить, що для кожної місцевості в певні характерні періоди часу формується свій специфічний метеорологічний градієнт. Він чинить спрямований вплив на тепловий баланс приміщень із різною орієнтацією, тому в результаті взаємодії вітру, сонячного випромінювання та температури повітря приміщення, що зорієнтовані по-різному, зазнають істотно відмінних тепловтрат або теплонадходжень.

На рис. 2 подано добові значення прямої сонячної радіації для поверхонь різної орієнтації при широті 48° північної широти.

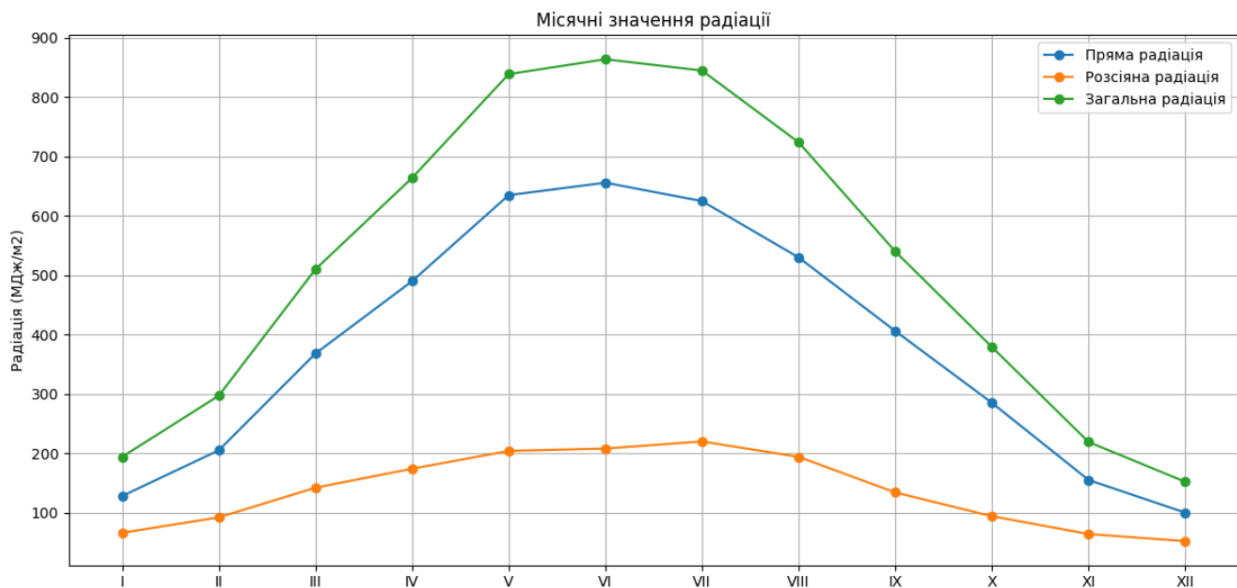


Рис. 2. Добові значення сонячної радіації на для поверхонь різної орієнтації

Fig. 2. Daily values of solar radiation on surfaces of different orientations

Статистичні дослідження показують зміни цих добових сум і демонструє значні сезонні коливання, зокрема спостерігається обернено пропорційна залежність між радіацією для східної та південної орієнтацій.

Враховуючи закономірності надходження сонячної енергії, а також зважаючи на актуаль-

ність енергозбереження в умовах сучасної енергетичної ситуації, ефективне використання сонячного тепла у тепловому балансі будівлі суттєво знижує експлуатаційні витрати [8].

Це спонукало провідних архітекторів світу розробити чіткі принципи проектування.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

По-перше, в сучасному індустріальному будівництві багатоповерхових споруд із великими площами застосування та легкими огорожувальними конструкціями не можна сліпо наслідувати підходи архітекторів минулого.

По-друге, кожен архітектор має усвідомлювати, що кожен фасад будівлі потребує індивідуального підходу, який залежить від положення сонця, точно розрахованого теплового навантаження та вимог до природного освітлення.

Проте розроблені архітекторами правила базуються переважно на практичному досвіді, а не на точних математичних розрахунках, які б враховували закономірності впливу сонячної радіації на тепловий баланс будівель.

Дослідження загалом відображають типову сезонну динаміку сонячної радіації для помірного поясу, але значення дещо завищені порівняно з типовими даними для міста Дніпра, особливо для загальної радіації влітку (850 мВт/м² проти 600...700 Вт/м²) і взимку (200 мВт/м² проти 50...100 Вт/м²).

Пряма і розсіяна радіація на графіку (див. рис. 1) влітку близькі до очікуваних значень для міста Дніпра, але взимку загальна радіація завищена, що може свідчити про те, що графік побудований для регіону з меншою хмарністю або південніше, ніж місто Дніпро.

