



**С. Л. Чурун, В. А. Висоцька**

*Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна*

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ НА ОСНОВІ AR-КОНСТРУКТОРІВ ТА ГЕЙМІФІКАЦІЇ ДЛЯ ІНТЕРАКТИВНОГО ТЕМАТИЧНОГО НАВЧАННЯ

У статті розглянуто інформаційну технологію створення інтерактивного навчального контенту та віртуальних турів на основі сучасних конструкторів доповненої реальності (AR). Мета дослідження – розроблення комплексного підходу до використання AR для підтримки навчання школярів і студентів, а також для організації інтерактивних онлайн-екскурсій та віртуальних турів. У роботі здійснено огляд і порівняльний аналіз популярних AR-платформ (Artivive, Assemlr, PlugXR, Onirix, Vuforia тощо) із оцінюванням їхнього функціоналу в безкоштовному режимі. На основі вибраних інструментів створено кілька тематичних AR-сцен: відеоклаж кафедри у Artivive, інтерактивну модель Сонячної системи у Assemlr, віртуальний тур Підгорецьким замком у PlugXR та анатомічну сцену із 3D-моделями внутрішніх органів у Onirix. Окремо розроблено мобільний AR-застосунок у середовищі Unity з інтеграцією Vuforia Engine, що демонструє професійний підхід до створення AR-контенту із використанням трекінгу зображень та тривимірних моделей. Для розширення функціоналу створено VR 360° панорами із подальшою інтеграцією у віртуальні тури. Результати тестування свідчать про ефективність використання AR- та VR-технологій для підвищення зацікавленості учнів і студентів, покращення засвоєння матеріалу та розширення доступу до культурних та освітніх ресурсів. Запропонована технологія може бути адаптована до різних предметних сфер та рівнів освіти, сприяючи розвитку інтерактивних методів навчання.

**Ключові слова:** доповнена реальність, гейміфікація, AR-конструктори, інтерактивне навчання, віртуальні тури, Unity, Vuforia, 3D-моделі, VR 360°, освітні технології.

### Вступ / Introduction

Сучасні технології доповненої реальності (Augmented Reality, AR) відкривають нові можливості для інтерактивного навчання, даючи змогу поєднати традиційні методи викладання із візуально насиченим і динамічним цифровим контентом. Завдяки розвитку доступних AR-конструкторів навіть користувачі без глибоких технічних знань можуть створювати освітні сцени, що оживляють друковані зображення, моделі чи карти, перетворюючи їх на інтерактивні навчальні ресурси. Конструктори (середовища створення або платформи для створення контенту – інструменти, що дають можливість створювати AR/VR-сцени без написання коду. Сцена (AR/VR-сцена) → віртуальний навчальний епізод або інтерактивна модель – структурований віртуальний простір, де розміщені 3D-об'єкти, відео чи інші навчальні матеріали. Це особливо актуально для середніх шкіл, оскільки використання AR у таких предметах, як біологія, географія, анатомія людини / тварини, історія чи астрономія, підвищує зацікавленість учнів і сприяє кращому засвоєнню матеріалу.

Інтеграція AR у навчальний процес дає змогу візуалізувати складні концепції, забезпечувати багатосенсорне сприйняття інформації та стимулювати дослідницьку активність учнів. Наприклад, вивчення внутрішньої бу-

дови організму можна доповнити тривимірними моделями органів, а уроки географії – інтерактивними картами або віртуальними подорожами. Окрім навчального сегмента, AR-конструктори активно застосовують для створення онлайн-турів і віртуальних екскурсій, що робить культурний та освітній контент доступним для широкої аудиторії, незалежно від географічного розташування.

