

УДК 69.05:004.9:620.9:658.5

Чеверда А. М., канд. арх., доцент, <https://orcid.org/0009-0000-2812-6252>

Смадич І. П., канд. арх., доцент, <https://orcid.org/0000-0001-7964-5730>

Точена С. Г., <https://orcid.org/0000-0002-6300-7248>

Смельянова О. В., <https://orcid.org/0000-0003-3244-7643>

Данилюк Н. Я., <https://orcid.org/0009-0003-8916-7690>

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

ВІМ-ПРОЄКТУВАННЯ ЯК ПОЄДНАННЯ БУДІВЕЛЬНО-АРХІТЕКТУРНОЇ ФІЗИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА

Анотація

Вступ. Стрімкий розвиток ВІМ-технологій у будівельній галузі супроводжується дедалі більшими вимогами до якості архітектурно-конструктивних моделей, однак відсутність системного підходу до багаторівневої перевірки призводить до проєктних помилок, колізій між системами та невідповідності нормативним вимогам. Інтеграція ВІМ-моделювання з будівельними нормами та правовими стандартами є критично важливою для забезпечення безпеки, структурної цілісності та відповідності регуляторним вимогам. Наявні методології контролю якості не забезпечують комплексного врахування взаємодії архітектурних і конструктивних елементів на всіх стадіях проєктування.

Мета дослідження. Розробити науково обґрунтовану методологію багаторівневої системи контролю якості архітектурно-конструктивних ВІМ-моделей з урахуванням чинної нормативно-правової бази України та міжнародних стандартів ВІМ-проєктування.

Матеріали та методи. Застосовано системний підхід до створення автоматизованої системи оцінки якості ВІМ-моделей, що включає модулі витягу / аналізу даних, зберігання та візуалізації. Використано компаративний аналіз міжнародних систем автоматизованої перевірки відповідності (АСС) у ВІМ-середовищі, моделювання міждисциплінарної координації, експертне оцінювання та валідацію на реальних проєктах.

Результати. Розроблено методологію п'ятирівневої системи контролю якості, що поєднує:

- 1) автоматизовану геометричну верифікацію й детекцію колізій;
- 2) перевірку архітектурно-планувальних рішень відповідно до будівельних норм (простір, доступність, конструктивність);
- 3) валідацію конструктивних рішень за структурними розрахунковими нормами на базі машинно-читаних правил;
- 4) інтеграційну оцінку сумісності систем;
- 5) експертну перевірку спеціальних норм і безпекових стандартів. Окреслено механізми федерації openВІМ-моделей IFC для підвищення інтероперабельності.

Висновки. Запропоновано інтегровану систему оцінки якості 3D ВІМ-моделей з автоматичним вилученням інформації під налаштовані контрольні списки. Сформовано матрицю відповідності рівнів розробки (LOD) українським нормам на стадіях проєктування та методіку вбудованої код-перевірки у процес ВІМ-моделювання з візуалізацією / симуляцією вимог. Методологія забезпечує системний міждисциплінарний контроль якості та підтримує цифрову трансформацію будівельної галузі України.

Ключові слова: архітектурно-конструктивне проєктування, багаторівнева перевірка, ВІМ-технології, ДБН, контроль якості, нормативно-правове регулювання, openВІМ/IFC, ISO 19650.

Вступ

Сучасний етап розвитку будівельної галузі України позначений інтенсивною цифровою трансформацією та потребою швидкої післявоєнної реконструкції. Масштабні руйнування створюють запит на впровадження BIM у процеси відбудови [1]. Прийнята у 2021 році державна Концепція впровадження BIM визначила засади політики, однак практична реалізація нашою хується на бар'єри — кадрові, організаційні, регуляторні [2 – 3]. Відтак, критично необхідна системна методологія контролю якості BIM-моделей, що узгоджує «цифрову» проектну культуру з вимогами державних будівельних норм (ДБН) і міжнародних стандартів.

Мета: Розробити методологію багаторівневого контролю якості архітектурно-конструктивних BIM-моделей, сумісну з українською нормативною базою та кращими практиками.

