

УДК 691.001.5:332.146.2:725

Г. О. Татарченко*,

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-0337>

Д. М. Безпалій,

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5663-5447>

Кафедра будівництва, урбаністики та просторового планування

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042, Україна.

*автор-кореспондент, e-mail: tatarchenko@snu.edu.ua

Оцінка енергоефективності та принципів Smart City на повному життєвому циклі будівель

Цитувати як:

Татарченко, Г. О., Безпалій, Д. М. (2026). Оцінка енергоефективності та принципів Smart City на повному життєвому циклі будівель. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 153-164. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-12)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. Життєвий цикл будівлі охоплює основні етапи: проєктування, будівництво, експлуатацію та виведення з експлуатації. На кожному з цих етапів формуються відповідні показники енергоефективності. У статті представлено інтегральний аналіз результатів експертного опитування (n = 103, 48 показників) щодо енергоефективності та принципів Smart City на всіх етапах життєвого циклу будівлі. Кожен показник оцінювався за 5-бальною порядковою шкалою Лайкерта. Підтверджено високу експертну підтримку запропонованої моделі сталості та валідність сформованого інструмента оцінювання (α -Кронбаха $\alpha = 0,997$). Структура опитування побудована за модулями стандарту EN 15978:2011: Блок 1 — Планування і проєктування (A1–A3), Блок 2 — Будівництво (A4–A5), Блок 3 — Експлуатація (B1–B7), Блок 4 — Демонтаж/end-of-life (C1–C4). Найвищу значущість експерти надали стадіям проєктування та експлуатації, де можливість впливу на енергоефективність і функціонування будівлі є найбільшими. Експлуатаційний етап продемонстрував найвищий рівень узгодженості оцінок, а пріоритетними показниками визначено ефективність HVAC-систем ($M = 4,64$) та енергоефективне освітлення з інтелектуальним керуванням ($M = 4,55$). Найнижчі оцінки отримала стадія демонтажу та повторного використання матеріалів, що вказує на недостатній рівень розвитку принципів циркулярної економіки. Узагальнення результатів дозволило сформулювати «проєктно-експлуатаційне ядро» сталості будівель, до якого належать: попередній аналіз енергопотреб, пасивні архітектурні рішення, оптимізація орієнтації будівлі, ефективність HVAC-систем та інтелектуальне освітлення. Перспективи подальших досліджень пов'язані з адаптацією запропонованого підходу до різних типів будівель, інтеграцією LCA-

аналізу та розробленням динамічного індексу сталості, що враховуватиме розвиток Smart-технологій і циркулярної економіки.

Ключові слова: життєвий цикл будівлі, розумне місто, енергоефективність, циркулярна економіка, експертне опитування, містобудування

Вступ. Сучасний розвиток урбанізованих територій характеризується активним впровадженням концепції Smart City, що передбачає інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у міську інфраструктуру з метою підвищення ефективності використання ресурсів та якості життя населення [1, 2]. Одним із ключових елементів цієї концепції є будівлі, які споживають значну частку енергоресурсів і суттєво впливають на екологічний стан довкілля. У цьому контексті актуальним є комплексний підхід до оцінки енергоефективності будівель на всіх етапах їх життєвого циклу — від проектування до утилізації.

Життєвий цикл будівлі охоплює основні етапи: проектування, будівництво, експлуатацію та виведення з експлуатації. На кожному з цих етапів формуються відповідні показники енергоефективності. Зокрема, на стадії проектування визначаються базові параметри енергоспоживання, обираються матеріали та технологічні рішення, що впливають на подальшу ефективність будівлі. На етапі будівництва важливим є дотримання технологічних норм і контроль якості виконання робіт. У період експлуатації відбувається фактичне споживання енергії, яке залежить від ефективності інженерних систем, режимів використання будівлі та рівня автоматизації. Завершальний етап передбачає утилізацію або повторне використання матеріалів із мінімізацією негативного впливу на довкілля [3].

