

<https://doi.org/10.31891/2307-5740-2023-314-1-11>

УДК 620.9

Олексій БАБЕНКО

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2773-6571>

e-mail: oleksij_babenko@ukr.net

Дмитро СТЕПАНОВ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2806-3180>

e-mail: stepanovdv@ukr.net

Наталія СТЕПАНОВА

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4654-2062>

e-mail: stepanovand@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ДІЇ ЗАХОДІВ З ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ БУДІВЛІ З УРАХУВАННЯМ ІНВЕСТИЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ

В статті здійснено моделювання впливу комплексного застосування енергоощадних заходів на показники енергоефективності громадської цегляної будівлі. Під час моделювання враховано економічний фактор – капіталовкладення в заходи з енергозбереження. Подібні моделювання здійснюються під час проведення енергетичних аудитів різних типів будівель. Виконання енергетичних аудитів житлових та громадських будівель міста є, відповідно до Закону України «Про енергоефективність», вагомим ланкою політики енергозбереження України. Енергетичні аудити потрібні для а) розроблення енергетичного сертифікату, який необхідний для багатьох нових і діючих будівель відповідно до діючого законодавства; б) залучення коштів від фонду енергоефективності та інших фондів на потреби термомодернізації; в) отримання обґрунтованих показників, які дозволять власникам будівель приймати енергоефективні рішення. Звіт з енергоаудиту містить три етапи: етап отримання інформації, етап аналізу інформації і розроблення енергозберігаючих рекомендацій, етап техніко-економічного обґрунтування запропонованих рекомендацій з енергозбереження. На першому етапі енергоаудитори збирають вихідні дані про будівлі. Для діючих будівель часто характерною є відсутність утеплення непрозорих огорожувальних конструкцій, наявність світлопрозорих огорожувальних конструкцій, приведені опори теплопередач яких значно нижчі мінімально допустимих значень, застарілі джерела тепlopостачання. Під час другого етапу розробляються математичні моделі, які дозволяють отримати техніко-економічні показники заходів з енергозбереження. Третім етапом є обґрунтування оптимальних заходів, які повинні задовольняти технічним та економічним обмеженням. В роботі проаналізовано залежності загального показника питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні двоповерхової цегляної громадської будівлі за умови модернізації газового котла, а також утеплення цегляних фасадів будівлі пінополістирольними плитами різної товщини. При цьому проводився аналіз як окремого так і комплексного застосування вказаних заходів. Економічним показником, що встановлює обмеження в заходи з енергозбереження, було прийнято загальні капіталовкладення в термомодернізацію. В результаті моделювання встановлено, що для визначення оптимальних заходів з підвищення енергоефективності будівлі необхідно застосовувати оптимізаційні математичні апарати, які враховують існуючі обмеження і можуть бути інтегровані в математичні моделі, що розраховують базовий рівень енергоспоживання за дотримання нормативних параметрів експлуатації будівлі.

Ключові слова: капіталовкладення, термомодернізація будівлі, енергопотреба, енергоспоживання, термічний опір, коефіцієнт корисної дії котла.

Oleksii BABENKO, Dmytro STEPANOV, Natalia STEPANOVA

Vinnitsia National Technical University

SIMULATION OF COMPLEX EFFECTS OF THERMAL MODERNIZATION MEASURES OF THE BUILDING TAKING INTO ACCOUNT INVESTMENT LIMITATIONS

The article simulates the impact of the complex application of energy-saving measures on the energy efficiency indicators of a public brick building. During modeling, the economic factor – capital investment in energy saving measures – was taken into account. Similar simulations are carried out during energy audits of various types of buildings. Performing energy audits of residential and public buildings in the city is, in accordance with the Law of Ukraine "On Energy Efficiency", an important part of Ukraine's energy conservation policy. Energy audits are required for: a) development of an energy certificate, which is required for many new and existing buildings in accordance with current legislation; b) attraction of funds from the energy efficiency fund and other funds for the needs of thermal modernization; c) obtaining reasonable indicators that will allow building owners to make energy-efficient decisions. The energy audit report contains three stages: the stage of obtaining information, the stage of analyzing information and developing energy-saving recommendations, and the stage of technical and economic substantiation of the proposed energy-saving recommendations. At the first stage, energy auditors collect raw data about buildings. Existing buildings are often characterized by the lack of insulation of opaque enclosing structures, the presence of translucent enclosing structures, the reduced heat transfer supports of which are significantly lower than the minimum permissible values, and outdated sources of heat supply. During the second stage, mathematical models are developed that allow obtaining technical and economic indicators of energy saving measures. The third stage is the substantiation of optimal measures that must satisfy technical and economic constraints. The work analyzed the dependence of the general indicator of specific energy consumption during heating and cooling of a two-story brick public building under the condition of modernization of the gas boiler, as well as insulation of the brick facades of the building with polystyrene foam plates of different thicknesses. At the same time, an analysis of both individual and complex

