

МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ У ЖИТТЄВОМУ ЦИКЛІ ОБ’ЄКТІВ ЖИТЛОВОГО БУДІВНИЦТВА

<http://doi.org/10.23939/semi2025.02>.

© Козик В. В., Марко О. Й., 2025

Узагальнено методичні підходи до оцінювання енергоспоживання житлового будівництва із фокусом на методику оцінювання, яка базується на оцінці життєвого циклу будівлі. Оцінка енергоспоживання охоплює всі етапи життєвого циклу житлового будівництва: проєктування, будування, експлуатацію, демонтаж та утилізацію. Окреслено методи оцінюванні втіленої та експлуатаційної енергії. Визначено, що енергоспоживання на завершальному етапі життєвого циклу будівлі є мінімальним. Отримані результати можна використати для підвищення енергоефективності житлового будівництва.

Ключові слова: енергоспоживання, життєвий цикл, методи оцінювання, житлове будівництво.

Постановка проблеми

Будівельна галузь відіграє важливу роль у формуванні міського середовища, забезпечуючи житло та водопостачання, транспортну інфраструктуру тощо. Станом на кінець 2020 року житловий фонд України налічував 17,41 млн житлових будинків із загальною площею 1015 млн м². У середньому площа міської житлової одиниці становила 52,2 м², а сільської – 60 м² [1]. Внаслідок російської агресії значна частина житлового фонду України зазнала руйнувань. Станом на кінець 2024 р., за оцінками Світового банку, приблизно 13 % житлового фонду України було пошкоджено або знищено, що вплинуло на понад 2,5 мільйона домогосподарств нашої країни [2], і ці цифри є не остаточними, оскільки руйнування житлових будівель продовжуються. Проте сектор житлового будівництва, незважаючи на війну, поступово зростає, статистичні дані свідчать про те, що загальна площа введеного в експлуатацію житла в Україні у 2024 р. становила 9,76 млн м² та продовжує зростати у 2025 р. [3].

Сектор житлового будівництва є одним із основних споживачів енергії та природних ресурсів, що супроводжується викидами забруднювальних речовин і утворенням відходів. За прогнозами ЮНІДО, впродовж наступних 25 років світовий будівельний фонд подвоїться та, відповідно, викиди вуглецю, які виникають на етапі будівництва (“авансовий вуглець”), становитимуть половину загального вуглецевого сліду нового будівництва до 2050 року [1].

Щодо України, загальне споживання енергії у 2022 році становило 105 826 млн кВт [4]. Аналіз структури енергоспоживання свідчить, що основними його споживачами є промисловість (38,7 %) та житловий сектор (33,6 %). Порівняння показників енергоспоживання житлових будівель засвідчує, що в Україні (від 250 до 275 кВт · год/м²) вони щонайменше вдвічі перевищують відповідні показники країн Західної Європи, де середнє споживання становить приблизно 120 кВт · год/м² [4].

Актуальність дослідження. Структура енергоспоживання в Україні (рис. 1) свідчить про те, що сектор житлового будівництва є одним із ключових чинників впливу на зміну клімату. Вирішення проблем, пов'язаних як з авансовим, так і з операційним вуглецевим слідом, є критично важливим і потребує невідкладних дій. За результатами численних досліджень [4], саме в цьому секторі зосереджено значний потенціал для енергозбереження, який потребує системної оцінки. Зокрема, згідно з аналітичними матеріалами Організації Об'єднаних Націй з промислового розвитку, потенціал підвищення енергоефективності у сфері житлового будівництва [5] є суттєвим (табл. 1). Це зумовлює необхідність впровадження сучасних підходів до оцінювання енергоспоживання в межах повного життєвого циклу будівель: від проектування до експлуатації та утилізації.

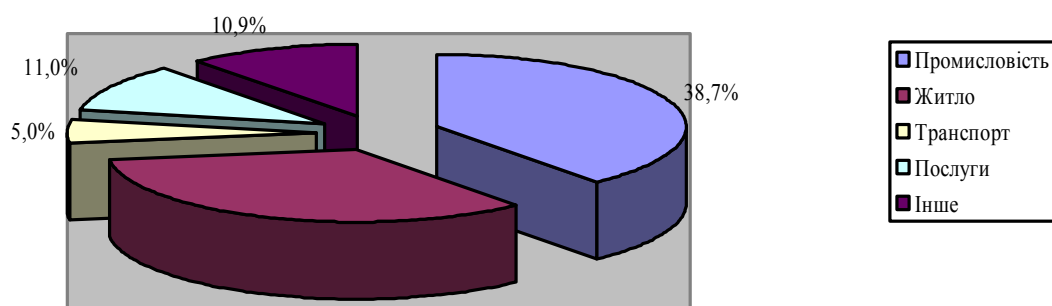


Рис. 1. Структура споживання енергії в Україні у січні 2022 року за секторами
Джерело: [4].

Таблиця 1

Потенціал енергозбереження у секторі житлового будівництва у 2023 р.

		Потенціал енергозбереження	Скорочення викидів CO ² , млн т н. е./рік	Вартість, млрд євро
Тип будівлі	Квартири	4 млн т н. е./рік	55	67
	Будинки	15,3 млн т н. е./рік	т/ф	60
	Освітні заклади	0,7 млн т н. е./рік	n/a	46.89
Будівельні матеріали	Цемент	430 т н. е./рік +	1	0.021
	Сталь та алюміній	n/a	750	n/a
	Бетон	n/a	1	n/a

Джерело: [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Енергоспоживання в житловому будівництві є ключовим фактором у досягненні енергоефективності та зменшенні негативного екологічного впливу будівель. Для оцінювання енергоспоживання використовують різні методи (рис. 2).