На будівельний сектор припадає приблизно 36 % глобального кінцевого енергоспоживання та 39 % енергетичних викидів CO₂, з яких 11–15 % припадають на стадії будівництва, монтажу та end-of-life процеси (за оцінками IEA, UN Environment Global Status Report) [4]. Європейська директива щодо енергетичної ефективності будівель [5], Регламент про будівельні вироби [6], Рамкова директива про відходи 2008/98/EC [7] та стандарт ISO 20887:2020 [8] формують нормативну базу, що вимагає узгодженої оцінки енергетичних та екологічних характеристик на всіх стадіях життєвого циклу — від концепції та проектування через будівництво, експлуатацію до завершального демонтажу.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Загалом, основна мета "розумних міст" полягає в об'єднанні даних, цифрових технологій та інтелектуальної інфраструктури для покращення якості життя та підтримки розвитку стійких, життєздатних і інклюзивних послуг. Стійкість проявляється у всіх технологіях «розумного міста». До її вимог належать масштабованість, ефективність використання енергії та ресурсів, безпека, відмовостійкість та доступність. Дотримання цих вимог дозволяє технологіям

сприяти досягненню численних цілей [9]. Попри існування зрілих рейтингових систем сталого будівництва (LEED, BREEAM, DGNB), у методології інтегральної оцінки сталості залишаються методологічні прогалини, особливо в частині визначення відносної ваги стадій життєвого циклу для країн перехідної економіки в умовах постконфліктної відбудови.

У роботі [10] доводиться, що операційний та втілений вуглець визначаються рішеннями стадій проєктування і експлуатації, тоді як будівництво і демонтаж виконують переважно роль стадій передачі. Серед розглянутих сценаріїв у [11] найефективнішими виявилися дві комбінації: залізобетонні теплоізоляційні панелі з пінополістиролом (EPS) для покрівлі, які дозволили скоротити енергоспоживання на 37 %, та цегла з попелу з використанням EPS як для стін, так і для покрівлі, що забезпечило зниження на 34 %.

Дослідження циркулярної економіки у будівництві [12, 13] вказують, що селективний демонтаж і передзносний аудит залишаються недостатньо впровадженими навіть на зрілих європейських ринках. Методи оцінки життєвого циклу (LCA) вже давно застосовуються для екологічної оцінки процесів розробки продукції в інших галузях, хоча їхнє використання у будівельному секторі вважається передовим методом лише протягом останніх 10 років [14]. Стандарти EN 15978:2011 [15] та ISO 20887:2020 [8] формують методологічну основу для оцінки екологічної ефективності будівель на всіх етапах життєвого циклу, проте їх імплементація в національну нормативну базу України потребує адаптації. Це особливо важливо при комплексному підході до розробки нових генеральних планів міст, що постраждали від війни [16].

Запропоноване дослідження адресує цю прогалину через структуроване експертне опитування з двома цілями: по-перше, кількісно визначити рівень професійного консенсусу щодо 48 показників, розподілених по чотирьох блоках життєвого циклу; по-друге, вивести емпірично обґрунтовану систему вагових коефіцієнтів стадій для інтегрального індексу сталої готовності будівлі, придатного для національної нормативної імплементації.

Метою дослідження є кількісне визначення експертних пріоритетів щодо 48 показників енергоефективності та принципів Smart City, розподілених по чотирьох блоках життєвого циклу будівлі для інтегрального індексу сталої готовності будівлі, придатного для національної нормативної імплементації в умовах гармонізації з європейськими стандартами.

Результати та обговорення. Структуроване експертне опитування проведено серед 103 респондентів ($n = 103$), що представляють фахівців будівельної галузі, студентів профільних спеціальностей, консультантів зі сталого розвитку, академічних дослідників та пересічних громадян. Гранічна

похибка вибірки при довірчій ймовірності 95 % перебуває у межах $\pm 9,7$ %. Кожен показник оцінювався за 5-бальною порядковою шкалою Лайкерта: 1 — не потрібно; 2 — потрібно в мінімальному ступені; 3 — потрібно частково; 4 — потрібно значною мірою; 5 — потрібно обов'язково.

Чотири блоки опитування визначено відповідно до модульної структури стандарту EN 15978:2011 [5]: Блок 1 — Планування і проєктування (модулі A1–A3); Блок 2 — Будівництво (A4–A5); Блок 3 — Експлуатація (B1–B7); Блок 4 — Демонтаж/end-of-life (C1–C4). Для кожного блоку сформульовано 12 показників, що збалансовано і порівнянно охоплюють енергетичний, ресурсний, екологічний, цифровий та Smart City виміри.