application of the specified measures was carried out. General capital investment in thermal modernization was adopted as an economic indicator that sets limits on energy saving measures. As a result of the modeling, it was established that in order to determine the optimal measures to increase the energy efficiency of the building, it is necessary to use optimization mathematical devices that take into account the existing restrictions and can be integrated into mathematical models that calculate the basic level of energy consumption in compliance with the normative parameters of the building's operation.

Keywords: capital investment, thermal modernization of the building, energy consumption, energy consumption, thermal resistance, boiler efficiency.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Останнім часом різко зростають тарифи на паливо, теплову та електричну енергію. Тому особливої актуальності набувають питання впровадження енергоефективних технологій. Підвищення енергоефективності житлово-комунального сектору України дозволить скоротити витрати енергоресурсів в Україні на 20...30% [1].

Термомодернізація будівель включає цілий комплекс заходів із підвищення енергоефективності об'єкту будівництва, починаючи від проведення аудиту теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій та інженерних мереж, закінчуючи виконанням монтажних робіт по заміні теплотехнічного обладнання, світлопрозорих огорожень та утепленню зовнішніх стін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Серед дослідників, котрі займалися дослідженням енергоефективності житлових і громадських будівель, можна виділити наступних: Фаренюк Г.Г. [2], Тимофеев М.В. [3] та ін. В роботах провідних науковців цього напрямку досліджень наведена база для моделювання процесів, що відбуваються під час використання паливно-енергетичних ресурсів на об'єктах. На основі розробленої наукової бази сформована «Методика визначення енергетичної ефективності будівель» [4], яка побудована на ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [2]. Вказані джерела є основою для оцінки енергетичної ефективності будівель.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття

Згідно Закону «Про енергетичну ефективність будівель» [5] всі будівлі, за певними виключеннями (ст.2 Закону), підлягають енергетичній сертифікації – оцінці енергоефективності будівлі, відповідності її показників мінімальним вимогам, розробці рекомендацій щодо підвищення рівня енергетичної ефективності. Така оцінка виконується як на етапі проектування нової будівлі, так і для існуючих будівель з метою їх подальшої термомодернізації.

Основними показниками енергоефективності будівель, які нормуються, є термічні опори огорожувальних конструкцій [3], граничне значення питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні житлових та громадських будівель EP_p [6]. Крім того, оцінюється енергоспоживання систем вентиляції та гарячого водопостачання.

Рівень енергетичної ефективності будівлі визначається її класом. При новому будівництві та реконструкції із зміною функціонального призначення мінімальною вимогою є клас будівлі «С» і цьому класу відповідає питоме енергоспоживання при опаленні та охолодженні EP_p . При термомодернізації існуючих будівель мінімальна вимога щодо питомого енергоспоживання підвищена на 20%.

Враховуючи, що для досягнення потрібного рівня енергоефективності необхідно впровадити певну кількість енергоощадних заходів, кожен з яких вимагає певних інвестицій, стає актуальною задача визначення саме таких заходів, сукупне застосування яких дозволить підвищити енергоефективність до потрібного рівня за наявних у підприємства коштів.

Формулювання цілей статті

Мета даної роботи – аналіз сумісної дії енергоефективних заходів в рамках термомодернізації адміністративної будівлі в м. Вінниця.

