

МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БАГАТОКВАРТИРНОЇ БУДІВЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ

Підвищення енергоефективності будівельного фонду є стратегічним завданням для України, а для залучення фінансування на комплексні проекти термомодернізації потрібно проводити енергетичний аудит та складати енергетичний сертифікат для житлових та багатоквартирних будівель. Енергоаудитори в Україні зазвичай розробляють власні моделі для проведення розрахунків, проте існують програмні продукти, що дозволяють виконувати моделювання енергоспоживання будівель з урахуванням особливостей експлуатації, характеристик огорожень та інженерних систем. Вивчення їх можливостей і порівняльний аналіз є актуальною задачею.

Метою роботи є огляд можливостей програмних продуктів для розрахунків питомого енергоспоживання на різні потреби і класу енергоефективності, а також розробки енергетичного сертифікату з виконанням порівняльного аналізу на прикладі житлового багатоквартирного будинку. Методи дослідження: аналітичні методи, метод порівняльного і структурного аналізу, техніко-економічні розрахунки з використанням програмного забезпечення E-Аудит, Auditor OZC, MS Excel та ін.

Ключові слова: багатоквартирні будинки, моделювання енергоспоживання, енергоефективність, термомодернізація.

Вступ

Питання підвищення енергоефективності будівельного фонду в Україні є особливо важливим через застарілий стан інженерних комунікацій в будівлях і значне енергоспоживання, Теплотехнічні характеристики огорожень в будівельному фонді нижче за встановлені будівельні норми [1], а інженерні мережі мають низький клас енергоефективності [2]. Енергетичну сертифікацію за національною методикою розрахунку [3] було впроваджено із введенням в дію Закону України «Про енергоефективність будівель» [4]. При визначенні класу енергоефективності будівлі за діючими вимогами враховують відхилення розрахункових значень енергоспоживання за методикою [3] від граничних показників [5]. Будівля є складною енергосистемою, для аналізу показників енергоспоживання доцільним є застосування енергетичного моделювання [6] для вибору технічних рішень під час реалізації комплексних проектів термомодернізації. Застосування енергоаудиторами програмних продуктів сприяє автоматизації проведення розрахунків енергоспоживання до та після впровадження заходів з енергозбереження, розробці енергетичного сертифікату та прискоренню процесів впровадження комплексних проектів термомодернізації.

Метою даного дослідження є проведення енергетичного аудиту багатоквартирної будівлі та розробка рекомендацій для впровадження заходів з енергозбереження з використанням спеціалізованих програмних продуктів. Дослідження проводилося в рамках виконання магістерської дисертації [7-10].

Відповідно до мети роботи були поставлені такі завдання:

- вивчити можливості програмних продуктів для моделювання енергетичних характеристик;
- провести енергетичне обстеження будівлі;
- розробити математичну модель для розрахунку питомого енергоспоживання та класу енергоефективності за національною методикою розрахунку;
- обчислити енергоспоживання з використанням спеціалізованих програмних продуктів з розробкою енергосертифікату;
- обґрунтувати заходи з підвищення енергоефективності для будівлі із визначенням енергетичного та економічного ефекту.

Матеріал і результати досліджень

Огляд програмних продуктів для моделювання енергетичних характеристик будівель

Розглянемо можливості різного програмного забезпечення для моделювання енергетичних характеристик будівель.

1) Retscreen – це безкоштовна програма, розроблена урядом Канади, що використовується для оцінки енергетичної ефективності будівель, а також аналізу проектів енергопостачання на базі

традиційних і відновлюваних джерел енергії. Основою програми є Microsoft Excel з вбудованими макросами, які дозволяють після введення вхідних даних отримувати фінансову оцінку проектів. Програма не дозволяє створювати 3D моделі. Характеристики огорожень можна задавати як пошарово, так і за допомогою приведенного опору теплопередачі. Основні можливості програми: аналіз енергоспоживання будівель з використанням кліматичних даних NASA, розрахунок різних варіантів термомодернізації будівель із фінансовим аналізом. Недоліком використання даного програмного продукту є відсутність можливості проведення обчислень за національною методикою розрахунку [3] і створення енергетичного сертифікату відповідно до вимог законодавства [4, 5].

2) DesignBuilder - потужний інструмент для енергетичного моделювання будівель, заснований на платформі EnergyPlus. Програма дозволяє моделювати сценарії енергоспоживання будівлі, враховуючи режим експлуатації будівель, кліматичні параметри, характеристики огорожень, повітрообмін, періодичність опалення та охолодження, а також характеристики інженерних систем (наприклад, наявність рекуперації). Серед функцій програми: створення 3D моделі будівлі з зонуванням приміщень; моделювання інженерних систем будівлі; можливість деталізованого погодинного розрахунку, урахування впливу нетрадиційних і відновлювальних джерел на енергоспоживання в будівлі; можливість створювати звіти з розподілом енергоспоживання за ресурсами (наприклад, газ, електроенергія і централізоване тепlopостачання). Існують певні відмінності щодо розрахунків в даному програмному продукті, які потрібно враховувати (зокрема, площа для визначення питомих показників обирається за зовнішніми обмірами, а в Україні – за внутрішніми). Дана програма також не дозволяє визначати енергоспоживання за національною методикою [4], також немає можливості створити енергосертифікат будівлі.