Ексергетичний аналіз є одним із ключових інструментів системного підходу, який враховує взаємодію енергетичної системи із зовнішнім середовищем. Згідно з дослідженнями [6], цей метод застосовують для оцінки ефективності компонентів і процесів на різних етапах енергетичних перетворень.

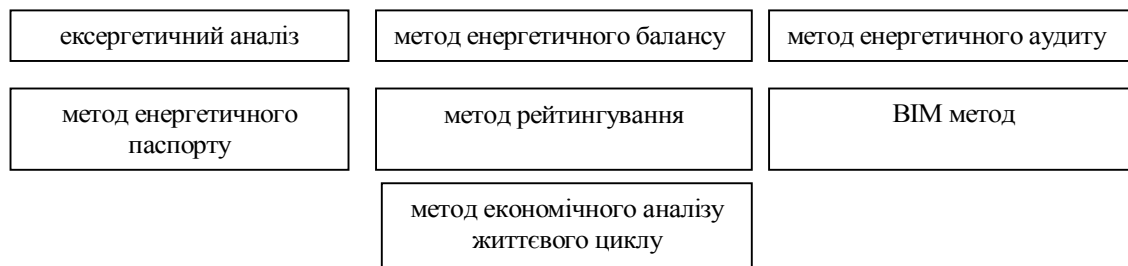


Рис. 2. Методи оцінювання енергоспоживання

Джерело: узагальнили автори за [6–12].

Метод енергетичного балансу ґрунтується на повному статистичному обліку енергетичних продуктів та їхньому русі в економіці. Формування енергетичного балансу дає змогу користувачам отримати цілісне уявлення про загальний обсяг енергії, що видобувають, обмінюють, перетворюють та споживає кінцевий користувач, а також оцінити **відносний** внесок кожного виду енергоносія (палива, енергетичного продукту) [7].

В основі методу енергетичного аудиту лежить оцінка та аналіз передумов, джерел втрат енергії та визначення шляхів їх усунення [8]. Цей підхід часто використовують у поєднанні з методом енергетичного паспорту: оцінювання енергоспоживання будівлі за шкалою від А (дуже ефективна) до G (неефективна). Така оцінка дає змогу отримати уявлення про вартість опалення, освітлення об'єкта нерухомості, а також рівень викидів CO₂. Енергетичний паспорт складається із переліку економічно доцільних заходів для покращення енергоефективності будівлі та містить інформацію про очікуваний рейтинг після впровадження реконструкційних рішень [9].

Міжнародно визнані стандарти та рейтингові системи, такі як BREEAM, LEED і Passivhaus, дають змогу оцінити енергоспоживання та стимулювати впровадження енергоефективних технологій та сприяють трансформації ринку житлового будівництва відповідно до принципів сталого розвитку [10].

Метод інформаційного моделювання будівель (BIM – Building Information Modeling) – цифровий підхід до проєктування, який інтегрує різні аспекти будівництва, зокрема оцінювання енергоспоживання та інші експлуатаційні характеристики об'єкта. Застосування BIM-методу полегшує оцінку та аналіз енергетичних потоків і впровадження енергоефективних рішень, оскільки забезпечує управління та оптимізацію будівельного процесу в цифровому середовищі, а також дає змогу візуалізувати вплив енергоощадних заходів на рівні моделі будівлі [11].

Метод економічного аналізу життєвого циклу будівлі ґрунтується на комплексному оцінюванні екологічного впливу всіх етапів її існування: від виробництва будівельних матеріалів і зведення до експлуатації та утилізації. Цей підхід використовують для аналізу викидів CO₂, споживання ресурсів та загального впливу на навколишнє середовище. Метод дає змогу оцінити довгострокові експлуатаційні витрати об'єкта та сприяє прийняттю економічно обґрунтованих рішень у сфері сталого будівництва [12].

Незважаючи на значний розвиток методів оцінювання, наявні підходи залишаються фрагментованими та не забезпечують цілісного аналізу енергоспоживання житлового будівництва. Це створює суттєвий розрив між теоретичними положеннями, викладеними в сучасних міжнародних стандартах (наприклад, ДСТУ EN 16627 [21]), та практичними можливостями їх повноцінної реалізації в Україні. Особливою проблемою є відсутність єдиної та відкритої системи нормативно-технічних даних, що охоплюють увесь життєвий цикл об'єкта.

Формулювання гіпотез і постановка цілей

Гіпотеза: методичні підходи до оцінювання енергоспоживання у життєвому циклі об'єктів житлового будівництва в Україні потребують систематизації та інтеграції окремих етапів у єдиний алгоритм, що дасть змогу об'єднати екологічне мислення та економічну обґрунтованість управлінських рішень.

Цілі дослідження:

1. Систематизувати підходи до оцінювання енергоспоживання у процесі життєвого циклу житлового будівництва.
2. Сформувати узагальнену послідовність процесу оцінювання енергоспоживання в життєвому циклі об'єктів житлового будівництва

Методи дослідження

У процесі дослідження застосовано низку взаємопов'язаних методів. Зокрема, метод теоретичного узагальнення використано для розкриття сутнісних характеристик оцінювання енергоспоживання у життєвому циклі об'єктів житлового будівництва. Метод систематизації став основою для формулювання обґрунтованих висновків, узгоджених із позиціями провідних науковців, щодо оцінювання енергоспоживання у поєднанні з підходом життєвого циклу. Метод візуалізації результатів дослідження сприяв наочному відображенню послідовності процесу оцінювання енергоспоживання впродовж життєвого циклу об'єктів житлового будівництва. Завершальним етапом стало логічне узагальнення з позицій системного підходу, що дало змогу інтегрувати результати в єдину концептуальну модель.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Оцінювання енергоспоживання з використанням підходу життєвого циклу враховує надходження та використання енергії на різних етапах життєвого циклу житлового будівництва. Етапи життєвого циклу, які враховуються в оцінці енергоспоживання, охоплюють всі процеси: проектування, будівництво та монтаж, експлуатацію та обслуговування, демонтаж, знесення та утилізацію (табл. 2).

