

## ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.31

## Методики аналізу життєвого циклу при відновленні історичних будівель

В.І. Дешко<sup>1</sup>, Н.А. Буяк<sup>2</sup>, І.Ю. Білоус<sup>3</sup>, Д.В. Бірюков<sup>4</sup>, А.В. Гавриш<sup>5</sup><sup>1-5</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр-т Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна✉ e-mail: [2korovaj.te@gmail.com](mailto:2korovaj.te@gmail.com)ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-8218-3933>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-0597-6945>; <sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-6640-103X>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0003-1926-6821>; <sup>5</sup><https://orcid.org/0009-0000-1728-1169>

Відновлення існуючих і створення будівель з близьким до нульового споживанням енергії (NZEB) є ключовою тенденцією у напрямку сталого розвитку. Адаптація принципів NZEB для історичних будівель пов'язана з низкою викликів, адже важливо зберегти баланс між збереженням архітектурної спадщини і енергоефективністю. Метою статті є узагальнення наукових підходів щодо аналізу життєвого циклу будівель для низьковуглецевого відновлення історичних будівель в Україні із врахуванням вимог до будівель з майже нульовим споживанням енергії. Дослідження включає систематичний аналіз наукової літератури, яка класифікована за такими напрямками: економічний, екологічний, енергетичний та ексергетичний аналіз життєвого циклу. Окрема увага приділяється питанням та моделям теплового комфорту. Згідно з діючими українськими нормативами вартість життєвого циклу будівлі визначається для таких основних фаз, які мають своє літерне відображення, а саме фаза Виробництво (A1-A3), фаза Зведення (A4, A5), фаза Використання (B) та закінчення життєвого циклу (C), а також оцінюється потенціал повторного використання (D). Фінансовий аналіз життєвого циклу здійснюється відповідно до ДСТУ ISO 15686-5:2023, а саме чиста приведена вартість (NPV) або чисті приведені витрати (NPC); термін окупності; чисті заощадження (net savings; NS); відношення заощаджень до інвестицій (savings-to-investment ratio; SIR); річна вартість (annual cost; AC) чи річний еквівалент вартості (annual equivalent value; AEV). Результати огляду свідчать про необхідність проведення такого аналізу із застосуванням динамічного енергетичного моделювання, енергетичного, ексергетичного та екологічного аналізів, що дозволить врахувати більший набір факторів і створювати та відновлювати будівлі із меншим споживанням викопних ресурсів та шкодою для довкілля. Такий аналіз дозволяє на етапі проектування приймати рішення, що передбачають вищі капітальні вкладення, але у період експлуатації створюють менше навантаження на довкілля та вичерпність енергоресурсів. Отримані висновки можна використати для побудови методики комплексного аналізу життєвого циклу будівель в енергетичному, ексергетичному, економічному аспектах а також забезпечувати належний рівень теплового комфорту із використанням відповідного підходу чи моделі.

**Ключові слова:** Показник глобального потепління; Аналіз життєвого циклу; Приєднаний вуглець; Операційний вуглець; Комфортні умови.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3275>

© The Author(s) 2025. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## 1. Вступ

Споживання енергії будівлями викликає зростаючий інтерес у світі та ЄС, що отримало своє

відображення у відповідних нормативних документах. Наприклад, було прийнято зобов'язання модернізувати існуючий будівельний фонд, зробивши його більш стійким і декарбонізованим.

Вводяться нові визначення, а саме «Будівлі з нульовими викидами (ZEB)» з високим рівнем виробництва енергії з відновлюваних джерел і майже нульовим споживанням енергії. В умовах воєнної агресії для України є актуальним питання відновлення пошкоджених будівель в реаліях високих стандартів щодо енергоефективності та викидів вуглецю. Особливий інтерес становлять історичні будівлі у відновленні яких є свої особливості та цінність.

Відповідно до визначення, історичні будівлі – це споруди, побудовані до 1945 року з використанням доіндустріальних технологій. Виходячи з європейської законодавчої та нормативної точки, лише ті будівлі, які мають відносно високий ступінь фізичної цілісності, а також визнані історичні та культурні особливості (наприклад, внесені до списку архітектурної спадщини), можуть вважатися «історичними» [1].

Енергетичне моделювання (BEM) історичних будівель, стає все більш неінвазивним і корисним засобом покращення їх енергетичних і екологічних показників шляхом підтримки обґрунтованого вибору відповідних рішень для чутливої реконструкції [2]. Під час енергетичної реновації історичної будівлі слід досягнути балансу між покращенням енергоефективності та захистом цінностей спадщини. Тому розроблені різні методології для оцінки та визначення найбільш прийнятних заходів з енергетичної реновації для таких об'єктів [3].

Перший етап проекту енергетичної реновації включає енергоаудит для визначення заходів щодо покращення енергоефективності. За допомогою цієї оцінки пропонуються пасивні та активні дії чи заходи. Наступним етапом є оцінка сценаріїв з використанням енергетичного [4], економічного [5] та ексергетичного підходів [6]. Особливо актуальним в умовах сталого розвитку є аналіз життєвого циклу таких проектів та забезпечення відповідного мікроклімату та теплового комфорту. Важливим етапом є встановлення системи енергоменеджменту будівлі (BEMS), яка контролює та оптимізує роботу обладнання, що у свою чергу покращує енергетичну ефективність будівлі.

Модель циркуляційної економіки обумовлює використання сучасних підходів аналізу життєвого циклу будівель з врахуванням енергетичного/ексергетичного екологічного і економічного підходів. Саме ґрунтовний аналіз у цих трьох напрямках на всіх етапах життєвого циклу дозволить максимально повно оцінити ефективність вико-

ристання ресурсів і проектувати будівлі чи впроваджувати заходи спрямовані саме на комплексне раціональне використання ресурсів і зниження негативного впливу на середовище, а в майбутньому і проектування будівель що є максимально інтегровані в середовище і здатні до самозабезпечення. Важливим при цьому є забезпечення комфортних умов, що напряму впливають на здоров'я і ефективну діяльність людини для якої створюються будівлі.

