

DOI: 10.32347/2786-7269.2025.11.510-521

УДК 69.059:711.058:004.9

Степанюк Р.Б.,

stepaniuk.rb@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0001-5945-8468,

Київський національний університет будівництва і архітектури,

д.т.н., професор **Антипенко Є.Ю.,**

antypenko @zn.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8048-0144,

Національний університет «Запорізька політехніка»,

д.е.н., професор **Валінкевич Н.В.,**

natali1573@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8804-868X,

Поліський національний університет,

Лавриненко О.М.,

lavrinenko_OM -2023@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0002-2956-1840,

Герасименко О.М.,

herasymenko_om-2023@knuba.edu.ua ORCID: 0009-0003-2722-1153,

Київський національний університет будівництва і архітектури

СТРУКТУРНО-ДИНАМІЧНА ТРАНСФОРМАЦІЯ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНОГО ДЕВЕЛОПМЕНТУ: АНАЛІТИКО-ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ

Досліджуються SMART-інновації та сучасні технології, що визначають тенденції розвитку будівельної галузі. Аналізується історична еволюція будівельних норм, починаючи від законодавчих положень Стародавнього Вавилону, середньовічної Європи та індустріальної революції до сучасних регламентів, що базуються на цифрових технологіях та екологічних стандартах. Розглядається вплив інформаційних технологій, цифрового моделювання (BIM), автоматизації процесів та використання Інтернету речей (IoT) на ефективність і безпеку будівельних об'єктів. Особлива увага приділяється концепції SMART-технологій, що інтегрують штучний інтелект, автоматизовані системи контролю та аналізу в управління будівельними процесами. Досліджено основні напрями їх застосування, зокрема, впровадження "розумних" будівель та міст, використання роботизованих систем для автоматизації будівництва, а також розвиток енергоефективних технологій. Досліджено ключові напрями застосування SMART-технологій у будівництві, проведено аналіз та обґрунтовано техніко-технологічні показники рівня застосування SMART-технологій. У статті представлено аналіз міжнародних методик оцінки рівня впровадження SMART-інновацій у будівництві, таких як LEED, BREEAM, WELL Building Standard, SmartReadiness

Indicator (SRI) та інші, що використовуються для визначення рівня екологічної ефективності та цифрової інтеграції будівельних проектів.

Ключовими перспективними напрямками розвитку SMART-технологій визначено інтеграцію штучного інтелекту для прогнозування стану будівель, подальше поширення 3D-друку в будівництві, розвиток екологічно чистих матеріалів та адаптацію будівельних процесів до мережі 5G. Стаття узагальнює сучасний стан розвитку SMART-технологій у будівельній сфері та пропонує перспективні напрями їх подальшого впровадження для підвищення ефективності, безпеки та екологічності будівництва.

Ключові слова: девелопмент; інновації; трансформація операційної системи підприємств будівельного девелопменту; SMART-технології; цифрове моделювання; енергоефективність; будівельний проект; інтелектуальні системи управління; інженерні конструкції; міська інфраструктура; сталий розвиток; BIM-технології; розумні міста; адитивні технології.

Постановка проблеми. Динамічна трансформація операційної системи будівельного девелопменту — це структурно-функціональна модель, що описує спосіб організації, управління та трансформації бізнес-процесів у будівельних девелоперських компаніях відповідно до змін ринкового середовища, нормативного регулювання, інноваційних технологій та цифрових платформ.

Еволюція будівельних норм розпочалася ще в давнину, коли перші цивілізації усвідомили необхідність регулювання будівництва задля безпеки мешканців. Одним із найдавніших прикладів є Вавилонський кодекс Хаммурапі, де встановлювалися суворі покарання для будівельників за неякісну роботу. Якщо будинок завалювався і вбивав власника, будівельник міг бути страчений, що свідчить про те, що навіть у ті часи існувало усвідомлення відповідальності за якість будівництва. У Стародавньому Римі розвинулася система міського планування, яка включала жорсткі обмеження щодо висоти будівель, вимоги до водопостачання, каналізації та використання негорючих матеріалів. Римські закони стали основою для майбутніх норм у Європі. Після падіння Риму централізовані норми зникли, однак у середньовічних містах почали діяти локальні правила, які регулювали ширину вулиць, висоту будівель та використання матеріалів, особливо у зв'язку з частими пожежами.