3) Auditor OZC - програма, створена для розрахунків теплової потужності системи опалення за ДСТУ EN 12831-1 [11] та питомого енергоспоживання. Програма надає можливість створення 3D моделі будівлі з моделюванням енергетичних характеристик з урахуванням різних зон. Можлива інтеграція з іншими програмами через експорт даних (наприклад, розрахунок тепловтрат приміщень є вихідною інформацією для проєктування системи опалення будівель та вибору опалювальних приладів для окремих приміщень з бази обладнання). Характеристики шарів огорожень можна обирати з наявної довідкової бази, що відповідає також [12], або задавати вручну; є можливість врахування теплопровідних включень огорожувальних конструкцій.

4) E-Audit – програмний продукт [13], що є сучасним інструментом для проведення енергетичного аудиту будівель і розроблена спеціально для автоматизації процесу розрахунку показників енергетичної ефективності, враховуючи діючі нормативи та стандарти [3, 14, 15]. E-Audit дозволяє оцінити енергетичні потреби для опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання для базового сценарію та з урахуванням заходів з енергозбереження. Програма дозволяє вводити детальні характеристики будівлі, включаючи матеріали огорожувальних конструкцій, геометричні параметри, а також інформацію про кліматичні умови та режими експлуатації. На основі цих даних програма проводить розрахунок тепловтрат, визначає обсяги енергетичних потреб, енергоспоживання, первинної енергії та викидів CO₂ і формує звіт з детальним описом результатів [13]. E-Audit також має можливість генерувати енергетичні сертифікати, що значно спрощує процес сертифікації будівель [14,15]. Отримані результати можуть бути використані як для оцінки поточної енергоефективності будівлі, так і для планування заходів з її покращення. Використання програми дозволяє мінімізувати можливі людські помилки, які можуть виникати при ручних розрахунках, забезпечуючи високу точність отриманих даних. Програмний продукт розроблено Асоціацією енергоаудиторів і є безкоштовним, але для роботи потрібно ввести діючий сертифікат кваліфікованого енергетичного аудитора. Для будівлі можна створювати декілька сценаріїв роботи (по замовчуванню - базовий сценарій та після впровадження заходів). Таким чином, програмний продукт «E-Аудит» дозволяє виконувати розрахунки відповідно до діючої методики [3] і є перспективним інструментом для проведення енергетичних аудитів і створення енергосертифікатів, тому його і обрано для проведення моделювання в рамках даного дослідження.

Послідовність проведення досліджень

Дослідження виконувалося в декілька етапів: енергообстеження, в тому числі за допомогою приладового забезпечення, аналіз даних і аналітичні розрахунки, моделювання. Проведено розрахунки за розробленою моделлю в середовищі EXEL за національною методикою розрахунку енергоспоживання будівель. Розроблено пакет енергозберігаючих заходів. Створено модель в програмному продукті «E-Аудит» до та після впровадження заходів. Також для даної будівлі було проведено розрахунки оболонки в Auditor OZC та виконано розрахунки теплової потужності та енергопотреби на опалення (існуючий стан та після термомодернізації). Здійснено виконано порівняльний аналіз результатів моделювання.

Енергетичне обстеження об'єкту досліджень

Об'єктом дослідження є 9-ти поверховий житловий будинок, розташований в м. Буча, Київської області. Введений в експлуатацію у 2009 році, будинок відповідав тодішнім вимогам до житлових об'єктів, однак сучасні норми висувають додаткові вимоги щодо енергетичної ефективності, які наразі не виконуються. В будівлі до початку військової агресії рф проживало близько 1000 мешканців, на даний момент – близько

600 осіб. Об'єкт побудовано з П-подібною компоновкою в плані (див. рис.1) за індивідуальним проектом, з 5-ма парадними, даховою газовою котельнею і неопалювальним підвалом та «теплим» горищем. Початок та кінець опалювального сезону кожного року змінний, адже це питання вирішують мешканці на загальних зборах ОСББ. На балансі будівлі є власна ГРП та трансформаторна підстанція [7,8]. Зовнішні стіни будівлі із силікатної цегли, що утеплена плитами Rockwool товщиною 5 см. Вікна двокамерні, застелення балконів – однокамерне. На цокольній частині розташовані приямки із одинарним вікном. Характеристики будівлі наведено в табл. 1, характеристики системи опалення – в табл.2.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд основного фасаду будівлі (а) та план забудови (б) [7,8].

