

DOI: 10.32347/2786-7269.2026.16.153-163

УДК 72.01:725.4:624

Назарук Т.Г.,

taras.h.nazaruk@ukd.edu.ua, ORCID: 0009-0007-5941-3036,

ЗВО «Університет Короля Данила», м. Івано-Франківськ

## ФАКТОРИ ТРАНСФОРМАЦІЇ ОБ'ЄМНО-ПЛАНУВАЛЬНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ПРОМИСЛОВИХ БУДІВЕЛЬ І КОМПЛЕКСІВ У СУЧАСНИХ УМОВАХ

*Присвячена систематизації чинників, що трансформують об'ємно-планувальні та конструктивні рішення промислових будівель у сучасних умовах технологічних, енергетичних і соціально-економічних змін. Розглянуто вплив переходу до гнучких виробничих систем, вимог енергоефективності, цифрової трансформації управління активами та нормативних обмежень на формування архітектурних рішень. Проаналізовано підходи повторного використання будівель, принципи кругової економіки та методики оцінювання потенціалу адаптації. Визначено роль цифрових технологій, систем енергоменеджменту та обліку вуглецевих витрат у прийнятті рішень щодо реконструкції або трансформації промислових об'єктів. Узагальнено сучасні інструменти проектування, що забезпечують гнучкість, ремонтпридатність і довготривалу функціональну варіативність будівель. Обґрунтовано необхідність переходу до сценарного та багатошарового проектування промислових споруд як довготривалих просторово-конструктивних платформ.*

*Ключові слова: адаптація промислових будівель; реконструкція; гнучкість простору; кругова економіка; цифровий двійник; енергоефективність.*

**Вступ.** Промислова будівля історично розумілася як просторово-структурна «машина» під конкретний процес, коли крок колон, прольоти, висоти, ліхтарі, інженерні системи та конфігурація огорожень, визначалися логікою технологічних ліній, внутрішньоцехової логістики, режимів вентиляції, кранового обладнання і пожежно-вибухових вимог. У цій моделі цінність будівлі була похідною від стабільності виробництва. Однак у сучасних умовах цей зв'язок ослаб, виробництво переходить до модульних та швидко переналаштовуваних схем, що підвищує вимоги до просторової й конструктивної «нейтральності» будівлі (future-proofing) та до можливості безболісної реконфігурації внутрішніх потоків і зон [16].

Друга площина проблеми – енергетична та кліматична. Для промислових споруд типовими є великі повітряні об'єми й значні витрати на кондиціонування, але енергетичний профіль визначається також внутрішніми тепловиділеннями

від обладнання та режимами повітрообміну. Емпіричні дослідження енергореновації показують, що навіть «традиційні» заходи (дах, ліхтарі, огороження) мають оцінюватися разом із виробничими навантаженнями, інакше проєктне рішення буде недостовірним або економічно неефективним. У нормативному полі Україна енергоефективність будівель також формалізована через діючі будівельні норми та законодавство, що створює додатковий регуляторний тиск на реконструкцію оболонки й інженерії [3; 6; 10].

Третя площина – цифрова трансформація та керованість активів. Перехід від BIM до цифрових двійників, що інтегрують модель активу з потоками даних сенсорів і аналітикою, змінює вимоги до планування (доступність вузлів, трас, зон обслуговування) і конструктивних рішень (можливість системного моніторингу, прогнозного ремонту, поетапної заміни). Паралельно оновлюються міжнародні рамки управління інформацією будівельних активів серії ISO 19650, що підтримують життєвий цикл від проєктування до експлуатації, ремонту й кінця життя [8; 13].

Нарешті, трансформації визначаються нормативними, економічними та соціальними ризиками: пожежна безпека, надійність, вибухонебезпека, охорона праці, а також «ціна простою» виробництва або соціальна значущість об'єкта після конверсії. Дослідження українських постіндустріальних кейсів демонструють спектр стратегій (демонтаж/реновація/адаптація) і показують, що рішення залежать від локальної економіки, інвестиційної моделі та сприйняття індустріальної спадщини [17].