Завдання оптимального врахування позитивного впливу клімату та нейтралізації негативного ефекту на будівлю слід розглядати в двох напрямках:

1) розробка методики обробки кліматичних даних для потреб будівельного проектування;

2) вибір орієнтації та розмірів будівлі, що найкраще використовують позитивний вплив і зменшують негативний ефект зовнішнього клімату на її огороження.

Оптимізація теплоенергетичного впливу зовнішнього клімату на тепловий баланс будівлі можлива завдяки правильному вибору форми будівлі, розташуванню та площі світлових прорізів, а також регулюванню фільтраційних потоків.

Наприклад, обраний тип форми, орієнтація та розміри будівлі дозволяють зменшити вплив сонячної радіації на оболонку будівлі в теплу пору року, що, у свою чергу, знижує потребу в охолодженні.

Зовнішні огорожувальні конструкції захищають приміщення від впливу зовнішніх атмо-

сферних факторів, а системи опалення та вентиляції підтримують бажаний внутрішній клімат.

Загалом, можна сказати, що вплив сонячної радіації на тепловий баланс приміщення в зимовий період є позитивним, а влітку – негативним.

Вплив вітру, з іншого боку, є негативним в холодну пору року, а в теплу пору року його ефект може бути негативним вдень і позитивним вночі.

Важливим є той факт, що кількісний вплив сонячної радіації та вітру на тепловий баланс будівлі при однаковій загальній корисній площі або об'ємі залежить від її орієнтації та розмірів.

Методологія проектування систем опалення, вентиляції та кондиціювання базується на розрахунках теплових і повітряних балансів будівлі для характерних сезонних періодів [9].

Методика вибору орієнтації та габаритів будівлі передбачає врахування кліматичних характеристик району забудови, а також заданих параметрів – загальної корисної площі будівлі та висоти поверхів.

На сьогодні в Україні діють національні нормативи з енергоефективності [10], які встановлюють вимоги до енергоефективності нових будівель, а також при реконструкції існуючих.

Сумарне значення узагальненого коефіцієнта теплопередачі трансмісією, Вт/К, розраховують за формулою [11]:

$$H_{tr,adj} = b_{tr,x} \cdot \sum_i A_i \cdot U_i, \quad (6)$$

де A_i – площа i -го елемента теплоізоляційної оболонки будівлі, що виміряна за внутрішніми розмірами, включно з площею внутрішніх дверних та віконних укосів, м²; U_i – приведений коефіцієнт теплопередачі i -го елемента теплоізоляційної оболонки будівлі, Вт/(м²·К), що визначають згідно з [5, 7]; $b_{tr,x}$ – поправочний коефіцієнт.

Значення узагальненого коефіцієнта теплопередачі вентиляцією [12] визначають за формулами для опалення (6):

$$H_{ve,adj,H} = \rho_0 \cdot c_0 \cdot (q_{ve,mn,H} \cdot b_{ve,H} + q_{inf,mn,H}), \quad (7)$$

$$H_{ve,adj,C} = \rho_0 \cdot c_0 \cdot (q_{ve,mn,C} \cdot b_{ve,C} + q_{inf,mn,C}), \quad (8)$$

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

де $\rho_0 \cdot c_0$ – теплоємність одиниці об'єму повітря, що дорівнює $0,336 \text{ Вт} \cdot \text{год}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $q_{ve,mn,H}$ – усереднена за часом витрата повітря для вентиляції для опалення та для охолодження відповідно, $\text{м}^3/\text{год}$; $q_{ve,mn,C}$ – усереднена за часом витрата повітря для інфільтрації для опалення та для охолодження відповідно, $\text{м}^3/\text{год}$; $b_{ve,H}$, $b_{ve,C}$ – температурний поправочний коефіцієнт, що коригує коефіцієнт теплопередачі вентиляцією.

Середнє значення теплонадходжень у приміщення визначається за формулою:

$$\Phi_{mn} = \sum \Phi_{int} \cdot N / \tau_{int}, \quad (9)$$

де N – графік використання, год/тиждень; τ_{int} – кількість годин в тиждні, год.

Відповідно до п. 11.3 [5, 7], визначаються надходження сонячної інсоляції через огорожувальні конструкції:

$$E_{sol,K} = F_{sh,ob,K} \cdot A_{sol,K} \cdot I_{sol,K} - F_{r,K} \cdot \Phi_{r,K}, \quad (10)$$

де $F_{sh,ob,K}$ – зменшувальний коефіцієнт інсоляційного затінення для еквівалентної площі k -ої поверхні; $A_{sol,K}$ – площа інсоляції з визначеною орієнтацією та кутом нахилу для скління, непрозорих елементів та спеціальних елементів; $I_{sol,K}$ – значення середньомісячного надходження сонячної радіації на визначену поверхню з урахуванням орієнтації, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $F_{r,K}$ – додатковий коефіцієнт, який враховує зв'язок між будівлею та небосхилом, котрий приймається 1 – для даху, який не затінений, та 0,5 – для вертикальної стіни; $\Phi_{r,K}$ – тепловий потік за рахунок випромінювання в атмосферу, Вт .

