

Михайло КУЛІК¹,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-4880-5217

Антолій БОБРАКОВ¹,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-7915-2642

Ольга НЕСКОРОДОВА¹,

студентка групи БАДз-115м

ORCID: 0009-0008-5933-4642

Сергій БОЛЮК²,

старший викладач,

ORCID: 0000-0003-4072-9018

¹Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

²Запорізький будівельний фаховий коледж, м. Запоріжжя

АНАЛІЗ ВИБОРУ МОЖЛИВИХ РІШЕНЬ ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОПОТРЕБ ТА ВИТРАТ НА ЗАХОДИ З ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ БУДІВЛІ КОРПУСУ №4 НУ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

У статті виконано аналіз технічних і організаційно-технологічних рішень щодо зменшення енергопотреб навчальної будівлі корпусу №4 НУ «Запорізька політехніка» (м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64). Актуальність дослідження зумовлена значним відхиленням фактичних теплотехнічних характеристик огороджувальних конструкцій від мінімально допустимих вимог ДБН та високими інтегральними показниками енергоспоживання будівель, зведених за застарілими нормативами, що відзначено у вітчизняних і зарубіжних працях. Метою роботи є обґрунтування раціонального вибору комплексу заходів термомодернізації на основі порівняльного аналізу їх енергетичної результативності та організаційно-економічної доцільності з урахуванням поетапного впровадження без зупинки освітнього процесу.

Вихідні параметри будівлі прийнято за результатами енергетичного сертифікування та розрахункових матеріалів: кондиціонувана площа становить 6545,11 м², опалювальна площа – 5950,10 м², загальний об'єм – 24114,97 м³, опалюваний об'єм – 17938,68 м³; будівлю віднесено до класу енергоефективності G. Теплотехнічний аналіз оболонки показав критично низькі значення приведенного опору теплопередачі: для зовнішніх стін (1605,115 м²) R=0,291 м²·К/Вт при вимозі 3,5 м²·К/Вт; для суміщеного покриття (1794,65 м²) R=0,611 м²·К/Вт при вимозі 6,0 м²·К/Вт; для перекриття над неопалюваним підвалом (544,6 м²) R=0,387 м²·К/Вт при вимозі 4,0 м²·К/Вт; для світлопрозорих конструкцій (1476,237 м²) R=0,543 м²·К/Вт при вимозі 0,7 м²·К/Вт]. Розрахунок складових тепловтрат і річної енергопотреб на опалення виконано згідно з ДСТУ 9190:2022 із виділенням трансмісійної та вентиляційної складових, що дало можливість визначити пріоритетні напрями зниження енергопотреб та обґрунтувати ефективність пакетів заходів.



Розглянуто варіанти термомодернізації: утеплення фасадів мінераловатними матами 200 мм, утеплення покриття 300 мм, утеплення перекриття над підвалом, герметизація стиків і зменшення інфільтрації, модернізація світлопрозорих конструкцій, встановлення ІТП з погодозалежним регулюванням і балансуванням, а також використання рекуперації повітря. Показано, що найбільший вплив на скорочення енергопотребі забезпечує комплексна модернізація оболонки у поєднанні з удосконаленням інженерних систем та керуванням режимами споживання.

Додатково обґрунтовано доцільність застосування сучасних організаційно-технологічних методик зниження кошторисних ризиків і непрямих витрат: Lean/LPS, BIM/VDC-координації та clash-detection, індустріалізованого (модульного) ретрофіту, що підвищують прогнозованість строків і бюджету та підтримують поетапну реалізацію заходів. Отримані результати можуть бути використані при формуванні програм термомодернізації будівель закладів освіти, підготовці енергетичних паспортів і проектних рішень реконструкції громадських будівель із урахуванням вимог сталого розвитку.

Ключові слова: *термомодернізація; енергетична сертифікація; енергопотреба на опалення; огорожувальні конструкції; інфільтрація; індивідуальний тепловий пункт; рекуперація; ДСТУ 9190:2022; організаційно-технологічні методики, BIM/VDC; Lean Construction.*

Постановка проблеми. Підвищення енергоефективності існуючих громадських будівель є одним із пріоритетних напрямів державної політики України у сфері енергозбереження та сталого розвитку. Значна частина будівель закладів вищої освіти була зведена у 60–80-х роках ХХ століття за нормативними вимогами, що суттєво відрізняються від сучасних стандартів теплозахисту та енергетичної ефективності. Фізичний знос огорожувальних конструкцій, недостатній опір теплопередачі стін і покриттів, застарілі світлопрозорі конструкції, недосконалі системи опалення та відсутність автоматизованого регулювання призводять до підвищених тепловтрат і значних витрат енергоресурсів.