Для кожного показника обчислено: зважений середній M , середньоквадратичне відхилення σ , коефіцієнт варіації $CV = \sigma/M \cdot 100$ %, медіану M_e , моду M_o , частку підтримки (% (4+5)), частку заперечення (% (1+2)) та нормований індекс згоди $IC = (M - 1)/4 \in [0; 1]$. Внутрішню узгодженість інструмента перевірено за коефіцієнтом α -Кронбаха як для повного 48-пунктного інструмента, так і для кожного блоку окремо. Міжблочні відмінності перевірено за допомогою непараметричних тестів — критерію Фрідмана та критерію Краскела–Волліса [17].

48-пунктний інструмент продемонстрував дуже високу внутрішню узгодженість: коефіцієнт α -Кронбаха становить $\alpha = 0,997$ для повного набору і $\alpha_{B1} = 0,989$; $\alpha_{B2} = 0,990$; $\alpha_{B3} = 0,989$; $\alpha_{B4} = 0,991$ для окремих блоків. Усі поблочні значення стабільно перевищують поріг прийнятності 0,70, що підтверджує надійність інструмента для подальшого інференційного аналізу. У таблиці 1 наведено п'ять найвище і п'ять найнижче ранжованих показників із усього 48-пунктного інструмента.

Кластер топ-5 показників сформовано переважно з пунктів Блоку 3 (Експлуатація) і Блоку 1 (Планування і проєктування), що відображає експертний фокус на двох стадіях, де енергозберігаючі рішення мають найбільший вплив на сукупний експлуатаційний слід будівлі впродовж 50–70-річного періоду. Кластер боттом-5 формує переважно Блок 4 (Демонтаж) і включає циркулярно-економічні показники, реалізація яких критично залежить від зрілого ринку вторинних матеріалів — на сьогодні нерозвинутого в національному контексті [12, 13, 18].

На рис. 1 представлено чотири панелі порівняльних блоків. Панель (а) виявляє M -подібну траєкторію $M_{B1} \rightarrow M_{B2} \rightarrow M_{B3} \rightarrow M_{B4}$ з піками на стадіях проєктування та експлуатації; панель (б) показує, що частки підтримки коливаються від 66,1 % (B4) до 82,0 % (B3), а частки заперечення — від 3,3 % (B3) до 9,3 % (B4); панель (в) підтверджує, що всі блоки залишаються нижче порога однорідності $CV = 33$ %; панель (г) представляє багатокритеріальний радар нормованих метрик, в якому Блок 3 формує найбільший зовнішній контур, а Блок 4 — найменший внутрішній, що

підтверджує статус експлуатаційної стадії як стадії з найбільшим консенсусом, а демонтажу — як найбільш дискусійної. На рис. 2 візуалізовано М-подібну траєкторію важливості впродовж життєвого циклу та емпірично виведені вагові коефіцієнти стадій для інтегрального індексу сталої готовності будівлі.

Таблиця 1. Найвище і найнижче ранжовані показники по повному життєвому циклу (n = 103)

Ранг	Код	Показник	Блок	M	CV, %	Sup, %
1	Q3.2	Ефективність системи HVAC	Б3	4,64	14,9	91,3
2	Q3.3	Енергоефективне освітлення (LED + смарт)	Б3	4,55	15,8	92,2
3	Q1.3	Концептуальне дослідження енергопотреб	Б1	4,50	19,1	86,4
4	Q1.1	Пасивні архітектурні рішення	Б1	4,46	17,9	86,4
5	Q1.4	Оптимізація орієнтації будівлі	Б1	4,45	19,5	87,4
...
44	Q2.4	Перероблені / вторинні матеріали	Б2	3,67	28,5	62,1
45	Q4.12	Повторне використання елементів	Б4	3,64	31,3	63,1
46	Q4.1	Селективний демонтаж	Б4	3,63	27,8	52,0
47	Q4.9	Заміщення первинних матеріалів вторинними	Б4	3,60	32,2	51,9
48	Q2.5	Енергоефективність будівельної техніки	Б2	3,57	30,1	56,4

Експлуатаційна стадія (Блок 3) показала найвищий агрегатний консенсус за всіма метриками ($\bar{M} = 4,32$; $\bar{CV} = 19,2$ %; підтримка 82,0 %; заперечення 3,3 %; $\alpha = 0,989$). Два найвище ранжованих показники всього 48-пунктного інструмента — ефективність HVAC ($M = 4,64$; $CV = 14,9$ %; підтримка 91,3 %) та енергоефективне освітлення з інтелектуальним керуванням ($M = 4,55$; підтримка 92,2 %) — належать саме до цієї стадії, що обґрунтовує їх ідентифікацію як пріоритетних важелів національного нормативного посилення в гармонізації з EPBD recast 2024 [19]. Три показники Блоку 3 домінують у глобальному рейтингу: ефективність HVAC

($M = 4,64$; $CV = 14,9\%$), LED-освітлення з інтелектуальним керуванням ($M = 4,55$) і якість повітря у приміщеннях ($M = 4,43$). Усі три відповідають зрілим технологіям зі швидкою окупністю (модернізація HVAC — 5–10 років; LED — 2–4 роки) і чіткими нормативними мандатами за [16] та ASHRAE [20].

