

DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2026-59-53>

УДК 338.45:69:330.341.1

Лісовий Андрій Васильович

доктор економічних наук, професор,
завідувач кафедри обліку та аудиту,
Державний податковий університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1928-3138>

Коритько Дмитрій Григорович

кандидат юридичних наук, директор,
ТОВ «Юкрейніан канстракшн аддітів технолоджіс»;
Керівник,
НДЦ INCORE (Institute for Construction and Reconstruction Engineering)
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8486-6840>

Andrii Lisovyi

State Tax University

Korytko Dmytrii

Ukrainian Construction Additive Technologies LLC;
Research Center INCORE (Institute for Construction and Reconstruction Engineering)

ЕКОНОМІЧНІ ФАКТОРИ ТА ІНСТИТУЦІЙНІ ДРАЙВЕРИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ

ECONOMIC FACTORS AND INSTITUTIONAL DRIVERS OF ADDITIVE TECHNOLOGIES DEVELOPMENT IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Анотація. У статті досліджено економічні фактори та інституційні драйвери розвитку адитивних технологій у будівельній галузі в умовах технологічної трансформації світової економіки. Обґрунтовано, що сучасний розвиток будівництва характеризується структурними диспропорціями, зокрема низькими темпами зростання продуктивності праці, високою трудомісткістю процесів та значними витратами матеріальних ресурсів. У цих умовах адитивні технології розглядаються як один із ключових інструментів технологічної модернізації будівельної індустрії. Проаналізовано макроекономічні передумови поширення адитивних технологій, зокрема глобальний попит на житлову та інфраструктурну забудову, дефіцит кваліфікованої робочої сили та посилення екологічних вимог до будівельної діяльності. Визначено перспективи застосування адитивних технологій у процесі відновлення будівельної галузі України в контексті післявоєнної реконструкції житлової та соціальної інфраструктури.

Ключові слова: адитивні технології, економіка будівельної галузі, інституційні драйвери інновацій, економічна ефективність будівництва, інноваційний розвиток будівництва, інвестиції в будівельні технології, цифрова трансформація будівництва, Construction 4.0.

Summary. The purpose of the study is to identify and analyze the key economic factors and institutional drivers influencing the development of additive technologies in the construction industry under conditions of technological transformation and digitalization of the global economy. The methodological basis of the research includes systemic, institutional and economic approaches to the analysis of technological innovation in the construction sector. Methods of scientific abstraction, comparative analysis, structural-functional analysis and synthesis were applied. The study also relies on the generalization of international analytical reports, statistical data and case studies of additive construction technologies implementation. The research demonstrates that the construction industry currently faces a number of structural challenges, including low productivity growth, high labor intensity and significant material consumption. These factors create economic conditions that stimulate the introduction of innovative technologies in construction. The study identifies the key drivers of additive technologies diffusion, such as the global housing deficit, shortage of qualified labor, increasing environmental requirements and the rapid growth of the global additive manufacturing market. It is established that the use of construction 3D printing technologies can significantly reduce construction time, minimize material waste and improve productivity. The study also analyzes investment characteristics and cost structures of additive construction projects, highlighting



their long-term economic benefits. The scientific novelty of the study lies in the comprehensive identification and systematization of economic and institutional determinants of additive technologies development in the construction sector. The research provides a conceptual framework explaining the interaction between technological innovation, regulatory environment and economic efficiency within the paradigm of Construction 4.0. The results of the study can be used for the development of strategic approaches to technological modernization of the construction industry, as well as for the formation of public policies aimed at supporting innovative construction technologies. In addition, the research findings may contribute to the development of economic mechanisms for the implementation of additive construction technologies in large-scale infrastructure and housing projects. The study concludes that additive technologies represent a promising direction for increasing efficiency and sustainability in the construction industry. Their integration into the digital ecosystem of construction processes creates conditions for the formation of a new economic model of construction production. The implementation of additive technologies may also play an important role in accelerating post-war reconstruction and infrastructure development.

Keywords: additive technologies, construction industry economics, institutional drivers of innovation, economic efficiency of construction, innovation-driven development of construction, investment in construction technologies, digital transformation of construction, Construction 4.0.

Постановка проблеми. Будівельна галузь є одним із найбільших секторів світової економіки, формуючи значну частку глобального валового внутрішнього продукту та забезпечуючи масштабну зайнятість населення. Водночас сучасний стан розвитку будівництва характеризується системними структурними диспропорціями, зокрема низькою динамікою зростання продуктивності праці, обмеженим рівнем інвестицій у дослідження та розробки, фрагментованою структурою ринку та високою залежністю від трудовітких технологічних процесів. У сукупності ці фактори зумовлюють підвищення вартості будівельних проєктів, збільшення термінів їх реалізації та зниження ефективності використання ресурсів у галузі.

Додатковим викликом виступає зростання глобального попиту на доступне житло та інфраструктурні об'єкти, що супроводжується дефіцитом кваліфікованої робочої сили й посиленням екологічних вимог до будівництва. У цих умовах традиційні методи організації будівельного процесу дедалі частіше виявляються недостатніми для забезпечення необхідних темпів та масштабів розвитку галузі. Відповідно, актуалізується потреба у впровадженні технологічних рішень, здатних суттєво підвищити продуктивність, скоротити витрати матеріалів і зменшити тривалість будівництва.