Таблиця 2

Процеси для оцінювання енергоспоживання з використанням підходу життєвого циклу

Етапи	Процеси на етапі життєвого циклу житлового будівництва
Проектування	1. Розроблення архітектурного і конструктивного проєкту. 2. Визначення технічних характеристик будівлі, таких як енергоефективність, типи матеріалів, системи опалення та вентиляції. 3. Оцінювання можливостей для використання відновлювальних джерел енергії (сонячні панелі, геотермальні системи тощо). 4. Проектування енергоефективних рішень для зменшення енергоспоживання у процесі експлуатації будівлі
Будівництво та монтаж	1. Видобуток сировини та її перероблення: – видобуток сировини для виробництва будівельних матеріалів (камінь, пісок, метал тощо); – перероблення сировини в готові матеріали (бетон, цегла, металеві конструкції). 2. Виробництво будівельних матеріалів: – виробництво будівельних матеріалів із використанням енергії та ресурсів – технологічні процеси, які потребують енергетичних витрат: виготовлення бетону, цегли, металевих конструкцій тощо. 3. Транспортування будівельних матеріалів до будівельного майданчика: – транспортні витрати енергії для доставки матеріалів; – вибір оптимальних способів транспортування для зменшення витрат; – будівництво житлового об'єкта, монтаж конструкцій та інженерних систем
Експлуатація та обслуговування	Використання енергії під час експлуатації будівлі (опалення, кондиціонування, освітлення, електричні пристрої)
Демонтаж, знесення та утилізація	Демонтаж будівельних конструкцій. Утилізація будівельних матеріалів

Узагальнили автори за [5, 20].

Аналіз літературних джерел підтверджує [13], що на різних етапах життєвого циклу спостерігаються різні рівні енергоспоживання (рис. 3).

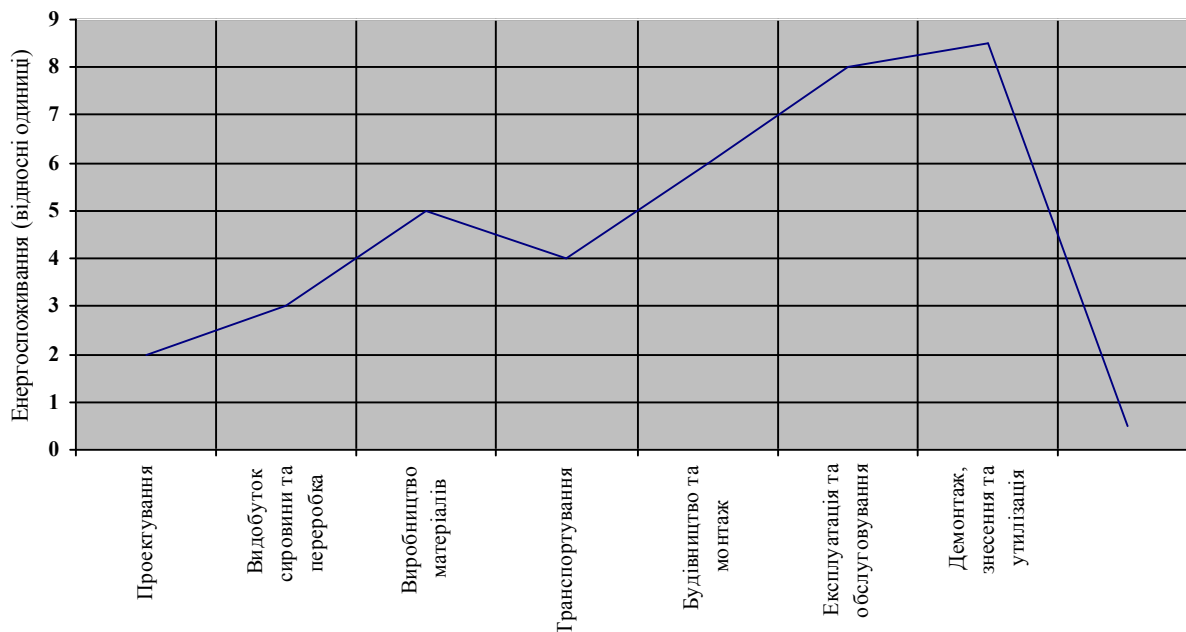


Рис. 3. Енергоспоживання на етапах життєвого циклу житлового будівництва
Джерело: за даними [5, 13].

Так, на етапі проектування енергоспоживання є низьким, але саме на цьому етапі закладається комплекс проєктних рішень, які спрямовані на забезпечення ефективного використання енергії. Найвищий пік споживання енергії є на етапі будівництва, оскільки він складається із енергомістких процесів, таких як виробництво матеріалів, монтаж житлового будинку, а у випадку реконструкції – витрати енергії на демонтаж (за необхідності) та модернізацію конструкції. На етапі експлуатації житлового будинку рівень енергоспоживання зазвичай залишається стабільним і визначається енергоефективністю будівлі, сформованою впродовж попередніх етапів життєвого циклу. Водночас етап демонтажу, порівняно із попередніми етапами, містить нижчі витрати енергії, проте, якщо впродовж експлуатації будівлі спостерігалось порівняно рівномірне її витрачання, то на цьому етапі буде короткострокове зростання енергетичних витрат, оскільки процес утилізації будівельних матеріалів, подібно до їхнього виробництва, потребує додаткових затрат енергії.