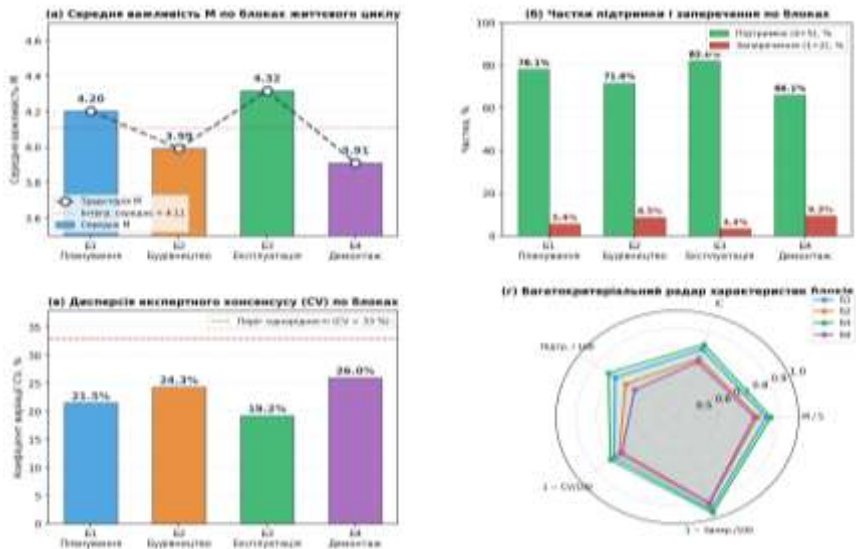


Рис. 1 — Порівняльна експертної оцінки за чотирма блоками життєвого циклу (n = 103)

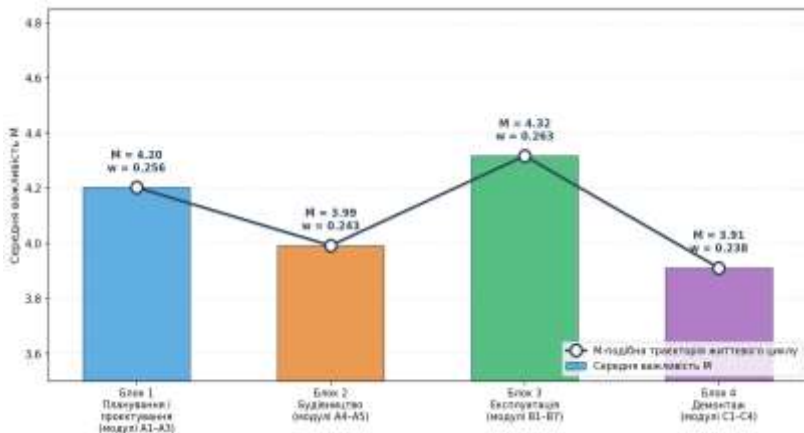


Рис. 2 — М-подібна траєкторія експертної важливості впродовж життєвого циклу будівлі та виведення нормалізованих стадійних ваг для інтегрального індексу сталості

Натомість блок демонтажу демонструє найвищу дисперсію ($C\bar{V} = 26,0$ %), найнижчу підтримку (66,1 %) і найвищу частку заперечення (9,3 %). Чотири найнижче ранжованих показники end-of-life стадії (селективний демонтаж, заміщення первинних матеріалів вторинними, повторне використання елементів, end-of-life облік CO₂) у своїй реалізації залежать від зрілого ринку вторинних матеріалів, інституціоналізованих методик передзносного аудиту та гармонізованих LCA-фреймворків.

Три групи наскрізних показників демонструють надзвичайно стабільні експертні оцінки в усіх чотирьох блоках, що свідчить про сильну конвергенцію професійної думки: цифровий інструментарій (BIM, smart construction, інтеграція Smart City) стабільно отримує 4,22–4,31; захист і обслуговування матеріалів — стабільно 4,31–4,40; управління відходами на кожній стадії — стабільно 4,12–4,27 з підтримкою 76–82 %.