Особливо актуальною ця проблема є для навчальних корпусів закладів вищої освіти, де тривалість опалювального періоду поєднується з нерівномірністю теплового навантаження та специфічними режимами експлуатації приміщень. В умовах зростання вартості енергоносіїв та обмеженого бюджетного фінансування питання раціонального вибору заходів зі зменшення енергопотребі набуває стратегічного значення. При цьому недостатньо лише окремих локальних рішень, таких як заміна вікон або часткове утеплення фасадів, оскільки відсутність системного підходу не забезпечує досягнення нормативних показників енергетичної ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика підвищення енергоефективності існуючого фонду будівель активно досліджується як у вітчизняних, так і в зарубіжних наукових працях. У роботах, присвячених термомодернізації житлових і громадських будівель, обґрунтовано системний підхід до зниження енергоспоживання на засадах сталого розвитку, що передбачає поєднання технічних, економічних та організаційних заходів [1, 3]. Дослідники підкреслюють необхідність комплексної модернізації огорожувальних конструкцій та інженерних систем із урахуванням вимог чинних нормативних

документів і показників життєвого циклу об'єкта [5]. Окрему увагу приділено впливу підвищення нормативних вимог до опору теплопередачі на рівень теплових втрат та енергетичну надійність будівель [2], що підтверджує доцільність приведення існуючих споруд до сучасних стандартів теплозахисту.

У дослідженнях, присвячених навчальним та громадським будівлям, показано, що найбільший ефект зменшення енергопотреби досягається за умови комплексної термомодернізації оболонки будівлі та модернізації систем теплопостачання з упровадженням автоматизованого регулювання [6, 8]. Окремі автори акцентують увагу на впливі повітропроникності огорожувальних конструкцій та якості монтажу світлопрозорих систем на фактичні тепловтрати [7, 10, 15], а також на ролі архітектурно-планувальних особливостей і показника компактності будівлі [13]. У роботах, присвячених реконструкції громадських об'єктів, обґрунтовано необхідність поєднання технічного обстеження з оцінкою енергетичних характеристик як передумови вибору раціональної стратегії модернізації [17].

Разом з тим аналіз літератури свідчить, що більшість досліджень або зосереджені на окремих технічних рішеннях, або мають узагальнений характер без прив'язки до конкретного об'єкта та його експлуатаційних умов. Питання вибору оптимального комплексу заходів зі зменшення енергопотреби для конкретної навчальної будівлі з урахуванням її конструктивних особливостей, інженерного забезпечення та регіональних кліматичних умов потребує додаткового обґрунтування. Це визначає необхідність проведення комплексного аналізу можливих рішень для корпусу №4 НУ «Запорізька політехніка» з метою визначення найбільш ефективної стратегії термомодернізації.

Метою публікації є проведення комплексного аналізу можливих технічних та організаційних рішень щодо зменшення енергопотреби будівлі корпусу №4 Національного університету «Запорізька політехніка» з урахуванням її конструктивних особливостей, технічного стану інженерних систем та вимог чинної нормативної бази, а також обґрунтування раціонального комплексу заходів термомодернізації на основі порівняльної оцінки їх енергетичної та техніко-економічної ефективності.

Основна частина. Будівля корпусу №4 НУ «Запорізька політехніка» (м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64) є громадською навчальною спорудою з тривалим терміном експлуатації та значним потенціалом підвищення енергоефективності. Відповідно до дослідження будівлі та розрахункових таблиць кондиціонування площа будівлі становить 6545,11 м², опалювальна площа – 5950,10 м², загальний будівельний об'єм – 24114,97 м³, опалюваний об'єм – 17938,68 м³.

За результатами процедур сертифікації будівля була віднесена до класу енергетичної ефективності G, що свідчить про невідповідність сучасним нормативним вимогам та необхідність реалізації комплексу заходів термомодернізації [20].