Таблиця 1 – Основні характеристики будівлі

Найменування	Показник
Загальна площа	22 687,2 м ²
Опалювана площа	21 050,3 м ²
Опалювальний об'єм	63 673,2 м ³
Коефіцієнт скління фасаду	0,201
Показник компактності будівлі	0,24 м ⁻¹

Таблиця 2 – Характеристика трубопроводів системи опалення

Параметр	Значення
Тип системи опалення	Двотрубна, з супутнім рухом теплоносія
Температурний графік	90/70°C
Подавальні трубопроводи	Сталеві, утеплені, прокладені по горищу
Зворотні трубопроводи	Сталеві, утеплені, прокладені по підвалу
Трубопроводи в квартирах	Поліпропіленові, не утеплені
Наявність балансувальних кранів	Відсутнє

Енергетичне обстеження будівлі показало, що вона має типові проблеми для подібних об'єктів. За останній період повстало питання живлення будівлі (зокрема обладнання дахової котельні) в години масових відключень від електромережі. Обмежений доступ до ресурсів ускладнили життєдіяльність мешканців, це негативно вплинуло на загальний рівень комфорту і безпеки. Будівля має значний потенціал для впровадження заходів з енергозбереження. Мешканці будівлі, в якій створено ОСББ, є активними і позитивно налаштовані на те, щоб брати участь у різних програмах підтримки впровадження енергоефективних заходів. Поліпшення енергоефективності, ізоляції та впровадження автоматизованих систем контролю споживання енергії можуть суттєво знизити витрати на енергоресурси, покращити умови проживання та підвищити стійкість будівлі в умовах несприятливих зовнішніх факторів.

Розрахунки енергетичних характеристик будівлі до та після термомодернізації

Для визначення питомих показників енергоспоживання за методикою було сформовано розрахункову модель у програмному середовищі MS Excel. Для оцінки енергетичної ефективності будівлі і розробки енергетичних сертифікатів згідно до [4] використовується ДСТУ 9190:2022 [3] та методика [14]. Методика обчислень враховує: зовнішні кліматичні умови і умови внутрішнього мікроклімату, конструктивні особливості огорожень, умови експлуатації і охолопне аналіз тепловтрат через огорожувальні конструкції, вентиляцію, інфільтрацію повітря, теплові надходження від зовнішніх і внутрішніх джерел, додаткові витрати на попередній підігрів та охолодження; враховує характеристики інженерних системах та ефективність роботи генеруючого обладнання. Основні показники енергетичних

втрат будівлі визначаються на основі теплопередачі непрозорих (стіни, дах, підлога) та прозорих (вікна, балконні двері) огорожень.

Геометричні характеристики, розміри і параметри інженерних мереж, характеристики обладнання уточнювалися під час енергетичного обстеження, кліматичні параметри для здійснення розрахунків обиралися зі стандарту [2]. Узагальнені коефіцієнти теплопередачі трансмісією H_D , H_U визначалися за вищенаведеною методикою, характеристики матеріалів обрано із [12].

Приведені опори теплопередачі існуючих огорожень, обчислені за методикою [12] не відповідають нормативним вимогам [1] і становлять:

- зовнішні стіни $R_{\Sigma \text{прі}}=2,256$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт (склад стіни: цегла силікатна $\lambda=0,87$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$), мінеральна вата $\lambda=0,055$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$), гіпсокартон $\lambda=0,21$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$)),

- горищне перекриття $R_{\Sigma \text{прі}}=1,071$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт (склад конструкції: стяжка $\lambda=0,93$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$), залізобетон $\lambda=2,04$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$), керамзит ($\lambda=0,19$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$)));

- перекриття над підвалом $R_{\Sigma \text{прі}}=0,717$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт (залізобетон $\lambda=2,04$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$), керамзит $\lambda=0,19$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$), стяжка $\lambda=0,93$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$), плитка $\lambda=0,51$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$));

- перекриття над проїздами $R_{\Sigma \text{прі}}=2,883$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт (пінопласт $\lambda=0,04$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$), залізобетон $\lambda=2,04$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$), стяжка $\lambda=0,93$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$), плитка $\lambda=0,51$ Вт/($\text{м} \cdot \text{К}$)).

Приведений опір теплопередачі вікон обчислено з урахуванням заскленої частини та частки обрамлення. Для основного типу вікон ця величина становить близько $R_{\Sigma \text{прі}}=0,5$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт;

Опір теплопередачі вхідних дверей в парадні $R_{\Sigma \text{прі}}=0,33$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт (тип дверей - метал утеплений, утеплювач тонкий); технічних дверей $R_{\Sigma \text{прі}}=0,4$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт.

Режим експлуатації будівлі: графік опалення – 168 год/тиждень, графік охолодження – 112 год/тиждень; розрахункова внутрішня температура на опалення і охолодження складає відповідно 20оС та 26 оС. Кратність повітрообміну за рахунок інфільтрації для природної вентиляції $n_{\text{інф}}=0,56$ год⁻¹ за [2] при висоті приміщень 2,7 м. Для кожного місяця обчислювалися значення енергопотреби для опалення та охолодження. В табл. 3 наведено значення питомого енергоспоживання та викидів CO₂ [8].