## 2. Економічний аналіз

Відповідно до ДБН А.2.2.3 [7], на основі якого здійснюється проектування будівель і споруд, введено можливість обґрунтування інвестицій на основі аналізу всіх етапів життєвого циклу об'єкту будівництва. Тому у проєктанта існує нормативно обґрунтована можливість застосування інструментів оцінки життєвого циклу. Основні етапи життєвого циклу та модулі для аналізу, що використовують конкретні програмні продукти, відповідно до EN 15978. Будівлі та об'єкти нерухомого майна. Планування строку експлуатації. Частина 5. Оцінювання вартості життєвого циклу [8], представлено у таблиці 1. Вартість життєвого циклу будівлі визначається для таких основних фаз, які мають своє літерне відображення, а саме фаза Виробництво (A1-A3), фаза Зведення (A4, A5), фаза Використання (B) та закінчення життєвого циклу (C), а також оцінюється потенціал повторного використання (D). Окрім оцінки вартості життєвого циклу, проводять аналіз повного життєвого циклу будівлі, який включає не будівельні витрати, доходи та зовнішні витрати (рис.1).

Фінансовий аналіз життєвого циклу здійснюється відповідно до ДСТУ ISO 15686-5:2023 на основі таких показників [8]: чиста приведена вартість (NPV) або чисті приведені витрати (NPC); термін окупності; чисті заощадження (net savings; NS); відношення заощаджень до інвестицій (savings-to-investment ratio; SIR); річна вартість (annual cost; AC) чи річний еквівалент вартості (annual equivalent value; AEV).

Даний стандарт описує можливість врахування зміни вартості грошей у часі та інфляції, ризиків та невизначеностей, детально описано розрахунок чутливості проекту до зміни ставки дисконтування та вартості енергоносіїв в часі, що є основою для здійснення таких розрахунків під час відновлення історичних будівель і надає ширшу інформацію для прийняття рішень.

Таблиця 1 – Фази життєвого циклу будівлі

Фаза життєвого циклу	Виробництво			Зведення		Використання							Закінчення життєвого циклу				
	Видобуток сировини	Транспортування	Виробництво	Транспортування	Зведення	Експлуатація	Обслуговування	Ремонт	Заміщення	Модернізація	Споживання енергії при експлуатації	Споживання води при експлуатації	Заміщення/демонтаж	Транспортування	Переробка відходів	Утилізація	Потенціал повторного використання
Модуль	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

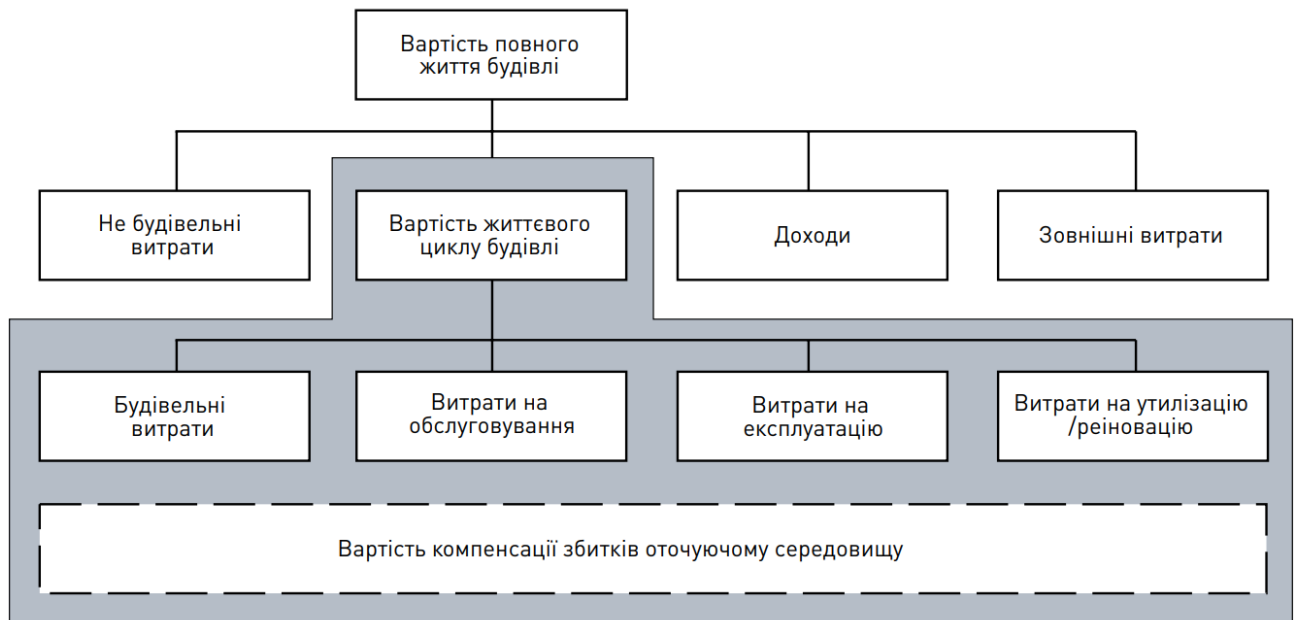


Рисунок 1 – Складові аналізу повного життєвого циклу будівлі [8]

На даний момент в Україні не розроблено програмних продуктів, які допомогли б реалізувати аналіз зазначених фінансових показників на різних етапах життєвого циклу будівлі. Одна у наукових працях представлено приклади етапів такого аналізу і можливості реалізації аналізу чутливостей [9]. А саме алгоритм оцінки вартісного аналізу життєвого циклу представлено на рис.2 [10].

У роботі [11] представлено нову методологічну оцінку декарбонізації житлового фонду Іспанії, що ґрунтується на необхідності розробки детальних планів декарбонізації житлового фонду, відповідно до вимог Європейського союзу. Пред-

ставлено оцінку стратегій реконструкції житлового сектору за допомогою динамічного моделювання та екологічно-економічної оцінки на основі аналізу життєвого циклу з використанням інструменту PARARENOVATE-LCT [10]. Такий підхід дозволяє розробити поетапні плани декарбонізації, надаючи пріоритет сценаріям з найвищим потенціалом декарбонізації.

Отже, з урахуванням необхідності розробки та втілення стратегій декарбонізації при відновленні будівель важливим є врахування не тільки економічних параметрів а і ґрунтового розуміння і детального прорахунку екологічних.