Виклад основного матеріалу

Для аналізу взаємного впливу енергоефективних заходів термомодернізації обрана існуюча двоповерхова адміністративна будівля в м. Вінниця з загальною площею 691 м², з коефіцієнтом скління фасадів 0,11 і коефіцієнтом компактності 0,63. Розрахунки згідно методики визначення енергетичної ефективності будівель [4] показали, що термічні опори огорожувальних конструкцій виявились нижче мінімально допустимих значень [3] в 1,3...4,71 рази, а питоме енергоспоживання при опаленні та охолодженні такої будівлі на 88% перевищило гранично допустиме значення, встановлене в [6] і склало 73,2 кВт·год/м³, що відповідає класу будівлі «G».

Під час термомодернізації будівель актуальним є визначення оптимальних показників зниження використання енергоресурсів за наявності обмежень, якими можуть бути обсяг можливих капіталовкладень, термін окупності, показники, що характеризують клас енергоефективності [5].

Під час дослідження результату використання заходів енергозбереження спостерігається така

тенденція, що сума показників економії паливно-енергетичних ресурсів (економія теплової чи електричної енергії або газу) під час використання окремих заходів не збігається з показником економії енергії під час їх комплексного використання. Це вказує на нелінійний характер залежності вказаних показників.

Проведено математичне моделювання залежності питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні адміністративної будівлі, що досліджується, окремо від таких заходів: заміна діючого газового котла для системи опалення з сезонним коефіцієнтом корисної дії ($\eta_{H,gen}$) 86 % на конденсаційний котел з коефіцієнтом корисної дії 94%, а також утеплення стін будівлі мінераловатними плитами з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 0,045$ Вт/(м·К), товщиною 0,05; 0,1; 0,15 м. Під час моделювання розглянуто такі випадки: використання лише конденсаційного котла, а також використання такого котла в поєднанні з утепленням стін мінераловатними плитами товщиною від 0,05 до 0,15 м. Результати наведено на рис. 1.

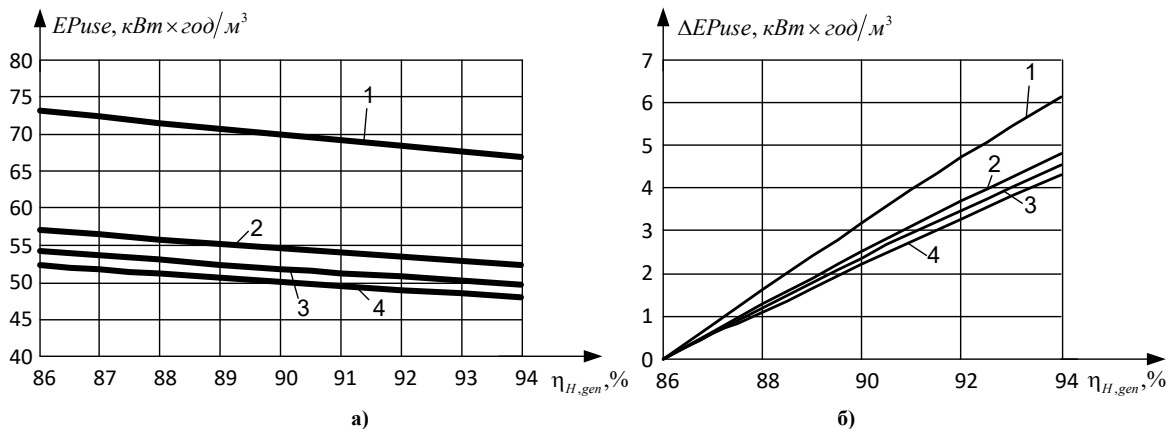


Рис. 1. Результати спільного та окремого застосування заходів з термомодернізації: заміни котла опалення та утеплення стін

На рис. 1а наведено залежність питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні EP_{use} за умови заміни котла опалення з $\eta_{H,gen} = 86\%$ на більш енергоефективний котел з показником $\eta_{H,gen}$, що збільшується до 94%. Крива 1 – випадок використання лише модернізації котла, криві 2, 3, 4 – модернізація котла опалення в поєднанні з заходом здійснення утеплення стін шаром мінеральної вати відповідно 0,05; 0,1 та 0,15 м. На рис. 1б наведено залежності зміни питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні. Криві 1–4 характеризують умови термомодернізації, аналогічно, як і на рис. 1а.