Одним із найбільш перспективних напрямів технологічної трансформації будівництва виступають адитивні технології, які інтегруються у ширший контекст цифровізації галузі та концепції Construction 4.0. Їх впровадження супроводжується формуванням нових економічних механізмів інноваційного розвитку, що пов'язані з інвестиційними умовами, інституційним середовищем та регуляторними стимулами. У зв'язку з цим особливою актуальністю набуває дослідження економічних факторів та інституційних драйверів розвитку адитивних технологій у будівельній галузі, що має важливе значення як для розвитку наукових підходів до технологічної модернізації будівництва, так і для формування ефективної політики інноваційного розвитку галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика технологічної модернізації будівельної галузі та пошуку економічних механізмів підвищення її ефективності активно розробляється у сучасній науковій літературі. У дослідженнях Ф. Барбози, Дж. Воетцела, Я. Мішке та ін. обґрунтовано, що будівництво належить до секторів економіки з найнижчими темпами зростання продуктивності, що зумовлює необхідність переходу до нової технологічної парадигми розвитку галузі [1]. Подальший розвиток цієї проблематики представлений у роботах експертів McKinsey & Company, де наголошується на системному характері структурної неефективності будівництва та необхідності інтеграції цифрових і роботизованих технологій у виробничі процеси [2].

Питання інноваційної активності та інвестиційного забезпечення технологічного розвитку будівництва досліджували Б. Гінігаддара, Т. Рамачандра та Д. Гікіянейдж, які підкреслюють критично низький рівень фінансування науково-дослідних робіт у галузі як один із ключових бар'єрів її інноваційної трансформації [3]. У ширшому соціально-економічному контексті проблема дефіциту житла та необхідності масштабування будівництва розглядається у дослідженнях Світового банку та World Green Building Council, де акцентується на необхідності пошуку нових технологічних моделей розвитку житлового будівництва [4; 6].

Значний масив наукових робіт присвячено економічним та екологічним аспектам адитивного виробництва. У дослідженні А. Аль-Амері та співавторів доведено, що використання 3D-друку у будівництві може забезпечити суттєве зниження витрат та екологічного навантаження протягом життєвого циклу будівель [22]. Подібні висновки містяться у роботах Ю. Венга та ін., де аналізується конкурентоспроможність технології 3D concrete printing у будівельній індустрії [23]. Питання економічної ефективності адитивного виробництва систематизовано у дослідженні Д. Томаса та С. Гілберта, де запропоновано методичні підходи до оцінювання вартості та доцільності впровадження адитивних технологій [24].

Важливу роль у формуванні сучасної наукової картини розвитку адитивних технологій відіграють аналітичні звіти Т. Волерса та ін., у яких відображено глобальні тенденції розвитку ринку адитивного виробництва та його галузеву дифузію [14; 15]. Додаткові дослідження, зокрема праці А. Сохні, М. Райлі та Дж. Ірізаррі, розглядають інтеграцію адитивних технологій у концепцію Construction 4.0 та цифрову трансформацію будівельного сектору [27].

Поряд із цим у науковій літературі висвітлюються екологічні та регуляторні аспекти розвитку будівництва, зокрема у дослідженнях, присвячених декарбонізації будівельного сектору та зменшенню вмісту вуглецю у будівельних матеріалах [9; 10; 11; 12]. Питання кадрового дефіциту у будівельній галузі та його впливу на ефективність реалізації проєктів аналізуються у дослідженнях галузевих організацій та професійних асоціацій [7; 8].

Окрему групу становлять дослідження, присвячені практичним аспектам застосування адитивних технологій у будівництві, зокрема аналізу реальних проєктів та ринкових тенденцій розвитку 3D-друку у будівельному секторі [5; 13; 16; 17; 18; 19; 20; 29; 30]. У цих роботах демонструються значні можливості підвищення продуктивності та скорочення витрат у процесі будівництва.

Разом із тим, незважаючи на значний науковий доробок, у сучасних дослідженнях недостатньо розкритими залишаються інституційно-економічні детермінанти масштабного впровадження адитивних технологій у будівельній галузі, а також механізми формування сприятливого інвестиційного середовища для їх поширення. Саме ці аспекти становлять предмет подальшого наукового аналізу в межах даної статті.

Мета статті полягає у комплексному дослідженні економічних факторів та інституційних драйверів розвитку адитивних технологій у будівельній галузі, а також у визначенні ключових економічних передумов, інвестиційних умов і регуляторних стимулів їх поширення. Особливу увагу приділено оцінці ролі адитивних технологій у підвищенні ефективності будівництва та формуванні технологічних засад модернізації галузі.

Методологічна основа дослідження ґрунтується на поєднанні системного, інституційного та економічного підходів до аналізу розвитку інноваційних технологій у будівельній галузі. Дослідження спирається на діалектичний принцип взаємозв'язку технологічних змін, економічних факторів та інституційного середовища, що визначають трансформацію будівельного сектору в умовах цифрової економіки. У роботі використано методи наукової абстракції, порівняльного та структурно-функціонального аналізу для виявлення економічних передумов і механізмів

впровадження адитивних технологій. Аналітичну основу становить узагальнення статистичних даних, результатів міжнародних досліджень, галузевих звітів і практичних кейсів застосування будівельного 3D-друку, що дозволило визначити економічні детермінанти інноваційної трансформації будівництва.

Виклад основного матеріалу дослідження. Трансформація будівельної галузі у XXI столітті відбувається під впливом комплексних економічних та інституційних факторів, що формують нову технологічну парадигму розвитку сектору. У структурі світової економіки будівництво традиційно посідає стратегічно важливе місце, оскільки забезпечує створення матеріальної інфраструктури економічного розвитку, формує значну частку інвестицій у основний капітал та забезпечує значний рівень зайнятості населення. За оцінками міжнародних досліджень, частка будівельної галузі у формуванні світового валового внутрішнього продукту становить близько 13 %, що свідчить про її системоутворююче значення для економічного розвитку [1].