Ці конвергентні пріоритети визначають те, що можна назвати інваріантами життєвого циклу — тематичні напрями, які мають бути нормативно вирішені на всіх стадіях, а не лише на одній.

Домінування HVAC і освітлення в експлуатаційному блоці ($M = 4,64$; $M = 4,55$) узгоджується зі звітом IEA Energy Efficiency 2023 [4], який ідентифікує HVAC і освітлення як найбільші окремі джерела операційних енергозбережень у комерційних та житлових будівлях. Висока важливість, надана BIM та цифровому моніторингу ($M = 4,22$ у Б2; $M = 4,31$ у Б1), узгоджується зі стратегією ЄС Renovation Wave [21], яка позиціонує цифровізацію як горизонтальний помічник процесів реновації будівельного фонду.

Стадію демонтажу (Блок 4) ідентифіковано як методологічно найменш зрілий сегмент життєвого циклу ($\bar{M} = 3,91$; $C\bar{V} = 26,0$ %; підтримка 66,1 %; заперечення 9,3 %). Чотири найнижче ранжованих показники всього інструмента — заміщення первинних матеріалів вторинними ($M = 3,60$), селективний демонтаж ($M = 3,63$), повторне використання елементів ($M = 3,64$) та end-of-life облік CO₂ ($M = 3,68$) — кластеризовано саме в цьому блоці і визначають чіткий пріоритет нормативної реформи в гармонізації з Європейськими документами.

Знижені оцінки циркулярно-економічних показників стадії демонтажу узгоджуються з висновками Akhimien et al. [12] та Charef & Lu [13], які повідомляють, що селективний демонтаж і передзносний аудит залишаються недостатньо впровадженими навіть на зрілих європейських ринках.

Висновки. Інтегральний аналіз результатів експертного опитування з енергоефективності та принципів Smart City на всіх етапах життєвого циклу будівлі ($n = 103$, 48 показників) підтвердив високу експертну підтримку запропонованої моделі сталості та валідність сформованого інструмента оцінювання.

Найвищу значущість експерти надали стадіям проектування та експлуатації, де можливості впливу на енергоефективність і функціонування будівлі є найбільшими. Експлуатаційний етап продемонстрував найвищий рівень узгодженості оцінок, а найбільш пріоритетними показниками визначено ефективність HVAC-систем та енергоефективне освітлення з інтелектуальним керуванням, що свідчить про необхідність посилення уваги до інженерних систем будівель у процесі гармонізації національних нормативів із положеннями EPBD recast 2024.

Найнижчі оцінки отримала стадія демонтажу та повторного використання матеріалів, що вказує на недостатній рівень розвитку принципів циркулярної економіки у будівельній галузі та визначає необхідність удосконалення нормативної бази відповідно до ISO 20887:2020, EN 15978:2011 та європейських підходів до управління будівельними відходами. Узагальнення результатів дозволило сформувати «проектно-експлуатаційне ядро» сталості будівель, до якого належать: попередній аналіз енергопотреб, пасивні архітектурні рішення, оптимізація орієнтації будівлі, ефективність HVAC-систем та інтелектуальне освітлення; саме ці показники доцільно розглядати як основу для формування національної системи оцінювання сталості будівель.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з адаптацією запропонованого підходу до різних типів будівель, інтеграцією LCA-аналізу та розробленням динамічного індексу сталості, що враховуватиме розвиток Smart-технологій і циркулярної економіки.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Sanchez-Gallegos, D. D., Carrizales-Espinoza, D. E., Torres-Charles, C., & Carretero, J. (2025). Smart Cities: A Systematic Review of Emerging Technologies. *Smart Cities*, 8(5), 173. <https://doi.org/10.3390/smartcities8050173>
2. Alvitez Adan, T. E. (2025). Research Trends on Sustainable Development in Smart Cities. *Discover Sustainability*, 6(1), 369. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01210-z>
3. Biloshytska, N., Tatarchenko, H., Biloshytskiy, M., & Uvarov, P. (2024). Analiz stanu zhytlovoho fondu m. Sievierodonetsk na pochatok 2022 roku. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 85, 31–49. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.85.31-49>
4. International Energy Agency. (2023). *Energy Efficiency 2023*. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
5. European Committee for Standardization. (2026). *EN 15978:2026. Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Requirements and guidance*. CEN.
6. European Parliament. (2024). Regulation (EU) 2024/3110 of 27 November 2024 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products (CPR 2024). *Official Journal of the European Union*, L-series. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275
7. European Parliament. (2008/2018). *Directive 2008/98/EC of 19 November 2008 on waste (Waste Framework Directive), consolidated version 2018*. <https://cybsec.lawthek.eu/detail/8b3c419b-acd4-4ead-a979-8576da0e311e/en/SINGLE?date=2024-02-17>
8. International Organization for Standardization. (2020). *ISO 20887:2020. Sustainability in buildings and civil engineering works — Design for disassembly and adaptability — Principles, requirements and guidance*. ISO.
9. Javed, A. R., Shahzad, F., Ur Rehman, S., Zikria, Y. B., Razzak, I., Jalil, Z., & Xu, G. (2022). Future smart cities: Requirements, emerging technologies, applications, challenges, and future aspects. *Cities*, 129, 103794. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103794>
10. Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., et al. (2020). Embodied GHG emissions of buildings — The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
11. Zahoor, H., & Jadoon, A. A. (2025). Energy efficiency and life cycle cost analysis of residential buildings using sustainable building materials. *Journal of Building Engineering*, 114, 114243. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2025.114243>
12. Akhimien, N. G., Latif, E., & Hou, S. S. (2021). Application of circular economy principles in buildings: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 38, 102041. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.102041>
13. Charef, R., & Lu, W. (2022). Factor dynamics to facilitate Circular Economy adoption in construction. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128639>
14. Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilarinho, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the