Рис. 1. Фасад будівлі та дані з технічного паспорту будівлі

Аналіз теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій показав істотне відставання від мінімально допустимих значень. Площа зовнішніх стін становить 1605,115 м² при приведеному опорі теплопередачі $R = 0,291$ м²·К/Вт, товщина стін всього 200 мм залізобетону (мінімальна вимога – 3,5 м²·К/Вт). Для суміщеного покриття площею 1794,65 м² R дорівнює 0,611 м²·К/Вт при нормативному значенні 6,0 м²·К/Вт. Перекриття над неопалюваним підвалом (544,6 м²) має $R = 0,387$ м²·К/Вт при нормативі 4,0 м²·К/Вт. Площа світлопрозорих конструкцій становить 1476,237 м² при $R = 0,543$ м²·К/Вт (мінімально допустиме – 0,7 м²·К/Вт), площа зовнішніх дверей – 34,02 м² при $R = 0,560$ м²·К/Вт (норма – 0,6 м²·К/Вт). Отримані значення підтверджують, що більшість елементів оболонки формують підвищені трансмісійні втрати, що узгоджується з результатами досліджень щодо впливу конструктивних особливостей на тепловий баланс будівель схожої функціональної направленості [13, 2].

Інтегральні показники енергоефективності свідчать про перевищення нормативних орієнтирів: питома енергопотреба на опалення становить 75,02 кВт·год/м²·рік при мінімальній вимозі 38,49 кВт·год/м²·рік; питома енергоспоживання – 85,01 кВт·год/м²·рік; питома споживання первинної енергії – 437,66 кВт·год/м²·рік; питомі викиди парникових газів – 65,33 кг/м²·рік. Така ситуація характерна для громадських будівель, зведених за застарілими нормативами, що відзначено у вітчизняних і зарубіжних дослідженнях [1, 9].

Для кількісного аналізу втрат теплоти було застосовано методику ДСТУ 9190:2022 [19], згідно з якою у загальному випадку значення теплопередачі трансмісією, (що відображає безпосередній узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією до зовнішнього середовища; стаціонарний узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією до ґрунту; узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією через некондиціоновані об'єми, Вт/К; узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією до суміжних будівель, Вт/К.) визначається як:

$$H_{tr,adj} = b_{tr,x} \sum_i (U_i \cdot A_i) \quad (1)$$

де $H_{tr,adj}$ – коефіцієнт теплопередачі трансмісією, Вт/К;

U_i – приведений коефіцієнт теплопередачі i -го елемента теплоізоляційної оболонки будівлі, Вт/(м²·К);

A_i – площа i -го елемента теплоізоляційної оболонки будівлі виміряна за внутрішніми розмірами, включно з площею внутрішніх дверних та віконних укосів, m^2 ;

$b_{tr,x}$ – поправковий коефіцієнт згідно пункту 8.2.1.1 [19];

Узагальнений коефіцієнт теплопередачі вентиляцією для опалення:

$$H_{ve,adj,H} = p_a c_a (q_{ve,mn,H} b_{ve,H} + q_{inf,mn,H}) \quad (2)$$

де $p_a c_a$ – тепломісність одиниці об'єму повітря, 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, $m^3/\text{год}$;

$q_{inf,mn,H}$ – усереднена за часом витрата повітря для інфільтрації для опалення та для охолодження відповідно, $m^3/\text{год}$;

$b_{ve,H}$ – температурний поправковий коефіцієнт, що коригує коефіцієнт теплопередачі вентиляцією замість різниці температур у випадках, коли температура припливного повітря не дорівнює температурі зовнішнього середовища.

Енергопотреба для опалення обчислювалась відповідно за формулою:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \times Q_{H,gn} - Q_{ve,pre-heat} \quad (3)$$

$Q_{H,ht}$ – сумарна теплопередача в режимі опалення, $\text{Вт}\cdot\text{год}$;

$Q_{H,gn}$ – сумарні теплонадходження в режимі опалення, $\text{Вт}\cdot\text{год}$;

$\eta_{H,gn}$ – безрозмірний коефіцієнт використання надходжень;

$Q_{ve,pre-heat}$ – енергопотреба для центрального попереднього підігрівання вентиляційного повітря, $\text{Вт}\cdot\text{год}$.

Аналіз складових (1)–(3) показує, що найбільший внесок у формування високого значення $Q_{H,nd}$ роблять стіни та покриття, а також інфільтраційні втрати через світлопрозорі конструкції, що підтверджує значущість повітропроникності оболонки [7].

Відповідно до енергетичного сертифікату сформовано базовий перелік заходів термомодернізації: утеплення зовнішніх стін мінераловатними матами товщиною 200 мм ($\lambda \leq 0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, клас НГ); утеплення покриття шаром 300 мм ; утеплення перекриття над підвалом; герметизація стиків; заміна або модернізація світлопрозорих конструкцій; встановлення індивідуального теплового пункту з погодозалежним регулюванням та балансуванням системи опалення; застосування повітряних рекуператорів. Доцільність комплексного підходу підтверджується результатами досліджень щодо термомодернізації навчальних корпусів [6], [8] та системного впровадження енергоефективних рішень [3], [16].