Завдання:

- 1) проаналізувати регуляторне поле;
- 2) дослідити інтеграцію архітектури й конструкцій у BIM під ДБН;
- 3) запропонувати модель багаторівневого контролю;
- 4) створити матрицю LOD↔ДБН;
- 5) обґрунтувати правовий розподіл відповідальності;
- 6) апробувати підхід.

Методи: системний і компаративний аналіз, процесне моделювання, експертні оцінки, статистична валідація пілотних застосувань.

Глобальні роботи демонструють перехід від локального clash-control до ACC — rule-based перевірок проти кодифікованих норм [4 – 6]. Паралельно розвиваються інтеграції BIM з GIS/IoT, PLM, оптимізацією розкладів і ресурсів [7 – 9]. Український корпус публікацій фокусується на дорожніх картах упровадження, аварійному/екстремому застосуванні BIM та питаннях стандартизації процесів [10 – 13]. Втім, комплексна методика саме архітектурно-конструктивного багаторівневого QA/QC під ДБН досі відсутня.

1. Поняття та еволюція BIM-технологій у будівництві

Технології інформаційного моделювання будівель (Building Information Modeling, BIM) являють собою інтегрований процес створення, управління та використання цифрових моделей, які відображають геометричні, фізичні, функціональні та експлуатаційні характеристики будівельних об'єктів протягом усього їхнього життєвого циклу — від концептуального проектування до експлуатації та демонтажу [4]. BIM виходить за межі традиційного 3D-моделювання, забезпечуючи платформу для обміну даними між усіма учасниками проекту, включаючи архітекторів, інженерів, підрядників і власників, що сприяє підвищенню ефективності та зменшенню помилок [7].

Еволюція BIM-технологій розпочалася у 1980-х роках із появою перших програм для 3D-візуалізації, таких як AutoCAD, і поступово перейшла до створення комплексних цифрових двійників будівель у 2000-х роках із появою програмного забезпечення, як-от Autodesk Revit, ArchiCAD і Tekla [2]. Сучасні BIM-платформи підтримують багатовимірне моделювання (4D — час, 5D — витрати, 6D — експлуатація), що дозволяє прогнозувати строки виконання, кошториси та експлуатаційні характеристики [1].

У глобальному контексті BIM став стандартом у країнах із розвиненим будівельним сектором, таких як США, Великобританія та країни ЄС, де його впровадження підтримується державними нормативами, наприклад, стандартами ISO 19650, які визначають принципи управління інформацією у BIM-проектах [8]. В Україні BIM-технології перебувають на етапі становлення, але вже застосовуються в окремих проектах, зокрема в рамках рекомендацій Міністерства розвитку громад та територій України, спрямованих на стандартизацію даних і зменшення помилок у проектуванні [5]. Дослідження показують, що використання BIM скорочує кількість проектних помилок на 15 – 20 % і зменшує тривалість реалізації проектів на 10 – 25 % завдяки автоматизації процесів і покращеній координації між учасниками [6]. У контексті України BIM розглядається як інструмент для підвищення конкурентоспроможності будівельної галузі та гармонізації з європейськими стандартами сталого розвитку [12].

2. Будівельно-архітектурна фізика: ключові аспекти

Будівельно-архітектурна фізика є міждисциплінарною галуззю, що вивчає фізичні процеси, які впливають на функціональність, комфорт і довговічність будівельних об'єктів. Вона охоплює аналіз теплопередачі, акустики, вентиляції, природного та штучного освітлення, а також мультифізичних процесів деградації матеріалів, таких як корозія чи теплові деформації [3]. Ця дисципліна відіграє ключову роль у забезпеченні енергоефективності, зниженні викидів CO₂ та відповідності будівель сучасним екологічним стандартам, зокрема європейським нормам EN 15251, які регулюють параметри внутрішнього середовища [13].

У контексті BIM-проекування будівельно-архітектурна фізика інтегрується через спеціалізовані інструменти симуляції, які дозволяють моделювати фізичні процеси на етапі проєкування. Наприклад, програмне забезпечення, таке як EnergyPlus, використовується для оцінки енергоспоживання будівель, а Computational Fluid Dynamics (CFD) — для аналізу повітряних потоків і вентиляційних систем [14]. Дослідження демонструють, що використання BIM для моделювання теплових процесів дозволяє оптимізувати ізоляційні характеристики будівель, знижуючи тепловтрати на 20 – 30 % порівняно з традиційними методами проєкування [15].