Разом із тим, попри значний масштаб економічної діяльності, будівельний сектор характеризується відносно низькою динамікою зростання продуктивності. Як зазначають Ф. Барбоза, Дж. Воетцел та Я. Мішке, протягом останніх двох десятиліть середньорічний приріст продуктивності у будівництві становив лише близько 0,4 %, тоді як у промисловості цей показник досягав приблизно 2 %, а в обробній промисловості – близько 3 % [1]. Подібні висновки підтверджуються і сучасними аналітичними дослідженнями McKinsey & Company, які підкреслюють, що будівництво залишається однією з найменш інноваційних галузей економіки, що обумовлює зростання вартості будівельних проєктів та збільшення термінів їх реалізації [2].

У філософсько-економічному вимірі така ситуація може бути інтерпретована як прояв технологічної інерції галузі, в якій домінують традиційні виробничі практики та інституційні механізми організації виробництва. Будівельна індустрія історично формувалася як система локальних виробничих процесів, що характеризуються високою трудомісткістю, значною залежністю від людського капіталу та обмеженим рівнем стандартизації. Саме тому інтеграція цифрових технологій та автоматизованих виробничих систем стає ключовим напрямом структурної модернізації галузі.

Одним із найважливіших факторів технологічної трансформації будівництва є глобальний дефіцит житла. Згідно з оцінками Світового банку, у країнах із ринковою економікою, що розвивається, дефіцит доступного житла перевищує 268 мільйонів житлових одиниць [4]. При цьому

за прогнозами World Green Building Council для задоволення глобального попиту на житло необхідно щоденно будувати приблизно 96 тисяч нових житлових об'єктів протягом наступних десятиліть [6]. Подібні масштаби будівництва практично неможливо забезпечити виключно за рахунок традиційних технологічних рішень.

Не менш важливим економічним фактором виступає дефіцит робочої сили у будівельному секторі. За даними Associated Builders and Contractors, лише у США будівельна галузь потребувала понад 546 тисяч додаткових працівників у 2023 році та понад 500 тисяч у 2024 році понад стандартні темпи найму [7]. Водночас результати опитувань Associated General Contractors свідчать, що близько 85 % будівельних компаній стикаються з проблемою незаповнених вакансій, що створює додаткові ризики для реалізації інвестиційних проєктів [8].

У цих умовах дедалі більшого значення набувають адитивні технології будівництва, які дозволяють поєднати автоматизацію виробничих процесів із принципово новими підходами до організації будівельного виробництва. Технології 3D-друку у будівництві забезпечують значне скорочення використання матеріалів, зменшення потреби у ручній праці та підвищення продуктивності будівельних процесів. Зокрема, за результатами галузевих досліджень застосування адитивного будівництва дозволяє скоротити відходи матеріалів до 60 % та зменшити потребу у ручній праці на 50–80 % під час виконання стінових робіт [13].

Систематизація ключових економічних факторів, що визначають розвиток адитивних технологій у будівельній галузі, представлена у таблиці 1.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що економічні передумови розвитку адитивних технологій у будівництві мають комплексний характер та формуються під впливом взаємодії макроекономічних, інституційних та технологічних факторів. У цьому контексті адитивні технології виступають не лише інноваційним виробничим інструментом, а й важливим елементом нової економічної моделі розвитку будівельної галузі, що базується на інтеграції цифрових технологій, автоматизації виробничих процесів та підвищенні ресурсної ефективності.

Важливим елементом формування економічних передумов розвитку адитивних технологій у будівельній галузі є посилення екологічних та регуляторних вимог до функціонування будівельного сектору. У сучасних умовах будівництво розглядається не лише як галузь створення матеріальної інфраструктури економіки, але й як один із ключових секторів, що впливають на екологічну стійкість розвитку суспільства. За оцінками міжнародних організацій, будівлі та будівельна індустрія формують понад третину глобальних викидів парникових газів, а також споживають близько половини усіх видобутих природних ресурсів [9].

Значний екологічний вплив будівельного сектору зумовлює формування нових регуляторних підходів до організації будівельної діяльності. У Європейському Союзі одним із ключових інструментів регулювання енергоефективності будівель виступає переглянута Директива про енергетичну ефективність будівель (Energy Performance of Buildings Directive – EPBD), яка передбачає досягнення нульового рівня викидів для нових будівель до 2030 року та повну декарбонізацію будівельного фонду до 2050 року [11].

Таблиця 1 – Економічні фактори розвитку адитивних технологій у будівельній галузі

Економічний фактор	Механізм впливу	Рівень економічної системи	Вплив на інноваційну активність	Значення для розвитку адитивних технологій
Дефіцит продуктивності будівництва	Зростання продуктивності близько 0,4 % на рік проти 2–3 % в інших галузях	Макроекономічний / галузевий	Критичний стимул до впровадження інновацій	Адитивні технології підвищують швидкість будівництва у кілька разів
Глобальний дефіцит житла	Понад 268 млн житлових одиниць дефіциту	Макроекономічний / соціальний	Високий	Скорочення тривалості будівництва та зниження вартості
Дефіцит кваліфікованої робочої сили	Значна кількість незаповнених вакансій у галузі	Ринок праці	Високий	Підвищення рівня автоматизації будівельних процесів
Екологічні регуляторні вимоги	Посилення кліматичної політики та екологічних стандартів	Інституційний	Високий	Скорочення відходів та вуглецевого сліду
Низькі витрати на НДДКР	Інвестиції у дослідження значно нижчі, ніж у промисловості	Галузевий	Обмежувальний фактор	Потребує державної підтримки інновацій

Джерело: узагальнено авторами на основі [1- 4; 7; 8; 13]

Водночас розвиток системи торгівлі викидами парникових газів (ETS) поширюється на сектор будівель, створюючи економічні стимули для впровадження енергоефективних технологій та скорочення вуглецевого сліду будівель [12].