З початком епохи Відродження зросла увага до містобудування, особливо у Франції та Англії. Після Великої пожежі Лондона 1666 року були впроваджені перші комплексні норми пожежної безпеки, які вимагали будівництва з негорючих матеріалів та забезпечення достатньої ширини вулиць. У цей же час у Європі почали розроблятися стандарти планування міст, які заклали основи майбутнього урбаністичного розвитку. З розвитком

промислової революції в XIX столітті будівельні норми стали більш структурованими та враховували нові технології. З'явилися перші санітарні норми, які регламентували наявність каналізації, вентиляції та освітлення. У цей же період виникли перші стандарти безпеки, які стосувалися використання металевих конструкцій та бетонних фундаментів. Активний розвиток міст, особливо у США та Європі, вимагав введення чітких будівельних кодексів.

У XX столітті розвиток інженерної справи, впровадження залізобетону та сталі сприяли ще більшій уніфікації будівельних норм. Почали діяти сейсмічні норми, які згодом стали обов'язковими для будівництва в зонах підвищеної сейсмічної активності, особливо в Японії та США. Будівельні кодекси почали регулювати не тільки саму конструкцію будівлі, але й такі аспекти, як електропостачання, водопостачання, теплоізоляція, безпека ліфтів та пожежозахист. Друга половина XX століття та початок XXI століття характеризуються впровадженням енергоефективних стандартів, екологічних норм та технологічних інновацій. Важливими стали стандарти енергозбереження, такі як LEED та BREEAM, які регламентують використання ресурсів у будівництві. Норми доступності стали ключовими в багатьох країнах, передбачаючи зручність для людей з обмеженими можливостями. Окремо впроваджено цифрові технології у сфері будівництва, зокрема BIM (Building Information Modeling), що дозволяє створювати цифрові моделі будівель ще на етапі проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції розвитку будівельної галузі тісно пов'язані з інноваційними технологіями, які сприяють підвищенню ефективності, якості та економічної доцільності будівництва. Інформаційні технології, цифровізація процесів, новітні методи управління проектами, а також використання адитивних технологій та автоматизації є ключовими аспектами трансформації будівельної сфери.

У статтях[1-4] аналізується український та міжнародний досвід інновацій у житловому будівництві, визначаються існуючі бар'єри та специфіка розвитку галузі. Автори [5-8] обґрунтовують основні можливості та перспективні напрями програмно-цільової підтримки організаційно-технологічних та управлінських інновацій з метою підвищення доступності та якості новозбудованого житла для громадян, мінімізації комунальних витрат населення та переходу до нових технологій будівництва житла з низькими витратами на його експлуатацію. У працях[9-13] розкрито основні переваги застосування інформаційних технологій у будівельній сфері як перспективного напрямку її інноваційного розвитку. Автори [14-16] акцентують увагу на важливості впровадження сучасних інформаційних технологій для підвищення ефективності будівельних процесів та конкурентоспроможності підприємств

галузі. Наукові роботи [17-19] розглядають аналітико-прикладні основи інновацій у будівництві, аналізує стан будівельної галузі за останні роки та досліджує перспективи впровадження інноваційних технологій. Особлива увага приділяється таким напрямкам, як 3D-друк та адитивні технології, які можуть суттєво вплинути на розвиток будівельної галузі в Україні, та розглянуто сучасні матеріали та технології для друку будівель та об'єктів інфраструктури в різних країнах світу.

Мета статті – дослідити концепцію SMART-технологій у будівельній галузі, проаналізувати їх еволюцію, ключові напрями застосування та техніко-технологічні показники рівня впровадження. На основі аналізу міжнародних методик сертифікації (LEED, BREEAM, WELL, SRI) визначити перспективні напрями розвитку SMART-інновацій, зокрема 3D-друк, екологічні матеріали та адаптацію будівництва до технологій 5G.

Виклад основного матеріалу. Концепція SMART (англ. Self-Monitoring, Analysis, and Reporting Technology) виникла як відповідь на потребу підвищення ефективності, безпеки та екологічності будівельних об'єктів. Її розвиток пов'язаний із глобальним поширенням Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI), автоматизації та цифрових технологій, що дозволили перетворити звичайні будівлі на «розумні» системи, здатні самостійно адаптуватися до змін навколишнього середовища та потреб користувачів.