В переважному випадку зменшувальний коефіцієнт інсоляції $F_{sh,ob,K}$ визначається за п.11.4.2 [5, 7], але в роботі відсутні розрахункові дані, тому відповідно до табл. 12 [5, 7] для вертикальної площини з нахилом 0 градусів дорівнює 1.

Площа інсоляції в залежності від орієнтації визначається як для прозорої, так і для непро-

зорої огорожувальної конструкції $F_{sh,ob,K}$ для прозорої конструкції визначається за формулою:

$$A_{sol,K} = F_{sh,gl} \cdot q_{sh,gl} \cdot (1 - F_F) \cdot A_{w,p}, \quad (11)$$

де $F_{sh,gl}$ – понижувальний коефіцієнт затінення рухомих засобів, за відсутності даних приймається рівним 1; $q_{sh,gl}$ – коефіцієнт пропускання сонячної інсоляції прозорою частиною конструкції; F_F – частка обрамленої площі, приймається рівною 0,3; $A_{w,p}$ – площа проекції прозорого елементу, виходячи з того що розрахунок буде вестись пофасадно, значення приймається рівною 1.

$$q_{sh,gl} = F_w \cdot q_n. \quad (12)$$

Для непрозорих огорожувальних конструкцій значення $A_{sol,K}$ визначається за формулою:

$$A_{sol,K} = \alpha_{S,c} \cdot R_{se} \cdot U_c \cdot A_c, \quad (13)$$

де $\alpha_{S,c}$ – безрозмірний коефіцієнт поглинання сонячної інсоляції першим шаром огорожувальної конструкції, приймається за табл. 10 [14, 15]; R_{se} – поверхневий тепловий опір непрозорої частини, приймається рівним $0,043 \text{ м}^2 \text{ К}/\text{Вт}$; U_c – коефіцієнт теплопередачі стіни згідно теплотехнічного розрахунку $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; A_c – площа непрозорих огорожувальних конструкцій, м^2 .

Основні розрахункові показники теплових надходжень зведені у табл. 1.

Для розрахунку теплових надходжень сонячної інсоляції через прозорі та непрозорі огорожувальні конструкції визначається величина сонячного теплового потоку на вертикальну поверхню при помірний хмарності, дані взяті з [13] для міста Дніпра та занесені до табл. 2.

Після цього проводиться розрахунок теплових надходжень на вертикальні поверхні залежно від їх типу та орієнтації. Розрахунок здійснюється за формулами вище. Отримані результати представлені в табл. 3 та 4.

Таблиця 1

Показники теплових надходжень

Table 1

Heat gain indicators

Засклені елементи фасаду		Непрозорі елементи фасаду	
Понижувальний коефіцієнт затінення перешкодами для еквівалентної площі інсоляції k -ої поверхні, $F_{sh,ob,K}$	1	Безрозмірний коефіцієнт поглинання сонячної радіації непрозорою частиною, $\alpha_{S,c}$	0,7
Понижувальний коефіцієнт затінення для рухомих засобів, $F_{sh,gl}$	1	Тепловий зовнішній поверхневий опір непрозорої частини R_{se}	0,043
Загальний коефіцієнт пропускання сонячної енергії світлопрозорої частини елемента, $q_{sh,gl}$	0,522	Коефіцієнт теплопередачі непрозорої частини, U_c	0,149
Частка площі обрамлення, F_F	0,3	Площа проєкції непрозорої частини A_c	1
Площа проєкції заскленого елемента, $A_{w,p}$	1		
Еквівалента площа інсоляції заскленого елемента оболонки $A_{sol,K}$		Еквівалента площа інсоляції непрозорої частини оболонки будівлі, $A_{sol,K}$	
0,365		0,0045	

Далі визначається загальне значення теплового потоку через вікна та стіни, яке обчислюється шляхом додавання відповідних значень з урахуванням орієнтації.

Динамічні методи дозволяють моделювати термічний опір і теплоємність огорожувальних конструкцій, враховують надходження сонячної радіації та вплив внутрішніх джерел тепла в цих конструкціях.

У разі застосування стандартного методу такі динамічні характеристики враховуються опосередковано – шляхом введення додаткових поправочних коефіцієнтів.

