

14. Андреев Б.М. Геотехнологічні параметри маловитратного підземного рудника в борту діючого кар'єра / Б.М. Андреев // Зб. наук. трудів НГА України № 12, Том 2. – Дніпропетровськ: РІК НГА України, 2001. – С. 115-119.
15. Андреев Б.М., Ошмянський І.Б., Черних О.Д. Відкрито-підземна розробка рудних родовищ. – Техніка, Київ, 2010 р., 520 ст.
16. Короленко М.К., Ступнік М.І., Калініченко В.О. [та ін.]. Розширення сировинної бази підземного Кривбасу за рахунок залучення до видобутку магнетитових кварцитів. – Кривий Ріг: Діоніс, 2012. 284 с.
17. Олійник Т.А. Підвищення якості бідних кускових руд шахтного видобутку Кривбасу методом відсадження / Т.А. Олійник, Л.В. Скляр // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ: НГУ, 2013. – Вип. 53 (94).

Рукопис подано до редакції 15.03.24

УДК 004.94

В.А. ШИМКО, ст. викладач  
Криворізький національний університет  
О.О. СЛІПІЧ, канд.техн.наук, директор  
ТОВ «Індастріал Констракшн Груп»

## ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ ТА VR-ТЕХНОЛОГІЙ В АРХІТЕКТУРНО-БУДІВЕЛЬНОМУ ПРОЕКТУВАННІ ТА БУДІВНИЦТВІ

**Мета.** Метою даної роботи є визначення сучасних засобів цифрової інформації та моделювання, що дозволять більш ефективно співпрацювати фахівцям різних напрямків на різних етапах архітектурно-будівельного проектування та безпосередньо під час будівництва об'єкту.

**Методи дослідження.** При виконанні даної роботи були використовані систематизація, структурний та порівняльний аналіз, теоретичне узагальнення даних, отриманих при детальному аналізі літературних, статистичних джерел та інтернет-ресурсів, натурних обстеженнях об'єктів. При натурних обстеженнях застосовані методи фотофіксації.

**Наукова новизна.** Архітектурно-будівельне проектування та будівництво в цілому передбачає тісну співпрацю великої кількості учасників між собою: проектувальників, будівельників-підрядників, замовників, інспекторів різних служб та відомств тощо. Саме тому актуальним завданням, вирішення якого стане суттєве покращення взаємодії цих фахівців, є використання цифрових інноваційних засобів та VR-технологій в процесі архітектурно-будівельного проектування та будівництва.

**Практична значимість.** Досвід архітектурно-будівельного проектування та будівництва різних об'єктів показує, що використання сучасних інноваційних цифрових засобів та технологій є ефективною технічною допомогою фахівцям, як в процесі створення нових об'єктів, так і під час їх реконструкції, а також сприяє значному зменшенню інженерних помилок та колізій в цих процесах. Результати роботи можуть бути широко впроваджені на різних етапах архітектурно-будівельного проектування та під час будівництва.

**Результати.** Проаналізовано сучасний стан та основні напрямки вдосконалення архітектурно-будівельного проектування та будівництва з активним застосуванням інноваційних цифрових технологій. Показані переваги та недоліки використання різних видів цифрових платформ та програмних комплексів для покращення взаємодії всіх учасників процесу проектування та будівництва. Визначені напрямки співпраці проектувальників та ІТ-фахівців по створенню більш ефективного програмного застосунку (додатку) VR-туру, розрахованого на багато користувачів.

**Ключові слова:** архітектурно-будівельне проектування, BIM-технології, VR-технології, розрахований на багато користувачів VR-тур, Unreal Engine, Pixel Streaming, кросплатформність.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-110-114

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Архітектурно-будівельне проектування, як специфічний та достатньо консервативний вид діяльності, має високий рівень трудовитратності, що значно впливає на терміни виконання проектів. Також при створенні проектної документації на різних стадіях залучається багато інженерів-фахівців відповідно до необхідних розділів проекту і дії яких повинні постійно узгоджуватися між собою і всю відповідальність за це несе головний архітектор(інженер) проекту. В подальшому вже на етапі будівництва об'єкта виникають проблеми постійних змін, коригування та узгодження нових проектних рішень між проектувальником, замовником та підрядником, що також суттєво впливає на терміни будівництва в цілому.