Загальну систему оцінки енергоспоживання житлового будівництва (1) доцільно розглядати як суму втіленої експлуатаційної енергії будівлі, а також енергії, необхідної для завершення життєвого циклу будівлі. Наведена формула є спрощеною адаптацією концепції оцінки життєвого циклу (LCA), зокрема її енергетичного аспекту (LCE), до потреб будівельної галузі. Вона ґрунтується на принципах міжнародних стандартів ISO 14044 [22] та EN 15978 [23] і є математичним узагальненням їх методологічних положень, забезпечуючи водночас практичний інструмент для розрахунку енергоспоживання життєвого циклу будівель.

$$LCE = E_i + E_{rec} + (OE \times T) + E_{el}, \quad (1)$$

де LCE – енергія життєвого циклу; E_i – початкова втілена енергія (енергія, витрачена на виробництво та будівництво будівлі); E_{rec} – рекурентна втілена енергія (для майбутнього обслуговування та відновлення); OE – сумарна річна експлуатаційна енергія, зокрема тепла і нетеплова; T – термін служби будівлі; E_{el} – енергія завершального етапу життєвого циклу.

Аналіз наукових джерел показав, що загалом існує три основні підходи до оцінювання енергії у процесі життєвого циклу житлового будівництва: аналіз процесу, енергетичний міжгалузевий аналіз і гібридний аналіз.

Аналіз процесу теоретично (але не обов'язково на практиці) є одним із найпростіших методів оцінювання втіленої енергії, він передбачає оцінювання енергії, необхідної для відповідних виробничих процесів, визначених у стандарті ISO 14044 [22], і може бути поданий у вигляді формули:

$$E_i = E_d \sum_{i=1}^n E_{id}, \quad (2)$$

де E_i – загальна втілена енергія для виробництва одиниці продукту; E_d – прямі витрати енергії, спожитої на виробництві, яка складатиметься із енергії на виробничі процеси, енергії на обслуговування обладнання (роботи устаткування, нагрівальних елементів, насосів тощо) та інших витрат енергії на виробництві (освітлення, вентиляція тощо); E_{id} – непрямі витрати енергії, пов'язані з виробництвом і постачанням кожного з вхідних ресурсів. Їх можна поділити на кілька компонентів: енергію, витрачену на видобуток і транспортування сировини, енергію на транспортування матеріалів, енергію на виробництво обладнання та його обслуговування, енергію, що пов'язана з іншими послугами (адміністрування, логістика тощо); n – кількість різних вхідних ресурсів або процесів, що потребують витрачання енергії.

Ця формула враховує як прямі, так і непрямі витрати енергії, хоча процесний аналіз є доволі трудомістким та може мати обмеження в точності через складність детального врахування всіх непрямих витрат.

Енергетичний міжгалузевий аналіз є ще одним із підходів, який дає змогу оцінити як прямі енергетичні витрати, так і непрямі втілену енергію, використовуючи національні економічні таблиці та середні енергетичні коефіцієнти (3).

$$E_i = e^T (I - A)^{-1} x, \quad (3)$$

де E_i – загальна втілена енергія продукту (МДж); e^T – вектор питомих енергетичних інтенсивностей для кожного сектора економіки, МДж/грн; I – одинична матриця; A – матриця міжгалузевих коефіцієнтів витрат (відображає зв'язки між секторами економіки); $(I - A)^{-1}$ – обернена матриця Леонтьєва, що показує загальний вплив одного сектора на всі інші; x – вектор випуску продукції (обсяг виробництва або вартість продукції у певному секторі).

Цей підхід базується на моделі “витрати–випуск” В. Леонтьєва [29], використовуючи для оцінки енергії та ресурсів на рівні економічних секторів, включаючи всі прямі й непрямі витрати. Ядром підходу є матриця $(I - A)^{-1}$, що враховує каскадні ефекти міжгалузевих зв'язків і забезпечує комплексну оцінку енергетичних потоків у життєвому циклі. Тобто матриця A показує, скільки ресурсів кожен сектор економіки отримує від інших секторів для виробництва своєї продукції. Вираз $(I - A)^{-1}$ враховує як прямі, так і непрямі впливи між секторами, даючи змогу оцінити повну втілену енергію. А множення цього виразу на e^T переводить економічні потоки в енергетичні, використовуючи середні енергетичні коефіцієнти.

Цей підхід ефективний для аналізу втіленої енергії у великих економічних системах, але менш точний для окремого будівництва, оскільки він базується на середніх енергетичних коефіцієнтах окремих секторів та не враховує індивідуальні технологічні відмінності між підприємствами.

Гібридний аналіз (4) поєднує процесний підхід та міжгалузевий аналіз, забезпечуючи більшу повноту результатів. Метод визнаний одним із провідних у сфері LCA та широко висвітлений у наукових публікаціях [30]. Формула подається як адаптована модель, що відображає зазначену методологію (4).

$$E_i = E_{iPA} + E_{iOA} - E_{overlap}, \quad (4)$$

де E_{iPA} – загальна втілена енергія продукту (МДж); E_{iPA} – частина енергії, оцінена за процесним аналізом; E_{iOA} – частина енергії, оцінена за енергетичним міжгалузевим аналізом; $E_{overlap}$ – дублювання енерговитрат у двох методах, яке потрібно виключити для уникнення подвійного рахунку.