Багатопрофільний медичний центр відноситься до категорії будівель дуже важких, через те, що зовнішні огороження мають товщину блоків газобетону 440 мм, а також між поверхами вкладається залізобетонна плита перек-

риття. Виходячи з цього, згідно табл. 15 [14], теплова інерція будівлі становить

$$C = 110 \text{ Вт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тоді внутрішню теплоємність будівлі можна визначити за формулою:

$$C_m = C \cdot A_f. \quad (14)$$

Тоді часова константа визначається за формулою для режиму опалення:

$$\tau = \frac{C_m}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj}}. \quad (15)$$

Для режиму охолодження:

$$\tau = \frac{C_m}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj} + H_{ve,extra,adj}}. \quad (16)$$

Таблиця 2

Сонячна радіація Вт/м² (вертикальна поверхня)

Table 2

Solar radiation W/m² (vertical surface)

Період	Кількість діб	Кількість годин	Пн	ПнСх	Сх	ПдСх	Пд	ПдЗ	З	ПнЗ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Січень	31	744	13	13	21	37	50	40	25	13
Лютий	28	672	23	24	36	58	72	62	38	24
Березень	31	744	31	38	57	79	91	83	61	39
Квітень	30	720	40	56	81	97	99	94	78	55
Травень	31	744	55	81	108	112	102	110	101	79
Червень	30	720	67	94	119	114	98	113	112	90
Липень	31	744	61	87	116	115	101	112	111	86
Серпень	31	744	44	69	108	118	111	117	96	68
Вересень	30	720	29	46	81	109	122	110	76	46
Жовтень	31	744	18	22	46	77	95	77	44	22
Листопад	30	720	10	12	20	38	49	39	20	12
Грудень	31	744	9	9	15	28	36	29	15	9
Рік	365	8 760								

Таблиця 3

Сонячні теплонадходження через світлопрозорий елемент будівлі, $E_{sol,K}$ Вт

Table 3

Solar heat gain through the translucent element of the building, $E_{sol,K}$ W

Пн	ПнСх	Сх	ПдСх	Пд	ПдЗ	З	ПнЗ
1	2	3	4	5	6	7	8
17,36	0,00	75,3	0,00	104,23	0,00	88,75	0,00
28,15	0,00	124,56	0,00	150,55	0,00	130,55	0,00
38,30	0,00	185,63	0,00	190,35	0,00	211,39	0,00
55,70	0,00	283,65	0,00	206,33	0,00	274,31	0,00
68,77	0,00	377,85	0,00	213,66	0,00	353,21	0,00
83,55	0,00	415,36	0,00	205,36	0,00	390,27	0,00
75,35	0,00	405,90	0,00	211,55	0,00	388,51	0,00
54,69	0,00	377,56	0,00	230,33	0,00	334,23	0,00
35,67	0,00	283,67	0,00	255,66	0,00	265,61	0,00
23,05	0,00	160,35	0,00	198,95	0,00	155,21	0,00
13,67	0,00	70,55	0,00	102,13	0,00	71,21	0,00

Таблиця 4

Сонячні теплонадходження через світлонепрозорий елемент будівлі, $E_{sol,K}$ Вт

Table 4

Solar heat gain through opaque building elements, $E_{sol,K}$ W

Пн	ПнСх	Сх	ПдСх	Пд	ПдЗ	3	ПнЗ
1	2	3	4	5	6	7	8
4,52	0,00	2,25	0,00	11,11	0,00	2,11	0,00
5,03	0,00	4,58	0,00	16,51	0,00	2,55	0,00
7,91	0,00	6,53	0,00	21,01	0,00	6,69	0,00
11,21	0,00	9,81	0,00	22,59	0,00	9,18	0,00
13,57	0,00	13,55	0,00	21,21	0,00	11,18	0,00
16,52	0,00	14,88	0,00	22,39	0,00	13,21	0,00
14,91	0,00	14,41	0,00	21,53	0,00	12,25	0,00
10,21	0,00	13,36	0,00	25,69	0,00	11,05	0,00
6,53	0,00	9,71	0,00	27,88	0,00	8,82	0,00
3,98	0,00	5,11	0,00	21,05	0,00	5,55	0,00
2,51	0,00	2,51	0,00	10,05	0,00	1,61	0,00
1,51	0,00	1,73	0,00	6,32	0,00	1,85	0,00

Таблиця 5

Теплове навантаження на систему опалення

Table 5

Thermal load on the heating system

Місяць року	Кількість діб	Кількість годин	Θt	Θi nt, set ,H	Q H,tr, КВт·год	Q H,ve , КВт ·год	Q H,ht, КВт·год	Q H,so l, КВт ·год	Q H,in t, КВт ·год	Q H,gn, КВт·год	γн	η H, gn	Q H,nd, КВт·год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Січень	31	744	–4,7	20	2336	951	3287	227	631	890	0,3	1,00	2285
Лютий	28	672	–3,8		2033	828	2860	318	598	931	0,3	1,00	1895
Березень	31	744	1,1		1787	728	2515	514	631	1098	0,5	1,00	1285
Квітень	30	720	9,6		952	387	1339	628	598	1185	1,0	0,98	70
Травень	31	744	16		378	154	532	807	631	1359	2,8	0,36	0
Червень	30	720	19,6		37	15	52	845	598	1485	29,2	0,03	0
Липень	31	744	21,6		–151	–62	–213	860	631	1531	–7,3	0,24	0
Серпень	31	744	20,7		–66	–27	–93	796	598	1385	–15,9	0,11	0
Вересень	30	720	15,4		421	171	592	650	631	1298	2,2	0,45	0