Метааналізи демонструють, що доповнена реальність (AR) справляє помірний позитивний вплив на навчальні результати, а також підвищує мотивацію і зацікавленість учнів [1]. Однак у сфері анатомії результати неоднозначні: хоча в деяких дослідженнях AR не продемонструвала значного поліпшення результатів знань порівняно із традиційними методами, вона все ж має потенціал для підтримки навчання студентів медичних спеціальностей [2, 3]. Зокрема, цей ефект може бути зумовлений високою гетерогенністю методологій досліджень та обмеженим рівнем доказовості [2]. У природничих та фізичних науках AR особливо корисна для візуалізації складних просторових понять, наприклад, у фізиці сприяє зниженню когнітивного навантаження, пришвидшує виконання завдань та підтримує співпрацю між учнями [4]. В галузі освіти загалом AR використовували для імерсивного вивчення історичних подій, ознайомлення з анатомією, астрономією і географією; ці дослідження виявили

покращення сприйняття та залученості [5]. Віртуальні екскурсії (Virtual Field Trips, VFTs) ефективно зацікавлюють учнів і допомагають їм краще розуміти навколишній світ – вони особливо корисні на початковому шкільному рівні [6].

Серед сучасних рішень у цій сфері можна виокремити такі платформи, як Assemlr, PlugXR, Onirix, Artivive та інші, кожна з яких має власні особливості й переваги для реалізації креативних і освітніх проєктів. Вони дають змогу працювати з 2D- та 3D-об'єктами, відео, аудіосупроводом, а також реалізовувати інтерактивні сценарії без написання коду. Такий інструментарій відкриває перспективи для впровадження інноваційних методів навчання, що поєднують наочність, ігрову взаємодію та дослідницький підхід.

*Об'єкт дослідження* – процеси реалізації та підтримки доповненої реальності (AR) для створення інтерактивного навчального контенту та віртуальних турів на основі сучасних AR-конструкторів та VR 360° панорам. Панорами 360° / VR-панорами (сферичні зображення або оглядові віртуальні зображення) – цифрові панорами з круговим оглядом, що створюють ефект присутності.

*Предмет дослідження* – методи та засоби реалізації інтерактивних освітніх проєктів і віртуальних турів із використанням AR-конструкторів (Artivive, Assemlr, PlugXR, Onirix тощо) у шкільній, позашкільній та університетській освіті.

*Мета* – розроблення інформаційної технології створення інтерактивного навчального контенту та віртуальних турів на основі дослідження можливостей AR-конструкторів, а також аналіз ефективності їх застосування у шкільній, позашкільній та університетській освіті.

Для досягнення цієї мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати функціональні можливості сучасних AR-конструкторів, доступних у безкоштовному режимі;
- розробити та протестувати освітні AR-сцени для різних предметів (біологія, географія, анатомія людини, історія, мистецтво, архітектура, астрономія тощо) з використанням вибраних платформ;
- створити демонстраційний мобільний AR-застосунок у середовищі Unity з інтеграцією Vuforia Engine;
- розробити та протестувати віртуальний тур на основі VR 360° панорам;
- оцінити ефективність розроблених рішень за критеріями зручності, якості відображення та доступності для кінцевого користувача.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Наведено стислий, але конструктивний огляд основних напрямів досліджень щодо застосування доповненої реальності (AR) в освіті й у віртуальних / онлайн-турах, що ґрунтується на рецензіях, метааналізах і прикладних кейсах. Дослідження [1] виявило покращення у навчальних результатах та позитивну реакцію учнів завдяки AR.

Хоча результати дослідження [2] підтвердили значний ефект VR, AR не продемонструвала статистично значущого впливу на знання. В умовах пандемії та ведення війни (обстріли, вимкнення електроенергії тощо) ці дослідження не провадилися. Дослідження [3] описує обмежений вплив AR через різноманітність досліджень і методологічні обмеження, хоча поряд із класичними методами як посібник та дошка вони мають істотні переваги. Дослідження [4] доводить, що AR покращує візуалізацію, спрощує виконання завдань, знижує когнітивне навантаження. У дослідженні [5] AR використано для навчання анатомії, історичних подій, моделей у фізиці, географії тощо, поліпшує занурення і знання. VFTs ефективні в початковій освіті для зацікавлення дітей і кращого розуміння світу [6]. Відповідно до результатів, метааналізи показують помірний позитивний ефект AR на навчальні результати учнів, а також стабільне підвищення мотивації й зацікавленості [1, 7]. Систематичні огляди підкреслюють, що AR застосовується на всіх рівнях освіти (K–12 і вищі заклади) й має різні навчальні цілі: підвищення досягнень, розвиток просторового мислення, створення інтерактивних симуляцій (наприклад, анатомія, астрономія, географія) [8].