**Метою статті** є систематизація факторів, що трансформують об'ємно-планувальні і конструктивні рішення промислових будівель і комплексів у сучасних умовах, та формування узагальнених орієнтирів для архітектурного проєктування. Для досягнення мети залучено: теоретичні підходи до адаптивності й повторного використання; інструменти оцінювання потенціалу адаптації (ARP, adaptSTAR); емпіричні приклади енергореновації, сейсмopідсилення та цифровізації управління експлуатацією; а також аналіз актуального українського нормативного контексту, який задає вимоги до проєктування і реконструкції промислових будівель.

**Аналіз останніх досліджень.** Проблематика трансформації об'ємно-планувальних і конструктивних рішень промислових будівель у сучасних умовах розглядається в науковій літературі крізь призму сталого розвитку, технологічної модернізації та адаптивного використання існуючого фонду. Значна увага приділяється впливу цифрових технологій, зокрема BIM-моделювання та цифрових двійників, на еволюцію підходів до проєктування, експлуатації та реконструкції виробничих об'єктів (М. Денг, К. Менасса, В. Кемат, П. Голинський, І. Ковачіч). Дослідники наголошують на необхідності інтеграції

принципів енергоефективності, декарбонізації та циркулярної економіки у процес формування архітектурно-конструктивних рішень промислових будівель (Х. Хернандез, Ю. Хуанг, А. Хічкок, Х. Сміт). У роботах, присвячених адаптивному повторному використанню індустриальних об'єктів, підкреслюється важливість оцінювання життєвого циклу будівель і потенціалу їх модернізації відповідно до сучасних екологічних і функціональних вимог (С. Конейос, К. Лангстон, Л. Калаковські та ін.). Окремий напрям досліджень зосереджений на енергоефективній реновації та конструктивному підсиленні існуючих промислових споруд, що передбачає використання нових матеріалів, технологій і методів аналізу будівельної продуктивності (Дж. Гоурліс, А. Прота, Р. Ландолфо). Сукупність цих досліджень формує теоретико-методологічне підґрунтя для осмислення сучасних чинників трансформації промислової архітектури, зумовлених технологічними, екологічними та соціально-економічними змінами.

**Виклад основного матеріалу.** Технологічні зміни виробництва в логіці Industry 4.0 зміщують базову проєктну вимогу від «під конкретну лінію» до «під змінність ліній» [5, с. 376]. Настанови з проєктування гнучких промислових будівель підкреслюють, що будівля має підтримувати різні конфігурації виробництва і логістики (перенесення робочих осередків, зміна потоків, інтеграція автоматизації), а отже потребує передбачуваної структурної сітки, резервів за висотою/навантаженнями та керованої інженерної інфраструктури. На рівні об'ємно-планувальних рішень це означає домінування «нейтральних» великопробльотних просторів із низькою кількістю конструктивних перешкод, формування сервісних і ремонтних коридорів, а також проєктування внутрішньої логістики як системи, що допускає перебудову (зони завантаження, маршрути навантажувачів, місця можливих конвеєрів, конфігурації складських стелажів). На рівні конструкцій це зазвичай зсуває акцент до каркасів, де локальні підсилення і перепланування не руйнують «первинну несучу логіку», тобто допускають нарощування або перерозподіл функцій у межах зміни технології. [16].

Енергоефективність і стійкість (резильєнтність) промислових будівель дедалі частіше є драйвером реконструкції навіть за незмінної функції. Кейс-стаді енергореновації існуючої виробничої споруди показує, що скорочення потреби в теплі може бути суттєвим, але лише за умови правильного врахування внутрішніх тепловиділень від машин, невизначеності даних по існуючим конструкціям і реальних режимів повітрообміну. Методологічно це означає перехід від «типових» теплотехнічних припущень до поєднання натурних вимірювань, моделювання та поетапного порівняння сценаріїв реконструкції оболонки й інженерії. У нормативному полі України енергоефективність

матеріалізується через обов'язкові вимоги до теплової ізоляції й енергоефективності та через законодавчі рамки, що узгоджують енергоефективні характеристики будівель із цільовими показниками державної політики [3; 6].