Насьогодні поява на ринку інноваційних цифрових технологій, зокрема BIM-технологій, дозволяє кардинально змінити підходи та старі технології створення проектної документації на більш сучасні та динамічні. Створення цифрової моделі майбутнього об'єкту в 3D-вимірі та в

усіх деталей дозволяє як скоротити час на виготовлення проектної документації так і значно зменшити кількість помилок при розробці.

В той же час більш ефективна співпраця та взаємодія залучених у процес проектування та будівництва спеціалістів на всіх етапах є практичним та науковим завданням, що обумовлює пошук нових підходів, ідей та досліджень в цьому напрямку.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Вже протягом останніх років проблема поліпшення та ефективності процесів створення проектної документації для будівництва як і саме будівництво, впровадження інноваційних технологій у ці процеси турбує багатьох вчених, що займаються дослідженнями в будівельній галузі та галузі IT-технологій.

Авторами статті також був проведений аналіз досліджень зарубіжних та вітчизняних вчених, в яких докладно і всебічно описано перспективні напрями впровадження сучасних інноваційних цифрових технологій у архітектурно-будівельне проектування та будівництво.

Окремі аспекти проблеми впровадження сучасних BIM- та VR-технологій в проектування та будівництво висвітлено в працях українських науковців: Афанасьєв Д., Блонський О. [1], Трач Р.В. [2], закордонних науковців: Zita A.[3], Шакшак О.М., Евсиков И.А.[4], Du J., Shi Y.[10], Ruppel U., Schatz K.[11] та інших. Однак більшість досліджень спрямовано виключно на поліпшення та вдосконалення самих процесів проектування та будівництва і майже не зачіпають проблемні аспекти тісної співпраці учасників цих процесів. В цьому і полягає невирішена частина проблеми і, відповідно, основна мета даного дослідження.

**Постановка завдання.** Проаналізувати досвід та визначити більш ефективні VR-технології, що можуть посприяти та поліпшити взаємодію різних інженерів-фахівців як в процесі створення проектної документації так і під час будівництва, їх більш тісної та ефективної співпраці, поставити завдання і методи дослідження.

**Викладення матеріалу та результати.** Кабінет Міністрів України 17 лютого 2021 року затвердив Концепцію впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні, яка передбачає поетапний перехід, починаючи з 2020 по 2035 рік до проектування, з обов'язковим використанням BIM-технологій на об'єктах державного фінансування.

BIM-технології – це інструмент, без якого немислиме швидке та ефективне будівництво, відновлення порушеної війною інфраструктури держави.

Ефективне використання такого потужного інноваційного інструменту, як BIM-технологій в процесі архітектурно-будівельного проектування, значно поліпшує якість проектування в цілому, дозволяє інженеру-проектувальнику різного фаху розглядати проектувану будівлю як в цілому, так і окремі її частини з різним ступенем деталізації.

Крім того інформаційне моделювання будівлі насамперед – це спільна робота різних спеціалістів. Головний інженер та архітектор проекту, директори будівельних компаній, інвестори та BIM-менеджери в рамках глобального проектування потребують віддаленого та спільного контролю процесу.

Саме для цього процесу на базі вже створеної цифрової моделі будинку більш доречно використання технологій віртуальної реальності або VR-технологій. Можливість віддалено брати участь у віртуальному турі (VR-турі) дозволяє значно економити час у процесі узгодження між різними фахівцями проектування. Такий підхід спрощує спілкування між фахівцями та людьми, які не мають професійних знань у будівельній галузі [3]. Оскільки у віртуальному турі є спеціальні візуальні засоби для ідентифікації об'єкта, то немає потреби використовувати професійні терміни.

Останні розробки в галузі VR-технологій сприяли використанню інтерактивної візуалізації при проектуванні та будівництві. На сьогоднішній день існуюче програмне забезпечення не дозволяє працювати віддалено у віртуальній реальності. Застосування інноваційного підходу у побудові VR-моделі за допомогою додатку Unreal Engine надає користувачам програми широкий спектр можливостей.

У додатку реалізована можливість вибору середньої температури у майбутньому будівельному об'єкті [4]. Користувач може оцінити результати розрахунку теплового балансу та необхідну кількість енергії на опалення з урахуванням коефіцієнта теплопередачі стін та вікон, взятого з BIM-моделі, та середньої температури повітря зовні. Завдяки простому та інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу, користувачу необов'язково мати якісь спеціальні знання.