У таких студентських дисциплінах (курсах) або шкільних предметах, як анатомія та медицина, AR дає змогу візуалізувати внутрішні структури, тренувати хірургічні навички та покращувати розуміння анатомічних взаємин; огляди у сфері медичної освіти вказують на переваги для практичних навичок і прийняття рішень [9]. Дослідження [10] свідчать про збільшення зацікавленості та покращення запам'ятовування у разі використання 3D-моделей (наприклад, моделей органів, фотосинтезу тощо) під час вивчення біології / природничих наук. AR-платформи (включно з AR-sandbox) допомагають у візуалізації рельєфу й процесів під час викладання та пояснення тем з географії, що поліпшує розуміння просторових процесів [11]. Віртуальні тури й AR-гайди (путівники або навігаційні посібники) в музеях (мобільні додатки, WebAR), а також під час викладання історії / мистецтва тощо підвищують залученість відвідувачів і доступ до пояснень експонатів, а також дають змогу організувати віддалені екскурсії для молоді [12, 13]. Гайди – путівники або навігаційні посібники – електронні чи друковані матеріали, що супроводжують екскурсії, експозиції чи навчальні курси.

Існують успішні проєкти та застосунки для дітей – від інтерактивних історій (наприклад, Wonderscope) до AR-гайдів у музеях; такі продукти демонструють можливість масштабувати використання на мобільних пристроях [14]. Платформи-конструктори (Assemlr, PlugXR, Onirix, Artivive, Vuforia тощо) регулярно застосовують у навчальних проєктах: окремі дослідження й R&D-звіти показують, що готові конструктори дають змогу швидко прототипувати навчальні сцени й тури без глибокого кодування, хоча рівень функціоналу (функціональні можливості) у безкоштовних акаунтах варіюється [15, 16].

Багато робіт – це невеликі експериментальні дослідження або R&D (розроблення й тестування прототипів) з обмеженими вибірками, різними контрольними групами і неоднорідними метриками (мотивація, успішність, витрачений час), що ускладнює пряме узагальнення [7]. Часті проблеми в дослідженнях: недостатній контроль довготривалих ефектів (ретенція знань), вплив досвіду викладача / модератора, ймовірна упередженість під час суб'єктивних опитувань стосовно мотивації [8].

Практичні виклики під час упровадження AR у школах – технічні бар'єри, педагогічні та етичні / юридичні питання. Технічні бар'єри ґрунтуються на нерівномірному доступі до смартфонів / планшетів, сумісності пристроїв, обмеженні у безкоштовних режимах AR-конструкторів тощо [11, 16]. Проте для виконання простих шкільних завдань в Україні ці бар'єри сьогодні не є істотними.

Педагогічні виклики полягають у необхідності навчання вчителів інструментам AR, адаптації програм і методик оцінювання, балансі між “ігровою” частиною та освітньою цінністю [8]. Ось це є суттєвою проблемою. Етичні / юридичні питання виникають переважно у музеях та публічних просторах (інтелектуальна власність, віртуальні втручання в офіційні експозиції) [14].

Рекомендації з оглядів і кейсів (що працює найкраще):

- Поєднувати AR-сцени з чіткою педагогічною метою й активностями (запитання – завдання, дискусія, контрольні тести) [8].

- Використовувати WebAR або QR-лінки для спрощення доступу (немає потреби у встановленні великої кількості окремих додатків) [16].

- Планувати оцінювання не лише короткострокових знань, але й довготривалої ретенції й зміни ставлення / мотивації [1].

AR має помірний позитивний вплив порівняно з VR на навчальні результати та чітко підвищує мотивацію учнів [1, 7]. AR-сцени особливо корисні в дисциплінах, де візуалізація просторових або складних процесів (анатомія, географія, астрономія) пришвидшує розуміння [9, 11]. Практична реалізація потребує уваги до доступності, підготовки вчителів та педагогічного дизайну, інакше технологія може залишитися “гаджетом” без освітньої цінності [8].