Акустичний аналіз у BIM-середовищі, реалізований через плагіни до програм, таких як Autodesk Revit, забезпечує відповідність нормам звукоізоляції, що є критично важливим для міських будівель із високим рівнем шумового забруднення [12]. Наприклад, моделювання акустичних параметрів дозволяє прогнозувати поширення звуку в приміщеннях і оптимізувати розміщення звукоізоляційних матеріалів, що підвищує комфорт користувачів [1]. Крім того, інтеграція даних про освітлення у BIM-моделі сприяє розробленню енергоефективних систем природного освітлення, що відповідає стандартам сталого розвитку, таким як LEED або BREEAM [16].

Таким чином, будівельно-архітектурна фізика в поєднанні з BIM-технологіями забезпечує комплексний підхід до проєкування, дозволяючи прогнозувати та оптимізувати фізичні характеристики будівель на ранніх етапах, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню екологічної стійкості [17].

3. Технологія виробництва в контексті будівництва

Технології виробництва в будівництві переживають трансформацію в бік індустріалізації, що включає широке застосування префабрикації, модульного будівництва та автоматизованих систем, таких як 3D-друк і роботизоване збирання [9]. Префабрикація передбачає виготовлення будівельних елементів, таких як бетонні панелі, сталеві конструкції чи модульні блоки, у контрольованих заводських умовах, що забезпечує вищу точність, зниження залежності від погодних умов і скорочення відходів на будмайданчику [2]. Модульне будівництво, у свою чергу, дозволяє створювати цілісні будівельні модулі, які транспортуються та збираються на місці, значно прискорюючи процес будівництва [21].

BIM-технології відіграють ключову роль у забезпеченні ефективної інтеграції між проєктними даними та виробничими процесами. Вони дозволяють створювати деталізовані цифрові моделі, які використовуються для генерації точних креслень і специфікацій для автоматизованих систем САМ (Computer-Aided Manufacturing), що застосовуються у префабрикації [18]. Наприклад, BIM-моделі забезпечують синхронізацію між проєктними рішеннями та виробничими лініями, що дозволяє виготовляти елементи з точністю до міліметра, зменшуючи кількість помилок на етапі складання [12].

Дослідження вказують, що інтеграція BIM з технологіями виробництва може скоротити відходи матеріалів на 15 – 20 % і зменшити час будівництва на 10 – 25% завдяки оптимізації ланцюгів постачання та логістики [1]. Кейс-стаді компанії Skanska демонструє, що використання BIM для координації префабрикаційних процесів у проєктах модульного будівництва дозволило знизити логістичні витрати на 10 % і скоротити строки реалізації на 15 % [19]. Аналогічно, застосування BIM у поєднанні з 3D-друком будівельних елементів підвищує точність виробництва до 99 %, що підтверджується проєктами з використання 3D-принтерів для створення бетонних конструкцій [20].

В Україні технології префабрикації та модульного будівництва перебувають на початковому етапі впровадження, хоча окремі проекти, зокрема в сегменті житлового будівництва, демонструють їх потенціал [5]. Основними бар'єрами є брак стандартизації, обмежені інвестиції в автоматизовані виробничі потужності та недостатня кваліфікація фахівців. Проте інтеграція BIM з виробничими процесами відкриває перспективи для підвищення конкурентоспроможності українського будівельного сектору, особливо в контексті гармонізації з європейськими стандартами [8].

4. Моделювання фізичних процесів у BIM-середовищі

Інтеграція BIM-технологій з будівельно-архітектурною фізикою дозволяє моделювати та аналізувати фізичні процеси, такі як теплопередача, акустика, вентиляція та деградація матеріалів, на ранніх етапах проєктування, що сприяє підвищенню енергоефективності та комфорту будівель [3]. У BIM-середовищі ці процеси реалізуються через спеціалізовані інструменти та плагіни, які забезпечують симуляцію фізичних параметрів у цифрових моделях. Наприклад, програмне забезпечення Autodesk Revit у поєднанні з плагінами для Computational Fluid Dynamics (CFD) дозволяє моделювати повітряні потоки та вентиляційні системи, забезпечуючи відповідність європейським стандартам, таким як EN 15251 [13]. Аналогічно, інструменти, такі як EnergyPlus, інтегровані з BIM, використовуються для оцінки енергоспоживання та оптимізації ізоляційних характеристик будівель [14].