Додатково програма дозволяє розрахувати ефективність використання альтернативних джерел енергії, таких як сонячні батареї та вітрогенератори. Програма пропонує оптимальну кількість джерел електроенергії з урахуванням їх вартості та середньорічної генерації енергії у заданому кліматичному регіоні. Застосування відкритого коду дозволяє додавати в додаток індивідуальні доопрацювання, необхідні тому чи іншому замовнику. Враховуючи високу зацікавленість VR-технологіями забудовників, додатково в проект імпортуються метадані приміщень та джерел світла. Це дозволяє демонструвати докладну квартирографію, а також оцінити освітленість приміщень та можливі витрати електроенергії, що дозволить покращити модель енерго-ефективності будівлі (рис.1).

На даний момент візуалізація будівельних об'єктів здійснюється в основному за допомогою програмних продуктів Autodesk Revit Live, Enscape та Twinmotion [5-7]. Дані програми дозволяють на базі BIM моделі створити VR-середовище, але не дозволяють компілювати в повноцінний VR-додаток. Також у них не реалізовано квартирографію, розрахунок енергоефективності та немає розрахованого на багато користувачів режиму. Варто зазначити, що продукти, створені на базі Unreal Engine, можна запускати на більшості операційних систем та платформ.

Для розрахованого на багато користувачів VR-туру є два підходи. Перший, кросплатформенний, з використанням плагіна Pixel Streaming (рис.2).



Рис.1. Реалізація квартирографії за допомогою Unreal Engine 5

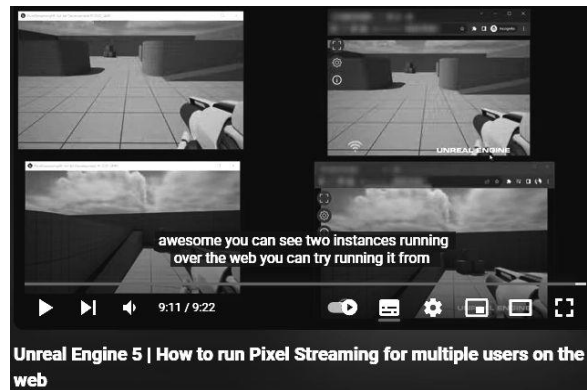


Рис.2. Кросплатформенний VR-тур з використанням плагіна Pixel Streaming

Результат для користувача аналогічний перегляду відеопотоку з таких сервісів, як YouTube або Netflix, за винятком двох речей [8]:

замість відтворення попередньо записаного відеокліпу, аудіо- та відеопотік генеруються в режимі реального часу за допомогою Unreal Engine;

користувачі можуть контролювати робочий процес через будь-який браузер, відправляючи назад на сервер події клавіатури, миші та інших пристроїв введення.

Переваги даного розрахованого на багато користувачів VR-туру на базі плагіна Pixel Streaming:

здатність мобільних пристроїв та легких веб-браузерів відображати графіку кращої якості, ніж це можливо в інших випадках. В результаті це дає можливість показувати складні сцени з високою роздільною здатністю, використовуючи функції рендерингу, які можливі лише при використанні власної настільної програми з потужним графічним процесором.

Відсутність потреби заздалегідь завантажувати великі файли або файли вмісту, що виконуються, і їх встановлювати. Єдине, що користувачеві необхідно завантажити – це медіапоток під час відтворення.

Можливість підтримувати кілька платформ без створення та розповсюдження кількох окремих пакетів. Програма компілюється один раз для Windows і дозволяє використовувати будь-яку платформу для перегляду контенту. Користувачі можуть переглядати потік у будь-якому сучасному браузері, який підтримує модель підключення WebRTC, включаючи Google Chrome та Mozilla Firefox на платформах для настільних комп'ютерів, IOS та Android.

Система Pixel Streaming містить мінімальну кількість компонентів, які відносно легко встановити у локальній мережі. Тим не менш, вона досить потужна, щоб команди, які мають досвід

розгортання веб-служб, могли використовувати її як основу для створення користувацьких хмарних платформ.