Питома енергопотреба на опалення та охолодження – 63,59 кВт·год/м². Питоме енергоспоживання на потреби опалення та охолодження становить 98,08 кВт·год/м², встановлені мінімальні вимоги при цьому – 85 кВт·год/м² [5]. Клас енергоефективності: Д [5,14].

Таблиця 3 – Розрахунки питомого енергоспоживання (за математичною моделлю) [8]

№	Найменування показника	Одиниця вимірювання	Значення показника
1	Питома енергопотреба на опалення, охолодження, гаряче водопостачання	кВт·год/м ²	99,97
2	Питоме енергоспоживання опалення	кВт·год/м ²	96,72
3	Питоме енергоспоживання охолодження	кВт·год/м ²	1,36
4	Питоме енергоспоживання ГВП	кВт·год/м ²	36,38
5	Питоме енергоспоживання освітлення	кВт·год/м ²	9,75
7	Питоме споживання первинної енергії	кВт·год/м ²	225,12
8	Питомі викиди парникових газів	кг/м ²	41,2

Діаграма значень річного енергоспоживання існуючої будівлі наведена на рис. 2.

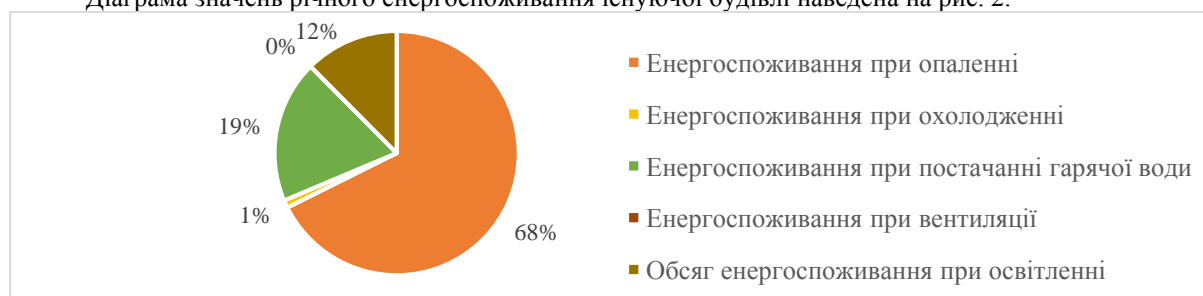


Рисунок 2 – Діаграма річного енергоспоживання існуючої будівлі

Пропозиції для підвищення енергоефективності будівлі:

1) Модернізація вхідних дверей та встановлення тамбурів

Заходи включають:

- заміну старих дверей під'їздів (5 одиниць по 2,7 м² кожна) на утеплені металеві двері з внутрішнім шаром ізоляції, наприклад, мінеральною ватою товщиною не менше 50 мм;
- встановлення 4 тамбурів з енергоефективними дверима;
- заміну внутрішніх дверей тамбурів.

Усі двері будуть оснащені доводчиками для покращення герметичності.

Мінімальний опір теплопередачі нових дверей має складати $0,7 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ відповідно до [1].

2) Модернізація системи освітлення у місцях загального користування

У межах цього заходу планується заміна 288 існуючих світильників потужністю 8 Вт на кожному поверсі на енергоефективні світлодіодні світильники потужністю 12 Вт, обладнані датчиками руху з радіусом дії понад 8 метрів. Це забезпечить оптимальне освітлення і зменшить тривалість роботи освітлювальних приладів, що позитивно позначиться на споживанні електроенергії.

3) Утеплення фасадів і цоколя будівлі

Для досягнення цього стандарту пропонується утеплити фасади (4944 м^2) мінеральною ватою товщиною 120 мм з коефіцієнтом теплопровідності до $0,041 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ і густиною $120\text{--}160 \text{ кг}/\text{м}^3$. Крім фасадів, планується також утеплити цоколь (329 м^2), що дозволить зменшити тепловтрати, підвищити міцність конструкції й продовжити її експлуатаційний термін. Для цоколю рекомендується використовувати плити з піноскла товщиною 100 мм із коефіцієнтом теплопровідності до $0,052 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ та густиною $120\text{--}150 \text{ кг}/\text{м}^3$. При утепленні фасадів і заміні вікон необхідно передбачити також оформлення зовнішніх відкосів і оздоблення стін.

4) Заміна вікон у місцях загального користування

Передбачається заміна 85 існуючих вікон (загальна площа $179,9 \text{ м}^2$) у місцях загального користування енергоефективними металопластиковими вікнами. Рекомендації до нових вікон: використання профілю з 5 або 6 камерами; двокамерні склопакети з м'яким енергозберігаючим покриттям; наповнення камер газами, такими як криптон (Kr) або аргон (Ar). Опір теплопередачі має бути не нижче $0,9 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, відповідно до вимог [1].