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

У межах дослідження використано комбінований підхід, що поєднує аналіз функціональних можливостей сучасних AR-конструкторів та AR-платформ (табл. 1), гейміфікацію (ігрофікацію), експериментальне створення освітніх AR-сцен та розроблення мобільного додатка доповненої реальності на основі професійного інструментарію.

Гейміфікація – це використання ігрових елементів та механік гри у неігрових контекстах, таких як навчання, робота або повсякденне життя, з метою підвищення мотивації, залучення, активності й зацікавленості учнів, а також покращення результатів їхнього навчання. Інакше кажучи, це застосування ігрових підходів для досягнення неігрових цілей. Основні аспекти гейміфікації: залучення та мотивація, використання ігрових елементів, досягнення конкретної мети, застосування в різних сферах. Переваги гейміфікації: підвищення залученості та мотивації, покращення результатів та продуктивності, створення позитивного емоційного зв'язку, допомога у засвоєнні нової інформації, формування навичок. Недоліки гейміфікації: необхідність постійного оновлення та адаптації, можливість втрати цінності нагород із часом (інфляція), не завжди підходить для всіх завдань та аудиторій. Гейміфікація не є заміною традиційних методів навчання або роботи, а швидше додатковим інструментом для підвищення їх ефективності. Основні етапи дослідження:

*Вибір та аналіз AR-конструкторів →*

*Експериментальне створення AR-сцен →*

*Розроблення мобільного AR-додатка в Unity з Vuforia*

*→ Застосування методики оцінювання*

Інформацію про функціонал та можливості AR-конструкторів у безкоштовному (Free) режимі роботи наведено в таблиці нижче.

Для оцінювання інструментів відібрано найпопулярніші AR-конструктори та AR-платформи, які активно застосовують у сфері освіти, туризму, мистецтва та бізнесу: Artivive, Assemblr, PlugXR, Onirix, ZapWorks, 8thWall, BlippAR, ROAR AR, Vuforia, MyWebAR, EyeJack. Аналіз виконано за такими критеріями:

- доступність платформи (Android, iOS, Web);
- функціонал у безкоштовному (Free) режимі;
- підтримка 2D/3D-об'єктів, відео та інтерактивних елементів;
- зручність інтерфейсу;
- вимоги до технічних знань користувача.

Результати оцінювання узагальнено у вигляді порівняльних таблиць, на основі яких сформовано рейтинг платформ за зручністю та функціоналом. Наведемо рейтинг AR-конструкторів / платформ за зручністю та функціоналом у Free-режимі:

1. PlugXR – найкраще співвідношення між доступними функціями, простотою і результатом (2D, 3D, відео, QR).

2. Assemblr – чудовий для навчальних AR-проектів у школі / університеті.

3. Vuforia (через Unity) – найгнучкіший, але потребує технічних знань.

4. Onirix – WebAR із 3D, зручний у використанні.

5. Artivive – зручний, але дуже вузькоспеціалізований.

6. Інші (ZapWorks, BlippAR, 8thWall, ROAR AR, MyWebAR, EyeJack) – мають певні переваги, але обмежені у безкоштовних версіях.

**Табл.1.** Найпопулярніші AR-конструктори та AR-платформи, які активно й широко використовуються в освіті, мистецтві, бізнесі та рекламі