building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>

15. European Committee for Standardization. (2011). *EN 15978:2011. Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method*. CEN.

16. Tatarchenko, H., & Porkuiian, S. (2024). Formuvannya kompleksnoho pidkhodu do povoiennoho skladannia novoho heneralnogo planu mist. *Prostorovyi rozvytok*, 7, 310–320. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.310-320>

17. Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., & Pal, D. K. (2015). Likert Scale: Explored and Explained. *British Journal of Applied Science & Technology*, 7(4), 396–403. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/14975>

18. European Commission. (2018). *EU Construction & Demolition Waste Management Protocol*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d63d5a8f-64e8-11ef-a8ba-01aa75ed71a1/language-en>

19. European Parliament. (2024). *Directive (EU) 2024/1275 on the Energy Performance of Buildings (EPBD recast)*. *Official Journal of the European Union*, L-series.

20. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). *ASHRAE Standard 62.1-2022. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. ASHRAE. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/62_1_2022_x_20221108.pdf

21. European Commission. (2020). *A Renovation Wave for Europe — greening our buildings, creating jobs, improving lives* (COM(2020) 662 final). <https://ec.europa.eu/newsroom/clima/items/690287/>

Список використаних джерел

1. Sanchez-Gallegos, D. D., Carrizales-Espinoza, D. E., Torres-Charles, C., & Carretero, J. (2025). Smart Cities: A Systematic Review of Emerging Technologies. *Smart Cities*, 8(5), 173. <https://doi.org/10.3390/smartcities8050173>

2. Alvitez Adan, T. E. (2025). Research Trends on Sustainable Development in Smart Cities. *Discover Sustainability*, 6(1), 369. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01210-z>

3. Білошицька, Н., Татарченко, Г., Білошицький, М., Уваров П. (2024). Аналіз стану житлового фонду м. Северодонецьк на початок 2022 року.- *Містобудування та територіальне планування*, 85. 31-49. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.85.31-49>

4. International Energy Agency. (2023). *Energy Efficiency 2023*. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>

5. European Committee for Standardization. (2026). *EN 15978:2026. Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Requirements and guidance*. CEN.

6. European Parliament. (2024). Regulation (EU) 2024/3110 of 27 November 2024 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products (CPR 2024). *Official Journal of the European Union*, L-series. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275

7. European Parliament. (2008/2018). *Directive 2008/98/EC of 19 November 2008 on waste (Waste Framework Directive), consolidated version 2018*. <https://cybsec.lawthek.eu/detail/8b3c419b-acd4-4ead-a979-8576da0e311e/en/SINGLE?date=2024-02-17>