З урахуванням сучасних наукових підходів доцільним є розширення переліку заходів: оптимізація вузлів монтажу вікон і мінімізація лінійних теплових містків [10], [15]; впровадження систем енергоменеджменту та моніторингу споживання [4], [16]; модернізація вузлів тепlopостачання відповідно до досвіду централізованих систем [11]; використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних систем [12]; орієнтація на принципи будівель із майже нульовим енергоспоживанням (NZEB) [14]; урахування підходів життєвого циклу при виборі інвестиційних рішень [5]. Системність та поетапність реалізації відповідає концепції сталого розвитку термомодернізації [1].

Таким чином, комплексне зниження складових $H_{tr,adj}$ та $H_{ve,adj,H}$ шляхом поєднання конструктивних та інженерних заходів є раціональною стратегією

зменшення енергопотребности будівлі корпусу №4, що узгоджується з нормативними вимогами [19], [20] та сучасними науковими підходами [1–17].

Отримані результати та виконаний аналіз створюють підґрунтя для формування узагальнених пропозицій щодо доцільності запропонованих рішень і визначення пріоритетності їх реалізації в умовах обмеженого фінансування та необхідності безперервної експлуатації навчальної будівлі. З урахуванням структури тепловтрат та розрахункових показників, першочерговими заходами доцільно визначити ті, що забезпечують найбільше зменшення коефіцієнта теплопередачі трансмісією при відносно помірних капіталовкладеннях і мінімальному втручанні у навчальний процес. До таких належать модернізація системи теплостачання із впровадженням індивідуального теплового пункту з погодозалежним регулюванням, гідравлічним балансуванням і встановленням регулювальної арматури на приладах опалення, а також заходи зі зменшення неконтрольованої інфільтрації через світлопрозорі конструкції та вузли примикань [6], [7], [16]. Зменшення кратності повітрообміну до нормативно обґрунтованого рівня дозволяє суттєво знизити складову $H_{ve,adj,H}$ у формулі (2), що безпосередньо впливає на зменшення річної енергопотребности $Q_{H,nd}$ за формулою (3) [19].

Наступним етапом доцільно реалізувати заходи, спрямовані на підвищення теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій із найбільшою площею та найменшим приведеним опором теплопередачі, зокрема утеплення зовнішніх стін і покриття до рівня нормативних вимог [20]. З огляду на площу стін (1605,115 м²) і покриття (1794,65 м²) їх модернізація забезпечує істотне зменшення складової $\sum(U_i \cdot A_i)$ у формулі (1), що підтверджує доцільність пріоритетності цих заходів у довгостроковій стратегії. При цьому необхідно передбачити комплексне опрацювання теплових містків, що відповідає сучасним рекомендаціям щодо реконструкції громадських будівель [17] та підвищення енергетичної надійності огорожувальних конструкцій [2].

З позиції середньо- та довгострокової перспективи доцільним є впровадження елементів енергоменеджменту з автоматизованим моніторингом споживання теплової енергії та аналізом режимів експлуатації приміщень, що дозволяє адаптувати теплове навантаження до реального графіка використання аудиторій і адміністративних приміщень [4], [8]. Такий підхід забезпечує додатковий ефект без суттєвих будівельних втручань і узгоджується з концепцією організаційно-технологічного підвищення надійності будівель [16]. Додатково можуть розглядатися рішення з інтеграції відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних систем для часткового покриття потреб у тепловій або електричній енергії [12], що сприятиме зменшенню питомого споживання первинної енергії та викидів парникових газів.

Сучасні дослідження свідчать, що застосування штучного інтелекту (ШІ) і цифрових моделей прогнозування дозволяє значно скоротити витрати на проведення ретрофіту і подальшого експлуатаційного моніторингу будівель. Наприклад, інструмент A14EF використовує машинне навчання для побудови моделей енергоспоживання та прогнозних сценаріїв модернізації, що дає змогу оптимально розподіляти фінансові ресурси, зменшувати невиправдані витрати на технічні рішення та прогнозувати вплив кожного заходу на загальні витрати проекту [21]. Такий підхід корисний при оцінці альтернативних стратегій термомодернізації корпусу №4, оскільки дозволяє уникнути “сліпого”

традиційного планування та зосередитися на найбільш ефективних інвестиціях із найкращою економічною віддачею.