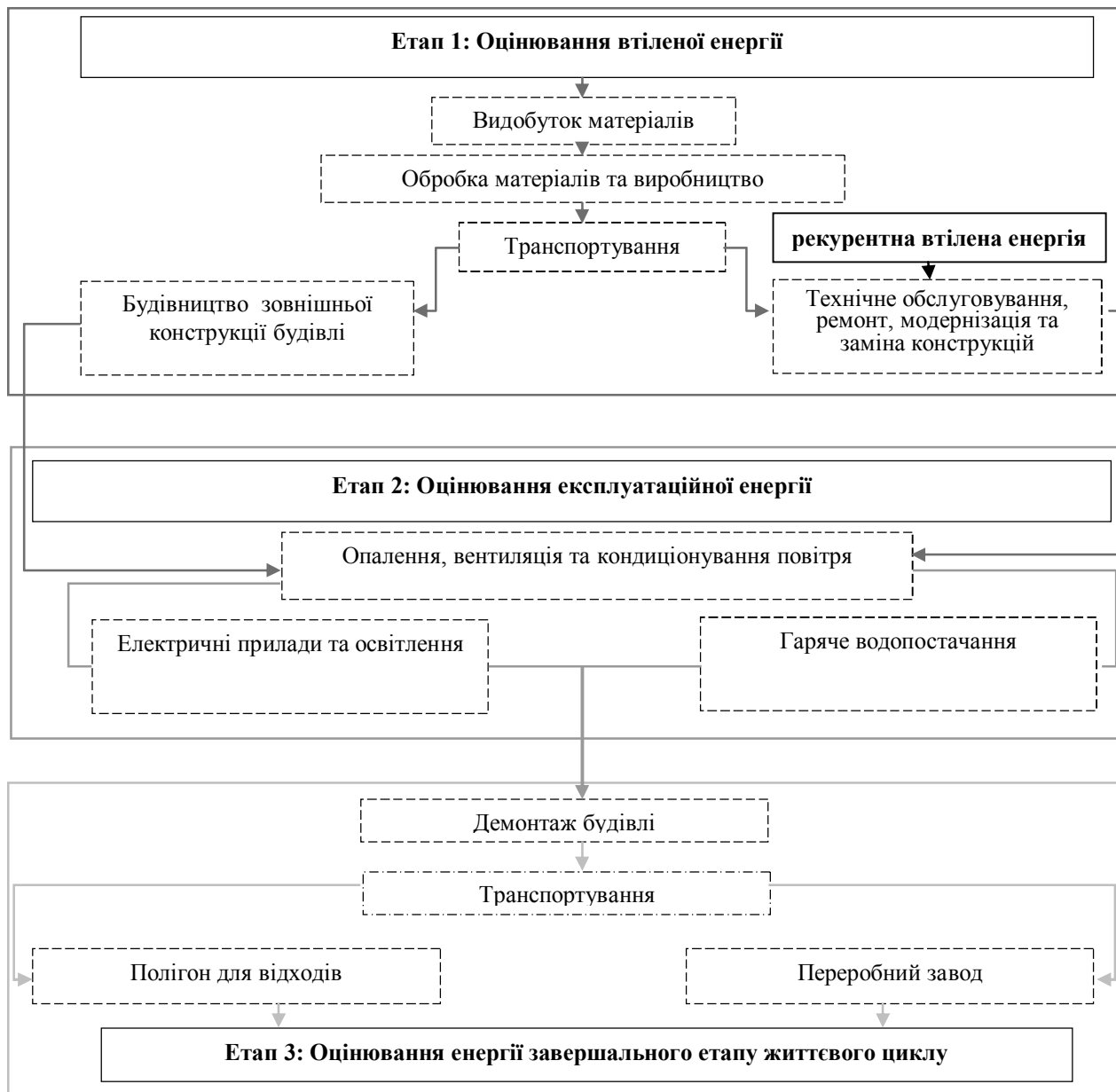


Рис. 4. Етапи оцінювання енергоспоживання у життєвому циклі об'єктів житлового будівництва
Джерело: авторська розробка.

До обмежень гібридного аналізу належить необхідність формування: (1) великої кількості точних даних як на рівні виробничих процесів, так і на макроекономічному рівні; (2) релевантних баз даних, оскільки саме від них залежить достовірність оцінки; (3) методологічної узгодженості підходів для коректного усунення дублювання даних, що ускладнює реалізацію аналізу.

В основу розробки підходів до оцінки експлуатаційної енергії житлового будівництва покладено методологічний принцип розгляду будівлі як енергетичної системи, що складається з низки взаємопов'язаних підсистем. Узагальнення положень, викладених у нормативних та методичних документах, таких як ДСТУ EN 15978:2018 [23], ДСТУ ISO 21930:2021 [25], ДБН В.2.5-67:2013 “Опалення, вентиляція та кондиціонування” [26] та ДБН В.2.6-31:2021 “Теплова ізоляція будівель” [27], а також рекомендацій RICS [28], дало змогу сформулювати спрощену математичну модель, подану у вигляді формули, яка відображає ключові аспекти енергоспоживання будівлі, зокрема витрати на знесення, транспортування та потенційні економічні вигоди від

переробки матеріалів. До підсистем експлуатаційної енергії належить енергія, що використовується на опалення та охолодження приміщень, нагрівання гарячої води, освітлення, приготування їжі та роботу побутових приладів. Розрахунок енергоспоживання зазвичай проводиться для одного року, після чого отримане значення множиться на кількість років експлуатації житлового будинку (5). Більшість досліджень припускає відносну незмінність експлуатаційного споживання енергії, що означає стабільний режим роботи систем, постійні моделі заповнюваності будівлі та відсутність амортизації опалювальних і охолоджувальних систем.

$$OE = E_{annual} \times T, \quad (5)$$

де E_{annual} – середнє річне споживання енергії будівлі; T – тривалість досліджуваного періоду (у роках).