Pixel Streaming використовує середовище однорангового зв'язку WebRTC для забезпечення мінімальної затримки між користувачем та додатком Unreal Engine.

Єдиний недолік полягає в тому, що на різних пристроях відбувається управління тим самим персонажем, тобто з'являється поділ учасників VR-туру на одного ведучого і кількох глядачів. Проте роль ведучого можна змінювати між учасниками.

Другий мультиплеєрний підхід реалізується вбудованими засобами Unreal Engine. За такого підходу інформація про стан «гри» передається між кількома комп'ютерами через Інтернет-з'єднання, а не формується на одному комп'ютері. Це робить розраховане на багато користувачів програмування, ніж програмування для одиночної сцени, оскільки процес обміну інформацією між користувачами делікатний і додає кілька додаткових кроків. Unreal Engine має потужне мережеве середовище, яке підтримує деякі з найпопулярніших у світі онлайн-ігор, допомагаючи спростити процес програмування.

До плюсів такого підходу можна віднести:

можливість у режимі реального часу віддалено взаємодіяти з іншими учасниками проекту;

відсутність необхідності використовувати професійні терміни, оскільки можна використовувати спеціальні візуальні засоби для ідентифікації об'єктів (рис. 3).

Мінусом цього підходу є необхідність завантажувати та встановлювати програмне забезпечення для кожного проекту.

Для повноцінного спілкування учасників розрахованого на багато користувачів VR-туру можна використовувати плагін Vıvox з можливістю аудіо-конференції та чату [9]. Сервіс легко інтегрується і є керованим рішенням з хостингом, яке працює з будь-яким движком і є єдиним відомим авторам кросплатформним сервісом. Таке рішення дозволяє спілкуватися гравцям на PC, PS4, Xbox One, Nintendo Switch, IOS, Android та у браузері. Сервіс Vıvox використовується в найбільших іграх, що легко масштабується для будь-якої аудиторії: від 10 осіб до 10 мільйонів. Також застосування Vıvox заощаджує споживання ресурсів процесора та каналу зв'язку, оскільки сервіс добре оптимізований.

На жаль, два перелічені вище методи мультиплеєрності не можуть бути реалізовані одночасно. Кожен підхід має свої плюси та мінуси, і замовник сам вирішує, який варіант підходить більше. У процесі проектування може скластися така ситуація, коли є фахівці, які бажають донести до інших інформацію про помилки проекту. У такій ситуації розумно використовувати кросплатформний або мультиплеєрний режим. У першому випадку, ви передаєте управління по черзі, а у другому кожен керує своїм рухом усередині проекту.

Використання другого мультиплеєрного підходу дозволяє, наприклад, досліджувати поведінку людей під час аварійної евакуації. Занурюючи людей у серйозне ігрове середовище, можна збирати інформацію про колективну поведінку людей у стресовій ситуації [10, 11].

На даний момент розроблено додаток VR-туру, MVP (minimum viable product, мінімально життєздатний продукт), що містить безліч цікавих та нових можливостей для звичайного користувача: візуалізація тепломасообміну в приміщенні, розрахунок квартирографії, аналіз енергоефективності та мультиплеєрний режим.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Ідея даної роботи саме й полягає у необхідності розробки ефективного мультиплеєрного VR-додатку, за допомогою якого одночасно декілька користувачів можуть перебувати у віртуальному просторі майбутнього будівельного об'єкта, побудованого на основі BIM-моделі. За допомогою засобів VR є можливість вільно переміщатися у тривимірному просторі та змінювати параметри об'єкта в режимі реального часу, визначати та своєчасно виправляти окремі помилки та оклюзії.



Рис. 3. Взаємодія користувачів у режимі мультиплеєра

Проведене дослідження довело, що поява сучасних інноваційних цифрових та VR-технологій сприяє вдосконаленню та ефективності такого багатовимірного процесу, як архітектурно-будівельне проектування, дозволяє значно зменшувати кількість помилок, що виникають при цьому, та значно економити час на узгодження питань, які виникають при проектуванні та будівництві.

Також дослідження показало, що до створення та розробки сучасного мультиплеєрного VR-додатку для більшої комунікації фахівці-будівельників між собою, необхідно залучення IT-фахівців та їх тісна співпраця з інженерами-проектувальниками.