У контексті екологічної модернізації будівельної галузі дедалі більшої актуальності набуває проблема так званого «втільеного вуглецю», тобто викидів, пов'язаних із виробництвом будівельних матеріалів, транспортуванням та будівництвом об'єктів. За оцінками World Green Building Council, частка втільеного вуглецю у загальному вуглецевому сліді будівель у країнах Європейського Союзу може становити від 10 до 20 % [10]. Саме тому сучасні дослідження дедалі частіше фокусуються на пошуку технологічних рішень, здатних мінімізувати використання матеріалів та зменшити екологічне навантаження на довкілля.

У цьому контексті адитивні технології розглядаються як один із перспективних інструментів екологічної трансформації будівництва. Завдяки принципу пошарового нанесення матеріалу будівельний 3D-друк дозволяє значно скоротити кількість відходів, що утворюються під час будівництва. За результатами досліджень, застосування адитивних технологій може зменшити обсяг відходів будівельних матеріалів до 60 % порівняно з традиційними методами будівництва [13]. Крім того, використання адитивного виробництва відкриває можливості застосування нових екологічно орієнтованих матеріалів, зокрема геополімерів, біокомпозитів та рециклованого бетону.

Не менш важливим фактором розвитку адитивних технологій виступає стрімке зростання глобального ринку адитивного виробництва. Відповідно до даних аналітичних звітів Т. Волерса, протягом останніх десятиліть ринок адитивного виробництва демонструє стабільну тенденцію до зростання. Зокрема, за даними Wohlers Report, у 2023 році обсяг світового ринку адитивного виробництва перевищив 20 млрд доларів США [14; 15]. При цьому особливо високими темпами розвивається сегмент будівельного 3D-друку, який, хоча й займає поки що відносно невелику частку ринку, характеризується надзвичайно високими темпами зростання.

За оцінками Grand View Research, обсяг світового ринку 3D-друку у будівництві у 2024 році становив близько 53,9 млн доларів США, а до 2030 року може зрости до 4,18 млрд доларів США при середньорічному темпі зростання понад 100 % [16]. Подібна динаміка свідчить про формування нового сегмента технологічного ринку, який у перспективі може суттєво змінити структуру будівельної індустрії.

Особливий інтерес у цьому контексті становить аналіз практичних кейсів впровадження адитивних технологій у будівництві. Одним із най-

більш відомих прикладів є проєкт компанії ICON у штаті Техас (США), де за допомогою роботизованої системи Vulcan було реалізовано проєкт житлового комплексу Wolf Ranch, що включає 100 будинків, збудованих із застосуванням технології 3D-друку [5]. Особливістю цього проєкту є те, що вартість будинків (від 450 до 600 тис. доларів США) є порівнянною з середньою ринковою ціною житла у відповідному регіоні, що свідчить про конкурентоспроможність адитивного будівництва.

Іншим важливим прикладом є діяльність компанії COBOD International, яка розробила одну з найпоширеніших систем будівельного 3D-друку – принтер BOD2. За допомогою цієї технології було реалізовано низку масштабних будівельних проєктів, зокрема спорудження найбільшої 3D-друкованої будівлі у Європі в місті Гейдельберг (Німеччина) [17]. У межах цього проєкту швидкість друку стін становила приблизно 4 квадратні метри на годину, що дозволило значно скоротити тривалість будівельного процесу.

Ще одним показовим прикладом є реалізація будівельних проєктів у країнах Африки. Так, компанія Power2Build здійснила будівництво житлового будинку площею 140 м² в Анголі всього за 30 годин друку стінових конструкцій [18]. При цьому продуктивність будівництва зросла у 4,5 рази порівняно з першим аналогічним проєктом, що демонструє значний ефект так званої «кривої навчання», характерної для нових технологічних процесів.

Особливої уваги заслуговує державна політика підтримки розвитку адитивного будівництва у деяких країнах. Зокрема, у Об'єднаних Арабських Еміратах було реалізовано масштабну програму розвитку 3D-друку у будівництві – Dubai 3D Printing Strategy. Ця стратегія передбачає, що до 2030 року близько 25 % усіх будівель у Дубаї мають бути зведені із використанням адитивних технологій [19]. У межах цієї програми було реалізовано низку інноваційних будівельних проєктів, серед яких будівництво адміністративної будівлі муніципалітету Дубая площею 640 м², створеної за допомогою мобільного будівельного принтера компанії Apis Cor [20].

Узагальнення економічних результатів реалізації ключових проєктів адитивного будівництва представлено у таблиці 2.

Таким чином, проведений аналіз свідчить, що розвиток адитивних технологій у будівельній галузі обумовлений не лише технологічними інноваціями, але й комплексом економічних та інституційних факторів. Серед них особливу роль відіграють екологічні регуляторні вимоги, структурні трансформації ринку праці, зростання глобального попиту на житло та формування нового сегмента технологічного ринку адитивного виробництва.