Що енергії необхідної для завершення життєвого циклу житлового будівництва, то дослідження припускали різні частки споживання енергії на цьому етапі. Так, наприклад, Ел. П. Деві та С. Паланіаппана [14] припустили, що на цей етап припадає 3 % загальної потреби в енергії життєвого циклу будівлі. А. Доду та співавтори [15] дослідили, що знесення на завершальному етапі життєвого циклу житлового будівництва не перевищить $10 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ тобто менше 0,1 % усього споживання енергії впродовж життєвого циклу.

Узагальнену послідовність процесу оцінювання енергоспоживання в життєвому циклі об'єктів житлового будівництва наведено на рис. 4. Важливо зазначити, що оцінювання може проводитися як для всіх етапів загалом, так і окремо для кожного виду енергії на кожному з етапів.

Удосконалення методики оцінки енергоспоживання життєвого циклу будівельних об'єктів здійснено шляхом розробки узагальненої послідовності, яка трансформує загальні теоретичні принципи у покроковий алгоритм для проведення повного та об'єктивного аналізу енергоспоживання житлової будівлі. Запропонований підхід охоплює всі складові – втілену, експлуатаційну та енергію завершального етапу – та забезпечує можливість їх комплексного врахування в єдиній системі. Це відкриває перспективи для коректного порівняння альтернативних рішень на стадіях проєктування, експлуатації та демонтажу, а також для визначення найефективніших напрямів енергозбереження у житловому будівництві.

Висновки

Результати проведеного дослідження систематизують теоретичні основи та методичні підходи до оцінювання енергоспоживання в житловому будівництві. Аналіз актуальних наукових джерел і публікацій засвідчив широке застосування ключових методів оцінювання, кожен з яких забезпечує необхідні аналітичні передумови для підвищення ефективності управління енергоресурсами та посилення енергоефективності об'єктів житлової забудови. Серед них виокремлюють три основні підходи до оцінювання енергії у процесі життєвого циклу житлового будівництва: аналіз процесу, енергетичний міжгалузевий аналіз та гібридний аналіз.

На основі узагальнення напрацювань у цій сфері встановлено, що, незалежно від застосованого підходу до оцінювання енергоефективності, функціонування житлового сектору відбувається в межах чітко окресленого життєвого циклу, який охоплює такі етапи: проєктування, будівництво та монтаж, експлуатацію й обслуговування, демонтаж, знесення та утилізацію. У цьому контексті доцільно виділяти три типи енергії, що підлягають оцінюванню: втілена енергія, експлуатаційна енергія та енергія завершального етапу життєвого циклу.

З урахуванням зазначеного систематизовано та інтегровано окремі етапи у єдину послідовність для оцінювання енергоспоживання у життєвому циклі об'єктів житлового будівництва. Ця послідовність охоплює математичний апарат у вигляді формул, що створює підґрунтя для цілеспрямованого впровадження заходів із оцінювання енергоефективності, та підтверджує поставлену гіпотезу про необхідність інтеграції методичних підходів у єдиний алгоритм, який поєднує екологічну складову з економічною обґрунтованістю управлінських рішень.

Перспективи подальших досліджень

Перспективними напрямками подальших досліджень є практична апробація положень запропонованої концептуальної моделі в реальному секторі житлового будівництва, а також аналітичне вивчення її інструментального потенціалу для кількісного оцінювання результативності впроваджених заходів із підвищення енергоефективності об'єктів житлової нерухомості.

1. International Energy Agency. Ukraine energy profile – Analysis. 2024. URL: <https://www.iea.org> (дата звернення: 28.02.2025).
2. World Bank. World Bank document. URL: <https://www.worldbank.org> (дата звернення: 28.02.2025).
3. Державна служба статистики України. Введення в експлуатацію житла в Україні. Статистичні дані. 2024. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 28.02.2025).
4. Українська асоціація відновлюваної енергетики. Енергоефективність та енергозбереження. URL: <https://uaea.com.ua/dysp/ee-cons.html> (дата звернення: 28.02.2025).
5. United Nations Industrial Development Organization, & Ministry of Economy of Ukraine. Policy impact assessment related to standards and technical regulations for Ukraine's green reconstruction. 2023. URL: <https://www.unido.org> (дата звернення: 28.02.2025).
6. Rismanchi B. District energy network (DEN), current global status and future development. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017; 75:571–579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.025>.
7. Guiver C., Opmeer M. R. The energy-balance method for optimal control in renewable energy applications. Renewable Energy Focus. 2024; 50: Article 100582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100582>.
8. Eaton R., Johnson M. A study on energy efficiency in enterprises: Energy audits and energy management systems. Implementation of national minimum criteria for energy audits, in line with Annex VI of the Energy Efficiency Directive. European Union. 2015. URL: https://energy.ec.europa.eu/system/files/eed-art8-study_on_minimum_criteria_for_energy_audits-wp3-final_0.pdf (дата звернення: 28.02.2025).
9. Ruggieri G., Maduta C., Melica G. Progress on the implementation of energy performance certificates in EU. European Commission. 2023. DOI: <https://doi.org/10.2760/522233>.
10. Wiley J. A., Benefield J. D., Johnson K. H. Green Design and the Market for Commercial Office Space. Journal of Real Estate Finance and Economics. 2008; 41:228–243.
11. Caterino N., Nuzzo I., Ianniello A., Varchetta G., Cosenza E. A BIM-based decision-making framework for optimal seismic retrofit of existing buildings. Engineering Structures. 2021; 242:112544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112544>.
12. Devender D., Boeing L. Life cycle energy analysis of buildings: A systematic review. Building and Environment. 2024; 252:111160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111160>.
13. Степанов Д. В., Резидент Д. М., Мартиненко В. В. Аналіз заходів для підвищення енергоефективності житлового будинку. Вісник ВПІ. 2024. (6):62–67.
14. Pinky Devi L., Palaniappan S. Life cycle energy analysis of a low-cost house in India. International Journal of Construction Education and Research. 2018. 15(4):256–275. DOI: <https://doi.org/10.1080/15578771.2018.1476935>.
15. Doodoo A., Gustavsson L., Tetley U. Y. Final energy savings and cost-effectiveness of deep energy renovation of a multi-storey residential building. Energy. 2017. 135:563–576.
16. Кіржецька М, Кіржецький Ю. Актуальні аспекти сталого бізнесу за ESG стандартами в Україні. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія “Проблеми економіки та управління”. 2022. 6:32–40.
17. Козик В. В., Марущак У. Д., Марко О. Й. Оцінка енергоефективності в життєвому циклі об'єктів житлового будівництва. Бізнес Інформ. 2024. № 5. С. 201–207. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001496946>.
18. Марущак У. Д., Позняк О. Р., Солтисік Р. А., Проць Є. Оптимізація параметрів світлопрозорих конструкцій. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва. 2019. Т. 1. № 2. С. 30–35.
19. Закон України “Про енергетичну ефективність будівель” від 22.06.2017 р. № 2118-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text> (дата звернення: 28.02.2025).
20. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. Київ: Мінрегіон України, 2022. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=107226 (дата звернення: 28.02.2025).