Одним із перших розробників ідеї «розумних будівель» вважається IBM, яка ще у 1990-х роках представила концепцію "SmartPlanet", що передбачала використання датчиків, аналітичних систем і автоматизації для покращення якості життя в містах. Далі концепцію розвивали технологічні гіганти, такі як Siemens, Schneider Electric, Cisco, Honeywell, а також архітектурні та інженерні компанії.

SMART-технології в будівництві базуються на використанні цифрових систем моніторингу, автоматизації та штучного інтелекту, що дозволяє будівлям не лише функціонувати більш ефективно, а й забезпечувати сталий розвиток, оптимальне енергоспоживання та безпеку мешканців (табл. 1). Сучасні SMART-інновації охоплюють різні аспекти будівництва: від розумного управління інфраструктурою до інтеграції екологічно чистих технологій. Основні напрями застосування включають:

- *SMART-будинки та "розумні" міста:* інтелектуальні системи управління енергією, що автоматично регулюють освітлення, опалення та кондиціонування; автоматизовані системи безпеки (відеоспостереження, біометричний доступ, датчики руху); мережеві IoT-пристрої для контролю за споживанням ресурсів (вода, електрика, газ).

- *Building Information Modeling (BIM)*: використання цифрового моделювання для проектування та будівництва; аналіз будівельної документації в режимі реального часу; мінімізація витрат за рахунок прогнозування потенційних ризиків.

- *Автоматизація будівельних процесів*: використання роботизованих систем для зведення споруд (3D-друк будівель, дрони для моніторингу будівельних майданчиків); інтелектуальні будівельні матеріали (самовідновлюваний бетон, матеріали з пам'яттю форми).

- *Енергозбереження та екологічна ефективність*: використання «зелених» енергетичних рішень (сонячні панелі, вітрові генератори, системи повторного використання води); технології регенерації тепла та автоматизоване регулювання температури.

- *SMART-безпека*: системи пожежної безпеки з автоматичним реагуванням; інтелектуальне керування евакуацією під час надзвичайних ситуацій; датчики забруднення повітря та системи контролю якості повітря.

Таблиця 1

Методики оцінки рівня впровадження SMART-інновацій у будівництві

Методика	Розробник	Характеристики	Приклад застосування
1	2	3	4
LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)	U.S. Green Building Council (USGBC) 1998	Оцінює ефективність енергоспоживання, використання матеріалів, якість внутрішнього середовища, управління водними ресурсами та інновації у проектуванні.	One Bryant Park (Нью-Йорк, США)
BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)	Building Research Establishment (BRE), Велика Британія 1990	Оцінює будівлі за екологічною ефективністю, рівнем впливу на довкілля, якістю проектування та управління ресурсами.	The Edge (Амстердам, Нідерланди)
1	2	3	4
WELL Building Standard	International WELL Building Institute (IWBI), США 2014	Оцінює будівлі за впливом на здоров'я та комфорт людей, враховуючи параметри якості повітря, води, освітлення, ергономіки, психофізіологічного комфорту.	Salesforce Tower (Сан-Франциско, США)
Smart Readiness Indicator (SRI)	Європейська Комісія 2020	Оцінює здатність будівель адаптуватися до технологічних інновацій та інтеграції розумних систем управління (енергозбереження, автоматизації, IoT).	Розумні офісні центри в ЄС
DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges	Німецька рада зі сталого будівництва	Систематизує оцінку сталого будівництва, включаючи ефективне використання	Siemens Headquarters (Мюнхен,

Bauen)	(DGNB) 2007	енергетичних ресурсів, комфорт користувачів, екологічні матеріали.	Німеччина)
CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency)	Міністерство будівництва Японії 2001	Вимірює екологічну ефективність будівель, аналізує баланс між якістю середовища та енергоспоживанням.	Tokyo Skytree
EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies)	IFC (Міжнародна фінансова корпорація, Світовий банк) 2014	Фокусується на енергоефективності, економії води та матеріалів із низьким впливом на довкілля.	Екологічні житлові комплекси в Латинській Америці
Green Star	Green Building Council Australia (GBCA) 2003	Включає оцінку будівель за енергоефективністю, внутрішнім середовищем, управлінням ресурсами та інноваціями у проектуванні.	Barangaroo South (Сідней, Австралія)
Living Building Challenge (LBC)	International Living Future Institute (ILFI) 2006	Найжорсткіша система сертифікації, яка вимагає нульового енергоспоживання та повної автономності будівель.	Bullitt Center (Сіетл, США)
NABERS (National Australian Built Environment Rating System)	Австралійське урядове агентство з екологічної оцінки 1998	Вимірює продуктивність будівель за споживанням води, енергії, викидами CO ₂ та рівнем комфорту мешканців.	Grosvenor Place (Сідней, Австралія)