| Назва     | Призначення                         | Платформи           | Функціонал        | Переваги                                                                       | Недоліки                                               | Пояснення                                                                                                                                                                    |
|-----------|-------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Artivive  | Мистецтво, галереї, освіта          | Android, iOS        | 3/5 (середній)    | Інтуїтивний інтерфейс, ідеально для мистецтва                                  | Лише відео-контент як AR                               | Безкоштовно можна створювати базові AR-сцени лише з одним відео; підходить для митців, але немає підтримки 3D чи інтерактиву                                                 |
| Assemblr  | Освіта, презентації                 | Android, iOS, Web   | 4/5 (хороший)     | Легкий старт, інтерактивний інтерфейс                                          | Платний доступ до деяких функцій                       | У Free-режимі дає змогу створювати інтерактивні сцени з 2D/3D-об'єктами; зручно для освіти. Є ліміти, але загалом багато доступних функцій                                   |
| PlugXR    | Бізнес, освіта                      | Web, Android, iOS   | 4/5 (хороший)     | Без коду, підтримка 3D/AR, хмарне збереження                                   | Частина функцій тільки в Pro-акаунті                   | Дуже зручний у Free-плані: підтримує 2D, 3D, відео, без коду. Обмежено кількість проєктів, але повноцінні WebAR-сцени доступні                                               |
| Onirix    | Бізнес, брендинг, освітні рішення   | Web, мобільні       | 3/5 (середній)    | Легке створення WebAR, підтримка трекінгу (відстеження)                        | Обмеження у безкоштовній версії                        | У Free-режимі створюють WebAR-сцени з трекінгом, але є обмеження на кастомізацію (налаштування під користувача, персоналізація) та кількість проєктів. Ефективний для освіти |
| Zap Works | Універсальний AR/VR для розробників | Web, Android, iOS   | 2/5 (обмежений)   | Потужний редактор, підтримка JavaScript та WebAR, інтеграція з Unity           | Складніший інтерфейс для новачків, повна версія платна | Безкоштовний план орієнтований швидше на ознайомлення. Потрібно знати JavaScript. Повний функціонал доступний лише у платній версії                                          |
| 8thWall   | Бізнес, реклама, маркетинг          | Web                 | 1/5 (мінімальний) | Працює без інсталяції, інтеграція з A-Frame / three.js, гнучкий JavaScript API | Дорога підписка, висока вартість ліцензії              | Один із найпотужніших, але фактично Free-режиму немає, лише trial-версія. Дорогий, орієнтований на бізнес                                                                    |
| BlippAR   | Освіта, реклама, бізнес             | Android, iOS, Web   | 2/5 (обмежений)   | Підтримка AI-функцій та Unity SDK, інтерактивність                             | Обмеження в безкоштовному тарифі                       | Доступний базовий функціонал, але безкоштовний режим істотно обмежений, а SDK вимагає реєстрації як розробника                                                               |
| ROAR AR   | Освіта, друкована реклама           | Android, iOS, Web   | 3/5 (середній)    | Простий інтерфейс, можливість AR-магазинів                                     | Менші можливості порівняно з конкурентами              | Простий конструктор із AR-магазинами. У безкоштовній версії дає змогу робити базові сцени, але функціональність менша, ніж у Assemblr чи PlugXR                              |
| Vuforia   | Професійна AR-розробка              | Unity, Android, iOS | 4/5 (хороший)     | Висока стабільність, відстеження об'єктів / зображень                          | Потребує програмування, складніше в освоєнні           | Безкоштовний SDK для некомерційного використання. Повна гнучкість і стабільність, але необхідні знання Unity                                                                 |
| MyWeb AR  | Освіта, маркетинг, прості 3D сцени  | Web                 | 2/5 (обмежений)   | Простота, не потребує інсталяції                                               | Обмежена функціональність безкоштовної версії          | Доступний лише базовий функціонал. Не підтримує багато інтерактиву в Free-плані, але простий у використанні                                                                  |
| EyeJack   | AR-митецькі інсталяції, галереї     | Android, iOS        | 2/5 (обмежений)   | Спеціалізація на мистецтві, підтримка анімації                                 | Переважно для художників, обмежена гнучкість           | Переважно підходить митцям. Безкоштовно можна робити AR-сцени, але лише в межах художніх проєктів, без гнучкої кастомізації                                                  |

Для перевірки AR-конструкторів / платформ створено тематичні AR-проекти:

- **Artivive** – відеоклаж із історією кафедри, накладений на зображення-маркер;
- **Assemblr** – інтерактивна 2D-модель Сонячної системи з поясненнями;
- **PlugXR** – віртуальний тур Підгорецьким замком із відео- та аудіосупроводом;
- **Onirix** – 3D-візуалізація внутрішніх органів людини для уроків анатомії;
- **Unity з Vuforia** – візуалізація будови квітки з 3D-моделями різних квітів;
- **Google Camera** – сферичні панорами приміщень для формування VR-туру.