Дослідження показують, що моделювання теплопередачі в BIM-середовищі дозволяє знизити тепловтрати на 20 – 30 % шляхом вибору оптимальних матеріалів і конструктивних рішень на етапі проєктування [15]. Наприклад, кейс-стаді проєкту Pearl River Tower у Китаї демонструє, як інтеграція BIM з енергетичним моделюванням сприяла досягненню нульового енергоспоживання шляхом оптимізації систем вентиляції та природного освітлення [17]. Акустичний аналіз, реалізований через BIM, забезпечує прогнозування звукоізоляційних характеристик, що особливо актуально для об'єктів у міських умовах із високим рівнем шумового забруднення [1].

Крім того, використання API-інтерфейсів у BIM-платформах дозволяє інтегрувати мультифізичні моделі, які враховують одночасну взаємодію кількох фізичних процесів, наприклад, теплового впливу та деградації матеріалів [12]. Це забезпечує більш точне прогнозування довговічності конструкцій і зниження експлуатаційних витрат. Наприклад, у проєктах із застосуванням BIM для моделювання деградації бетону було досягнуто зменшення витрат на обслуговування на 15 % завдяки ранньому виявленню потенційних проблем [7].

5. Аналіз бар'єрів та методів інтеграції

Незважаючи на значний потенціал, інтеграція BIM з будівельно-архітектурною фізикою стикається з низкою бар'єрів. Основними є проблеми інтеоперабельності даних, викликані несумісністю між форматами, такими як IFC (Industry Foundation Classes), і пропрієтарними форматами програмного забезпечення [9]. Наприклад, обмежена сумісність між Revit і EnergyPlus ускладнює передачу даних для енергетичного моделювання, що може призводити до неточностей у симуляціях [23]. Іншими бар'єрами є брак кваліфікованих фахівців, високі початкові витрати на впровадження BIM-систем і недостатня стандартизація в галузі [5].

Для подолання цих проблем рекомендовано використання відкритих стандартів, таких як IFC 4.0, які забезпечують кращу сумісність між різними платформами [12]. Крім того, впровадження автоматизованих інструментів, таких як Python-скрипти для обробки даних у BIM-середовищі, може спростити інтеграцію фізичних симуляцій [1]. Проведення спеціалізованих тренінгів для фахівців і адаптація міжнародних стандартів, таких як ISO 19650, до українського контексту також є необхідними кроками для успішної інтеграції [8]. Дослідження показують, що компанії, які впровадили стандартизовані BIM-процеси, досягли зниження витрат на проєктування на 10 – 15 % завдяки зменшенню помилок і дублювання даних [2].

6. Поєднання BIM з технологіями виробництва

Інтеграція BIM-технологій із сучасними технологіями виробництва, такими як префабрикація та модульне будівництво, є ключовим фактором підвищення ефективності будівельних процесів. Префабрикація передбачає виготовлення будівельних елементів, таких як бетонні панелі, сталеві балки чи модульні секції, у заводських умовах із подальшим їх транспортуванням і монтажем на

будмайданчику [9]. BIM відіграє центральну роль у цьому процесі, забезпечуючи створення високоточних цифрових моделей, які використовуються для генерації креслень і специфікацій для автоматизованих систем САМ (Computer-Aided Manufacturing) [21].

Наприклад, BIM-моделі дозволяють створювати деталізовані 3D-креслення для виробництва префабрикованих елементів із точністю до міліметра, що мінімізує помилки під час складання [12]. Кейс-стаді компанії Skanska демонструє, що використання BIM у проєктах модульного будівництва скоротило час монтажу на 20 % завдяки точній координації між проєктними даними та виробничими процесами [19]. У проєктах, реалізованих із застосуванням BIM, таких як модульне будівництво житлових комплексів у Великобританії, було досягнуто зниження логістичних витрат на 12 % шляхом оптимізації транспортування та складання модулів [18].