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Продовження табл. 5

Continuation of Table 5

Місяць року	Кількість діб	Кількість годин	Θ_t	$\Theta_{int, set, H}$	$Q_{H, tr, од}$	$Q_{H, ve, KBт \cdot год}$	$Q_{H, ht, од}$	$Q_{H, sol, KBт \cdot год}$	$Q_{H, int, KBт \cdot год}$	$Q_{H, gn, од}$	γ_H	$\eta_{H, gn}$	$Q_{H, nd, KBт \cdot год}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Жовтень	31	744	8,6		1078	439	1517	430	598	1152	0,7	1,00	398
Листопад	30	720	2,2		1629	663	2292	199	631	835	0,4	1,00	1335
Грудень	31	744	-2,5		2128	866	2994	154	598	790	0,3	1,00	2058
Всього за рік	365	8760											9299

Таблиця 6

Теплове навантаження системи охолодження

Table 6

Thermal load of the cooling system

Місяць року	Кількість діб	Кількість годин	Θ_t	$\Theta_{int, set, C}$	$Q_{C, tr, KBт \cdot год}$	$Q_{C, ve, KBт \cdot год}$	$Q_{C, ht, KBт \cdot год}$	$Q_{C, sol, KBт \cdot год}$	$Q_{C, int, KBт \cdot год}$	$Q_{C, gn, KBт \cdot год}$	γ_C	$\eta_{C, gn}$	$Q_{C, nd, KBт \cdot год}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Січень	31	744	-4,7		2256	1554	3765	227	631	900	0,2	0,23	0
Лютий	28	672	-3,8		1980	1390	3450	305	598	905	0,3	0,27	0
Березень	31	744	1,1		1890	13225	3215	445	631	1190	0,4	0,36	0
Квітень	30	720	9,6		1285	815	2156	598	598	1195	0,6	0,57	0
Травень	31	744	16		935	641	1590	800	631	1385	0,9	0,88	85
Червень	30	720	19,6		681	461	1132	801	598	1491	1,3	0,99	356
Липень	31	744	21,6	30	561	377	883	810	631	1498	1,6	1,00	580
Серпень	31	744	20,7		631	430	1001	750	598	1435	1,4	0,99	390
Вересень	30	720	15,4		954	598	1581	601	631	1290	0,8	0,79	30
Жовтень	31	744	8,6		1387	911	2405	425	598	1015	0,5	0,45	0
Листопад	30	720	2,2		1787	1256	3055	190	631	833	0,3	0,28	0
Грудень	31	744	-2,5		2125	1482	3636	150	598	830	0,2	0,22	0
Всього за рік	365	8760											1441



Рис. 3. Енергопотреби на систему опалення

Fig. 3. Energy consumption for the heating system

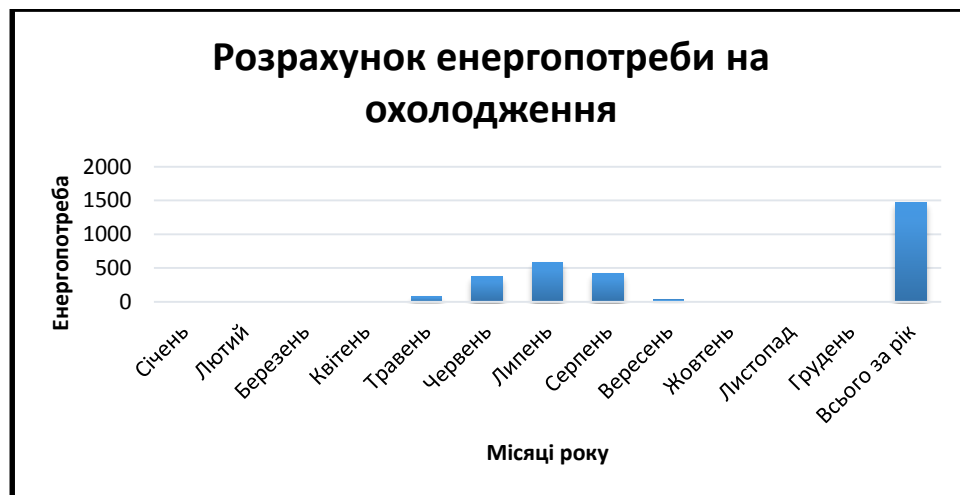


Рис. 4. Енергопотреби на систему охолодження

Fig. 4. Energy consumption for the cooling system

Таблиця 7

Теплотехнічні характеристики матеріалів

Table 7

Thermal characteristics of materials

Матеріали	$R, m^2 \cdot ^\circ C / Wm$	δ, m	$\varphi, kJ / m^2 \cdot ^\circ C$	$Q, kJ / kg$	$\Delta T / \Delta, ^\circ C / cm$
Цегла	1,84	0,46	464	840	4
Керамзитобетон	2,06	0,36	230	800	6
Газобетоні блоки	0,83	0,1	50	1 000	15
Мінеральна вата	2,00	0,07	3	920	40

Задача оптимального керування $Q(t)$, розглянута як задача мінімізації часу переходу від температури T_1 до температури T^{end} , має очевидне розв'язання у двох конкретних випадках.