У сучасному будівництві інноваційні технології, такі як смарт-технології, 3D-друк, енергоефективність, використання відновлювальних джерел енергії та зелені будівлі, є ключовими компонентами. Вони допомагають створити стійкі, комфортні та екологічно чисті будівлі, що відповідають потребам сучасного суспільства. Оцінка рівня впровадження SMART-інновацій у будівництві базується на кількісних і якісних показниках. Основні з них:

1. Рівень автоматизації та інтеграції IoT
 - Кількість датчиків та інтелектуальних систем на 1 м² будівлі.
 - Відсоток автоматизованих процесів (управління енергією, безпекою, вентиляцією).
 - Рівень зв'язку між підсистемами (BIM, Smart Grid, IoT).
2. Енергоефективність
 - Клас енергоефективності будівлі (за міжнародними стандартами LEED, BREEAM, ISO 50001).
 - Кількість збереженої енергії за рахунок SMART-рішень (% скорочення споживання).
 - Відсоток використання відновлюваних джерел енергії.
 - Екологічність та стійкість

- Відсоток матеріалів, що підлягають вторинному використанню.
- Вуглецевий слід будівлі (вимірюється в CO_2/m^2).
- Рівень утилізації відходів та їх повторного використання.
- 3. Рівень комфорту та безпеки
 - Оцінка мікроклімату (температура, вологість, якість повітря).
 - Час реакції систем безпеки на надзвичайні події.
 - Відгуки користувачів про рівень комфорту в розумному будинку (опитування, індекси задоволеності).
- 4. Цифрова трансформація будівельної галузі
 - Відсоток компаній, що використовують BIM-технології та цифрове моделювання.
 - Час проєктування та будівництва завдяки SMART-інструментам.
 - Інвестиції у SMART-рішення у відсотках від загального обсягу витрат.

У найближчі десятиліття очікується активний розвиток наступних напрямків: а) штучний інтелект та машинне навчання (прогнозування стану будівель на основі аналізу великих даних; автоматичний контроль витрат матеріалів та оптимізація постачання); б) повна інтеграція розумних будівель у "розумні" міста (з'єднання окремих об'єктів інфраструктури у єдину цифрову систему; використання блокчейн-технологій для захисту даних у будівельній галузі); в) розвиток 3D-друку в будівництві (друк житлових будинків із використанням екологічних матеріалів; автоматизоване створення будівель без втручання людини); г) використання нанотехнологій та розумних матеріалів (самовідновлювані будівельні матеріали (бетон, що регенерується), прозорі сонячні панелі для вікон); д) синхронізація з 5G та хмарними технологіями (швидкісний обмін даними між елементами розумного будинку, дистанційне керування будівлями через мобільні додатки).

Висновки. Будівельні норми пройшли довгий шлях від простих законів відповідальності у Вавилоні до складних міжнародних стандартів, що регулюють безпеку, екологічність та технологічну ефективність сучасних споруд. Вони постійно змінюються у відповідь на нові виклики часу, забезпечуючи зручність, безпеку та сталість розвитку міст та інфраструктури. Особливу увагу приділено оцінці впливу цифрового моделювання (BIM), автоматизації процесів, штучного інтелекту та Інтернету речей (IoT) на ефективність, безпеку та екологічну стійкість будівельних проєктів. SMART-технології стають невід'ємною частиною будівельної галузі, забезпечуючи ефективність, безпеку та сталий розвиток. Вони змінюють підхід до архітектури та будівництва, дозволяючи створювати високотехнологічні будівлі з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Список використаних джерел