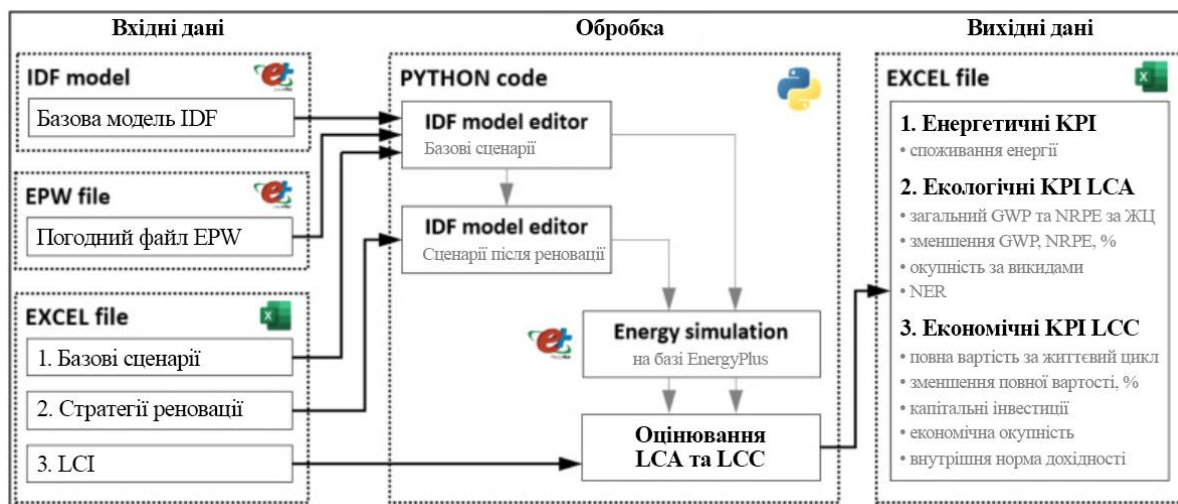


Рисунок 2 – Алгоритм параметричного інструменту оцінки LCA-LCC для еколого-економічної оцінки стратегій реновації у житлових будівлях з урахуванням життєвого циклу за допомогою інструменту PARARENOVATE-LCT [10]

### 3. Екологічний аналіз

У зв'язку із рядом закріплених зобов'язань у національному законодавстві та міжнародні зобов'язання, в Україні впроваджується і розробляється системи оцінки впливу на довкілля [12]. Зокрема діючий стандарт ДСТУ EN 15978:2022 [13] використовує аналіз життєвого циклу для оцінки

екологічного впливу будівлі від виробничих матеріалів до утилізації. Даний стандарт прийнятий Наказом від 28.12.2022 № 285 Про пакетне прийняття європейських нормативних документів CEN/CENELEC і є перекладом європейського стандарту EN 15978:2011 [14]. Основні етапи життєвого циклу аналогічні, як у стандарті [8] і представлені на рис.3.

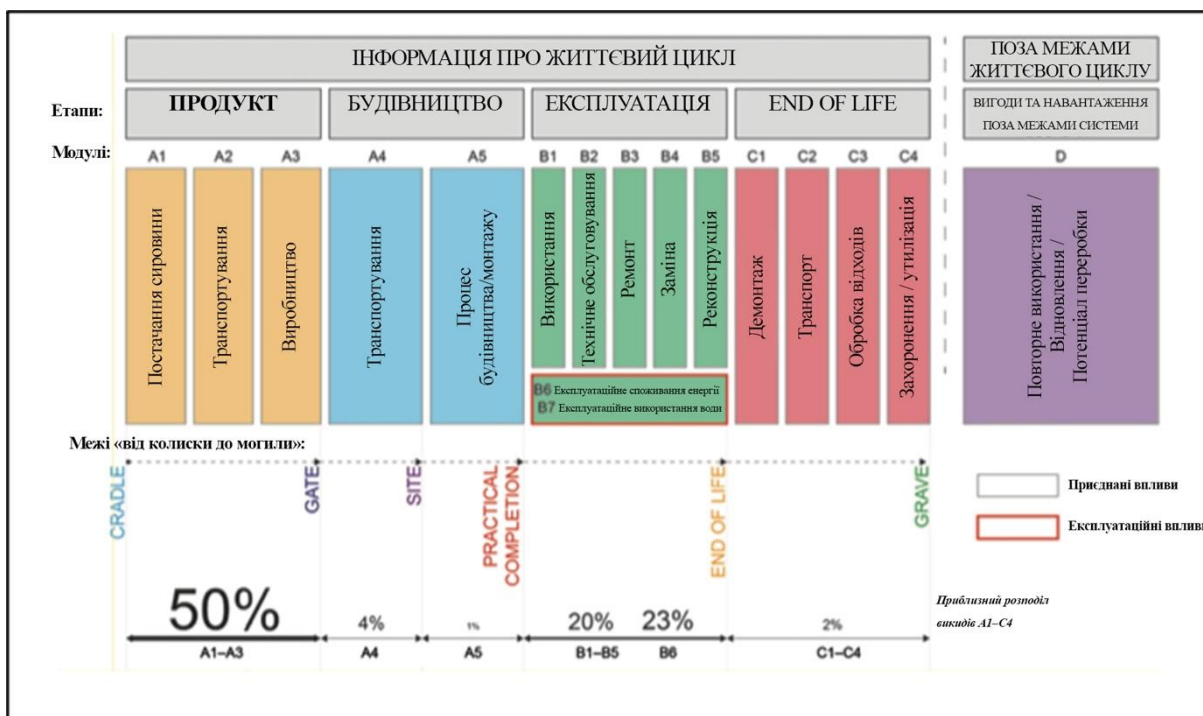


Рисунок 3 – Етапи життєвого циклу [15]

Аналіз впливу на навколишнє середовище регламентує серія стандартів ISO 14000 [16], відповідно до якої оцінюють такі показники:

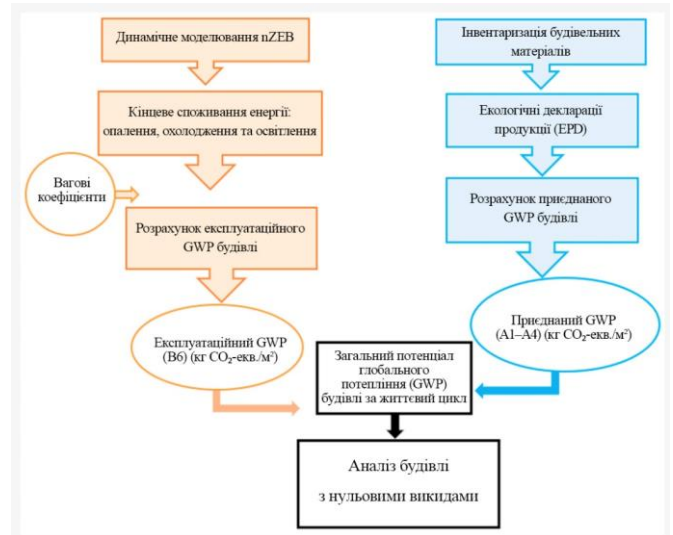
- потенціал глобального потепління, кг CO<sub>2</sub> – еквіваленту (GWP);
- руйнування озонового шару, в кг CFC-11;

- підкислення земельних та водних джерел, в молях  $H^+$  або  $kg\ SO_2$ ;
- евтрофікація, в  $kg$  азоту або  $kg$  фосфату;
- утворення тропосферного озону, в  $kg\ O_3$  – еквіваленту чи в  $kg$  прекурсорів (етену,  $NO_x$ );
- виснаження невідновлюваних джерел енергії, в МДж.