У разі мінімізації витрат теплової енергії на нагрівання огорожувальних конструкцій та внутрішнього повітря, а також при збільшенні швидкості зміни температури огорожень, завдання оптимального керування має очевидне розв'язання. Обидва ці сценарії можливі, коли застосовуються конструкції з низькими теплоаккумуляційними властивостями.

Вплив теплотехнічних характеристик будівельних матеріалів і конструкцій на швидкість нагрівання проілюстровано на прикладі матеріалів, зазначених в табл. 7.

У другому стовпчику наведені значення термічного опору матеріалів відповідної товщини, що вказана в стовпчику 3 [15].

Стовпчик 4 містить теплоаккумуляційні показники, а стовпчик 5 – кількість тепла, необхідного для підвищення температури з 0 до 20 °C для матеріалу вказаної товщини та площі 1 м².

У стовпчику 6 подано швидкість зміни температури поверхні матеріалу при впливі джерела потужністю 1 кВт.

Аналіз табл. 7 показує: чим нижчий теплоаккумуляційний показник матеріалу, тим швидше він нагрівається і тим менше енергії для цього потрібно.

Другий варіант розв'язання задачі оптимізації можливий за умов високого коефіцієнта конвективної теплопередачі між внутрішнім повітрям і внутрішньою поверхнею огорожувальної конструкції.

Враховуючи, що коефіцієнт конвективного теплообміну за умов вільної конвекції становить близько 4 Вт/м²·°C його збільшення до значення 15 Вт/м² може утворитися за рахунок нагріву огорожуючої конструкції надстилючим струменем.

Таким чином, можна сформулювати рекомендації щодо енергоефективного методу розігрівання приміщення, який спрямований на мінімізацію енергоспоживання.

Суть методу полягає в подачі тепла до опалювальних приладів і регулюванні тепловіддачі, причому подача тепла здійснюється протягом максимально короткого часу за умови повного використання потужності опалювального обладнання.

Розподіл тепла в процесі нагрівання приміщення відбувається за допомогою спрямованих теплових струменів.

Автоматизована система управління забезпечує своєчасний перехід до режиму подачі тепла, який підтримує нормативний рівень теплового обміну в приміщенні.

Наукова новизна та практична значимість

У даній науковій статті якісно та кількісно оцінено зміни в методиці визначення основних видів кліматичних навантажень на будівельні конструкції для умов України, зокрема вплив інсоляції, вітрового навантаження, температури зовнішнього повітря, інфільтрації та теплозахисту огорожувальних конструкцій.

З практичної точки зору, у ході проведеного аналізу отримано дані, які дозволяють визначити шляхи та напрями подальшого вдосконалення та уточнення наявних методик розрахунку основних кліматичних навантажень для умов України.

Висновки

На основі чисельного моделювання підтверджено, що досягнення високої енергоефективності в будівлі багатoproфільного медичного центру можливе за умови комплексного врахування кліматичних умов, орієнтації фасадів, теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій і використання сучасного інженерного обладнання.

У досліджуваному об'єкті наявні вікна з боку північного фасаду на обох поверхах, проте буферні зони були передбачені на кожній сходовій клітині. Незважаючи на це, за результатами моделювання будівля відповідала встановленим критеріям.

Ймовірно, цього вдалося досягти завдяки впровадженню сучасних енергоефективних інженерних систем, зокрема теплового насоса з коефіцієнтом ефективності (COP) 3,5, а також використання окремих припливних та витяжних систем вентиляції з високим рівнем рекуперації тепла, яка сягає майже 85 %.

Варто зазначити, що таке обладнання характеризується низьким споживанням електроенергії (до 0,2...0,3 кВт), що суттєво знижує загальне енергоспоживання будівлі. Якщо ж використовувати дешевше та менш ефективне обла-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

днання, досягти стандартів «пасивного» будинку може виявитися неможливо. Це й створює основну дилему енергоефективного будівництва – баланс між інвестиціями та ефективністю.

Альтернативним підходом є досягнення необхідних енергетичних показників виключно за рахунок архітектурних та конструктивних рішень. Однак і в цьому випадку постає фінансове питання, адже використання високоякісних вікон та ефективних будівельних матеріалів також потребує значних коштів, що не завжди доступно для замовника.

Ще одним викликом є обмеженість даних для точного розрахунку, зокрема щодо фактич-

них показників роботи вентиляційних систем та теплових насосів.

Лабораторні дослідження таких параметрів майже недоступні, особливо зважаючи на те, що в базі даних програмного забезпечення присутнє лише одне українське місто.