Запропонована інформаційна технологія створення й упровадження рішень доповненої та віртуальної реальності в освіті – це комплекс алгоритмів, методів і архітектурних рішень, спрямованих на системне застосування AR/VR у навчальному процесі.

Алгоритмічний рівень передбачає послідовність процедур:

1. Ідентифікація навчальних потреб – визначення предметної області, типу знань (фактологічні, просторові, процедурні) та навчальних цілей.
2. Побудова AR/VR-сценарію – вибір технологічної платформи (WebAR-конструктор чи Unity з Vuforia), підбір маркерів або QR-кодів, інтеграція мультимодальних ресурсів (3D-моделей, відео, аудіо, текстових анотацій).
3. Організація інтерактивної взаємодії – проектування дій користувача з об'єктами (масштабування, обертання, перегляд додаткової інформації) та подання контрольних завдань.
4. Оцінювання ефективності – збирання і аналізування кількісних і якісних показників: результати тестування, тривалість взаємодії, опитування щодо мотивації та рівня задоволеності.

Методичний рівень ґрунтується на:

- методі мультимодальної візуалізації, що забезпечує поєднання різних форматів даних (2D, 3D, відео, звук);
- методі адаптивного вибору платформи залежно від технічних умов та педагогічних завдань;
- методі інтеграції AR/VR-сцен у навчальний процес через лекції, лабораторні заняття, віртуальні екскурсії.

Архітектурний рівень реалізується у трирівневій структурі:

- клієнтський рівень – мобільні застосунки або WebAR-рішення для кінцевого користувача;
- серверний рівень – база мультимедійних ресурсів і система управління контентом;
- аналітичний рівень – модулі збирання та оброблення даних про використання AR/VR-сцен із подальшим оцінюванням їхньої освітньої ефективності.

Апробацію інформаційної технології здійснено на основі низки прототипів: інтерактивного відеоклажу (Artivive), 2D-моделі Сонячної системи (Assemblr), віртуального туру історичною пам'яткою (PlugXR), анатомічних 3D-сцен (Onirix), мобільного застосунку “Квітка” (Unity + Vuforia) та VR-панорам 360°. Кожен із цих прикладів є реалізацією окремих модулів запропонованої технології, що підтверджує її функціональність та адаптивність.

Подано формалізований опис запропонованої інформаційної технології. Нехай маємо множину навчальних дисциплін  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ , де кожен елемент  $d_i$  характеризується набором навчальних тем  $T_i = \{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im}\}$ .

1. Алгоритм вибору платформи. Введемо функцію вибору платформи  $P$ :

$P: T \times C \rightarrow \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ , де  $T$  – навчальна тема;  $C$  – множина технічних обмежень (рівень обладнання, наявність інтернет-доступу);  $p_j$  – вибрана платформа (наприклад, WebAR чи Unity). Вибір здійснюється за критерієм оптимальності:

$$P^*(t, c) = \arg \max_{p_j} U(p_j, t, c),$$

де  $U$  – функція корисності, що враховує доступність, якість візуалізації та інтерактивність.

2. Формування AR/VR-сценарію. Сценарій описується як трійка:  $S = \langle M, I, A \rangle$ , де  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_r\}$  – множина мультимодальних ресурсів (3D-моделі, відео, аудіо, текст);  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_s\}$  – множина інтерактивних дій користувача (масштабування, обертання, викликання підказок);  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_q\}$  – множина навчальних завдань і контрольних тестів. Отже, функція побудови сценарію має вигляд:  $F: (d_i, t_{ij}) \rightarrow S$ .

3. Модель інтерактивної взаємодії. Взаємодію користувача з AR/VR-сценарієм можна подати як послідовність станів:  $X = \{x_0, x_1, \dots, x_T\}$ , де  $x_t$  – стан системи у момент часу  $t$ . Перехід визначається функцією:  $x_{t+1} = G(x_t, u_t)$ , де  $u_t \in I$  – дія користувача.

4. Модель оцінювання ефективності. Ефективність технології визначається як:  $E = \alpha K + \beta M + \gamma S$ , де  $K$  – показник засвоєння знань (результати тестування);  $M$  – показник мотивації (анкетування);  $S$  – показник задоволеності користувача;  $\alpha, \beta, \gamma$  – вагові коефіцієнти ( $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ). У порівняльному аналізі ефективність AR/VR визначається як різниця між експериментальною та контрольною групами:  $\Delta E = E_{exp} - E_{ctrl}$ .