Інтеграція smart-технологій та цифрових двійників у процес ретрофіту може ще більше знизити загальний кошторис. Дослідження з ретрофіту офісних будівель показують, що застосування IoT-рішень, автоматизованих систем керування енергоспоживанням і адаптивного регулювання кліматичних систем забезпечує суттєве скорочення монтажних та експлуатаційних витрат, оскільки ці системи дозволяють службам технічного обслуговування реагувати в режимі реального часу на зміни умов експлуатації та зменшувати перевитрати енергії [22]. Підхід smart-ретрофіту забезпечує не лише енергозбереження, але й здешевлення циклу модернізаційних робіт завдяки зниженню людських ресурсів та зменшенню обсягів традиційних будівельних втручань.

Ще один підхід — енергетичні сервісні компанії (ESCO) та моделі фінансування, які дозволяють реалізувати термомодернізацію без значних початкових вкладень за рахунок економії енергоресурсів у майбутньому [23]. ESCO фінансують модернізацію на підставі гарантованої економії (Energy Performance Contracting), що переносить частину ризиків із замовника на виконавця й стимулює впровадження рішень із найкоротшим терміном окупності. Такі організаційно-технологічні механізми можуть бути інтегровані в стратегії модернізації навчальних корпусів, забезпечуючи більш гнучкі фінансові рішення і зменшуючи граничну вартість проекту.

Нарешті, програми на зразок Energiesprong доводять, що використання завчасно виготовлених енергетичних оболонок та стандартних модулів дозволяє суттєво скоротити строки монтажу та витрати на матеріали й робочу силу, оскільки зменшується обсяг складних «тонких» будівельних операцій на місці. Такий підхід, запозичений із європейської практики, може бути адаптований і для українських реалій через кооперацію між виробниками будівельних панелей, проектними організаціями та підрядниками, що також впливає на зниження вартості термомодернізації без втрати її ефективності [24].

Світові організаційно-технологічні методики реконструкції та модернізації існуючих будівель ґрунтуються на сучасних міжнародних підходах до управління будівельними процесами. Зокрема, концепція Lean Construction, що сформувалася у США на основі принципів виробничої системи Toyota (Японія), орієнтована на мінімізацію втрат (простой, переробок, надлишкових запасів, неузгодженості між виконавцями). Її прикладний інструмент – Last Planner System (LPS) – забезпечує поетапне та надійне планування робіт, що особливо важливо при термомодернізації функціонуючих навчальних будівель без зупинки освітнього процесу [25, 26]. У контексті корпусу №4 це дозволяє скоротити накладні витрати, оптимізувати календарний графік і зменшити ризик перевищення кошторису.

Технологія BIM/VDC координації (США, Велика Британія) доповнює організаційні підходи цифровим моделюванням та інструментом автоматичного виявлення колізій (clash detection). За потреби для існуючих будівель застосовується підхід Scan-to-BIM, який дозволяє створити точну цифрову модель об'єкта перед модернізацією [27]. Це мінімізує переробки та помилки під час інтеграції нових інженерних систем, утеплення вузлів примикань та встановлення ГПП. Відповідно, знижується частка “непередбачених” витрат у кошторисі та підвищується прогнозованість бюджету.

Індустріалізований або модульний ретрофіт, що активно розвивається у Нідерландах у межах програми Energiesprong, передбачає перенесення значної частини робіт із майданчика на виробництво (offsite). Заводське виготовлення фасадних панелей із вбудованою теплоізоляцією та інженерними модулями скорочує строки монтажу, зменшує трудові витрати та забезпечує стабільну якість [28, 29]. Для навчальних корпусів це дозволяє мінімізувати перерви у функціонуванні будівлі та зменшити загальні витрати за рахунок стандартизації та серійності рішень.

Таблиця 1

Таблиця порівняння організаційно-технологічних методик теоретичного зменшення витрат при термомодернізації корпусу №4