З огляду на це, для реального досягнення цілей у сфері енергоефективного будівництва необхідно розробити вітчизняні розрахункові комплекси, адаптовані до умов конкретних кліматичних зон України, що дозволить точніше прогнозувати та оптимізувати енергоспоживання будівель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білецький В. С., Сергєєв П. В. *Енергоефективність будівель* : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2017. 150 с.
2. Богданов В. С., Кравченко О. В. *Математичне моделювання теплових процесів у будівлях*. Київ : НУ-БіП України, 2018. 120 с.
3. Гарасимчук І. Д., Панцир Ю. І., Оленюк О. А., Печенюк А. В. Сучасні виклики та перспективи підвищення енергоефективності будівель і споруд в Україні. *Подільський вісник*. 2025. № 46. С. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-1.33>
4. Головка В. Ф. *Теплові насоси: теорія та практика застосування*. Львів : ПДТУ, 2019. 200 с.
5. Коменда Н. В., Грицюк І. В., Волинець В. І., Гадай А. В., Коменда Д. Т. Наукові підходи до оцінки енергоефективності будівель. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2025. № 23. С. 123–131. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-12)
6. Левчук О. В., Доронін В. А. *Енергоефективність будівель*. Київ : Ліра-К, 2017. 175 с.
7. Лецишин І. М., Максимець О. В. Енергоефективність будівель як один із напрямків стратегії сталого розвитку сучасних міст та регіонів. *Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects* : International Science-Practical Conference, Lviv, 23-25 жовт. 2024 р. DOI: <https://doi.org/10.36930/conf150.4.3>
8. Пастухова С. В., Анін В. І., Метеленко Н. Г. Енергозберігаючі технології при будівництві будівель та споруд на території України. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2023. № 24. С. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/291861>
9. Сердюк В. Р., Франишина С. Ю., Сердюк Т. В., Христич О. В. Організаційно-технологічні заходи термомодернізації застарілого житлового фонду. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. № 2. С. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-6-17>
10. Фаренюк Г. Г., Возняк О. Т., Шаповал С. П. *Термомодернізація житлових будинків*. Київ : ДП НДІБК, 2018. 112 с.
11. Aruta G., Ascione F., Iovane T., Mastellone M. Thermal resilience to climate change of energy retrofit technologies for building envelope. *Energy*. 2025. Vol. 327. Article 136489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136489>
12. Brudermueller T., Potthoff U., Fleisch E., Wortmann F. Estimation of energy efficiency of heat pumps in residential buildings using real operation data. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. Article 2834. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58014-y>
13. Devkota K., Rasul M. G., Chowdhury A. A., Azad A. K. Recent advancements in low-energy buildings: integrating bio-phase change materials and rooftop greenery systems *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 101. Article 111790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.111790>
14. Ma Z., Awan M. B., Lu M., Ali M. An overview of emerging and sustainable technologies for increased energy efficiency and carbon emission mitigation in buildings. *Buildings*. 2023. Vol. 13, Iss. 10. 2658. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13102658>

15. Rabczak S., Mateichyk V., Smieszek M. Evaluating the energy efficiency of combining heat pumps and photovoltaic panels in eco-friendly housing. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, Iss. 13. P. 5575. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14135575>

A. V. RADKEYCH^{1*}, M. M. LIAKHOVETSKA-TOKARIEVA^{2*}, S. V. HAVRYLYUK^{3*}

^{1*}Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517

^{2*}Dep. «Heating, Ventilation, Air Conditioning and Heat and Gas Supply», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleg Petrova St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (097) 923 47 73, e-mail lyakhovetsky-tokareva@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-0338-4930

^{3*}Energy Efficient Solutions LLC Climatech Company, Naberezhna Zavodska Str., 44, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (096) 718 89 17, e-mail s.v.gavr28@gmail.com, ORCID 0009-0001-6827-7722

Optimization of Energy Efficiency of a Multi-Profile Medical Center Building

Purpose. Increasing the thermal efficiency of a multidisciplinary medical center building by optimizing architectural and planning solutions, taking into account climatic conditions and improving the parameters of engineering systems. The building is considered as a single energy system, the efficiency of which is determined by the interaction of external and internal factors. **Methodology.** Is based on mathematical modeling of heat and mass transfer, analysis of climatic data, and calculation of energy consumption in accordance with current standards. The study takes into account the effects of solar insolation, wind loads, outdoor air temperature, air infiltration, and thermal insulation of building envelopes. An indicator of the efficiency of a design solution is proposed, which assesses its deviation from the energy-optimal variant. **Findings.** Are based on the example of a multidisciplinary medical center located in the city of Dnipro. An analysis of insolation according to the orientation of facades was carried out, thermal gains through transparent and opaque elements were calculated, and heating and cooling loads were determined. Seasonal climate variability, thermal inertia of materials, and the operational regime were taken into account. The study confirmed that the building's orientation, glazing area, ventilation system efficiency, and the quality of engineering equipment significantly affect energy consumption. A method for determining the optimal building dimensions is proposed, based on local climatic data and the potential of solar energy. **Originality.** lies in the substantiation of a systemic approach to energy-efficient design, which combines climatic factors, architectural constraints, and thermal characteristics into a unified model. A coefficient is proposed to evaluate the design solution in terms of its energy efficiency. **Practical value.** lies in the development of recommendations for reducing energy consumption. The proposed solutions make it possible to reduce thermal loads on engineering systems by 20–25%, lower operating costs, and improve comfort. The examined facility includes a ventilation system with heat recovery (up to 85%) and a heat pump with a COP of 3.5, which resulted in significant energy savings. The results confirm the effectiveness of integrating architectural design with modern engineering equipment and climate adaptation. The methodology can be applied to a wide range of public and residential buildings. **Conclusions.** Comprehensive energy-efficient design requires the integration of architecture, energy systems, and climatology. The proposed approach enables the development of projects that not only comply with standards but also ensure minimal energy consumption under real operating conditions.