Енергетичний вимір посилюється поширенням енергоменеджменту як управлінської практики. Міжнародний стандарт ISO 50001 пропонує рамку системного управління енергетичною результативністю організації, що робить архітектурні рішення частиною циклу «вимірювання – аналіз – покращення». Для промислових комплексів це означає: планування має забезпечувати точки обліку, доступність вузлів модернізації, можливість поетапного введення енергоефективних систем без довгих зупинок виробництва, а також резервування критичних інженерних функцій (особливо там, де простій створює непропорційні економічні втрати) [14].

Підходи повторного використання будівель і принципи кругової економіки переводять промислову споруду в статус ресурсу: її конструктивний каркас розглядається як матеріальна основа для нових рішень, а простір – як універсальна платформа для подальшого функціонального наповнення. Теоретичні огляди адаптивності підкреслюють ризик надмірної оптимізації на початковому етапі, що зменшує здатність будівлі до зміни функцій у майбутньому, і наголошують на потребі збалансувати початкові вуглецеві витрати, закладені у матеріалах і конструкціях, із довгостроковими екологічними та економічними вигодами від уникнення демонтажу. Систематичний огляд досліджень адаптивності додає, що бар'єри впровадження лежать не лише в техніці, а й у регуляторних обмеженнях, економічних стимулах та соціальних установах, а також в обмеженій увазі до структурної гнучкості несучих елементів у частині існуючих методик оцінювання [19].

У практичному вимірі важливі інструменти оцінювання. Для прикладу модель ARP пропонує багатокритеріальне ранжування можливостей повторного використання, враховуючи фінансові, екологічні й соціальні параметри, та стимулює ухвалення рішень до того, як будівля перейде у стан незворотної деградації. Модель adaptSTAR, орієнтована на проєктування нових будівель із «вбудованим» потенціалом повторного використання, структурує критерії у фізичні, економічні, функціональні, технологічні, соціальні, правові та політичні групи, тобто прямо пов'язує архітектурно-конструктивні рішення з майбутньою адаптивністю [7].

Екологічний аргумент за адаптацію посилюється включенням embodied carbon (вуглецевого сліду) у вибір сценарію реконструкції. Огляди реновації промислової спадщини показують, що embodied carbon часто недооцінюють порівняно з операційними викидами, хоча саме embodied складова може стати домінантною у випадку глибоких модернізацій і низьковуглецевої експлуатації.

Відповідно, конструктивні рішення трансформації набувають «вуглецевої чутливості», коли перевага надається локальним підсиленням, повторному використанню елементів, зменшенню демонтажу до мінімально необхідного та чутливому підбору матеріалів і технологій [12].

Кругова логіка практично підтримується Design for Disassembly (підхід у проектуванні будівель, за якого конструкції, вузли та матеріали спочатку передбачаються такими, щоб їх можна було легко розібрати, замінити або повторно використати без руйнування). Систематичний огляд DfD у будівельній галузі фіксує розвиток досліджень щодо вузлів, індикаторів круговості, інтеграції з BIM та аналізу реальних прикладів демонтованих (або демонтованих частково) конструкцій; наголошено, що технологічні рішення повинні поєднувати проектування, виробництво, монтаж і майбутній демонтаж. Розширенням цієї логіки виступає рамка DfMAD, що поєднує DfMA і DfD як наскрізну методологію індустріалізованого та кругового будівництва, де стандартизація, модульність та простежуваність компонентів стають умовами довготривалої адаптивності [15].

Цифрові технології (BIM, IoT, цифрові двійники) трансформують логіку «простір – конструкція – експлуатація». ISO 19650-1 визначає принципи управління інформацією протягом усього життєвого циклу активу, включно з ремонтом, модернізацією та кінцем життя. У національному полі України зазначено діючий стандарт, ідентичний ISO 19650-1, що створює інституційну основу для уніфікації інформаційних процесів. Системний огляд у ITcon показує еволюцію від BIM до цифрових двійників у AEC-FM, де ключовими стають інтеграція даних, інтероперабельність та «оживлення» моделі за рахунок сенсорних потоків. Приклад розгортання цифрового двійника для 3D-операцій будівлі демонструє інтеграцію BIM, IoT-систем автоматизації, методів ШІ і засобів змішаної реальності як напрямок розвитку експлуатаційної керованості. [13].