5) Утеплення перекриття над неопалюваним підвалом

Передбачається утеплення 2131 м^2 стелі підвального приміщення мінватою густиною $140 \text{ кг}/\text{м}^3$ і товщиною 160 мм. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу $0,037 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ в умовах експлуатації Б. Опір теплопередачі має бути не менше $5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, відповідно до вимог [1]. Для забезпечення відповідності нормам необхідно використовувати плити, які відповідають ДСТУ Б В.2.7-167:2008 і мають відповідні сертифікати та санітарні висновки.

6) Утеплення горищного перекриття

Передбачено утеплення 2210 м^2 горищного перекриття мінеральною ватою товщиною 180 мм з густиною не менше $45 \text{ кг}/\text{м}^3$ та теплопровідністю до $0,037 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ для досягнення нормативного опору теплопередачі не менше $6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ відповідно до [1]. Мінераловатні плити слід укладати на очищену поверхню перекриття. Для захисту утеплювача від вологи потрібно встановити шар пароізоляції з внутрішнього боку та гідроізоляційний шар із зовнішнього боку для захисту від атмосферних опадів. Перед початком робіт необхідно провести технічне обстеження стану гідроізоляції покрівлі над горищем/

7) Гідравлічне балансування системи опалення

Планується встановлення автоматичних балансувальних клапанів, які регулюють перепад тиску в системі. Зокрема, передбачено використання клапанів Danfoss ASV-P на зворотному трубопроводі разом із запірним клапаном ASV-M на подаючому трубопроводі. Ці клапани стабілізують перепад тиску в системах зі змінною витратою теплоносія, що допоможе досягти рівномірного розподілу тепла. Передбачається встановлення автоматичних регуляторів перепаду тиску на 76 стояків системи опалення.

8) Встановлення терморегуляторів на радіатори та розподільвачів теплової енергії

Для ефективного впровадження заходу потрібно попередньо виконати гідравлічне балансування системи опалення для рівномірного розподілу теплоносія. Передбачено встановлення 679 розподільвачів тепла, термостатичних клапанів і радіаторних терморегуляторів у будівлі. Термостатичні клапани та регулятори на радіаторах дозволяють підтримувати оптимальний температурний режим і уникати перегріву приміщень.

9) Встановлення сонячних панелей на дах будівлі

В рамках реалізації заходу пропонується встановити сонячну електростанцію (СЕС), сумарною потужністю 20 кВт. Основне обладнання:

- фотоелектричні панелі для генерації електроенергії (30 од. по 630 Вт);
- гібридні інвертори для перетворення електроенергії (2 од. по 10 кВт);
- акумуляторні батареї для накопичення електроенергії (сумарна ємність 20 кВт·год);
- двосторонній лічильник для обліку спожитої та відданої до мережі електроенергії;
- система захисту СЕС.

Даний захід допоможе частково або повністю (в залежності від погодних умов) покривати електроспоживання на потреби освітлення місць загального користування, циркуляційних насосів систем опалення та холодного водопостачання. В періоди відключень електроживлення даний захід дозволить отримувати енергію для роботи автономної котельні (в холодний період року).

В таблиці 4 наведено техніко-економічні показники запропонованих заходів.

Таблиця 4 – Заходи з підвищення енергоефективності

№	Найменування заходу	Інвестиції, грн	Економія енергії: кВт·год/рік	Чиста економія, грн/рік
1	Модернізація входних дверей та встановлення тамбурів	359000	5592	5660
2	Модернізація системи освітлення у місцях загального користування	318200	17660	76290
3	Утеплення фасаду та цоколя будівлі	17563000	128671	130232
4	Заміна вікон у місцях загального користування	1663200	30271	30638
5	Утеплення перекриття над неопалювальним підвалом	6393000	100986	102210
6	Утеплення горішнього перекриття	6434000	152318	154166
7	Гідравлічне балансування системи опалення	1280000	21049	21304
8	Встановлення терморегуляторів на радіатори та розподільвачів теплової енергії	4414000	127917	129470
9	Встановлення сонячних панелей на дах будівлі	1102300	21117	91225

Для розрахунку кількості згенерованої енергії від СЕС на плоскому даху будівлі використано онлайн калькулятор [16]. Точну вартість заходів можна буде визначити після підготовки проектно-кошторисної документації та проходження експертизи.

Моделювання енергоспоживання будівлі в програмному продукті E-Аудит

Програма E-Audit дозволяє виконати розрахунки показників енергетичної ефективності будівлі з урахуванням діючої методики [3].

Послідовність виконання розрахунків наведено на рис.3 [10].



Рисунок 3 – Послідовність роботи в програмному продукті E-Аудит

Відхилення показників, отриманих шляхом розрахунків в MS Excel та за допомогою E-audit становить по окремим складовим енергоспоживання в межах до 3-10% (див. таблицю 5).