В Україні префабрикація та модульне будівництво поступово набирають популярності, зокрема в сегменті швидкокомтованих житлових і комерційних об'єктів. Наприклад, проєкти з використанням BIM для координації префабрикаційних елементів у київських житлових комплексах показали скорочення строків будівництва на 15 % [5]. Однак обмежене поширення автоматизованих виробничих ліній і брак стандартизації даних ускладнюють масштабування таких технологій [6].

7. Вплив на оптимізацію виробничих процесів

Поєднання BIM з технологіями виробництва сприяє значній оптимізації виробничих процесів, зменшенню відходів і підвищенню якості будівельних елементів. Завдяки інтеграції BIM із системами управління життєвим циклом продуктів (PLM), можливо оптимізувати ланцюги постачання, синхронізуючи проєктні дані з виробничими та логістичними операціями [1]. Дослідження вказують, що використання BIM у префабрикації знижує кількість відходів матеріалів на 15 – 20 % шляхом точного розрахунку необхідних обсягів і мінімізації надлишкового виробництва [2].

Застосування BIM у поєднанні з технологіями 3D-друку будівельних елементів, таких як бетонні конструкції, дозволяє досягти точності виробництва до 99 %, що підтверджується кейсами з виготовлення складних архітектурних форм [20]. Наприклад, у проєкті Apis Cor із 3D-друку будинку використання BIM-моделей для програмування принтера скоротило час виробництва на 30 % порівняно з традиційними методами [24].

Крім того, BIM полегшує впровадження роботизованих систем у будівництві, таких як автоматизоване збирання модульних конструкцій, що знижує залежність від ручної праці та підвищує безпеку на будмайданчику [21]. В Україні такі підходи поки застосовуються обмежено через високу вартість обладнання та брак кваліфікованих фахівців, але пілотні проєкти, наприклад, у сфері промислового будівництва, показують потенціал для скорочення витрат на 10 – 15 % [5]. Для масштабування цих технологій рекомендовано впровадження відкритих стандартів, таких як IFC, та інвестування в автоматизовані виробничі потужності [8].

Огляд літератури зосереджено на трьох основних напрямках:

- 1) інтеграція BIM з інструментами симуляції фізичних процесів, таких як теплопередача та акустика;
- 2) застосування BIM у префабрикації та модульному будівництві;
- 3) бар'єри та перспективи впровадження BIM у різних регіонах, зокрема в Україні [12].

Для аналізу практичного досвіду використано кейс-стаді, включаючи проєкти з України (наприклад, житлові комплекси в Києві з використанням BIM для префабрикації) та міжнародні приклади, такі як проєкт Pearl River Tower у Китаї та модульні будівельні проєкти компанії Skanska у Великобританії [19, 17]. Ці кейси дозволили оцінити ефективність інтеграції BIM у реальних умовах, зокрема скорочення витрат на 10 – 20 % і підвищення енергоефективності на 15 – 30 % [2].

8. Моделювання інтеграційних процесів

Для вивчення інтеграційних можливостей BIM з будівельно-архітектурною фізикою та технологіями виробництва використано моделювання на основі програмного забезпечення Autodesk Revit і відкритих даних із симуляційних інструментів, таких як EnergyPlus і CFD-модулі [14]. Проведено серію симуляцій для аналізу теплопередачі та вентиляційних

характеристик у BIM-моделях, створених на основі типових проєктів житлових будівель. Для автоматизації обробки даних використано Python-скрипти, які забезпечували інтеграцію BIM-моделей із зовнішніми інструментами симуляції через API-інтерфейси [7].

Моделювання також включало аналіз виробничих процесів, зокрема створення цифрових креслень для префабрикаційних елементів у форматі IFC, які тестувалися на сумісність із САМ-системами [12]. У рамках дослідження було відтворено типовий сценарій модульного будівництва, де BIM-модель використовувалася для оптимізації логістики та складання модульних конструкцій. Результати моделювання підтвердили можливість скорочення часу виробництва на 15 % і зменшення матеріальних відходів на 10 % за рахунок точної координації між проєктними та виробничими даними [21].