Нормативно-правові вимоги задають «межі допустимого» для трансформації. В Україні діють спеціалізовані норми для промислових будівель, які поширюються на проектування, нове будівництво та реконструкцію і включають вимоги до технологічних рішень, інженерних систем, санітарно-гігієнічних умов та пожежної безпеки. Загальні вимоги пожежної безпеки формують обов'язкові рішення щодо евакуації, обмеження поширення пожежі й систем протипожежного захисту, а принципи надійності та конструктивної безпеки задають рамку життєвого циклу від вишукувань і проектування до ліквідації споруд. Окремі виробничі профілі (потенційно вибухонебезпечні середовища) повинні враховувати також вимоги до обладнання і захисту в потенційно вибухових атмосферах, закріплені в директиві АТЕХ ЄС [1; 9].

Економічні та соціальні фактори визначають сценарії повторного використання і міські наслідки трансформацій. Українське дослідження постіндустріальних об'єктів показує, що стратегії демонтажу або адаптації залежать від інвестиційної мотивації, здатності формувати нові робочі місця та включати об'єкт у міські зв'язки; водночас адаптація може мати ефекти у планувальній, економічній, екологічній та соціально-безпековій площинах. Для архітектурної теорії це важливо тим, що «промислова форма» перестає бути суто технологічною, а стає носієм культурної й економічної програми; звідси – переоцінка просторових якостей (великопрольотні зали, «індустріальна естетика», висоти, оболонки) та необхідність працювати з ризиками гентрифікації, локального конфлікту функцій і транспортного навантаження на прилеглі території [17].

Безпека й експлуатаційна надійність формують типологію «конструктивних трансформацій» – підсилення, заміна вузлів, введення систем жорсткості. Для промислових будівель важливо, що локальні відмови вузлів можуть визначати глобальну працездатність, а реконструктивні втручання мають мінімізувати перерви у роботі. Кейс сейсмopідсилення сталевोї промислової будівлі демонструє ефективність поєднання локального підсилення з'єднань і введення систем розкосів як «низькоінвазивної» стратегії підвищення надійності без блокування доступності будівлі [18].

Матеріалознавство та інноваційні рішення, зокрема УНРС, відкривають додаткові можливості продовження життя конструкцій і локального підсилення. Огляди УНРС підкреслюють поєднання високих міцнісних і довговічних характеристик та розвиток технологій застосування у підсиленні елементів; для промислових будівель це релевантно у випадках, коли нові навантаження або вимоги до довговічності концентруються локально (зони інтенсивного зношення, вузли, елементи під сучасне обладнання) і потребують матеріалів із високим ресурсом. У поєднанні з DfD/DfMAD-підходами матеріальні інновації створюють підстави для «ремонтпридатної» конструктивної еволюції, коли будівля продовжує життя через серію керованих модернізацій, а не через одну радикальну заміну [15].

Узагальнення наведених факторів дозволяє сформулювати методичний принцип – сучасне промислове проєктування має бути множинним і багатошаровим. Множинність означає, що на етапі концепції опрацьовуються не один, а кілька ймовірних режимів функціонування (модернізація технології, змішаний комплекс, часткова конверсія), а архітектурно-конструктивне рішення оптимізується під «коридор» сценаріїв. Багатошаровість означає розділення довготривалої несучої структури й швидкозмінних систем (огороження, інженерія, внутрішнє планування), щоб модернізація «швидких шарів» не

вимагала демонтажу «повільного шару» каркаса. Саме ця логіка узгоджує технічну гнучкість, енергоефективність, цифрову керованість ресурсів у єдиній архітектурній рамці [4; 15].