Таблиця 2 – Економічні результати реалізації проєктів адитивного будівництва

Проект	Технологія	Економічний ефект	Тривалість будівництва	Основні результати
ICON Wolf Ranch (США)	3D-друк бетону	Конкурентна вартість житла	3–4 тижні	Серійне будівництво 100 будинків
COBOD Heidelberg (Німеччина)	Принтер BOD2	Висока швидкість друку	140 годин друку	Найбільша 3D-друкована будівля Європи
Power2Build (Ангола)	3D-друк	Зниження витрат на матеріали	30 годин	Підвищення продуктивності у 4,5 рази
Apis Cor (ОАЕ)	Мобільний принтер	Зниження витрат на будівництво	3 тижні	Найбільша 3D-друкована будівля на момент реалізації

Джерело: узагальнено авторами на основі [5; 17; 18; 19; 20]

Подальший розвиток цих технологій безпосередньо пов'язаний із формуванням ефективних інвестиційних механізмів їх впровадження, що потребує детального аналізу структури витрат та економічної ефективності адитивного будівництва. Саме ці аспекти становлять предмет подальшого дослідження.

Важливим напрямом дослідження економічних передумов розвитку адитивних технологій у будівництві є аналіз структури витрат та економічної ефективності їх впровадження. На відміну від традиційних технологій будівництва, що характеризуються високою трудомісткістю та значними витратами на матеріали й організацію виробничих процесів, адитивні технології формують нову економічну модель організації будівельного виробництва. У межах цієї моделі значна частина витрат переноситься із операційної площини у сферу капітальних інвестицій, пов'язаних із придбанням обладнання та впровадженням цифрових технологій.

Згідно з результатами досліджень, структура капітальних витрат у проєктах адитивного будівництва має специфічний характер. Основну частку інвестицій становить придбання будівельного 3D-принтера, на який припадає приблизно 40–60 % загального обсягу початкових капіталовкладень. Значну частку також формують системи змішування та подачі будівельних сумішей (15–25 %), програмне забезпечення та системи управління виробничим процесом (10–15 %), а також витрати на підготовку персоналу та технологічну адаптацію обладнання (5–10 %) [21]. Така структура інвестицій свідчить про наявність відносно високого порогу входу на ринок адитивного будівництва, що обумовлює важливість фінансової підтримки інноваційних проєктів.

Разом із тим, попри значні початкові інвестиції, економічні вигоди від застосування адитивних технологій можуть бути суттєвими. У дослідженні А. Аль-Амері та співавторів, присвяченому аналізу повного життєвого циклу 3D-друкованої житлової будівлі, встановлено, що використання адитивних технологій може забезпечити

скорочення витрат на будівництво до 78 % порівняно з традиційними технологіями [22]. Водночас екологічний вплив таких будівель виявився значно нижчим, що підтверджує потенціал адитивного будівництва як інструменту екологічної модернізації будівельного сектору.

Порівняльний аналіз економічної ефективності адитивного будівництва також представлено у дослідженні Ю. Венга та співавторів, де було проаналізовано конкурентоспроможність технології 3D concrete printing у будівельній галузі. Результати цього дослідження показали, що економічна ефективність адитивного будівництва значною мірою залежить від конфігурації виробничого процесу, зокрема від вибору між друком безпосередньо на будівельному майданчику або виробництвом конструктивних елементів на заводі з подальшим транспортуванням [23]. Найбільш економічно доцільною виявилася модель безпосереднього друку на будівельному майданчику, що дозволяє мінімізувати витрати на транспортування та логістику.

Узагальнення основних економічних характеристик інвестиційних проєктів у сфері адитивного будівництва представлено у таблиці 3.

Суттєву роль у розвитку адитивного будівництва відіграє також концепція Construction 4.0, яка відображає процес цифрової трансформації будівельної галузі та інтеграцію роботизованих і автоматизованих технологій у виробничі процеси, що активно підтримується в рамках європейських інноваційних програм, зокрема Horizon Europe [25]. У науковій літературі ця концепція розглядається як інтеграція сучасних цифрових технологій, зокрема інформаційного моделювання будівель (BIM), Інтернету речей, штучного інтелекту та роботизованих виробничих систем, у процес створення будівельних об'єктів [27].

У межах цієї парадигми адитивні технології виступають одним із ключових елементів цифрової екосистеми будівництва. Їх застосування дозволяє створити принципово нову модель організації виробничого процесу, у якій фізичне будівництво безпосередньо пов'язане з цифровими моделями

Таблиця 3 – Інвестиційні характеристики проєктів впровадження адитивних технологій у будівництві

Інвестиційний показник	Характеристика	Діапазон значень	Економічне значення
Капітальні витрати (CAPEX)	Основні інвестиції у обладнання	200 тис. – 1,5 млн дол.	Формують поріг входу на ринок
Скорочення операційних витрат	Зменшення витрат на матеріали та працю	20–78 %	Підвищує економічну ефективність
Період окупності	Тривалість повернення інвестицій	2–5 років	Залежить від масштабів проєктів
Ефект кривої навчання	Підвищення продуктивності	до 4,5 рази	Зниження собівартості
Зниження ризиків перевищення бюджету	Висока точність цифрового виробництва	<5 %	Підвищення передбачуваності витрат

Джерело: узагальнено авторами на основі [18; 21; 22; 23; 24]

об'єктів. Завдяки використанню технологій BIM створюється цифровий двійник будівлі, який дозволяє оптимізувати архітектурні та конструктивні рішення ще на етапі проєктування [26].

Інтеграція адитивних технологій із цифровими системами управління будівництвом також створює передумови для формування нової логіки організації будівельного виробництва. Зокрема, адитивне виробництво відкриває можливості для розвитку концепції розподіленого виробництва, у межах якої будівельні елементи можуть виготовлятися безпосередньо на будівельному майданчику або у локальних виробничих центрах. За оцінками досліджень NIST, подібний підхід дозволяє скоротити витрати, пов'язані з транспортуванням та логістикою будівельних матеріалів, приблизно на 12 % [24].