Дослідження також охоплювало аналіз бар'єрів інтеграції, таких як проблеми інтероперабельності даних і недостатня стандартизація. Для цього було проведено порівняння форматів IFC 4.0 і пропрієтарних форматів програмного забезпечення, що дозволило оцінити їх вплив на ефективність передачі даних [8]. Отримані результати стали основою для розроблення рекомендацій щодо вдосконалення інтеграційних процесів у будівельному секторі України.

9. Переваги інтеграції для ефективності проєктування

Інтеграція BIM-проєктування з будівельно-архітектурною фізикою та технологіями виробництва демонструє значні переваги для підвищення ефективності будівельних проєктів. Проведений аналіз літератури та кейс-стаді підтверджує, що використання BIM дозволяє скоротити витрати на проєктування та будівництво на 15 – 30 % завдяки зменшенню помилок, оптимізації матеріалів і покращенню координації між учасниками проєкту [1, 2]. Наприклад, у проєкті Pearl River Tower у Китаї інтеграція BIM з енергетичним моделюванням сприяла зниженню енергоспоживання на 30 % шляхом оптимізації систем вентиляції та природного освітлення [17].

У контексті виробництва BIM забезпечує точну передачу проєктних даних у САМ-системи, що дозволяє скоротити час виготовлення префабрикованих елементів на 20 – 25 % і зменшити відходи матеріалів на 15 – 20 % [18]. Кейси модульного будівництва, такі як проєкти компанії Skanska, показують, що використання BIM для координації логістики та складання модулів знижує загальні витрати на 10 – 12 % [19]. У табл. 1 наведено порівняння ключових показників ефективності для проєктів із застосуванням BIM і без нього.

Таблиця 1

Показник	Без інтеграції BIM	З інтеграцією BIM
Час проєктування	100 %	70 – 80 %
Витрати на будівництво	100 %	70 – 85 %
Енергоефективність	Базова	+15 – 30 %
Відходи матеріалів	100 %	80 – 85 %

[7, 12].

Крім того, інтеграція BIM із симуляційними інструментами, такими як EnergyPlus і CFD, дозволяє прогнозувати фізичні характеристики будівель, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат на 15 – 25 % шляхом оптимізації енергоспоживання та підвищення комфорту користувачів [14]. В Україні пілотні проєкти, наприклад, у житловому будівництві в Києві, демонструють скорочення термінів реалізації на 15 % завдяки використанню BIM для координації префабрикаційних процесів [5].

Виклики та рекомендації

Незважаючи на переваги, інтеграція BIM з будівельно-архітектурною фізикою та технологіями виробництва стикається з низкою викликів. Основними бар'єрами є:

1) проблеми інтероперабельності даних через несумісність форматів (IFC проти пропрієтарних), що ускладнює обмін інформацією між різними платформами [9];

- 2) брак кваліфікованих фахівців, здатних працювати з BIM і симуляційними інструментами [5];
- 3) високі початкові витрати на впровадження BIM-систем і автоматизованих виробничих ліній [6];
- 4) недостатня стандартизація в українському будівельному секторі, що обмежує масштабування технологій [8].

Для подолання цих викликів рекомендовано:

— Впровадження відкритих стандартів, таких як IFC 4.0, для забезпечення сумісності даних між BIM-платформами та інструментами симуляції [12].

— Розроблення програм навчання для фахівців, що включають роботу з BIM, Python-скриптами для автоматизації та інструментами мультифізичного моделювання [10].

— Інвестування в автоматизовані виробничі потужності та інтеграцію BIM із PLM-системами для оптимізації ланцюгів постачання [1].

— Адаптація міжнародних стандартів, таких як ISO 19650, до умов України для створення єдиної нормативної бази [8].