Особлива увага в контексті декарбонізації з використанням аналізу життєвого циклу приділяється потенціалу глобального потепління (GWP). Методологія і особливості його розрахунку в контексті життєвого циклу не деталізовано в національному законодавстві, однак існують принципи його визначення в період експлуатації [10]. Важливими є дослідження, які представляють методологію визначення GWP на всіх етапах життєвого циклу. GWP який пов'язаний з експлуатацією будівлі називається експлуатаційний GWP, а зі створенням – приєднаний. На рис.4 [17] представлено нову та оптимізовану методологію оцінки життєвого циклу (LCA) відповідно до EN 15978 для цілісної оцінки потенціалу глобального потепління (GWP) будівель, який поєднує каліброване динамічне моделювання експлуатаційного використання енергії, виконане за допомогою Design-Builder, для визначення точних експлуатаційних викидів  $CO_2$ . Другим етапом є комплексна оцінка приєднаних викидів, що охоплює будівельні матеріали та фази транспортування, з використанням детальних декларацій екологічної продукції (EPD). Особливості розрахунку приєднаних викидів описані методиками у кожній з країн європейського союзу [18], а також розроблені програмні продукти та таблиці, які ґрунтуються на базах даних будівельних матеріалів [19] в Україні такі підходи розробляються. Приклад EPD, що є основою для визначення приєднаного вуглецю у будівлях представлено на рис.5 [20]. Результати відображені для кожного з етапів життєвого циклу за такими характеристиками: потенціал глобального потепління, невідновлювальні ресурси, енергоспоживання, споживання води, генерування відходів.

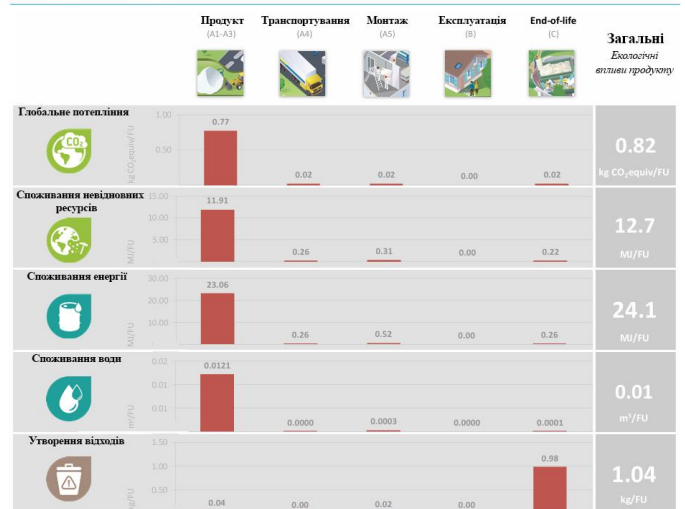
Застосування оптимізованої методології оцінки життєвого циклу (LCA) для оцінки потенціалу глобального потепління (GWP) будівель nZEB (в Іспанії) [17] показує, що, що приєднані викиди домінують у GWP життєвого циклу, складаючи 69%, тоді як експлуатаційні викиди складають лише 31% для терміну 50 років, підкреслює зростаючу важливість приєднаних викидів у міру зниження експлуатаційних витрат енергії. Вдоско-

налена система оцінки життєвого циклу (LCA), це алгоритм для досягнення ZEB, що обумовлює суттєве скорочення глобального споживання енергії та викидів вуглецю, а також сприятиме пом'якшенню наслідків зміни клімату.



**Рисунок 4** – Методологія визначення показника глобального потепління GWP для життєвого циклу будівлі [17]

#### Інтерпретація результатів LCA

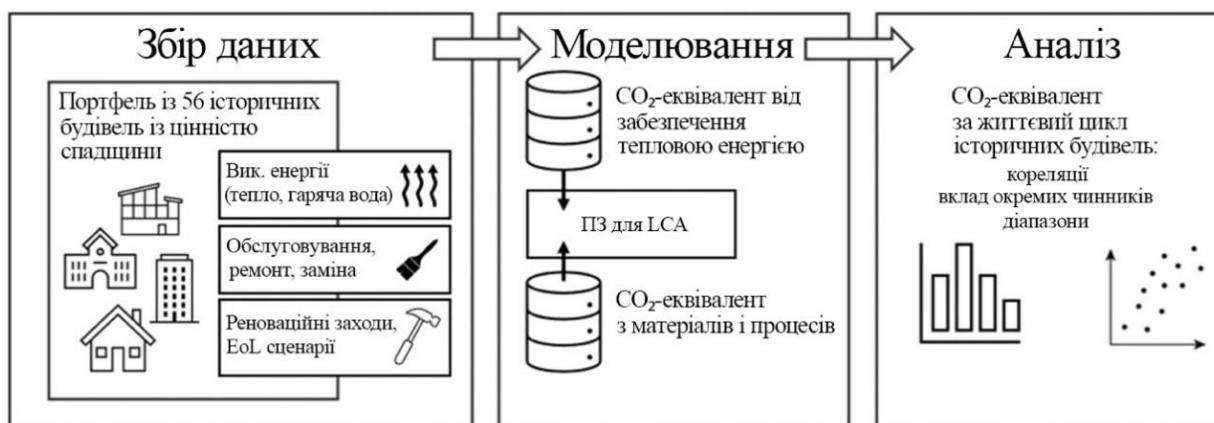


**Рисунок 5** – Представлення результатів екологічного аналізу життєвого циклу в EPD

Прикладом використання екологічного аналізу на різних етапах життєвого циклу є реконструкція 100-річного дерев'яного багатоквартирного будинку у зоні охорони історичної спадщини у Естонії, який був спроектований як будівля з майже нульовим енергоспоживанням (nZEB) [21]. У цьому дослідженні розглянуто вплив різних сценаріїв реконструкції, враховуючи як приєднані так і експлуатаційні викиди  $CO_2$ . Глибока реконструкція