**Висновки.** Трансформація об'ємно-планувальних і конструктивних рішень промислових будівель у сучасних умовах є результатом синхронної дії технологічних, енергетичних, цифрових, нормативних, економічних і соціальних чинників. Зсув до Industry 4.0 робить критичною гнучкість просторово-структурної платформи: регулярність несучої сітки, резерви за висотою і навантаженнями, модульність інженерії та можливість поетапних змін без «зламу» каркаса. Енергоефективність і стійкість вимагають інтеграції оболонки, інженерії та виробничого процесу, а також підкріплюються управлінськими стандартами енергоменеджменту, що перетворюють архітектуру на елемент системи вимірювання й постійного покращення.

Adaptive reuse і кругова економіка переводять реконструкцію промислових будівель у площину контролю вуглецю й ресурсів: важливими стають моделі оцінювання потенціалу адаптації, облік embodied carbon і стратегія проектування для демонтажу та відновного використання. Нормативні обмеження (пожежна безпека, надійність, вибухонебезпека) задають незмінний «коридор допустимих рішень», у межах якого архітектор і інженер проектують трансформацію як керовану реструктуризацію ризиків [2].

Практичний наслідок для архітектурного проектування полягає у переході до параметричного, сценарного мислення: проектувати промисловий каркас як довготривалу платформу з модульною інженерією; закладати ремонтпридатність і можливість низькоінвазивних підсилень; використовувати цифрові контури (BIM–IoT–цифровий двійник) для моніторингу й оптимізації експлуатації; а рішення про реконструкцію приймати з урахуванням життєвого циклу, embodied carbon і нормативних вимог. Такий підхід дозволяє поєднати економіку виробництва, екологічні цілі та безпекові вимоги в єдиній архітектурно-конструктивній логіці модернізації промислових будівель і комплексів.

**Подальший напрямок дослідження.** Подальші дослідження доцільно спрямувати на формування інтегрованих методик оцінювання адаптивності промислових будівель, що поєднуюватимуть просторово-конструктивні, енергетичні та вуглецеві показники життєвого циклу. Перспективним є поглиблення емпіричних досліджень впливу цифрових двійників і сенсорних систем на архітектурні рішення реконструкції та управління експлуатацією виробничих об'єктів. Важливим напрямом залишається адаптація міжнародних підходів кругового будівництва й проектування для демонтажу до українського нормативного середовища та інвестиційних моделей. Особливої уваги потребує

розроблення типології конструктивних трансформацій промислових будівель у контексті постіндустріальних міських перетворень і ризиків змішаного використання територій.

### Бібліографічний список

1. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3019922918881626107](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3019922918881626107).
2. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. URL: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3199634775304307868?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199634775304307868?doc_type=2).
3. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Міністерство розвитку громад та територій України. URL: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3075196638495507996](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996).
4. ДСТУ EN ISO 19650-1:2022. Організація та оцифрування інформації про будівлі та інженерні споруди... Частина 1. Поняття та принципи (чинний з 31.12.2023). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=113917](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=113917).
5. Завербний А.С., Сало К.Р. Проблеми та перспективи розвитку індустрії 4.0 в Україні за умов євроінтегрування. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку*. 2022. №2(8). С. 374-382. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2022/dec/29557/220972maket-378-386.pdf>
6. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII (чинна редакція). Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 33, ст.359. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
7. Conejos S., Langston C., Smith J. AdaptSTAR model: A climate-friendly strategy to promote built environment sustainability. *Habitat International*. 2013. Vol. 37. P. 95–103. doi:10.1016/j.habitatint.2011.12.003.
8. Deng M., Menassa C., Kamat V. From BIM to Digital Twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *ITcon*. 2021. Vol. 26. P. 58–83. doi:10.36680/j.itcon.2021.005.
9. Directive 2014/34/EU (ATEX). On equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/34/oj/eng>
10. Gourelis G., Kovacic I. A study on building performance analysis for energy retrofit of existing industrial facilities. *Applied Energy*. 2016. Vol. 184. P. 1389–1399. doi:10.1016/j.apenergy.2016.03.104.
11. Hernández H. Circular Industrialized Construction: A Perspective Through Design for Manufacturing, Assembly, and Disassembly. *Buildings*. 2025. Vol. 15(13). P.2 174. doi:10.3390/buildings15132174.
12. Huang Y., Hiscock A., Satyarthi J., Smith H. Including Embodied Carbon in Assessing Renovation Options for Industrial Heritage Buildings: A Review and Case Studies. *Sustainability*. 2025. Vol. 17(1). P. 72. <https://doi.org/10.3390/su17010072>
13. ISO 19650-1:2018. Information management using building information modelling – Part 1: Concepts and principles. URL: <https://www.iso.org/standard/68078.html>.
14. ISO 50001:2018. Energy management systems – Requirements with guidance for use. URL: <https://www.iso.org/standard/69426.html>.
15. Ostapska K., Rütther P., Loli A., Gradeci K. Design for Disassembly: A systematic scoping review and analysis of built structures Designed for Disassembly. *Sustainable Production and Consumption*. 2024. Vol. 48. P. 377–395. doi:10.1016/j.spc.2024.05.014.
16. Reisinger J., Hollinsky P., Kovacic I. Design guideline for flexible industrial buildings under Industry 4.0 conditions. *Sustainability*. 2021. Vol. 13(19). P. 10627. doi:10.3390/su131910627.