Таблиця 5 – Аналіз відхилень у результатах розрахунків (існуюча будівля) [10]

№	Показник	Розрахунок		Відхилення, %
		Excel	E-Audit	
1	Питоме енергоспоживання опалення кВт·год/м ²	96,72	95,17	2,8
2	Питоме енергоспоживання гарячого водопостачання	36,38	32,7	10,1
3	Обсяг енергоспоживання при освітленні, кВт·год/м ²	9,75	10,7	9,9
4	Питомі викиди парникових газів, кг/м ²	41,2	35	5

В таблиці 6 наведено результати моделювання показників енергоспоживання будівлі до та після впровадження рекомендованих заходів у програмному продукті E-Аудит [8].

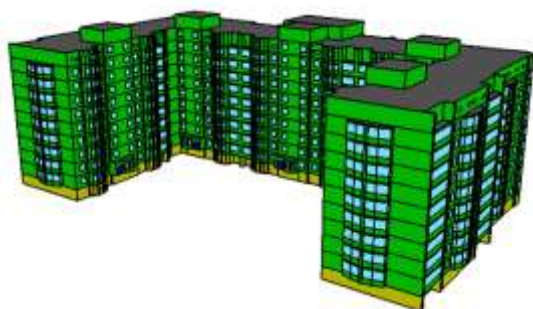
Таблиця 6 – Аналіз показників енергоспоживання будівлі до та після заходів (E-Аудит)

Вид енергоспоживання	Обсяг енергоспоживання за рік			
	до впровадження заходів		після впровадження заходів	
	тис. кВт · год	кВт · год/м ²	тис. кВт · год	кВт · год/м ²
на опалення	2003	95,17	1027	48,78
на охолодження	30	1,43	61	2,89

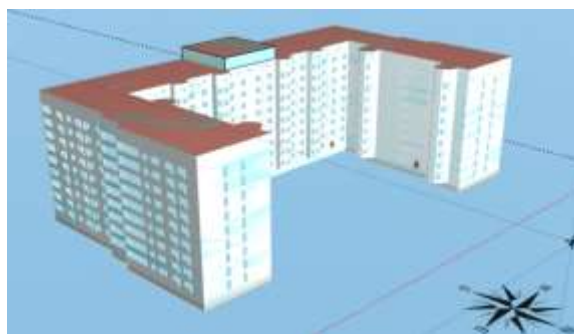
Після впровадження заходів з енергозбереження будівля значно зменшила своє енергоспоживання, особливо в частині опалення. Хоча споживання енергії на охолодження зросло, загальний показник енергоспоживання значно знизився, що свідчить про суттєве підвищення енергоефективності будівлі. Таким чином, з використанням інженерних методик розрахунку та моделювання виконано аналіз показників енергоефективності будівлі до та після впровадження комплексу заходів.

Порівняння результатів моделювання енергоспоживання за допомогою спеціалізованих програм

Для даної будівлі було проведено не тільки енергетичне обстеження з використанням інструментальних вимірів окремих параметрів, але й виконувалося також моделювання у спеціалізованих програмних продуктах DesignBuilder, Audytor OZC [17–18]. За допомогою програмного забезпечення побудовано 3D моделі і виконано прикладні дослідження енергетичних характеристик з розробкою пропозицій для термомодернізації існуючої житлової будівлі. Нижче на рис. 4 показано зовнішній вигляд побудованих моделей. Динамічне моделювання енергоспоживання проводиться із урахуванням теплофізичних властивостей внутрішніх і зовнішніх огорожень, умов експлуатації, інженерних мереж, внутрішніх теплових надходжень, надходжень теплоти від сонячної інсоляції, повітрообміну, інерційних властивостей, погодних умов, характеристик інженерних мереж та ефективності роботи джерела енергії.



а – розроблена 3D модель в DesignBuilder



б – розроблена 3D модель в Audytor OZC

Рисунок 4 – Моделювання енергетичних характеристик в спеціалізованих програмних продуктах

У графічному інтерфейсі DesignBuilder створюється геометрія будівлі із виконанням зонування приміщень, а програмний продукт EnergyPlus використовувався в дослідженнях енергетичних характеристик будівлі. Під час виконання моделювання створюється три моделі будівлі:

- actual – відображає реальні конструктивні і теплотехнічні характеристики огорожень, інженерних мереж, температурні умови та повітрообмін;
- baseline – умови комфортності, повітрообміну доведені до нормативних показників;
- proposed – теплотехнічні характеристики відповідають сучасним вимогам.

Під час моделювання у розділі «HVAC system» обирається тип системи опалення, вентиляції та гарячого водопостачання з прийнятими параметрами теплоносія. В результаті енергетичного моделювання програмний продукт дозволяє визначити: витрати палива, теплові навантаження; графіки температури, швидкості і тиску повітря, надходження від сонця; умови мікроклімату.