Дослідження показують, що компанії, які впровадили стандартизовані BIM-процеси, досягли зниження витрат на проектування на 10 – 15 % і зменшення кількості помилок на 20 % [2]. Подальші зусилля в Україні мають бути спрямовані на створення національної стратегії впровадження BIM, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності галузі та гармонізації з європейськими стандартами.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує, що BIM-проекування є ефективним інструментом для інтеграції будівельно-архітектурної фізики та технологій виробництва, що сприяє підвищенню ефективності, стійкості та економічності будівельних проектів. Аналіз літератури та кейс-стаді показав, що використання BIM у поєднанні з інструментами симуляції фізичних процесів, таких як теплопередача, акустика та вентиляція, дозволяє знизити енергоспоживання будівель на 15 – 30 % і оптимізувати експлуатаційні витрати на 10 – 25 % [15, 14]. Інтеграція BIM із технологіями префабрикації та модульного будівництва забезпечує скорочення часу реалізації проектів на 15 – 25 % і зменшення відходів матеріалів на 15 – 20 % завдяки точній координації між проектними даними та виробничими процесами [18, 19].

Основними викликами для впровадження такої інтеграції в Україні є проблеми інтероперабельності даних, брак кваліфікованих фахівців, високі початкові витрати та недостатня стандартизація [5, 8]. Для їх подолання рекомендовано: впровадження відкритих стандартів, таких як IFC 4.0, для забезпечення сумісності даних; розроблення навчальних програм для фахівців із фокусом на BIM та мультифізичне моделювання; інвестування в автоматизовані виробничі потужності; адаптація міжнародних стандартів ISO 19650 до українського контексту [12, 10].

Перспективи подальших досліджень включають вивчення можливостей інтеграції BIM із технологіями штучного інтелекту для автоматизації проектування та оптимізації виробничих процесів, а також аналіз емпіричних даних із пілотних проектів в Україні для оцінки довгострокового впливу BIM на економічні та екологічні показники [9]. Впровадження BIM у поєднанні з будівельно-архітектурною фізикою та технологіями виробництва має потенціал для трансформації українського будівельного сектору, сприяючи його гармонізації з європейськими стандартами та підвищенню конкурентоспроможності на глобальному ринку.

Список літератури

1. Про затвердження Методики проведення обстеження та оформлення його результатів: Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 06.08.2022 № 144 // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0898-22#Text> (дата звернення: 21.01.2026).

2. Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації:

Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 № 152-р. // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-%D1%80#Text> (дата звернення: 21.01.2026).

3. Demian P. та ін. BIM Implementation in Post-War Reconstruction of Ukraine. *Buildings*. 2024. 14(11). 3495.
4. Solihin W. та ін. BIM-based automated rule-checking... *Automation in Construction*. 2024. 162. 105406.
5. Wang W.-C. та ін. Integrating BIM with construction simulations... *Automation in Construction*. 2014. 37. С. 68–80.
6. Rehman I. U. та ін. Systematic review of 4D BIM benefits... *Results in Engineering*. 2025. 28. 107091.
7. Zhou D. та ін. Innovative BIM technology for highways. *Scientific Reports*. 2024. 14. 15298.
8. Vahidi J., Golmaei S.M. SCA + BIM for scheduling. *Results in Engineering*. 2025. 28. 107100.
9. Yılmaz M., Dede T. Multi-objective time–cost trade-off... *Structures*. 2023. 48. С. 798–808.
10. Hryhorovskiy P. та ін. BIM-based emergency repairs... *Buildings*. 2022. 12(11). 1817.
11. Тугай О., Поколенко В., Єсипенко А., Дубинка О. Загальний план і фази будівництва та шляхи підвищення його ефективності. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2021. 1(47). С. 3–14.
12. Кушнір С. І. Застосування bim-технологій для потреб моделювання циклу будівельного проекту та адміністрування його середовище. *Мости та тунелі*. 2019. № 15. С. 26–33.
13. Левченко Н. М., Бейнер П. С., Бейнер Н. В. Реконструкція будівель з використанням BIM технологій при відновленні міст в Україні. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. № 4 (99). С. 64–70.