17. Serhiuk I., Kalakoski L. Demolition or adaptation?: post-industrial buildings in Ukraine. *Buildings & Cities*. 2023. Vol. 4(1). P. 352–368. doi:10.5334/bc.307.
18. Tartaglia R., Milone A., Prota A., Landolfo R. Seismic Retrofitting of Existing Industrial Steel Buildings: A Case-Study. *Materials*. 2022. Vol. 15(9). P. 3276. doi:10.3390/ma15093276.
19. Watt H., Davison B., Hodgson P., Kitching C., Densley Tingley D. What should an adaptable building look like? *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2023. Vol. 18. P. 200158. doi:10.1016/j.rcradv.2023.200158.

PhD Student **Nazaruk Taras**, King Danylo University, Ivano-Frankivsk

## **FACTORS OF TRANSFORMATION OF SPATIAL-PLANNING AND STRUCTURAL SOLUTIONS OF INDUSTRIAL BUILDINGS AND COMPLEXES IN CONTEMPORARY CONDITIONS**

The article systematizes the factors that transform spatial-planning and structural solutions of industrial buildings under contemporary technological, environmental, and socio-economic conditions. Historically, industrial buildings were designed as rigid spatial-structural systems tailored to a specific technological process, where column grids, spans, heights, and engineering systems were determined by production lines and internal logistics. In the context of Industry 4.0 and rapidly reconfigurable manufacturing, this paradigm is shifting toward spatial and structural neutrality, enabling multiple functional scenarios and long-term adaptability.

The study analyzes the influence of energy transition, digitalization, and regulatory frameworks on the transformation of industrial architecture. Particular attention is paid to the integration of energy efficiency strategies, life-cycle thinking, and carbon-sensitive design into reconstruction and modernization processes. Empirical and theoretical approaches to adaptive reuse, circular construction, and evaluation models for adaptive potential are reviewed. The paper highlights the importance of maintaining structural flexibility, modular engineering systems, and the possibility of low-invasive upgrades to extend the service life of industrial assets.

The role of digital technologies, including building information modeling, sensor-based monitoring, and digital twins, is examined as a key driver of informed decision-making and predictive maintenance. These tools transform the relationship between spatial organization, structural systems, and building operation by enabling data-driven management throughout the life cycle. Regulatory requirements related to safety, reliability, and environmental performance are identified as constraints shaping feasible transformation scenarios.

The findings suggest that contemporary industrial design should be based on scenario-oriented and layered approaches, where long-term structural frameworks coexist with rapidly changeable functional and technological layers. Such an approach

enables the integration of production efficiency, environmental objectives, and safety requirements into a unified architectural strategy. The research contributes to the theoretical framework for adaptive and circular transformation of industrial buildings and outlines directions for future studies focused on digitalization, carbon assessment, and structural adaptability within post-industrial urban contexts.

Keywords: adaptation of industrial buildings; reconstruction; spatial flexibility; circular economy; digital twin; energy efficiency; carbon footprint; structural transformation.