Методика (орг.-техн.)	Суть підходу	Використання для корпусу №4	Механізм здешевлення кошторису	Теоретичний економічний ефект для проєкту (діапазон)	Опорні міжнародні джерела
1	2	3	4	5	6
Lean Construction / Last Planner System (LPS)	Планування робіт “від кінця”, стабілізація потоків, зменшення простоїв, переробок і втрат	Фасадне утеплення + покрівля + роботи в навчальному графіку (поетапність, “вікна” робіт)	Менше простоїв бригад, менше переробок, краща логістика матеріалів, коротша тривалість → менші накладні	від 5 до 15% від вартості буд.-монтажних робіт (БМР)	Lean Construction Institute про IPD/Lean (зменшення “waste”) [25]; приклад ефектів Lean (як орієнтир) [26]
BIM/VDC координація + clash detection (Scan-to-BIM за потреби)	Рання координація систем/вузлів, виявлення колізій до виходу на майданчик	Вузли примикань утеплення, інженерні рішення (ІТП, вентиляція/рекуперація), проходки, балансування	Зменшення переробок/колізій, менше змін на майданчику, менше “непередбачених” витрат	від 3 до 10% загального бюджету, а по частині інженерії часто більше (через зниження переробок)	Springer: зниження rework 40–50% та ін. показники ефекту BIM [27]
Індустріалізований/ модульний ретрофіт (offsite, панелі, “Energiesprong-логіка”)	Максимум робіт — на заводі; на об’єкті — швидкий монтаж панелей фасаду/покрівлі, “енергомодулі”	Фасад + покрівля (особливо коли треба швидко і без довгої зупинки навчання)	Менше людино-годин на майданчику, коротший строк монтажу, нижчі ризики затримок, менше відходів	від 10 до 30% БМР (і/або скорочення строків; ефект сильніше у великих площах фасаду/покрівлі)	Energiesprong UK: зростання продуктивності, зниження відходів, типові скорочення строків/вартості [28]; огляд про скорочення часу й здешевлення [29]

Висновки. Проведений аналіз геометричних, теплотехнічних та енергетичних характеристик будівлі корпусу №4 НУ «Запорізька політехніка» засвідчив суттєву невідповідність показників теплозахисту огорожувальних конструкцій чинним нормативним вимогам [20]. Приведені опори теплопередачі зовнішніх стін, покриття та перекриття над підвалом є значно нижчими за мінімально допустимі значення, що формує підвищені трансмісійні втрати та обумовлює перевищення

питомої енергопотреби на опалення (75,02 кВт·год/м²·рік) над нормативним рівнем (38,49 кВт·год/м²·рік). Визначено, що основний внесок у річну енергопотребу здійснюють стіни, покриття та інфільтраційні втрати через світлопрозорі конструкції.

Розрахункове обґрунтування за методикою ДСТУ 9190:2022 [19] показало, що зменшення коефіцієнтів теплопередачі трансмісією та вентиляцією шляхом утеплення оболонки будівлі, зниження повітропроникності та модернізації системи теплопостачання дозволяє суттєво скоротити річну енергопотребу. Встановлено, що ізольоване впровадження окремих заходів забезпечує обмежений ефект, тоді як комплексна термомодернізація забезпечує системне зменшення складових, що безпосередньо впливають на зниження $Q_{H,nd}$.

Обґрунтовано доцільність поетапної реалізації заходів термомодернізації з урахуванням пріоритетності модернізації інженерних систем та зменшення інфільтраційних втрат на початковому етапі, а також подальшого підвищення теплозахисних характеристик огорожувальних конструкцій. Такий підхід відповідає сучасним науковим рекомендаціям щодо реконструкції громадських будівель [6], [17] та концепції сталого розвитку термомодернізації [1], [5].

Дослідження також показало, що сучасні міжнародні підходи до організаційно-технологічного забезпечення ретрофіту можуть істотно впливати на економічну ефективність термомодернізації. Використання цифрових моделей прогнозування та алгоритмів штучного інтелекту (зокрема AI4EF) забезпечує більш обґрунтований вибір сценаріїв модернізації та оптимальний розподіл інвестиційних ресурсів [21]. Інтеграція smart-технологій, систем моніторингу та цифрових двійників дозволяє скорочувати експлуатаційні витрати й підвищувати керованість процесів енергоспоживання [22]. Індустріалізовані та модульні підходи (Energiesprong), а також застосування Lean Construction і BIM/VDC-координації забезпечують скорочення строків виконання робіт, зменшення переробок і накладних витрат [25]–[29]. У сукупності зазначені інструменти формують підґрунтя для оптимізації кошторису термомодернізації корпусу №4 та підтверджують доцільність поєднання технічних заходів із сучасними організаційно-технологічними методиками з метою досягнення максимальної енергетичної та економічної ефективності.