1. Trach, R., Khomenko, O., Trach, Y., Kulikov, O., Druzhynin, M., Kishchak, N., ... & Obodianska, O. (2023). Application of fuzzy logic and SNA tools to assessment of communication quality between construction project participants. *Sustainability*, 15(7), 5653.
2. Trach, R., Ryzhakova, G., Trach, Y., Shpakov, A., & Tyvoniuk, V. (2023). Modeling the Cause-and-Effect Relationships between the Causes of Damage and External Indicators of RC Elements Using ML Tools. *Sustainability*, 15(6), 5250
3. Chernyshev D., Ivakhnenko I., Ryzhakova G., & Predun, K., (2018). Implementation of principles of biospheric compatibility in the practice of ecological construction in Ukraine. *International Journal of Engineering & Technology – UAE: Science Publishing Corporation*. – Vol 10, No 3.2: Special Issue 2, 584 – 586.
4. Поколенко В.О., Рижакова Г.М., Приходько Д.О. Запровадження інструментарію вибору альтернатив реалізації будівельних проектів за функціонально-технічною надійністю організацій-виконавців. *Управління розвитком складних систем*. – 2014. – Вип. 19. – С.104 – 108.
5. Хоменко О.М., Петренко Г.С., Рижакова Г.М., Петруха Н.М., Чуприна Ю.А., Малихіна О.М., Кушнір О.К. Сучасні інструменти та програмні продукти адміністрування будівельними організаціями в умовах трансформації операційних систем менеджменту. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2022. № 52. С. 113 – 125, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2022.52.113-125.
6. Хоменко О.М., Рижакова Г.М., Малихіна О.М., Петренко Г.С., Степанюк Р.Б. Цільові пріоритети та формалізовані індикатори трансформації операційних систем стейкхолдерів будівництва. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 56. С. 173 – 180, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2023.56.173-180
7. Chupryna I., Ryzhakova G., Chupryna K., Tormosov R., Gonchar V. (2022) Designing a toolset for the formalized evaluation and selection of reengineering projects to be implemented at an enterprise *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol.1 No.13 (115), p. 6–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251235>
8. Tetyana Marchuk, Dmytro Ryzhakov, Galyna Ryzhakova and Sergiy Stetsenko (2017). Identification of the basic elements of the innovation analytical platform for energy efficiency in project financing. *Investment Management and Financial Innovations* (open-access), 14(4), pp. 12-20. DOI: [http://10.21511/imfi.14\(4\).2017.02](http://10.21511/imfi.14(4).2017.02)
9. Akselrod R., Shpakov A., Ryzhakova G., Honcharenko T., Chupryna I., Shpakova H. (2022) Integration of data flows of the construction project life cycle to create a digital enterprise based on Building Information Modeling. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 12, Issue 01 (January 2022), pp. 40–50. ISSN 2250-2459. DOI: 10.46338/ijetae0122_05

10. Ryzhakova, G., Malykhina, O., Pokolenko, V., Nesterenko, I., Honcharenko, T. (2022) Construction Project Management with Digital Twin Information System International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2022, 12(10), pp. 19–28.
11. Гончаренко Т.А. Кластерний метод формування метаданих багатовимірних інформаційних систем для розв'язання задач генерального планування. *Управління розвитком складних систем*. № 42. С. 93–101, 2020. DOI: 10.32347/2412-9933.2020.42.93-101.
12. Рижаківа Г.М., Кіщак Н.Г., Хоменко О.М., Ротов О.О., Ніколаєва М.Ю., Веремєєва Т.І. Сучасний вектор оновлення будівельного девелопменту в контексті стратегії Integrated Project Delivery. *Управління розвитком складних систем*. Київ. 2022. № 49. С. 113 – 123, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2022.49.113–123.
13. Згалат-Лозинська, Л.О. (2020). Концепція інноваційного розвитку будівельної галузі в умовах пандемії та економічної кризи. *Економічний простір*, (157), 27–31.
14. Рижаківа Г.М., Орленко І.М., Малихіна О.М. Методологічна регламентація та аналітико-інформаційне забезпечення менеджменту організацій в сучасній системі будівельного девелопменту. *Формування ринкових відносин в Україні*. - 2021. - № 7-8. - С. 59-65.
15. Рижаківа Г.М., Приходько Д.О., Предун К.М. Моделі цільового вибору репрезентативних індикаторів діяльності будівельних підприємств: етимологія та типологія систем діагностики. *Управління розвитком складних систем*. – 2017. – № 32. – С. 159 – 165.
16. Kulikov P., Ryzhakova G., Honcharenko T., Ryzhakov D., Malykhina O. OLAP-Tools for the Formation of Connected and Diversified Production and Project Management Systems, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8(10), October 2020, pp. 7337-7343, <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/1108102020> 16.
17. Рижаківа Г.М. Сучасні особливості та перспективи розвитку інфраструктури ринку інвестицій. *Будівельне виробництво*. 2015, (58), 96-101.
18. Трач Р.В. Рижаківа Г.М., Крижановський В.І. Інформаційне моделювання та концепція інтегрованої реалізації будівельних проектів, як основа інноваційного розвитку будівельного підприємства. *Управління розвитком складних систем*. - 2017. - Вип. 31. - С. 173-178.
19. Беленкова, О.Ю. (2023). Імперативи маркетингової діяльності стейкхолдерів будівництва: реінжиніринг чи стагнація. *Просторовий розвиток*, (5), 326–338.