21. ДСТУ EN 16627:2019. Будівлі та будівельні елементи. Оцінка життєвого циклу. Загальні принципи та методи. Київ : ДП “УкрНДНЦ”, 2019. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=107226 (дата звернення: 28.02.2025).

22. ISO 14044:2006. Екологічний менеджмент. Оцінка життєвого циклу. Вимоги та керівництво. Женева : Міжнародна організація зі стандартизації, 2006. URL: <https://www.iso.org/standard/38498.html> (дата звернення: 04.09.2025).

23. EN 15978:2011. Стійкість будівельних робіт. Оцінка екологічних показників будівель. Метод розрахунку. Брюссель: Європейський комітет зі стандартизації, 2011. URL: <https://www.scribd.com/document/839251653/BS-EN-15978> (дата звернення: 04.09.2025).

24. ДСТУ EN 15978:2018. Будівлі та будівельні елементи. Оцінка життєвого циклу. Методи розрахунку екологічних показників. Київ : ДП “УкрНДНЦ”, 2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=107226 (дата звернення: 04.09.2025).

25. ДСТУ ISO 21930:2021. Будівельні матеріали та вироби. Оцінка життєвого циклу. Загальні принципи та вимоги до екологічної декларації продукції. Київ : ДП “УкрНДНЦ”, 2021. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativity/dstu/5> (дата звернення: 04.09.2025).

26. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074971619479783152?doc_type=2 (дата звернення: 04.09.2025).

27. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція будівель. Київ: Мінрегіон України, 2021. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996?doc_type=2 (дата звернення: 04.09.2025).

28. RICS. *Lifecycle Costing*, 1st edition. London: Royal Institution of Chartered Surveyors. 2025. URL: https://www.rics.org/content/dam/ricsglobal/documents/standards/Life-cycle-costing_1st-edition.pdf (Accessed: September 4, 2025).

29. Leontief, W. *Input-Output Economics*. 1986. 2nd ed. Oxford : Oxford University Press. URL: digamo.free.fr/leontief86.pdf.

30. Suh S., Heijungs R. Hybrid Input-Output Life Cycle Assessment. In: Heijungs, R., Suh, S. *The Computational Structure of Life Cycle Assessment*. Series: Eco-Efficiency in Industry and Science. Dordrecht: Springer, 2002. Pp. 263–288. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9900-9> (Accessed: September 4, 2025).

1. International Energy Agency. (2024). *Ukraine energy profile – Analysis*. Retrieved from <https://www.iea.org>.

2. World Bank. (n.d.). *World Bank document*. Retrieved from <https://www.worldbank.org>.

3. State Statistics Service of Ukraine. (2024). *Commissioning of residential buildings in Ukraine. Statistical data*. Retrieved from <https://www.ukrstat.gov.ua> (Accessed: February 28, 2025).

4. Ukrainian Association of Renewable Energy. (n.d.). *Energy efficiency and energy saving*. Retrieved from <https://uaea.com.ua/dysp/ee-cons.html> (Accessed: February 28, 2025).

5. United Nations Industrial Development Organization, & Ministry of Economy of Ukraine. (2023). *Policy impact assessment related to standards and technical regulations for Ukraine’s green reconstruction*. Retrieved from <https://www.unido.org>.

6. Rismanchi, B. (2017). District energy network (DEN), current global status and future development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 571–579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.025>.

7. Guiver, C., & Opmeer, M. R. (2024). The energy-balance method for optimal control in renewable energy applications. *Renewable Energy Focus*, 50, Article 100582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100582>.

8. Eaton, R., & Johnson, M. (2015). *A study on energy efficiency in enterprises: Energy audits and energy management systems. Implementation of national minimum criteria for energy audits, in line with Annex VI of the Energy Efficiency Directive*. European Union. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/system/files/eed-art8-study_on_minimum_criteria_for_energy_audits-wp3-final_0.pdf.

9. Ruggieri, G., Maduta, C., & Melica, G. (2023). *Progress on the implementation of energy performance certificates in EU*. European Commission. DOI: <https://doi.org/10.2760/522233>.

10. Wiley, J. A., Benefield, J. D., & Johnson, K. H. (2008). Green design and the market for commercial office space. *Journal of Real Estate Finance and Economics*, 41, 228–243.