## REFERENCES

1. Conejos, S., Langston, C., & Smith, J. (2013). AdaptSTAR model: A climate-friendly strategy to promote built environment sustainability. *Habitat International*, 37, 95–103. Access Mode: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.12.003> {in Ukrainian}.
2. DBN V.1.1-7:2016. (2016). *Fire safety of construction facilities: General requirements*. Access Mode: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3019922918881626107](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3019922918881626107) {in Ukrainian}.
3. DBN V.1.2-14:2018. (2018). *General principles of ensuring reliability and structural safety of buildings and structures*. Access Mode: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3199634775304307868?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199634775304307868?doc_type=2) {in Ukrainian}.
4. DBN V.2.6-31:2021. (2021). *Thermal insulation and energy efficiency of buildings*. Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. Access Mode: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3075196638495507996](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996) {in Ukrainian}.
5. Deng, M., Menassa, C., & Kamat, V. (2021). From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *ITcon*, 26, 58–83. Access Mode: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005> {in English}.
6. Directive 2014/34/EU of the European Parliament and of the Council on equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres. (2014). Access Mode: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/34/oj/eng> {in English}.
7. DSTU EN ISO 19650-1:2022. (2022). *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works — Part 1: Concepts and principles*. Access Mode: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=113917](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=113917) {in English}.
8. Gourelis, G., & Kovacic, I. (2016). A study on building performance analysis for energy retrofit of existing industrial facilities. *Applied Energy*, 184, 1389–1399. Access Mode: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.104> {in English}.

9. Hernández, H. (2025). Circular industrialized construction: A perspective through design for manufacturing, assembly, and disassembly. *Buildings*, 15(13), 2174. Access Mode: <https://doi.org/10.3390/buildings15132174> {in English}.
10. Huang, Y., Hiscock, A. V., Satyarthi, J., & Smith, H. (2025). Including embodied carbon in assessing renovation options for industrial heritage buildings: A review and case studies. *Sustainability*, 17(1), 72. Access Mode: <https://doi.org/10.3390/su17010072> {in English}.
11. ISO 19650-1. (2018). *Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles*. International Organization for Standardization. Access Mode: <https://www.iso.org/standard/68078.html> {in English}.
12. ISO 50001. (2018). *Energy management systems — Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization. Access Mode: <https://www.iso.org/standard/69426.html> {in English}.
13. Law of Ukraine on energy efficiency of buildings No. 2118-VIII. (2017). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, 33, 359. Access Mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19> {in English}.
14. Ostapska, K., Rüther, P., Loli, A., & Gradeci, K. (2024). Design for disassembly: A systematic scoping review and analysis of built structures designed for disassembly. *Sustainable Production and Consumption*, 48, 377–395. Access Mode: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.014> {in English}.
15. Reisinger, J., Hollinsky, P., & Kovacic, I. (2021). Design guideline for flexible industrial buildings under Industry 4.0 conditions. *Sustainability*, 13(19), 10627. Access Mode: <https://doi.org/10.3390/su131910627> {in English}.
16. Serhiuk, I., & Kalakoski, L. (2023). Demolition or adaptation? Post-industrial buildings in Ukraine. *Buildings & Cities*, 4(1), 352–368. Access Mode: <https://doi.org/10.5334/bc.307> {in English}.
17. Tartaglia, R., Milone, A., Prota, A., & Landolfo, R. (2022). Seismic retrofitting of existing industrial steel buildings: A case study. *Materials*, 15(9), 3276. Access Mode: <https://doi.org/10.3390/ma15093276> {in English}.
18. Watt, H., Davison, B., Hodgson, P., Kitching, C., & Densley Tingley, D. (2023). What should an adaptable building look like? *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 18, 200158. Access Mode: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200158> {in English}.
19. Zaverbnyi, A.S., & Salo, K R. (2022). Problems and prospects of Industry 4.0 development in Ukraine under European integration conditions. *Management and Entrepreneurship in Ukraine: Stages of Formation and Problems of Development*, 2(8), 374–382. Access Mode: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2022/dec/29557/220972maket-378-386.pdf> {in English}.