PhD Student **Stepaniuk Roman**,
Doctor of Technical Sciences, Professor **Antypenko Eugene**,
National University "Zaporizhzhia Polytechnic",
DrSc (Economics), Associate Professor **Valinkevych Nataliia**,
Polissya National University,
PhD Student **Oleksandr Lavrinenko**, PhD Student **Oleksii Herasymenko**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

STRUCTURAL-DYNAMIC TRANSFORMATION OF THE OPERATIONAL SYSTEM OF CONSTRUCTION DEVELOPMENT ENTERPRISES: ANALYTICAL AND APPLIED ASPECTS

The article explores SMART innovations and modern technologies that define the trends in the development of the construction industry. The historical evolution of building regulations is analyzed, starting from the legislative provisions of Ancient Babylon, Medieval Europe, and the Industrial Revolution to modern regulations based on digital technologies and environmental standards. The impact of information technologies, digital modeling (BIM), process automation, and the Internet of Things (IoT) on the efficiency and safety of construction projects is examined.

Special attention is given to the concept of SMART technologies, which integrate artificial intelligence, automated control, and analytical systems into construction process management. The main areas of their application are studied, including the implementation of "smart" buildings and cities, the use of robotic systems for construction automation, and the development of energy-efficient technologies. The key directions of SMART technology application in construction are analyzed, and technical-technological indicators of their implementation levels are substantiated.

The article presents an analysis of international methodologies for assessing the level of SMART innovation implementation in construction, such as LEED, BREEAM, WELL Building Standard, Smart Readiness Indicator (SRI), and others used to determine the level of environmental efficiency and digital integration of construction projects. The key prospective directions for SMART technology development include the integration of artificial intelligence for predicting building conditions, the further expansion of 3D printing in construction, the advancement of environmentally friendly materials, and the adaptation of construction processes to 5G networks. The article summarizes the current state of SMART technology development in the construction sector and proposes promising directions for their

further implementation to enhance efficiency, safety, and environmental sustainability in construction.

Keywords: development; innovations; transformation of the operational system of construction development enterprises; SMART technologies; digital modeling; energy efficiency; construction project; intelligent management systems; engineering structures; urban infrastructure; sustainable development; BIM technologies; smart cities; additive technologies.