11. Caterino, N., Nuzzo, I., Ianniello, A., Varchetta, G., & Cosenza, E. (2021). A BIM-based decision-making framework for optimal seismic retrofit of existing buildings. *Engineering Structures*, 242, 112544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112544>.

12. Devender, D., & Boeing, L. (2024). Life cycle energy analysis of buildings: A systematic review. *Building and Environment*, 252, 111160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111160>.
13. Stepanov, D. V., Rezydent, D. M., & Martynenko, V. V. (2024). Analiz zakhodiv dlia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti zhytlovoho budynku. *Visnyk VPI*, (6), 62–67.
14. Pinky Devi, L., & Palaniappan, S. (2018). Life cycle energy analysis of a low-cost house in India. *International Journal of Construction Education and Research*, 15(4), 256–275. DOI: <https://doi.org/10.1080/15578771.2018.1476935>.
15. Dodoo, A., Gustavsson, L., & Tettey, U. Y. (2017). Final energy savings and cost-effectiveness of deep energy renovation of a multi-storey residential building. *Energy*, 135, 563–576.
16. Kirzhetska, M., & Kirzhetskyi, Y. (2022). Current aspects of sustainable business according to ESG standards in Ukraine. *Visnyk of the Lviv Polytechnic National University. Series: Problems of Economics and Management*, 6, 32–40.
17. Kozyk, V. V., Marushchak, U. D., & Marko, O. Y. (2024). Assessment of energy efficiency in the life cycle of residential construction projects. *Business Inform*, (5), 201–207. Retrieved from <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001496946>.
18. Marushchak, U. D., Pozniak, O. R., Soltysik, R. A., & Prots, Ye. (2019). Optimization of parameters of translucent structures. *Visnyk of the Lviv Polytechnic National University. Theory and Practice of Construction*, 1(2), 30–35. DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2019.02.030>.
19. Verkhovna Rada of Ukraine. (2017). *Law of Ukraine on Energy Efficiency of Buildings* No. 2118-VIII, June 22, 2017. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text> (Accessed: February 28, 2025).
20. DSTU 9190:2022. (2022). *Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=107226 (Accessed: February 28, 2025).
21. DSTU EN 16627:2019. (2019). Buildings and building elements. Assessment of life cycle. General principles and methods. Kyiv: State Enterprise “UkrNDNC”. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=107226 (Accessed: February 28, 2025).
22. ISO 14044:2006. (2006). Environmental management: Life cycle assessment. Requirements and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/38498.html> (Accessed: September 4, 2025).
23. EN 15978:2011. (2011). Sustainability of construction works: Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. Brussels: European Committee for Standardization. Retrieved from <https://www.scribd.com/document/839251653/BS-EN-15978> (Accessed: September 4, 2025).
24. DSTU EN 15978:2018. (2018). Buildings and building elements. Assessment of life cycle. Calculation methods of environmental performance. Kyiv: State Enterprise “UkrNDNC”. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=107226 (Accessed: September 4, 2025).
25. DSTU ISO 21930:2021. (2021). Building materials and products. Assessment of life cycle. General principles and requirements for environmental product declaration. Kyiv: State Enterprise “UkrNDNC”. Retrieved from <https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/5> (Accessed: September 4, 2025).
26. DBN V.2.5-67:2013. (2013). Heating, ventilation and air conditioning. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. Retrieved from https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074971619479783152?doc_type=2 (Accessed: September 4, 2025).
27. DBN V.2.6-31:2021. (2021). Thermal insulation of buildings. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. Retrieved from https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996?doc_type=2 (Accessed: September 4, 2025).
28. RICS. (2025). *Lifecycle Costing*, 1st edition. London: Royal Institution of Chartered Surveyors. Retrieved from https://www.rics.org/content/dam/ricsglobal/documents/standards/Life-cycle-costing_1st-edition.pdf (Accessed: September 4, 2025).
29. Leontief, W. (1986). Input-Output Economics. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press. Retrieved from digamo.free.fr/leontief86.pdf.
30. Suh, S., & Heijungs, R. (2002). Hybrid Input-Output Life Cycle Assessment. In: Heijungs, R., & Suh, S. *The Computational Structure of Life Cycle Assessment*. Series: Eco-Efficiency in Industry and Science. Dordrecht: Springer, pp. 263–288. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9900-9> (Accessed: September 4, 2025).

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ENERGY CONSUMPTION ASSESSMENT IN THE LIFE CYCLE OF RESIDENTIAL BUILDINGS

© Kozyk V., Marko O., 2025

Purpose: The purpose of this study is to consolidate contemporary methodological approaches to assessing energy consumption in residential construction, with a focus on the methodology based on the building life cycle concept. This approach enables a more accurate evaluation of energy consumption impacts at various stages of a building's existence and facilitates the development of recommendations for improving energy efficiency.

Design/methodology/approach: The study employs a comprehensive approach to energy consumption assessment, covering all stages of the residential building life cycle: design, construction, operation, demolition, and disposal. Special attention is given to the differentiation between embodied and operational energy. The research applies methods of energy auditing, energy balance, exergy analysis, and life cycle cost analysis.

Practical implications: The research findings can be used as a tool for planning and monitoring the energy efficiency of residential buildings. They hold practical value for designers, developers, energy auditors, and regulatory authorities in the development of strategies to reduce energy consumption and carbon emissions, especially in the context of the post-war reconstruction of Ukraine's housing stock.

Originality/value: The originality of the study lies in the integration of energy consumption assessment approaches within the framework of the full building life cycle. This allows not only for the quantitative determination of energy expenditures but also for their strategic optimization over time.

Keywords: energy consumption, life cycle, assessment methods, residential construction/

Paper type: research review paper/