5. Архітектура інформаційної технології. Формально її можна подати як трирівневу систему:  $IT = \langle L_c, L_s, L_a \rangle$ , де  $L_c$  – клієнтський рівень (мобільні застосунки, WebAR-браузери),  $L_s$  – серверний рівень (сховище мультимедійних ресурсів, система управління контентом),  $L_a$  – аналітичний рівень (збирання та опрацювання статистичних даних).

Отже, запропонована нова цілісна інформаційна технологія описується як система  $IT = \{D, P, F, G, E, L_c, L_s, L_a\}$ , де  $D$  – навчальні дисципліни;  $P$  – алгоритм вибору платформи;  $F$  – функція побудови AR/VR-сценарію;  $G$  –

модель інтерактивної взаємодії;  $E$  – модель оцінювання ефективності;  $L_c$ ,  $L_s$ ,  $L_a$  – архітектурні рівні (клієнтський, серверний, аналітичний). В цій ІТ всі компоненти взаємопов'язані й забезпечують замкнений цикл – від формулювання освітніх цілей до аналізу результатів.

Для кожного проєкту використовували вихідні зображення-маркери (image marker, зображення-мітка або ідентифікаційне зображення – графічний об'єкт, який використовується для розпізнавання та активації AR-контенту, на які накладали відео, 2D/3D-моделі або інформаційні блоки. Сцени тестували через офіційні мобільні додатки відповідних платформ або за допомогою WebAR-посилань / QR-кодів. Для демонстрації можливостей професійного підходу до створення AR-контенту розроблено повноцінний мобільний застосунок у середовищі Unity 2022.3 LTS з інтеграцією Vuforia Engine. Основні етапи:

1. Встановлення Unity Hub та Unity Editor із підтримкою Android Build Support.
2. Створення бази даних зображень маркерів у сервісі Vuforia Developer Portal.

3. Імпорт маркерів та налаштування об'єктів AR Camera і Image Target у Unity.

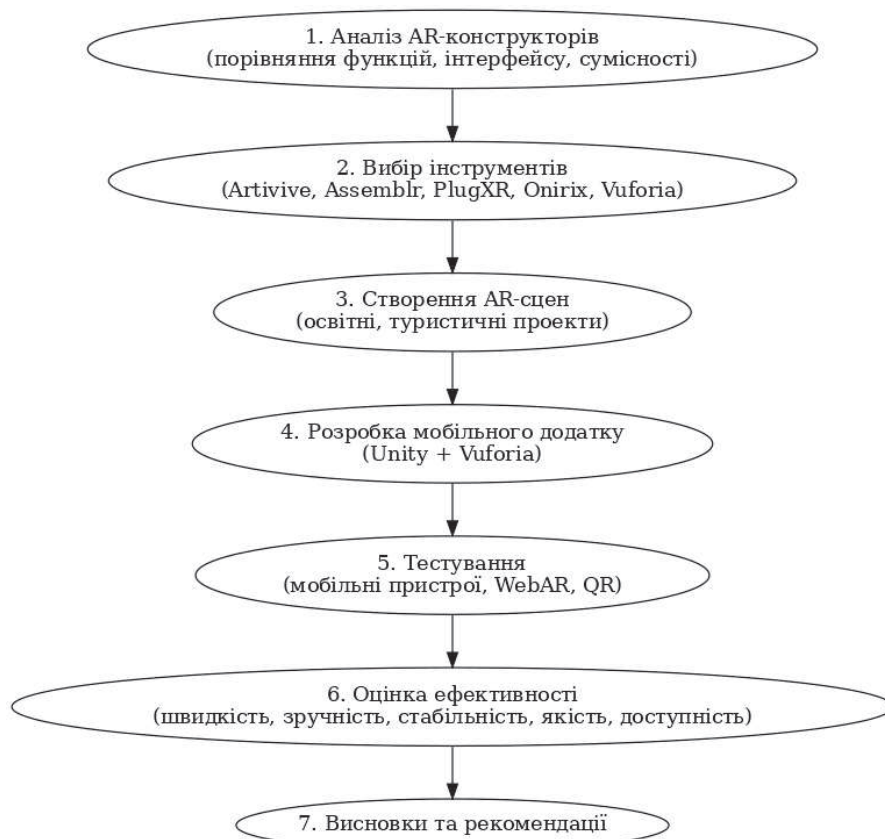
4. Додавання 3D-моделей (формат FBX) із текстурами, налаштування матеріалів і кольорів.