Keywords: energy efficiency; thermal balance; climatic conditions; heat transfer; insolation; ventilation

REFERENCES

1. Biletskyi, V. S., & Serheiev, P. V. (2017). *Energy Efficiency of Buildings*. Kyiv: NTUU “KPI”. (in Ukrainian)
2. Bohdanov, V. S., & Kravchenko, O. V. (2018). *Mathematical Modeling of Heat Processes in Buildings*. Kyiv: NULES of Ukraine. (in Ukrainian)
3. Harasymchuk, I. D., Pantsyr, Yu. I., Olenyuk, O. A., & Pecheniuk, A. V. (2025). Modern Challenges and Prospects for Improving the Energy Efficiency of Buildings and Structures in Ukraine. *Podilskyi Bulletin*, (46), 228-235. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-1.33> (in Ukrainian)
4. Holovko, V. F. (2017). *Heat Pumps: Theory and Practice of Application*. Lviv: PDTU. (in Ukrainian)
5. Komenda, N. V., Hrytsiuk, I. V., Volynets, V. I., Hadai, A. V., & Komenda, D. T. (2025). Scientific Approaches to Assessing the Energy Efficiency of Buildings. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*. (23), 123-131. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-12) (in Ukrainian)
6. Levchuk, O. V., & Doronin, V. A. (2017). *Energy Efficiency of Buildings*. Kyiv: LiraK. (in Ukrainian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

7. Leshchyshyn, I. M., & Maksymets, O. V. (2024, October). Energy Efficiency of Buildings as a Direction of Sustainable Development Strategy for Modern Cities and Regions. Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects. *International Science-Practical Conference*. Lviv, Ukrainian. DOI: <https://doi.org/10.36930/conf150.4.3> (in Ukrainian)
8. Pastukhova, S. V., Anin, B. I., & Metelenko, N. G. (2023). Energy-saving technologies in the construction of build-ings and structures in Ukraine. *Bridges and tunnels: theory, research, practice*, (24), 56-65. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/291861> (in Ukrainian)
9. Serdiuk, V. R., Franyshyna, S. Yu., Serdiuk, T. V., & Khrystych, O. V. (2022). Organizational and Technological Measures for Thermomodernization of the Obsolete Housing Stock. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*. (2), 6-17. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-6-17> (in Ukrainian)
10. Farenjuk, H. H., Vozniak, O. T., & Shapoval, S. P. (2018). *Thermomodernization of Residential Buildings*. Ky-iv: State Research Institute of Building Constructions. (in Ukrainian)
11. Aruta, G., Ascione, F., Iovane, T., & Mastellone, M. (2025). Thermal Resilience to Climate Change of Energy Retrofit Technologies for Building Envelope. *Energy*, 327, Article 136489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136489> (in English)
12. Brudermueller, T., Potthoff, U., Fleisch, E., & Wortmann, F. (2025). Estimation of Energy Efficiency of Heat Pumps in Residential Buildings Using Real Operation Data. *Nature Communications*, A16, Article 2834. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58014-y> (in English)
13. Devkota, K., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Azad, A. K. (2025). Recent Advancements in Low-Energy Buildings: Integrating Biophase Change Materials and Rooftop Greenery Systems. *Journal of Building Engineering*. Vol. 101. Article 111790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.111790> (in English)
14. Ma, Z., Awan, M. B., Lu, M., Ali, M. (2023). An Overview of Emerging and Sustainable Technologies for In-creased Energy Efficiency and Carbon Emission Mitigation in Buildings. *Buildings*. 13(10), 2658. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13102658> (in English)
15. Rabczak, S., Mateichyk, V., & Smieszek, M. (2024). Evaluating the Energy Efficiency of Combining Heat Pumps and Photovoltaic Panels in Eco-Friendly Housing. *Applied Sciences*. 14(13), P. 5575. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14135575> (in English)

Надійшла до редколегії: 23.05.2025

Прийнята до друку: 23.09.2025