історичної дерев'яної будівлі зменшує її вуглецевий слід, оскільки призводить до більш енергоефективних рішень для реконструкції, оскільки експлуатаційні викиди переважають над приєднаними в холодному кліматі. З екологічної точки зору, більш доцільно проводити ґрунтовнішу реконструкцію історично цінних будівель, ніж покращувати їх зовнішній вигляд. Ремонтні роботи для досягнення рівня nZEB (будівлі з низькою енергоефективністю) повинні включати ізоляцію теплової оболонки, одночасно відновлюючи історичний вигляд та зберігаючи оригінальний профіль будівлі. Більшість цих досліджень пропонують комплексний аналіз різних сценаріїв, включаючи вуглецевий слід, енергоефективність та оптимальність витрат, пов'язаних з різними стратегіями реконструкції будівель, розташованих у зонах охорони історичної спадщини. Автори наголошують на тому, що капітальний ремонт є більш економічно ефективним у порівнянні з поетапним.

Питання реконструкції, обслуговування та управління історичними будівлями повинно бути ретельно продуманим і обґрунтованим з ціллю збереження історичної спадщини, однак існує мало практичних прикладів аналізу життєвого циклу в контексті викидів вуглецю. Проведені дослідження оцінки життєвого циклу 56 історичних будівель у Данії за період з 2015 по 2023 рік надають унікальне розуміння реальних заходів з технічного обслуговування, ремонту та заміни показують, що системи опалення є найважливішим фактором, що визначає викиди парникових газів протягом життєвого циклу відремонтованих будівель [22]. Три етапний підхід до оцінки викидів парникових газів протягом життєвого циклу будівель, що мають історичну спадщину представлено на рис. 6. і складається з таких етапів : збір даних, моделювання та аналіз. Необхідно наголосити на актуальності і недостатньому опрацюванню саме третьої стадії.



**Рисунок 6** – Триетапний підхід до оцінки викидів парникових газів протягом життєвого циклу історичних будівель, що мають спадщину [22]

Інтегруючи аналіз вартості життєвого циклу (LCC) та викидів вуглецю протягом життєвого циклу (LCCE) у процес прийняття рішень, система забезпечує прозору методологію для оцінки енергозберігаючих заходів (ESM) для визначення пріоритетів реконструкції в межах будівельного фонду [23]. На прикладі шести шкільних будівель запропонований алгоритм демонструє його здатність визначати економічно оптимальні та вуглецево ефективні стратегії реконструкції. Ключові висновки включають скорочення споживання енергії на 18-31% та скорочення викидів вуглецю на 7-30% для половини оцінених будівель.

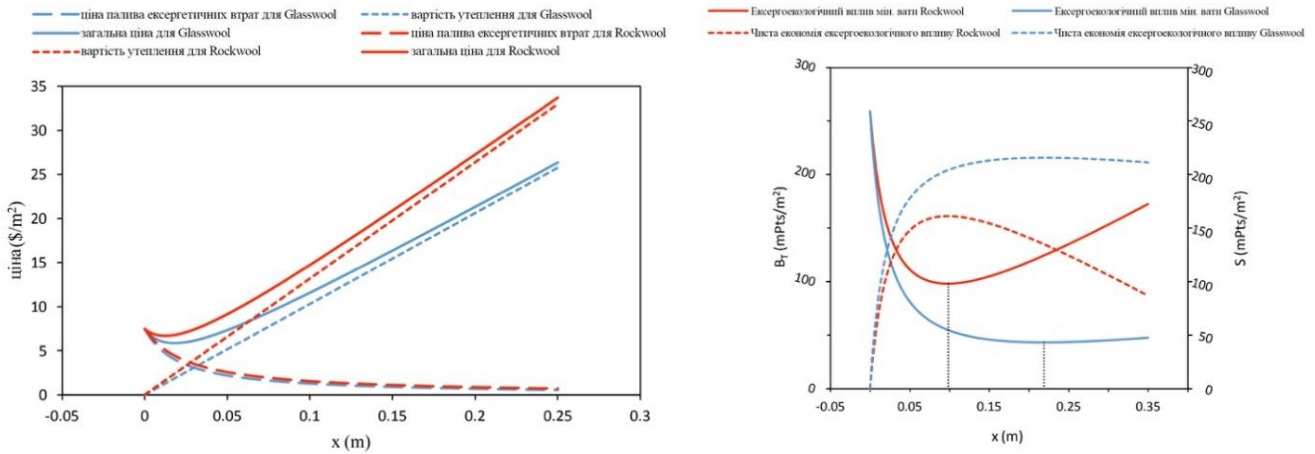
#### 4. Ексергетичний та ексергоекономічний аналіз

Використання різних за якістю джерел енергії для забезпечення відповідного мікроклімату в історичних будівлях обумовлює доповнення аналізу життєвого циклу ексергетичним аналізом, ексергоекономічним а також оцінкою рівня теплового комфорту та мікроклімату, що має свої особливості в таких будівлях.

Ексергетична оцінка життєвого циклу використовується для обліку ресурсів при оцінці життєвого циклу, методи, засновані на ексергії, забезпечують більш комплексну міру сталості, враховуючи як енергетичні, так і неенергетичні ресурси. Існуючі дослідження використовують ексергетичну оцінку життєвого циклу як доповнення до традиційного LCA в обліку ресурсів, а також існує можливість для більш комплексної ексерге-

тичної оцінки життєвого циклу, яка включає ексергію викидів життєвого циклу [24]. Запропоновано обирати оптимальну товщину теплоізоляції будівлі на основі ексергетичного аналізу життєвого циклу, представлено ексергетичний

екологічний фактор, на основі якого проводиться оптимізація [25]. На рис.7. представлено вибір оптимальної товщини теплоізоляції зовнішніх огорожень на основі ексергоекономічного та ексергоекологічного підходів.



**Рисунок 7** – Вибір оптимальної товщини теплоізоляції на основі ексергоекономічного та ексергоекологічного підходів

## 5. Тепловий комфорт в будівлях

Важливим аспектом є забезпечення належного мікроклімату в історичних будівлях, для оцінки якого використовують показники традиційні моделі [26], а також ексергетичні моделі, що дозволяють врахувати механізми терморегуляції людини [27]. Класифікація моделей теплового комфорту представлено на рис.8 [28].