#### *Список літератури*

1. **Афанасьєв Д., Блонський О.** Концепція впровадження BIM – Будівельного Інформаційного Моделювання в Україні. 2020. 116 с.
2. **Трач Р.В.** Інформаційне моделювання в будівництві (BIM): сутність, етапи становлення та перспективи розвитку (КНУБА). Миколаїв: МНУ ім. В.О. Сухомлинського / Науковий збірник «Економіка та управління підприємством», – 2017. – Вип. 16. – С.490–496
3. **Zita A.** Enhancing BIM Methodology with VR Technology // State of the Art Virtual Reality and Augmented Reality Knowhow. 2018. P. 59–79. DOI: 10.5772/intechopen.74070.
4. **Шакшак О.М., Евсиков И.А.** Многофункциональное VR приложение на основе цифровой модели здания // Архитектон: известия вузов. 2019. № 4 (68). URL: [http://archvuz.ru/2019\\_4/17](http://archvuz.ru/2019_4/17).
5. Revit Live. URL: <https://www.autodesk.com/products/revit-live/overview> (дата обращения: 14.02.2020).
6. Enscape. URL: <https://enscape3d.com/> (дата обращения: 14.02.2020).
7. Twinmotion. URL: <https://www.unrealengine.com/en-US/twinmotion> (дата обращения: 14.02.2020).
8. Pixel Streaming. URL: <https://docs.unrealengine.com/en-US/Platforms/PixelStreaming/index.html> (дата обращения: 25.01.2020).
9. Vivox. URL: <https://www.vivox.com/> (дата обращения: 25.01.2020).
10. **Du J., Shi Y., Mei C., Quarles J., Yan W.** Communication by Interaction: A Multiplayer VR Environment for Building Walkthroughs // Construction Research Congress. 2016. P. 2281–2290. DOI: 10.1061/9780784479827.227.
11. **Rüppel U., Schatz K.** Designing a BIM-based serious game for fire safety evacuation simulations // Advanced Engineering Informatics. 2011. 25(4). P. 600–611. DOI: 10.1016/j.aei.2011.08.001

Рукопис подано до редакції 20.03.24

УДК 622.235:622.271

Д.А. ТІТОВ, аспірант

Криворізький національний університет

### **ТЕОРЕТИЧНА БАЗА ОБГРУНТУВАННЯ ЗБАЛАНСОВАНОГО ЕНЕРГОНАСИЧЕННЯ ПОРОДНОГО МАСИВУ ПІДРИВАННЯМ КОМБІНОВАНИХ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ**

**Мета.** Основною метою даної статті є добір надійних й адекватних аналітичних методів та способів їх експериментальної перевірки для комплексного і системного дослідження фізичних процесів, які відбуваються при вибуховому руйнуванні скельних порід свердловинними зарядами спеціальних конструкцій, в цілях забезпечення збалансованого розподілу вибухової енергії в породному масиві, який підривається, максимально відповідно до змінних фізико-механічних характеристик скельних порід в окремих локальних зонах вибухового блоку.

**Методи дослідження** – порівняльний аналіз сучасних, надійно апробованих імітаційних та математичних моделей геомеханічних процесів. Критерієм придатності при цьому слугувала максимальна адекватність методів щодо завдання точного визначення повного тензора напружено-деформованого стану порід за умов динамічного напруження вибухом породного масиву складної структури на відкритих розробках для наступного відбору методів, найбільш придатних для цілей дослідження.

**Наукова новизна** матеріалу статті полягає в системному підході щодо обґрунтування теоретичної бази збалансованого енергонасичення породного масиву підриванням комбінованих свердловинних зарядів і відповідних їм засобів, заходів та технічних рішень.

**Практична значимість.** Представлений методологічний підхід та його подальший розвиток цілком придатні для формулювання змісту подібних за напрямком досліджень та їх планування, сприяючи вирішенню задач зниження собівартості мінеральної продукції за рахунок підвищення ефективності буро-підривних робіт у залізорудному кар'єрі.

**Результати.** На підставі виконаного аналізу сформовано комплекс науково-методологічних підходів як інструментарію для базових теоретичних і експериментальних вишукувань, застосування яких забезпечує визначене автором уточнення механізму створення і розвитку динамічного навантаження скельного масиву вибухом для на-