З рис. 1б видно, що у випадку заміни лише котлів на більш енергоефективні, питоме енергоспоживання зменшується на $6,2$ кВт \times год/ m^2 . За умови використання більш енергоефективних котлів і утеплення стін мінеральною ватою, товщиною від 0,05 до 0,15 м., криві зміни питомого енергоспоживання стають пологішими і зниження питомого енергоспоживання досягає 4,8 (крива 2), 4,6 (крива 3) та 4,3 (крива 4).

Очевидно, що, не зважаючи на більш пологий характер кривої зміни питомого енергоспоживання за умови комплексного використання декількох енергозберігаючих заходів, абсолютне значення економії буде більше в порівнянні з випадком застосування лише окремих заходів. Однак, в реальних умовах експлуатації об'єктів, можуть бути обмеження по можливості впровадження заходів з термомодернізації, зокрема можливості капіталовкладень. В такому випадку пропонується застосувати оптимізаційні математичні методи, які, враховуючи обмеження, дозволять отримати оптимальне співвідношення у застосуванні різних заходів. Такими методами можуть бути, наприклад, метод узагальненого приведенного градієнту, що використовується для нелінійних задач, симплекс-метод, що застосовується для вирішення лінійних задач або інші методи.

В задачі, що розглядаємо спостерігається лінійна залежність питомого енергоспоживання. Нехай обмеженням по термомодернізації є можливість фінансових капіталовкладень в термомодернізацію 1 млн грн. Вартість заміни котла на більш енергоефективний (з $\eta_{H,gen} = 94\%$) складає 300 тис. грн. Використовуючи засіб електронних таблиць Excel «Пошук рішень», встановивши опцію «застосування симплекс методу» і обмеження наявних коштів 700 тис. грн., отримано оптимальний результат по утепленню стін: застосування мінераловатної плити, товщиною 12 см. Враховуючи, що є практична можливість використання товщини утеплювача 10 або 15 см, власником будівлі приймається остаточне рішення. Рішення повинно базуватись як на фінансових можливостях, так і на вимогах закону України про енергоефективність, про перелік будівель, які підлягають обов'язковій сертифікації і наказу [5], який регламентує мінімальні вимоги до енергоефективності будівель.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Характер зниження питомого енерговикористання будівлями змінюється залежно від заходу, а також комплексного застосування останніх.

Для визначення оптимального поєднання різних заходів з врахуванням наявних обмежень і для досягнення вимог діючого законодавства щодо показників енергоефективності, доцільно застосовувати оптимізаційні математичні апарати, що дозволяють вирішувати лінійні задачі.

Література

1. Енергоефективність в ЖКГ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://energy-efficiency.in.ua/energoeffektivnost-v-zhkh/>
2. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні : ДСТУ Б А.2.2-12:2015. — [Чинний від 2016-01-01]. — К. : Мінрегіон України, 2015. — 140 с.
3. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель : ДБН В.2.6-31:2021. — [Чинний від 2022-09-01]. — К. : Мінрегіон України, 2022. — 23 с.
4. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель : Наказ Мінрегіону України № 169 від 11.07.2018 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#Text>
5. Про енергетичну ефективність будівел : Закон України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>.
6. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель : Наказ Міністерства розвитку громад та територій України № 260 від 27.10.2020 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20#top>

References

1. Enerhoefektyvnist v ZhKH [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://energy-efficiency.in.ua/energoeffektivnost-v-zhkh/>
2. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvittlenni ta haryachomu vodopostachanni : DSTU B A.2.2-12:2015. — [Chynnyi vid 2016-01-01]. — K. : Minrehion Ukrainy, 2015. — 140 s.
3. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel : DBN V.2.6-31:2021. — [Chynnyi vid 2022-09-01]. — K. : Minrehion Ukrainy, 2022. — 23 s.
4. Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel : Nakaz Minrehionu Ukrainy № 169 vid 11.07.2018 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#Text>
5. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel : Zakon Ukrainy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>.
6. Pro zatverdzhennia Minimalnykh vymoh do enerhetychnoi efektyvnosti budivel : Nakaz Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy № 260 vid 27.10.2020 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20#top>