Поведінка мешканців і питання теплового комфорту змінюються у зв'язку з екологічними та

енергетичними змінами. Тому розуміння впливу поведінки мешканців, факторів, що впливають на тепловий комфорт, та підходів до моделювання поведінки мешканців – це ще один із важливих аспектів комплексного аналізу. Поведінку мешканців можна поділити на п'ять категорій: характеристики мешканців, сприйняття мешканця, реалістична поведінка, тепловиток та взаємодія мешканців із системою. Аналіз теплового комфорту також інтегрується і в аналіз життєвого циклу і є його невід'ємною частиною [29].



**Рисунок 8** – Класифікація моделей теплового комфорту [28]

Іншим аспектом який слід враховувати при відновленні будівель це сценарії зміни клімату, оскільки термін експлуатації будівель становить близько 100 років і варто враховувати вплив цього фактору на енергоспоживання та тепловий комфорт. Щоб краще зрозуміти та врахувати вплив зміни клімату на енергоспоживання та рівень ком-

форту на прикладі офісних будівель у Канаді (що характеризується холодним та вологим кліматом) моделювання енергоспоживання будівель проводиться з використанням кліматичних прогнозів на період 2056–2075 років. Результати показують зниження навантаження на опалення та збільшення навантаження на охолодження через майбутні

вищі температури по всій Канаді. Для всіх трьох вибраних міст розширення заданих значень температури призводить до значного відсотка зон з прогнозованим середнім значенням (PMV) поза діапазоном  $\pm 0,5$ . Автори оцінюють переваги підвищення рівня теплоізоляції для досягнення теплового комфорту в холодні зимові дні та негативні наслідки, які можуть виникнути в літні дні [30].

## 6. Висновки та перспективи

У рамках даної роботи було проаналізовані літературні джерела які присвячені вивченню питання відновлення історичних будівель в умовах викликів щодо створення будівель з майже нульовим споживанням енергії та викидами парникових газів. Представлено нормативні документи, які обумовлюють використання методів аналізу життєвого циклу під час створення проектною документації на будівництво. Детально розглянуто особливості аналізу життєвого циклу, а саме його етапи та показники. Можна стверджувати необхідність проведення такого аналізу із застосуванням динамічного енергетичного моделювання, енергетичного, ексергетичного та екологічного аналізів, що дозволить врахувати більший набір факторів і створювати та відновлювати будівлі із меншим споживанням викопних ресурсів та шкодою для довкілля. Такий аналіз дозволяє на етапі проектування приймати рішення, що передбачають вищі капітальні вкладення, але у період експлуатації створюють менше навантаження на довкілля та вичерпність енергоресурсів.

Ще одним важливим аспектом аналізу є забезпечення відповідного мікроклімату та теплового комфорту у будівлях, для цього необхідно використовувати стандарти та моделі теплового комфорту, особливо актуальною є ексергетична модель. Використання таких моделей в стратегіях керування є вагомим кроком до підвищення енергоефективності.

## Особистий внесок авторів CRediT

**Дешко В.І.:** концептуалізація, методологія. **Буяк Н.А.:** постановка задачі, обробка даних. **Білоус І.Ю.:** концептуалізація, постановка задачі. **Бірюков Д.В.:** методичне забезпечення, аналіз та узагальнення даних. **Гавриш А.В.:** аналіз та узагальнення даних, обробка даних, інформаційний пошук

## Література

1. **E. Verticchio et al.** Current practices and open issues on the whole-building dynamic simulation of historical buildings: a review of the literature case studies // *Building and Environment*. – 2024. – P. 111621. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111621>
2. **E. Verticchio et al.** Building Energy Modelling for Historical Buildings: Current Distribution of Literature Case Studies in View of Climate Change // *Procedia Structural Integrity*. – 2024. – Vol. 55. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.001>
3. **S. K. Güleröglu et al.** Methodological approach for performance assessment of historical buildings based on seismic, energy and cost performance: A Mediterranean case // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – Vol. 31. – 101372. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101372>
4. **Panakaduwa C., Coates P., Munir M.** Identifying sustainable retrofit challenges of historical Buildings: A systematic review // *Energy and Buildings*. – 2024. – P. 114226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114226>
5. **K.-A. Kertsmik et al.** Low carbon emission renovation of historical residential buildings // *Energy Reports*. – 2024. – Vol. 11. – P. 3836-3847. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.030>
6. **Nwodo M. N., Anumba C. J.** Exergetic Life Cycle Assessment: A Review // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – No. 11. – P. 2684. <https://doi.org/10.3390/en13112684>
7. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проектною документації на будівництво. Зі Змінами № 1 та № 2. Чинний від 2022-07-01. – Вид. офіц.: Київ, 2022.
8. ДСТУ ISO 15686-5:2020. Будівлі та об'єкти нерухомого майна. Планування строку експлуатації. Частина 5. Оцінювання вартості життєвого циклу. Чинний від 2023-02-01. Вид. офіц. 2023.
9. **Buyak N., Dешко V., Borodinecs A., Bilous I., Naumchuk O., Sukhodub I.** Assessment of strategies for low-carbon regeneration of buildings in Eastern Europe // *Energy*. – 2025. – Vol. 325. – P. 136069.
10. **M. Arbulu, X. Oregi, L. Etxepare.** Parametric simulation tool for the enviro-economic evaluation of energy renovation strategies in residential buildings with life cycle thinking: PARARENOVATE-LCT // *Energy and buildings*. – 2024. – Vol. 312. – P. 114182, [10.1016/j.enbuild.2024.114182](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114182).
11. **M. Arbulu, X. Oregi, L. Etxepare, A. Fuster, Ravi S. Srinivasan.** Decarbonisation of the Basque Country residential stock by a holistic enviro-econo-