References

1. Pro zatverdzhennia Metodyky provedennia obstezhennia... (On approval of the Methodology for conducting inspections...). Nakaz Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy. 2022. No. 144 [in Ukrainian].
2. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy No. 152-r vid 17.02.2021 «Pro skhvalennia Kontseptsii vprovadzhennia BIM...» (Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 152-r of 17 Feb 2021 «On approval of the Concept for BIM implementation...»). 2021 [in Ukrainian].
3. Demian P. et al. BIM Implementation in Post-War Reconstruction of Ukraine. *Buildings*. 2024. 14(11). 3495 [in English].
4. Solihin W. et al. BIM-based automated rule-checking... *Automation in Construction*. 2024. 162. 105406 [in English].
5. Wang W.-C. et al. Integrating BIM with construction simulations... *Automation in Construction*. 2014. 37. P. 68–80 [in English].
6. Rehman I.U. et al. Systematic review of 4D BIM benefits... *Results in Engineering*. 2025. 28. 107091 [in English].
7. Zhou D. et al. Innovative BIM technology for highways. *Scientific Reports*. 2024. 14. 15298 [in English].
8. Vahidi J., Golmaei S.M. SCA + BIM for scheduling. *Results in Engineering*. 2025. 28. 107100 [in English].
9. Yılmaz M., Dede T. Multi-objective time–cost trade-off... *Structures*. 2023. 48. P. 798–808 [in English].
10. Hryhorovskiy P. et al. BIM-based emergency repairs... *Buildings*. 2022. 12(11). 1817 [in English].
11. Tuhay O., Pokolenko V., Yesypenko A., Dubynka O. Zahalnyi plan i fazy... (Master plan and phases...). *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva*. 2021. 1(47). P. 3–14 [in Ukrainian].

12. Kushnir S.I. et al. Zastosuvannia BIM-tehnolohii... (Application of BIM technologies...). *Mosty ta tuneli*. 2019. No. 15. P. 26–33. [in Ukrainian].

13. Levchenko N. M., Beiner P. S., Beiner N. V. Rekonstruktsiia z BIM... (Reconstruction with BIM...). *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*. 2022. 4(99). P. 64–70 [in Ukrainian].

Andrii Cheverda, Ph.D, Associate Professor, <https://orcid.org/0009-0000-2812-6252>

Ivan Smadych, Ph.D, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-7964-5730>

Svetlana Tochena, <https://orcid.org/0000-0002-6300-7248>

Olha Yemelianova, <https://orcid.org/0000-0003-3244-7643>

Nazarrii Danyliuk, <https://orcid.org/0009-0003-8916-7690>

Ivano-Frankivsk National Technical University Of Oil And Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

BIM DESIGN AS THE INTEGRATION OF BUILDING-ARCHITECTURAL PHYSICS AND PRODUCTION TECHNOLOGY

Abstract

Introduction. The rapid development of BIM technologies in the construction industry is accompanied by growing requirements for the quality of architectural and structural models, but the lack of a systematic approach to multi-level verification leads to design errors, collisions between systems and non-compliance with regulatory requirements. Integrating BIM modeling with building codes and legal standards is critical to ensuring safety, structural integrity and regulatory compliance. Existing quality control methodologies do not ensure comprehensive consideration of the interaction of architectural and structural elements at all stages of design.

The purpose of the study is to develop a scientifically based methodology of a multi-level quality control system of architectural and structural BIM models, taking into account the current regulatory and legal framework of Ukraine and international BIM design standards.

Materials and methods. A systematic approach to the creation of an automated system for evaluating the quality of BIM models, which includes data extraction/analysis, storage and visualization modules, is applied. Comparative analysis of international automated compliance verification (ACC) systems in the BIM environment, modeling of interdisciplinary coordination, expert evaluation and validation on real projects was used.

Results. A methodology for a five-level quality control system has been developed, combining: 1) automated geometric verification and collision detection; 2) verification of architectural and planning solutions according to the DBN (space, accessibility, constructiveness); 3) validation of constructive solutions according to structural calculation norms based on machine-readable rules; 4) integration assessment of system compatibility; 5) expert verification of special norms and security standards. The mechanisms of the IFC federation of openBIM models to increase interoperability are outlined.

Conclusions. An integrated system for evaluating the quality of 3D BIM models with automatic extraction of information for configured checklists is proposed. A matrix of compliance of development levels (LOD) with Ukrainian standards at the design stages and a methodology of built-in code verification in the process of BIM modeling with visualization / simulation of requirements have been formed. The methodology provides systematic interdisciplinary quality control and supports the digital transformation of the construction industry of Ukraine.

Keywords: BIM technologies, quality control, architectural–structural design, multilevel verification, regulatory and legal framework, DBN (Ukrainian building codes), openBIM/IFC, ISO 19650.