Особливого значення розвиток адитивних технологій набуває у контексті відновлення економіки України. Внаслідок військових руйнувань будівельна галузь країни зазнала значних втрат, що створює потребу у швидкому відновленні житлової та інфраструктурної бази. За оцінками аналітичних центрів, обсяг будівельного ринку України у 2024 році становив приблизно 5,1 млрд доларів США, що на понад 45 % нижче довоєнного рівня [28].

У цих умовах адитивні технології можуть відіграти важливу роль у процесі відбудови країни. Показовим прикладом є проєкт будівництва 3D-друкованої школи у Львові, реалізований за участю міжнародних партнерів. Загальна площа будівлі становить близько 370 м², при цьому близько 90 % будівельних матеріалів було вироблено в Україні [30]. Подібні проєкти демонструють потенціал адитивних технологій як інструменту швидкого та економічно ефективного будівництва соціальної інфраструктури.

Отже, результати проведеного дослідження свідчать, що розвиток адитивних технологій у будівельній галузі є результатом комплексної взаємодії економічних, інституційних та технологічних

факторів. У довгостроковій перспективі інтеграція адитивних технологій у систему цифрового будівництва може сприяти формуванню нової моделі організації будівельного виробництва, що базується на принципах ресурсної ефективності, технологічної гнучкості та сталого розвитку.

Висновки. Проведене дослідження дозволило встановити, що розвиток адитивних технологій у будівельній галузі є результатом комплексної взаємодії економічних, інституційних та технологічних факторів, які формують нову парадигму інноваційної трансформації будівельного сектору. Аналіз сучасного стану галузі показав, що традиційні моделі організації будівельного виробництва характеризуються відносно низькою динамікою зростання продуктивності, високою трудомісткістю виробничих процесів та значними витратами матеріальних ресурсів. У цих умовах впровадження адитивних технологій розглядається як один із ключових напрямів технологічної модернізації будівництва.

У результаті проведеного дослідження визначено основні економічні фактори, що стимулюють розвиток адитивних технологій у будівельній галузі. До них належать структурний дефіцит продуктивності будівництва, зростання глобального попиту на житло, дефіцит кваліфікованої робочої сили, посилення екологічних вимог до будівельної діяльності, а також формування нового сегмента світового ринку адитивного виробництва. Установлено, що зазначені фактори формують об'єктивні економічні передумови для поширення технологій 3D-друку у будівництві.

Проведений аналіз показав, що адитивні технології здатні забезпечити суттєве підвищення ефективності будівельного виробництва завдяки скороченню витрат матеріалів, зменшенню потреби у трудових ресурсах, підвищенню точності будівельних процесів та скороченню тривалості будівництва. Водночас їх впровадження потребує значних початкових інвестицій та формування відповідного інституційного середовища, зокрема

розвитку нормативної бази, підтримки інноваційної діяльності та підготовки кваліфікованих фахівців.

Окрему увагу у дослідженні приділено аналізу перспектив застосування адитивних технологій у процесі відновлення будівельної галузі України. Встановлено, що використання технологій 3D-друку може стати важливим інструментом прискорення повоєнної реконструкції інфраструктури та житлового фонду, оскільки вони дозволяють поєднати високу швидкість будівництва з відносно низькими витратами ресурсів.

Подальші наукові дослідження у цій сфері доцільно спрямувати на поглиблений аналіз економічної ефективності використання адитивних технологій у різних сегментах будівельної галузі,

зокрема у житловому, інфраструктурному та промисловому будівництві. Перспективним напрямом досліджень є також розроблення економічних моделей оцінювання інвестиційної привабливості проєктів адитивного будівництва з урахуванням факторів ризику, технологічної невизначеності та ефекту кривої навчання.

Крім того, важливим завданням подальших досліджень є вивчення інституційних механізмів стимулювання розвитку адитивних технологій у будівельній галузі, зокрема формування державної інноваційної політики, фінансових інструментів підтримки технологічних стартапів та інтеграції адитивного виробництва у систему цифрової трансформації будівництва в межах концепції Construction 4.0.

Список використаних джерел:

1. Barbosa F., Woetzel J., Mischke J. et al. *Reinventing construction: a route to higher productivity*. McKinsey Global Institute, 2017. 168 p. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution> (дата звернення: 09.03.2026).
2. McKinsey & Company. *Delivering on construction productivity is no longer optional*. McKinsey Operations Practice, 2024. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/delivering-on-construction-productivity-is-no-longer-optional> (дата звернення: 09.03.2026).
3. Ginigaddara B., Ramachandra T., Geekiyanage D. Strategies for enhancing research and development activities in the Sri Lankan construction industry. *Proceedings of the 11th International Research Conference*. General Sir John Kotelawala Defence University, 2018. P. 86–91.
4. World Bank. *Introducing the Adequate Housing Index (AHI): a new approach to estimate the housing deficit*. Policy Research Working Paper No. 9830. Washington, D.C.: World Bank Group, 2021. 42 p.
5. Wolf Ranch by ICON and Lennar: 100 3D-printed homes in Georgetown, Texas. *Entrepreneur*. 2024. Aug. 8. URL: <https://www.entrepreneur.com/business-news/how-much-does-a-3d-printed-icon-home-in-texas-cost/478301> (дата звернення: 09.03.2026).
6. World Green Building Council. *Sustainable and affordable housing*. London: WorldGBC, 2023. URL: <https://worldgbc.org/article/sustainable-and-affordable-housing/> (дата звернення: 09.03.2026).
7. Associated Builders and Contractors. 2024 construction workforce shortage tops half a million. *ABC News Release*. 2024. Jan. 31. URL: <https://www.abc.org/News-Media/News-Releases/abc-2024-construction-workforce-shortage-tops-half-a-million> (дата звернення: 09.03.2026).
8. Associated General Contractors of America. Skilled labor shortages in the construction industry: insights from AGC survey. *COAA Resources*. 2023. Nov. 29. URL: <https://www.coaa.org/resources/skilled-labor-shortages-in-the-construction-industry-insights-from-agc-survey> (дата звернення: 09.03.2026).
9. Shifting Paradigms. *Embodied carbon reduction in EU construction makes economic sense*. Report for the European Commission. 2023. URL: https://shiftingparadigms.nl/projects/eu_embodiedc/ (дата звернення: 09.03.2026).
10. World Green Building Council. European building sector leaders urge EU to prioritise decarbonising the built environment. *WorldGBC #BuildingLife*. 2023. Jan. 17. URL: <https://worldgbc.org/article/european-building-sector-leaders-urge-eu-to-prioritise-decarbonising-the-built-environment/> (дата звернення: 09.03.2026).
11. European Council. *Revised Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*. Official Journal of the European Union. 2024. Apr. 14.
12. European Environment Agency. *Greenhouse gas emissions from energy use in buildings in Europe*. EEA Indicator Assessment. 2025. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy> (дата звернення: 09.03.2026).
13. Grand View Research. *3D Printing Construction Market Size & Share Report, 2030*. Market Analysis Report. San Francisco: Grand View Research, 2024. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-constructions-market> (дата звернення: 09.03.2026).
14. Wohlers T. et al. *Wohlers Report 2023: 3D printing and additive manufacturing – global state of the industry*. Fort Collins: Wohlers Associates / ASTM International, 2023. 425 p.
15. Wohlers T. et al. *Wohlers Report 2024: 3D printing and additive manufacturing – global state of the industry*. Fort Collins: Wohlers Associates / ASTM International, 2024.
16. Grand View Research. *Global 3D Printing Construction Market Size & Outlook*. Market Data Book. San Francisco: Grand View Research, 2024.
17. COBOD International. Europe's largest 3D printed building is being constructed in Heidelberg. *COBOD News*. 2023. May 3. URL: <https://cobod.com/europe-largest-3d-printed-building/> (дата звернення: 09.03.2026).

18. COBOD International. Largest 3D printed building in Africa. *COBOD News*. 2024. Feb. 4. URL: <https://cobod.com/largest-3d-printed-building-in-africa/> (дата звернення: 09.03.2026).
19. *Dubai 3D Printing Strategy*. The Official Platform of the UAE Government. 2024. URL: <https://u.ae/en/about-the-uae/strategies-initiatives-and-awards/strategies-plans-and-visions/industry-science-and-technology/dubai-3d-printing-strategy> (дата звернення: 09.03.2026).
20. Apis Cor. Dubai Municipality — world's largest 3D-printed building (640 m²). *Parametric Architecture*. 2024. Aug. 4. URL: <https://parametric-architecture.com/apis-cor-completes-the-dubai-municipality-largest-3d-printed-construction/> (дата звернення: 09.03.2026).
21. Адитивні технології в будівництві: огляд конструктивних та економічних аспектів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2024. № 101. С. 85–97. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2024.101.10>
22. Al-Ameri A. et al. Environmental footprint and economics of a full-scale 3D-printed house. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 21. Article 11978. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132111978>
23. Weng Y. et al. Additive manufacturing in the construction industry: the comparative competitiveness of 3D concrete printing. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 9. Article 3865. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11093865>
24. Thomas D. S., Gilbert S. W. *Costs and cost effectiveness of additive manufacturing: a literature review and discussion*. NIST Special Publication 1176. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2014. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>
25. European Commission. *Horizon Europe Call HORIZON-CL5-2026-02-D4-01: on-site innovative robotic and automated solutions for building renovation and construction*. 2026.
26. European Commission. *The digital transformation of the built environment*. BUILD UP. 2024. URL: <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-article-digital-transformation-built-environment-and-0> (дата звернення: 09.03.2026).
27. Sawhney A., Riley M., Irizarry J. (eds.). *Construction 4.0: advanced technology, tools and materials for the digital transformation of the construction industry*. London: Routledge, 2020. 530 p.
28. GMK Center. Non-residential segment became the driver of construction growth in Ukraine in 2024. *GMK Center Infrastructure*. 2025. URL: <https://gmk.center/en/posts/non-residential-segment-became-the-driver-of-construction-growth-in-ukraine-in-2024/> (дата звернення: 09.03.2026).
29. COBOD International. First 3D printed social housing project built to new ISO standards. *COBOD News*. 2024. Dec. 16. URL: <https://cobod.com/3d-printed-social-housing-project-compliant-with-new-standards/> (дата звернення: 09.03.2026).
30. COBOD International. COBOD's BOD2 3D printer used to build a school in Ukraine. *Construction Digital*. 2023. June 7. URL: <https://constructiondigital.com/articles/cobods-bod2-3d-printer-used-to-build-a-school-in-ukraine> (дата звернення: 09.03.2026).