- mic assessment of renovation strategies under the life cycle thinking for climate risk mitigation // *Sustainable Cities and Society*. – 2024. – Vol. 117. – P. 105963. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105963>.
12. **Білик А.С.** Екологічний та економічний аналіз життєвого циклу каркасів будівель: монографія. – К.: УЦСБ, КНУБА, 7БЦ, 2022. – 263 с.
13. ДСТУ EN 15978:2022. Стійкість будівельних робіт. Оцінювання екологічних характеристик будівель. Метод розрахунку (EN 15978:2011, IDT). Чинний від 2023-12-31. Вид. офіц.
14. Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method. EN 15978:2011. Effective from 2012-05-31. Official edition.
15. **Insider S.** Life cycle stages in Construction works as per BS EN 15978: 2011. Structures Insider. URL: <https://www.structuresinsider.com/post/life-cycle-stages-in-construction-works-as-per-bs-en-15978-2011> (дата звернення: 18.08.2025).
16. ISO 14000 Series. Encyclopedia of Sustainable Management. – 2023. – P. 2058. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25984-5\\_301297](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25984-5_301297)
17. **A. Palomar-Torres et al.** Decarbonizing Near-Zero-Energy Buildings to Zero-Emission Buildings: A Holistic Life Cycle Approach to Minimize Embodied and Operational Emissions Through Circular Economy Strategies // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – No. 5. – P. 2670. <https://doi.org/10.3390/app15052670>
18. How to calculate embodied carbon. URL: <https://www.egbc.ca/getmedia/a7603519-43cc-4795-8558-6960b2b7b5d1/HTCEC-2nd-edition.pdf> (дата звернення: 18.08.2025).
19. The Structural Carbon Tool – version 3. URL: <https://www.istructe.org/resources/guidance/the-structural-carbon-tool/> (дата звернення: 18.08.2025).
20. Environmental product declaration. URL: [https://www.rockwool.com/syssiteassets/o2-rockwool/dokumentit-ja-sertifikaatit/dokumentit/epd---environmental-product-declaration/epd\\_boh-cig-mal-tap.pdf](https://www.rockwool.com/syssiteassets/o2-rockwool/dokumentit-ja-sertifikaatit/dokumentit/epd---environmental-product-declaration/epd_boh-cig-mal-tap.pdf) (дата звернення: 18.08.2025).
21. **K.-A. Kertsmik, E. Arumägi, J. Hallik, T. Kalamees.** Low carbon emission renovation of historical residential buildings // *Energy Reports*. – 2024. – Vol. 11. – P. 3836-3847. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.03.030>.
22. **F. N. Rasmussen, T. F. Andersen, A. M. Rahbæk, H. Birgisdóttir, C. Bertolin.** Empirical assessment of life cycle GHG emissions of historical buildings with heritage values // *Energy Reports*. – 2025. – Vol. 14. – P. 141-156, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.05.073>.
23. **O. Fahlstedt, A. Temeljotov-Salaj, F. N. Rasmussen, R. A. Bohne.** Integrating energy, cost, and carbon assessments into building portfolio management: A case study // *Energy and Buildings*. – 2025. – Vol. 336. – P. 115538 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115538>.
24. **Nwodo M. N., Anumba C. J.** Exergetic Life Cycle Assessment: A Review // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – No. 11. – P. 2684. <https://doi.org/10.3390/en13112684>
25. **M. Ashouri et al.** Optimum insulation thickness determination of a building wall using exergetic life cycle assessment // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 106. – P. 307-315. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.190>
26. **J. Lyu et al.** Analysis of occupant thermal comfort and energy-saving potential based on cooling behaviors in residential buildings: A case study of Shanghai // *Building and Environment*. – 2025. – P. 112792. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112792>
27. **Shukuya M.** Exergetic approach to the understanding of built environment – state-of-754 the-art review // *Japan architectural review*. – 2019. – Vol. 2(2). – P. 143-152. <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12082>.
28. **V.A. Arowoia, A. O. Onososen, R.C. Moehler, Y. Fang.** Influence of Thermal Comfort on Energy Consumption for Building Occupants: The Current State of the Art // *Buildings* – 2024. – Vol. 14(5). – P. 310. <https://doi.org/10.3390/buildings14051310>
29. **S. Algburi, A. Mohammed, I. Abdullah, T. M. Hanoon, H. F. Fakhrudeen, O. Mukhitdinov, F. I. Jabbar, Q. Hassan, A. Khudhair, D. Kato.** Predictive modeling of building energy consumption and thermal comfort for decarbonization in construction and retrofitting // *Results in Engineering*. – 2025. – Vol. 26. – P. 105475. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105475>.
30. **P. Jafarpur, U. Berardi.** Effects of climate changes on building energy demand and thermal comfort in Canadian office buildings adopting different temperature setpoints // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 42. – P. 102725. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102725>.

## Life cycle analysis methods for the restoration of historic buildings

Valerii Deshko<sup>1</sup>, Nadia Buyak<sup>2</sup>✉, Inna Bilous<sup>3</sup>, Dmytro Biriukov<sup>4</sup>, Andrii Gavrysh<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine

✉ e-mail: <sup>2</sup>korovaj.te@gmail.com

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-8218-3933>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-0597-6945>; <sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-6640-103X>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0003-1926-6821>; <sup>5</sup><https://orcid.org/0009-0000-1728-1169>

*The renovation of existing and the creation of buildings with nearly zero energy consumption (NZEB) is a key trend towards sustainable development. The adaptation of NZEB principles for historic buildings is associated with a number of challenges, as it is important to maintain a balance between the preservation of architectural heritage and energy efficiency. The aim of the article is to summarize scientific approaches to the analysis of the life cycle of buildings for low-carbon renovation of historic buildings in Ukraine, taking into account the requirements for buildings with nearly zero energy consumption. The study includes a systematic analysis of scientific literature, which is classified into the following areas: economic, environmental, energy and exergy life cycle analysis. Special attention is paid to issues and models of thermal comfort. According to current Ukrainian standards, the life cycle cost of a building is determined for the following main phases, which have their own letter representation, namely the Production phase (A1-A3), the Construction phase (A4,A5), the Use phase (B) and the end of the life cycle (C), and the reuse potential (D) is also assessed. Financial life cycle analysis is carried out in accordance with DSTU ISO 15686-5:2023, namely net present value (NPV) or net present cost (NPC); payback period; net savings (NS); savings-to-investment ratio (SIR); annual cost (AC) or annual equivalent value (AEV). The results of the review indicate the need for such an analysis using dynamic energy modeling, energy, exergy and environmental analyses, which will allow taking into account a larger set of factors and creating and renovating buildings with less consumption of fossil resources and damage to the environment. Such an analysis allows making decisions at the design stage that involve higher capital investments, but during the operation period create less environmental burden and depletion of energy resources. The conclusions obtained can be used to build a methodology for comprehensive analysis of the life cycle of buildings in energy, exergy, economic aspects, as well as to ensure an appropriate level of thermal comfort using an appropriate approach or model.*