8. International Organization for Standardization. (2020). *ISO 20887:2020. Sustainability in buildings and civil engineering works — Design for disassembly and adaptability — Principles, requirements and guidance*. ISO.
9. Javed, A. R., Shahzad, F., Ur Rehman, S., Zikria, Y. B., Razzak, I., Jalil, Z., & Xu, G. (2022). Future smart cities: Requirements, emerging technologies, applications, challenges, and future aspects. *Cities*, 129, 103794. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103794>
10. Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., et al. (2020). Embodied GHG emissions of buildings — The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
11. Zahoor, H., & Jadoon, A. A. (2025). Energy efficiency and life cycle cost analysis of residential buildings using sustainable building materials. *Journal of Building Engineering*, 114, 114243. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2025.114243>
12. Akhimien, N. G., Latif, E., & Hou, S. S. (2021). Application of circular economy principles in buildings: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 38, 102041. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.102041>
13. Charef, R., & Lu, W. (2022). Factor dynamics to facilitate Circular Economy adoption in construction. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128639>
14. Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
15. European Committee for Standardization. (2011). *EN 15978:2011. Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method*. CEN.
16. Татарченко, Г., Поркуян С. (2024). Формування комплексного підходу до повоєнного складання нового генерального плану міст. Просторовий розвиток, 7, 310–320. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.310-320>
17. Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., & Pal, D. K. (2015). Likert Scale: Explored and Explained. *British Journal of Applied Science & Technology*, 7(4), 396–403. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/14975>
18. European Commission. (2018). *EU Construction & Demolition Waste Management Protocol*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d63d5a8f-64e8-11ef-a8ba-01aa75ed71a1/language-en>
19. European Parliament. (2024). *Directive (EU) 2024/1275 on the Energy Performance of Buildings (EPBD recast)*. *Official Journal of the European Union*, L-series.
20. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). *ASHRAE Standard 62.1-2022. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. ASHRAE. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/62_1_2022_x_20221108.pdf
21. European Commission. (2020). *A Renovation Wave for Europe — greening our buildings, creating jobs, improving lives* (COM(2020) 662 final). <https://ec.europa.eu/newsroom/clima/items/690287/>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 13.05.2026	Received 13.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 15.05.2026	Received in revised form 15.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

H. Tatarchenko*,

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-0337>

D. Bezpalyy,

PhD Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5663-5447>

Department of Civil Engineering, Urbanism and Spatial Planning

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 17 Ioanna Pavla Druhoho Str., Kyiv, 01042, Ukraine

*corresponding author, e-mail: tatarchenko@snu.edu.ua

Assessment of Energy Efficiency and Smart City Principles over the Full Building Life Cycle

How to Cite:

Tatarchenko, H., Bezpalyy, D. (2026). Assessment of Energy Efficiency and Smart City Principles over the Full Building Life Cycle. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, 25, 153-164. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-12)

Abstract. The life cycle of a building comprises the following main stages: design, construction, operation and decommissioning. At each of these stages, corresponding energy efficiency indicators are established. This article presents an integrated analysis of the results of an expert survey (n = 103, 48 indicators) on energy efficiency and Smart City principles at all stages of a building's life cycle. Each indicator was assessed using a 5-point Likert scale. High expert support for the proposed sustainability model and the validity of the developed assessment tool (Cronbach's $\alpha = 0.997$) were confirmed. The structure of the survey is based on the modules of standard EN 15978:2011: Block 1 — Planning and Design (A1–A3), Block 2 — Construction (A4–A5), Block 3 — Operation (B1–B7), Block 4 — Demolition/end-of-life (C1–C4). The experts assigned the highest importance to the design and operation stages, where the potential to influence the energy efficiency and functioning of the building is greatest. The operation stage demonstrated the highest level of consensus in the assessments, with the efficiency of HVAC systems ($M = 4.64$) and energy-efficient lighting with smart control ($M = 4.55$) identified as priority indicators. The lowest ratings were given to the demolition and material reuse stage, indicating an insufficient level of development of circular economy principles. The lowest scores were given to the stage involving the dismantling and reuse of materials, which indicates an insufficient level of development of circular economy principles. A synthesis of the results enabled the formation of a 'design-operation core' of building sustainability, comprising: preliminary analysis of energy requirements, passive architectural solutions, optimisation of building orientation, efficiency of HVAC systems, and smart lighting. Prospects for further research relate to adapting the proposed approach to different types of buildings, integrating LCA analysis, and developing a dynamic sustainability index that will take into account the development of smart technologies and the circular economy.

Keywords: building life cycle, Smart City, energy efficiency, circular economy, expert survey, urban planning.