Список літератури:

1. Maksymov A., Kyrylov I., Chynchyk A. Thermomodernization of the housing fund on the basis of sustainable development: stages and directions. *Building Production*, 2025, 78, 94–102. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.78.94-102>
2. Пашинський В.А., Настоящий В.А., Пашинський М.В., Богатирьов Д.В. Вплив підвищення нормативних вимог на рівень теплової надійності та втрати тепла через стіни й покриття житлових і громадських будівель. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 2024, 9(40), Ч. I, 64–74. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.64-74](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.64-74)
3. Maksymov A., Lysytsia N., Podoyntsyn S. Institutional development of the thermomaterization market in the focus of main stakeholders. *Building Production*, 2024, 77, 18–25. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.77.18-25>
4. Grigorovitch M., Vlad G., Yulzary S., Gal E. Advancing Energy Efficiency in Educational Buildings: A Case Study on Sustainable Retrofitting and Management Strategies. *Applied Sciences*, 2025, 5(20), Article 10867. <https://doi.org/10.3390/app152010867>

5. Беленкова О., Коваль О. Цільові пріоритети та формалізовані показники реалізації концепції життєвого циклу об'єктів будівництва під час проектного фінансування програм відновлення житла. *Будівельне виробництво*, 2025, 78, 117-124. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.78.117-124>

6. Череднікова О., Гузик Д., Мілейковський В., Харченко А., Соснін А., Чередніков М. Термомодернізація та удосконалення інженерних систем корпусу Ф Національного університету "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка". *Вентиляція, освітлення та теплозапостачання*, 2025, 52, 32-46. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.52.32-46>

7. Бондаренко А., Юрченко Є., Коваль О., Коваль А. Обґрунтування методу визначення повітропроникності будівель. *Вентиляція, освітлення та теплозапостачання*, 2024, 48, 40-49. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.48.40-49>

8. Кізеєв М., Новицька О., Кравченко Н., Проценко С. Аналіз заходів з підвищення енергоефективності навчальних корпусів національного університету водного господарства та природокористування. *Вентиляція, освітлення та теплозапостачання*, 2024, 46, 77-88. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.46.77-88>

9. Гасімов А.Ф., Мамедов Н.Я., Акбарова С.М., Фейзієва Г. Г. Проблеми енергоефективності в будівлях: аналіз світового досвіду. *Вентиляція, освітлення та теплозапостачання*, 2023, 44, 30-38. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.44.30-38>

10. Клімова І., Мойсеєнко В. Аналіз відповідності вікон новітнім вимогам з енергоефективності. *Вентиляція, освітлення та теплозапостачання*, 2022, 43, 27-30. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.43.27-30>

11. Гламаздін П., Вітковський В., Рогожин Д., Карпюк М., Габа К. Підвищення ефективності систем централізованого тепло-постачання за рахунок оптимізації служби підготовки води. Досвід КП «Житомиртеплоенерго». *Вентиляція, освітлення та теплозапостачання*, 2022, 43, 50-64. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.43.50-64>

12. Венгрин І., Шаповал С., Желих В., Козак Х., Гулай Б. Теплозабезпечення будівель екологічно чистими джерелами енергії із застосуванням сонячної енергії. *Вентиляція, освітлення та теплозапостачання*, 2022, 41, 18-23. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.41.18-23>

13. Басок Б., Давиденко Б., Новіков В.Г., Новицька М.П. Вплив архітектурних особливостей будівель на теплові втрати з їхніх фасадів. *Вентиляція, освітлення та теплозапостачання*, 2022, 40, 37-42. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.40.37-42>

14. Перегінєць І. Організація будівництва індивідуальних будинків стандарту NZEB за проектами повторного використання. *Містобудування та територіальне планування*, 2025, 90, 366-376. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.90.366-376>

15. Осипов О., Фірсов Д. Сучасні тенденції у застосуванні віконних систем з ПВХ та методів організації та виконання монтажу віконних конструкцій у будівництві. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2025, 55(5), 11-19. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(2\).11-19](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(2).11-19)

16. Полтавець М., Галушко Д. Енергоефективний напрямок організаційно-технологічного проектування в підвищенні надійності зведення будівель. *Шляхи*

підвищення ефективності будівництва, 2025, 55(2), 39–48.
[https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(2\).39-48](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(2).39-48)

17. Предун К., Гончар В., Кузьміч Я., Шепета М., Верченко В. Аналіз стану та методи реконструкції громадських будівель. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2024, 54(2), 50–61. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(2\).50-61](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).50-61)

18. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від 2023-03-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. 63 с.

19. ДСТУ 9190:2022. Теплоізоляція будівель. Методи розрахунку теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій. [Чинний від 2023-03-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 156 с.

20. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний від 2022-09-01]. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2021. 27 с.

21. Tzortzis A.M., Kormpakis G.s, Pelekis S., Michalitsi-Psarrou A., Karakolis E., Ntanos Ch., Askounis D. AI4EF: Artificial Intelligence for Energy Efficiency in the building sector. *SoftwareX*, 2025, Vol. 30, 102172. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102172>.