Порівняльний аналіз результатів моделювання в програмному продукті E-audit та за допомогою EnergyPlus для даної будівлі показав, що споживання теплової енергії на потреби опалення відрізняється незначно (відповідно 2003 тис. кВт-год та 2084 тис.кВт-год), тобто відхилення результатів становить до 5%. Результати порівняння по електричній енергії показало, що відхилення становить до 10%.

Програмний продукт Audytor OZC рахує не тільки енергоспоживання за різними складовими із визначенням класу енергоефективності за діючою методикою розрахунку, але надає можливість також визначити також теплову потужність системи за діючим стандартом ДСТУ EN 12831-1 [11], результати розрахунку від проектних даних відрізняються в межах 10%. Отримані дані: проектне теплове навантаження будівлі - 1,152 МВт, визначене за допомогою програмного продукту теплове навантаження існуючої будівлі – 1,043 МВт. В результаті моделювання визначено, що у разі впровадження заходів із підвищення теплового захисту огорожень теплове навантаження становитиме 0,723 МВт. Результати порівняння енергоспоживання на потреби опалення в E-audit та Audytor OZC для даної будівлі відрізняються приблизно на 7%.

Таким чином, існують різні підходи аналізу енергоспоживання, зокрема із застосуванням розрахункових інженерних методик та спеціалізованих програмних продуктів. Порівняльний аналіз на прикладі існуючої багатоквартирної будівлі показав, що відхилення в результатах може бути в межах, допустимих для інженерних розрахунків. Натомість використання безкоштовного програмного забезпечення E-audit, яке надає енергоаудиторам Асоціація енергоаудиторів України, дозволяє автоматизувати розрахунки і значно спростити фахівцям задачу пошуку технічних рішень щодо підвищення енергетичної ефективності будівель, виконання техніко-економічних розрахунків і створення енергетичних сертифікатів.

Висновки: вивчено можливості спеціалізованих програмних продуктів, що використовуються для моделювання енергетичних характеристик. Виконано деталізоване енергетичне обстеження житлової будівлі та моделювання енергоспоживання за допомогою розробленої моделі в Excel та спеціалізованого програмного продукту E-audit з виконанням порівняльного аналізу. У програмі E-audit було проведено два сценарії обчислень для визначення енергоефективності будівлі: один до проведення енергоефективних заходів, а інший — після їх впровадження. Розрахунки у програмі E-audit показали зменшення споживання енергії після впровадження заходів з підвищення теплотехнічних характеристик огорожень і модернізації інженерних мереж. Це зниження енергоспоживання дозволяє отримати конкретні економічні вигоди для власників будівель, оскільки знижуються витрати на опалення і енергоресурси.

Список використаної літератури

1. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель.
2. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція, кондиціонування.
3. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.
4. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України № 2118-VIII, ред. від 15.11.2024. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
5. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №260. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
6. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. 2014. № 80. С. 68 – 72.
7. Шовкалюк М.М., Рабенко С.О. Енергетичне обстеження житлової багатоквартирної будівлі з розробкою енергетичного сертифікату // Збірник наук. праць VII науково-технічної конференції магістрантів імені професора В.М. Винославського, [20 – 22 листопада 2024 р.], с. 41-44.
8. Рабенко С.О., Шовкалюк М.М., Моделювання показників енергоспоживання багатоквартирної будівлі з використанням спеціалізованих програмних продуктів // Збірник наук. праць X Міжнародної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'24», [Київ, 26-27 листопада 2024 р.], с.170-172.
9. Шовкалюк М.М., Рабенко С.О. Розробка концепції використання цифрових технологій для підвищення енергоефективності будівельного фонду // Збірник наук. праць II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Progressive opportunities and solutions of advanced society», [м. Дніпро, 7 – 8 листопада 2024 р.], с. 285-286.

10. Рабенко Є.О. Моделювання енергоспоживання житлової багатоквартирної будівлі з урахуванням особливостей різних програмних комплексів / Магістерська дисертація за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – К.: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2024 – 147с.
11. ДСТУ EN 12831-1:2017 Енергоефективність будівель. Метод розрахунку проектного теплового навантаження. Частина 1. Теплове навантаження, Модуль М3-3 (EN 12831-1:2017, IDT).
12. ДСТУ 9191:2022 Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. К., ДП «УкрНДНЦ», 2022, 63 с.
13. Програма для енергетичної сертифікації E-Audit. Режим доступу: <https://e-audit.escoua.com/user/sign-in?next=/home/>
14. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. №169. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 301.
15. Про затвердження Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності та форми енергетичного сертифіката: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. № 172. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 334.
16. Онлайн калькулятор вироблення електричної енергії СЕС Photovoltaic geographical information system. Режим доступу: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
17. Шовкалюк М. М., Пахунова К. Ю., Шевченко О. М. Аналіз енергетичних характеристик житлової багатоквартирної будівлі із урахуванням соціально-експлуатаційних факторів. Технології та інжиніринг, № 6 (11), 2022 с. 52-62.
18. Шовкалюк Ю.В., Шовкалюк М.М. Поглиблений енергоаудит житлового багатоквартирного будинку з урахуванням впливу соціальних та експлуатаційних факторів / Молодий вчений №2 (78), 2020. с. 200-206.

M. Shovkaliuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1898-3493

Y. Rabenko¹, Master student, ORCID 0009-0005-9483-9628

O. Yatsenko¹, Ph.D., ORCID 0000-0002-8001-5987

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

MODELING OF ENERGY CONSUMPTION INDICATORS OF AN APARTMENT BUILDING USING SPECIALIZED SOFTWARE PRODUCTS

Increasing the energy efficiency of the building stock is a strategic task for Ukraine, and to attract funding for comprehensive thermal modernization projects, it is necessary to conduct an energy audit and draw up an energy certificate for residential and multi-apartment buildings. Energy auditors in Ukraine usually develop their own models for calculations, but there are software products that allow modeling the energy consumption of buildings taking into account the features of operation, characteristics of enclosures and engineering systems. Studying their capabilities and comparative analysis is a relevant task. The use of software products by energy auditors helps automate energy consumption calculations before and after the implementation of energy saving measures, develop an energy certificate, and accelerate the implementation of complex thermal modernization projects.

The purpose of the work is to review the capabilities of software products for calculating specific energy consumption for various needs and energy efficiency classes, as well as developing an energy certificate with a comparative analysis using the example of a residential multi-apartment building. Research methods: analytical methods, comparative and structural analysis method, feasibility studies using E-Audit, Audytor OZC, MS Excel, etc. In accordance with the purpose of the work, the following tasks were set:

- to study the capabilities of software products for modeling energy characteristics;
- to conduct an energy survey of the building;
- to develop a mathematical model for calculating specific energy consumption and energy efficiency class according to the national calculation methodology;
- to calculate energy consumption using specialized software products with the development of an energy certificate;
- to justify measures to increase energy efficiency for the building with the determination of energy and economic effects.

Keywords: apartment buildings, energy consumption modeling, energy efficiency, thermal modernization.

References

1. DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings
2. DBN V.2.5-67:2013 Heating, ventilation, air conditioning.
3. DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply.
4. On the Energy Efficiency of Buildings: Law of Ukraine No.2118-VIII. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
5. On approval of the Minimum requirements for the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine dated 10/27/2020. No. 260. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
6. Deshko V.I., Bilous I.Yu. Mathematical models of buildings for assessing energy consumption. Building structures: Interdepartmental scientific and technical collection of scientific works. 2014. No. 80. P. 68 – 72.
7. Shovkaliuk M.M., Rabenko E.O. Energy inspection of a residential multi-apartment building with the development of an energy certificate // Collection of scientific works of the VII scientific and technical conference of master's students named after Professor V.M. Vynoslavsky, [November 20 – 22, 2024], p. 41-44.
8. Rabenko E.O., Shovkaliuk M.M., Modeling of energy consumption indicators of an apartment building using specialized software products // Collection of scientific papers of the 10th International Conference “Energy Management: State and Development Prospects – PEMS’24”, [Kyiv, November 26-27, 2024], pp. 170-172.
9. Shovkaliuk M.M., Rabenko E.O. Development of a concept for using digital technologies to increase the energy efficiency of the building stock // Collection of scientific papers of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference “Progressive opportunities and solutions of advanced society”, [Dnipro, November 7-8, 2024], pp. 285-286.
10. Rabenko E.O. Modeling energy consumption of a residential apartment building taking into account the features of various software complexes / Master's thesis in speciality 141 Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2024 – 147p.
11. DSTU EN 12831-1:2017 Energy efficiency of buildings. Method for calculating the design heat load. Part 1. Heat load, Module M3-3 (EN 12831-1:2017, IDT).
12. DSTU 9191:2022 Methods for selecting thermal insulation material for building insulation. Kyiv, 2022, 63 p.
13. Program for energy certification E-Audit. Access mode: <https://e-audit.escoua.com/user/sign-in?next=/home/>
14. On approval of the Methodology for determining the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine dated 11.07.2018 No. 169. Official Gazette of Ukraine. 2018, No. 55. P. 301.
15. On approval of the Procedure for conducting energy efficiency certification and the form of an energy certificate: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine dated 11.07.2018 No. 172. Official Gazette of Ukraine. 2018, No. 55. P. 334.
16. Online calculator for generating electricity from a photovoltaic power plant Photovoltaic geographical information system. Access mode: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
17. Shovkaliuk M. M., Pakhunova K. Yu., Shevchenko O. M. Analysis of energy characteristics of a residential apartment building taking into account social and operational factors. Technologies and Engineering, No. 6 (11), 2022 p. 52-62.
18. Shovkaliuk Yu. V., Shovkaliuk M. M. In-depth energy audit of a residential apartment building taking into account the influence of social and operational factors / Young Scientist No. 2 (78), 2020. p. 200-206.

Надійшла: 28.01.2025
Received: 28.01.2025