References:

1. Barbosa, F., Woetzel, J., Mischke, J., et al. (2017). *Reinventing construction: A route to higher productivity*. McKinsey Global Institute. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>
2. McKinsey & Company. (2024). *Delivering on construction productivity is no longer optional*. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/delivering-on-construction-productivity-is-no-longer-optional>
3. Ginigaddara, B., Ramachandra, T., & Geekiyanage, D. (2018). Strategies for enhancing research and development activities in the Sri Lankan construction industry. In *Proceedings of the 11th International Research Conference* (pp. 86–91). General Sir John Kotelawala Defence University.
4. World Bank. (2021). *Introducing the Adequate Housing Index (AHI): A new approach to estimate the housing deficit* (Policy Research Working Paper No. 9830). World Bank Group.
5. *Entrepreneur*. (2024, August 8). Wolf Ranch by ICON and Lennar: 100 3D-printed homes in Georgetown, Texas. Available at: <https://www.entrepreneur.com/business-news/how-much-does-a-3d-printed-icon-home-in-texas-cost/478301>
6. World Green Building Council. (2023). *Sustainable and affordable housing*. Available at: <https://worldgbc.org/article/sustainable-and-affordable-housing/>
7. Associated Builders and Contractors. (2024, January 31). 2024 construction workforce shortage tops half a million. Available at: <https://www.abc.org/News-Media/News-Releases/abc-2024-construction-workforce-shortage-tops-half-a-million>
8. Associated General Contractors of America. (2023, November 29). Skilled labor shortages in the construction industry: Insights from AGC survey. Available at: <https://www.coaa.org/resources/skilled-labor-shortages-in-the-construction-industry-insights-from-agc-survey>
9. Shifting Paradigms. (2023). *Embodied carbon reduction in EU construction makes economic sense*. Available at: https://shiftingparadigms.nl/projects/eu_embodiedc/
10. World Green Building Council. (2023, January 17). European building sector leaders urge EU to prioritise decarbonising the built environment. Available at: <https://worldgbc.org/article/european-building-sector-leaders-urge-eu-to-prioritise-decarbonising-the-built-environment/>

11. European Council. (2024). *Revised Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*. Official Journal of the European Union.
12. European Environment Agency. (2025). *Greenhouse gas emissions from energy use in buildings in Europe*. Available at: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy>
13. Grand View Research. (2024). *3D printing construction market size & share report, 2030*. Grand View Research. Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-constructions-market>
14. Wohlers, T., et al. (2023). *Wohlers Report 2023: 3D printing and additive manufacturing – Global state of the industry*. Wohlers Associates / ASTM International.
15. Wohlers, T., et al. (2024). *Wohlers Report 2024: 3D printing and additive manufacturing – Global state of the industry*. Wohlers Associates / ASTM International.
16. Grand View Research. (2024). *Global 3D printing construction market size & outlook*. Grand View Research.
17. COBOD International. (2023, May 3). Europe's largest 3D printed building is being constructed in Heidelberg. Available at: <https://cobod.com/europe-largest-3d-printed-building/>
18. COBOD International. (2024, February 4). Largest 3D printed building in Africa. Available at: <https://cobod.com/largest-3d-printed-building-in-africa/>
19. UAE Government. (2024). *Dubai 3D printing strategy*. Available at: <https://u.ae/en/about-the-uae/strategies-initiatives-and-awards/strategies-plans-and-visions/industry-science-and-technology/dubai-3d-printing-strategy>
20. Parametric Architecture. (2024, August 4). Dubai Municipality — world's largest 3D-printed building (640 m²). Available at: <https://parametric-architecture.com/apis-cor-completes-the-dubai-municipality-largest-3d-printed-construction/>
21. Adyativni tekhnolohii v budivnytstvi: Ohliad konstruktivnykh ta ekonomichnykh aspektiv [Additive technologies in construction: Review of structural and economic aspects]. (2024). *Visnyk NTU "KhPI"*, no. 101, pp. 85–97. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2024.101.10>
22. Al-Ameri, A., et al. (2021). Environmental footprint and economics of a full-scale 3D-printed house. *Sustainability*, no. 13(21), 11978. Available at: <https://doi.org/10.3390/su132111978>
23. Weng, Y., et al. (2021). Additive manufacturing in the construction industry: The comparative competitiveness of 3D concrete printing. *Applied Sciences*, no. 11(9), 3865. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11093865>
24. Thomas, D. S., & Gilbert, S. W. (2014). *Costs and cost effectiveness of additive manufacturing: A literature review and discussion* (NIST Special Publication 1176). National Institute of Standards and Technology. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>
25. European Commission. (2026). *Horizon Europe Call HORIZON-CL5-2026-02-D4-01: On-site innovative robotic and automated solutions for building renovation and construction*.
26. European Commission. (2024). *The digital transformation of the built environment*. Available at: <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-article-digital-transformation-built-environment-and-0>
27. Sawhney, A., Riley, M., & Irizarry, J. (Eds.). (2020). *Construction 4.0: Advanced technology, tools and materials for the digital transformation of the construction industry*. Routledge.
28. GMK Center. (2025). Non-residential segment became the driver of construction growth in Ukraine in 2024. Available at: <https://gmk.center/en/posts/non-residential-segment-became-the-driver-of-construction-growth-in-ukraine-in-2024/>
29. COBOD International. (2024, December 16). First 3D printed social housing project built to new ISO standards. Available at: <https://cobod.com/3d-printed-social-housing-project-compliant-with-new-standards/>
30. *Construction Digital*. (2023, June 7). COBOD's BOD2 3D printer used to build a school in Ukraine. Available at: <https://constructiondigital.com/articles/cobods-bod2-3d-printer-used-to-build-a-school-in-ukraine>

Дата надходження статті: 04.04.2026

Дата прийняття статті: 24.04.2026

Дата публікації статті: 11.05.2026