22. Azouz M., Elariane S. Towards energy efficiency: Retrofitting existing office buildings using smart technologies. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2023, 70, Article 327. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00327-0>

23. National Association of Energy Service Companies (NAESCO). (2017, January 15). What is an ESCO? URL: <http://www.naesco.org/what-is-an-esc>

24. Dall’O’ G. *Green planning for cities and communities: Novel incisive approaches to sustainability*. 2020. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41072-8>

25. Integrated Project Delivery (IPD). An Introduction to Integrated Project Delivery. URL: <https://leanconstruction.org/lean-topics/integrated-project-delivery-ipd/>

26. Harita H. Application of lean construction method in cost and time control of high-rise building projects in urban areas. *International Review of Civil Engineering and Construction Economics*, 2025, 2(1). <https://doi.org/10.70134/ircee.v2i1.326>

27. Das K., Khursheed S., Paul V.K. The impact of BIM on project time and cost: Insights from case studies. *Discover Civil Engineering*, 2025, 5, Article 25. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00200-2>

28. Offsite construction: One piece of the puzzle for scaling up retrofit. Energiesprong UK. URL: <https://www.energiesprong.uk/newspage/offsite-construction-one-piece-of-the-puzzle-for-scaling-up-retrofit>

29. Canadian take on Energiesprong. Passive House Accelerator. URL: <https://passivehouseaccelerator.com/articles/canadian-take-on-energiesprong>

Mykhailo KULIK, Anatoliy BOBRAKOV, Olga NESKORODOVA, Serhii BOLIUK
Analysis of the selection of possible solutions to reduce energy demand and costs of thermal modernization measures for building no. 4 of the national university “Zaporizhzhia Polytechnic”

The article presents an analysis of technical and organizational-technological solutions aimed at reducing the energy demand of the educational building No. 4 of Zaporizhzhia Polytechnic National University (64 Universytetska Street, Zaporizhzhia). The relevance of the study is обословед by the significant deviation of the actual thermal performance characteristics of the building envelope from the minimum requirements of

Ukrainian State Building Codes (DBN), as well as by the high integral energy consumption indicators typical of buildings constructed under outdated standards, as noted in both domestic and international research. The purpose of the study is to substantiate the rational selection of a set of thermal modernization measures based on a comparative analysis of their energy performance and organizational-economic feasibility, taking into account phased implementation without interrupting the educational process.

The initial building parameters were adopted according to the energy certification results and calculation materials: conditioned area – 6545.11 m², heated area – 5950.10 m², total volume – 24,114.97 m³, heated volume – 17,938.68 m³; the building was assigned energy efficiency class G. The thermal performance analysis of the building envelope revealed critically low values of reduced thermal resistance: for external walls (1605.115 m²) $R = 0.291 \text{ m}^2\text{-K/W}$ with a required value of 3.5 m²-K/W; for the combined roof (1794.65 m²) $R = 0.611 \text{ m}^2\text{-K/W}$ with a required value of 6.0 m²-K/W; for the slab above the unheated basement (544.6 m²) $R = 0.387 \text{ m}^2\text{-K/W}$ with a required value of 4.0 m²-K/W; for glazed structures (1476.237 m²) $R = 0.543 \text{ m}^2\text{-K/W}$ with a required value of 0.7 m²-K/W. The calculation of heat loss components and annual heating energy demand was performed in accordance with DSTU 9190:2022, distinguishing transmission and ventilation components, which made it possible to identify priority directions for energy demand reduction and justify the effectiveness of modernization packages. The following thermal modernization options were considered: façade insulation with 200 mm mineral wool, roof insulation of 300 mm, insulation of the slab above the basement, joint sealing and infiltration reduction, modernization of glazing systems, installation of an individual heating substation (IHS) with weather-compensated control and hydraulic balancing, and application of heat recovery systems. It was demonstrated that the greatest impact on reducing energy demand is achieved through comprehensive envelope modernization combined with engineering system upgrades and consumption management.

Additionally, the feasibility of applying modern organizational and technological methodologies to reduce cost risks and indirect expenses was substantiated, including Lean/LPS, BIM/VDC coordination with clash detection, and industrialized (modular) retrofit approaches. These methods increase schedule and budget predictability and support phased implementation of measures. The obtained results can be used in the development of thermal modernization programs for educational buildings, preparation of energy passports, and design solutions for the reconstruction of public buildings in line with sustainable development requirements.

Keywords: *thermal modernization; energy certification; heating energy demand; building envelope; infiltration; individual heating substation; heat recovery; DSTU 9190:2022; organizational and technological methodologies, BIM/VDC, Lean Construction.*

Дата надходження статті: 03.01.2026

Дата прийняття статті: 02.02.2026