REFERENCES

1. Trach, R., Khomenko, O., Trach, Y., Kulikov, O., Druzhynin, M., Kishchak, N., ... & Obodianska, O. (2023). Application of fuzzy logic and SNA tools to assessment of communication quality between construction project participants. *Sustainability*, 15(7), 5653. {in English}
2. Trach, R., Ryzhakova, G., Trach, Y., Shpakov, A., & Tyvoniuk, V. (2023). Modeling the Cause-and-Effect Relationships between the Causes of Damage and External Indicators of RC Elements Using ML Tools. *Sustainability*, 15(6), 5250. {in English}
3. Chernyshev, D., Ivakhnenko, I., Ryzhakova, G., & Predun, K. (2018). Implementation of principles of biospheric compatibility in the practice of ecological construction in Ukraine. *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 10, No. 3.2: Special Issue 2, 584–586. {in English}
4. Pokolenko, V.O., Ryzhakova, G.M., & Prykhodko, D.O. (2014). Introduction of tools for selecting alternatives for the implementation of construction projects based on the functional and technical reliability of contracting organizations. *Management of Development of Complex Systems*, (19), 104–108. {in Ukrainian}
5. Khomenko, O.M., Petrenko, G.S., Ryzhakova, G.M., Petrukha, N.M., Chupryna, Y.A., Malykhin, O.M., & Kushnir, O.K. (2022). Modern tools and software products for the administration of construction organizations under the transformation of management operating systems. *Management of Development of Complex Systems*, Kyiv, (52), 113–125. <https://dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.113-125>. {in Ukrainian}
6. Khomenko, O.M., Ryzhakova, G.M., Malykhin, O.M., Petrenko, G.S., & Stepaniuk, R.B. (2023). Target priorities and formalized indicators of operational systems transformation for construction stakeholders. *Management of Development of Complex Systems*, Kyiv, (56), 173–180. <https://dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.173-180>. {in Ukrainian}
7. Chupryna, I., Ryzhakova, G., Chupryna, K., Tormosov, R., & Gonchar, V. (2022). Designing a toolset for the formalized evaluation and selection of reengineering projects to be implemented at an enterprise. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, No. 13 (115), 6–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251235>. {in English}
8. Marchuk, T., Ryzhakov, D., Ryzhakova, G., & Stetsenko, S. (2017). Identification of the basic elements of the innovation-analytical platform for energy efficiency in project financing.

Investment Management and Financial Innovations, 14(4), 12–20. [https://doi.org/10.21511/imfi.14\(4\).2017.02](https://doi.org/10.21511/imfi.14(4).2017.02). {in English}

9. Akselrod, R., Shpakov, A., Ryzhakova, G., Honcharenko, T., Chupryna, I., & Shpakova, N. (2022). Integration of data flows of the construction project life cycle to create a digital enterprise based on Building Information Modeling. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(1), 40–50. https://doi.org/10.46338/ijetae0122_05. {in English}

10. Ryzhakova, G., Malykhin, O., Pokolenko, V., Nesterenko, I., & Honcharenko, T. (2022). Construction Project Management with Digital Twin Information System. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(10), 19–28. {in English}

11. Honcharenko, T.A. (2020). Cluster method of forming metadata for multidimensional information systems for solving general planning tasks. *Management of Development of Complex Systems*, (42), 93–101. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.93-101>. {in Ukrainian}

12. Ryzhakova, G.M., Kishchak, N.G., Khomenko, O.M., Rotov, O.O., Nikolaeva, M.Yu., & Veremeeva, T.I. (2022). Modern vector of renewal of construction development in the context of the Integrated Project Delivery stratagem. *Management of Development of Complex Systems*, Kyiv, (49), 113–123. <https://dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2022.49.113-123>. {in Ukrainian}

13. Zhalat-Lozynska, L.O. (2020). The concept of innovative development of the construction industry in the conditions of a pandemic and economic crisis. *Economic Space*, (157), 27–31. {in Ukrainian}

14. Ryzhakova, G.M., Orlenko, I.M., & Malykhin, O.M. (2021). Methodological regulation and analytical and informational support of management in the modern system of construction development. *Formation of Market Relations in Ukraine*, (7–8), 59–65. {in Ukrainian}

15. Ryzhakova, G.M., Prykhodko, D.O., & Predun, K.M. (2017). Models for target selection of representative performance indicators of construction enterprises: etymology and typology of diagnostic systems. *Management of Development of Complex Systems*, (32), 159–165. {in Ukrainian}

16. Kulikov, P., Ryzhakova, G., Honcharenko, T., Ryzhakov, D., & Malykhin, O. (2020). OLAP-tools for the formation of connected and diversified production and project management systems. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8(10), 7337–7343. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/1108102020>. {in English}

17. Ryzhakova, G.M. (2015). Modern features and prospects for the development of investment market infrastructure. *Construction Production*, (58), 96–101. {in Ukrainian}

18. Trach, R.V., Ryzhakova, G.M., & Kryzhanovsky, V.I. (2017). Information modeling and the concept of integrated implementation of construction projects as the basis for the innovative development of a construction enterprise. *Management of Development of Complex Systems*, (31), 173–178. {in Ukrainian}

19. Bielenkova, O.Y. (2023). Imperatives of marketing activities of construction stakeholders: reengineering or stagnation. *Spatial Development*, (5), 326–338. {in Ukrainian}