**Keywords:** Global warming index; Life cycle analysis; Attached carbon; Operational carbon; Comfortable conditions.

### References

1. Verticchio, E. et al. (2024) Current practices and open issues on the whole-building dynamic simulation of historical buildings: a review of the literature case studies. *Building and Environment*, 111621.
2. Verticchio, E. et al. (2024) Building Energy Modelling for Historical Buildings: Current Distribution of Literature Case Studies in View of Climate Change. *Procedia Structural Integrity*, 55, 1-8.
3. Güleröglü, S. K. et al. (2020) Methodological approach for performance assessment of historical buildings based on seismic, energy and cost performance: A Mediterranean case. *Journal of Building Engineering*, 31, 101372.
4. Panakaduwa, C., Coates, P., Munir, M. (2024) Identifying sustainable retrofit challenges of historical Buildings: A systematic review. *Energy and Buildings*, 114226.
5. Kertsmik, K.-A. et al. (2024) Low carbon emission renovation of historical residential buildings. *Energy Reports*, 11, 3836-3847.
6. Nwodo, M. N., Anumba, C. J. (2020) Exergetic Life Cycle Assessment: A Review. *Energies*, 13, 11, 2684.
7. (2022) DBN A.2.2-3:2014. Composition and content of design documentation for construction. With Amendments No. 1 and No. 2. Effective from 2022-07-01. *Official edition: Kyiv*.
8. (2023) DSTU ISO 15686-5:2020. Buildings and real estate objects. Life cycle planning. Part 5. Life cycle cost assessment. Effective from 2023-02-01. *Official edition: Kyiv*.
9. Buyak, N., Deshko, V., Borodinecs, A., Bilous, I.,

- Naumchuk, O., Sukhodub, I.** (2025) Assessment of strategies for low-carbon regeneration of buildings in Eastern Europe. *Energy*, 325, 136069.
10. **Arbulu, M., Oregi, X., Etxepare, L.** (2024) Parametric simulation tool for the enviro-economic evaluation of energy renovation strategies in residential buildings with life cycle thinking: PARARENOVATE-LCT. *Energy and buildings*, 312, 114182.
11. **Arbulu, M., Oregi, X., Etxepare, L., Fuster, A., Srinivasan, Ravi S.** (2024) Decarbonisation of the Basque Country residential stock by a holistic enviro-economic assessment of renovation strategies under the life cycle thinking for climate risk mitigation. *Sustainable Cities and Society*, 117, 105963.
12. **Bilyk, A.S.** (2022) Ecological and economic analysis of the life cycle of building frames: monograph. K.: UCSB, KNUBA, 7BC, 263.
13. (2023) DSTU EN 15978:2022. Sustainability of construction works. Assessment of the environmental characteristics of buildings. Calculation method (EN 15978:2011, IDT). Valid from 2023-12-31. *Official edition: Kyiv*.
14. (2012) Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method. EN 15978:2011. Effective from 2012-05-31. Official edition.
15. **Insider, S.** (2025) Life cycle stages in Construction works as per BS EN 15978: 2011. Structures Insider. Retrieved 18 August 2025 from <https://www.structuresinsider.com/post/life-cycle-stages-in-construction-works-as-per-bs-en-15978-2011>.
16. (2023) ISO 14000 Series. *Encyclopedia of Sustainable Management*, 2058.
17. **Palomar-Torres, A. et al.** (2025) Decarbonizing Near-Zero-Energy Buildings to Zero-Emission Buildings: A Holistic Life Cycle Approach to Minimize Embodied and Operational Emissions Through Circular Economy Strategies. *Applied Sciences*, 15, 5, 2670.
18. How to calculate embodied carbon. Retrieved 18 August 2025 from <https://www.egbc.ca/getmedia/a7603519-43cc-4795-8558-6960b2b7b5d1/HTCEC-2nd-edition.pdf>
19. The Structural Carbon Tool – version 3. Retrieved 18 August 2025 from <https://www.istructe.org/resources/guidance/the-structural-carbon-tool/>
20. Environmental product declaration. Retrieved 18 August 2025 from [https://www.rockwool.com/syssite-assets/o2-rockwool/dokumentit-ja-sertifikaatit/dokumentit/epd---environmental-product-declaration/epd\\_boh-cig-mal-tap.pdf](https://www.rockwool.com/syssite-assets/o2-rockwool/dokumentit-ja-sertifikaatit/dokumentit/epd---environmental-product-declaration/epd_boh-cig-mal-tap.pdf).
21. **Kertsmik, K.-A., Arumägi, E., Hallik, J., Kalamees, T.** (2024) Low carbon emission renovation of historical residential buildings. *Energy Reports*, 11, 3836-3847.
22. **Rasmussen, F. N., Andersen, T. F., Rahbæk, A. M., Birgisdóttir, H., Bertolin, C.** (2025) Empirical assessment of life cycle GHG emissions of historical buildings with heritage values. *Energy Reports*, 14, 141-156.
23. **Fahlstedt, O., Temeljotov-Salaj, A., Rasmussen, F. N., A.Bohne, R.** (2025) Integrating energy, cost, and carbon assessments into building portfolio management: A case study. *Energy and Buildings*, 336, 115538.
24. **Nwodo, M. N., Anumba, C. J.** (2020) Exergetic Life Cycle Assessment: A Review. *Energies*, 13, 11, 2684.
25. **Ashouri, M. et al.** (2016) Optimum insulation thickness determination of a building wall using exergetic life cycle assessment. *Applied Thermal Engineering*, 106, 307-315.
26. **Lyu, J. et al.** (2025) Analysis of occupant thermal comfort and energy-saving potential based on cooling behaviors in residential buildings: A case study of Shanghai. *Building and Environment*, 112792.
27. **Shukuya, M.** (2019) Exergetic approach to the understanding of built environment – state-of-754 the-art review. *Japan architectural review*, 2(2), 143-152.
28. **Arowoija, V.A., Onososen, A. O., Moehler, R.C., Fang, Y.** (2024) Influence of Thermal Comfort on Energy Consumption for Building Occupants: The Current State of the Art. *Buildings*, 14(5), 310.
29. **Algburi, S., Mohammed, A., Abdullah, I., Hanoon, T. M., Fakhrudeen, H. F., Mukhitdinov, O., Jabbar, F. I., Hassan, Q., Khudhair, A., Kato, D.** (2025) Predictive modeling of building energy consumption and thermal comfort for decarbonization in construction and retrofitting. *Results in Engineering*, 26, 105475.
30. **Jafarpur, P., Berardi, U.** (2021) Effects of climate changes on building energy demand and thermal comfort in Canadian office buildings adopting different temperature setpoints. *Journal of Building Engineering*, 42, 102725.