5. Оптимізація сцен для мобільних пристроїв (роздільна здатність текстур, стиснення ресурсів).

6. Збирання проєкту у форматі .apk та тестування на смартфоні Android.

У розробленій демонстраційній сцені використано згенероване AI зображення квітки як маркер, на який накладали схему будови квітки з підписами та кілька тривимірних моделей різних видів квітів. Ефективність роботи інструментів оцінювали на основі:

- швидкості створення сцени;
- зручності інтерфейсу для користувача без досвіду програмування;
- стабільності відстеження маркерів;
- якості відображення 3D-контенту на мобільних пристроях;
- доступності проєкту для кінцевого користувача (застосунок чи WebAR).



**Рис. 1.** DFD модуля ідентифікації помилок / DFD of the error identification module

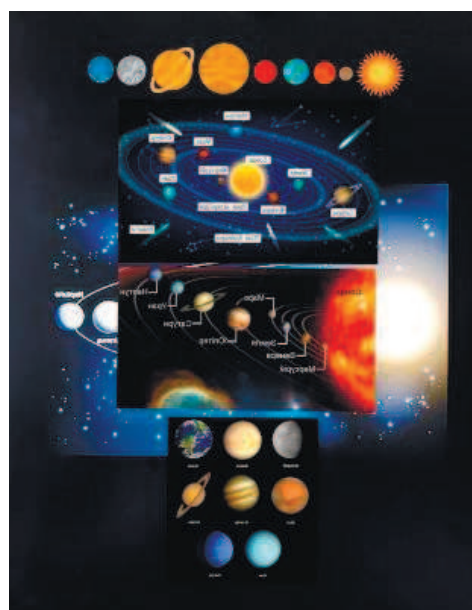
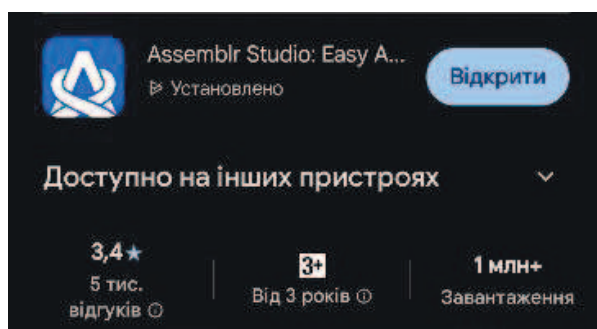
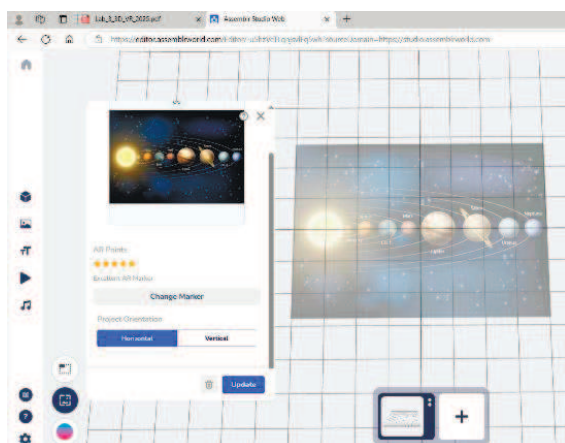
В Assemblr під час створення інтерактивної 2D-моделі Сонячної системи із зображеннями додано зображення-маркер (Сонячну систему). Поверх зображення маркера додано 2D-зображення Сонця, планет (схожих на оригінальні) та тематичні інформаційні фотографії.

В PlugXR під час створення віртуального туру Підгорецьким замком із відео- та аудіосупроводом

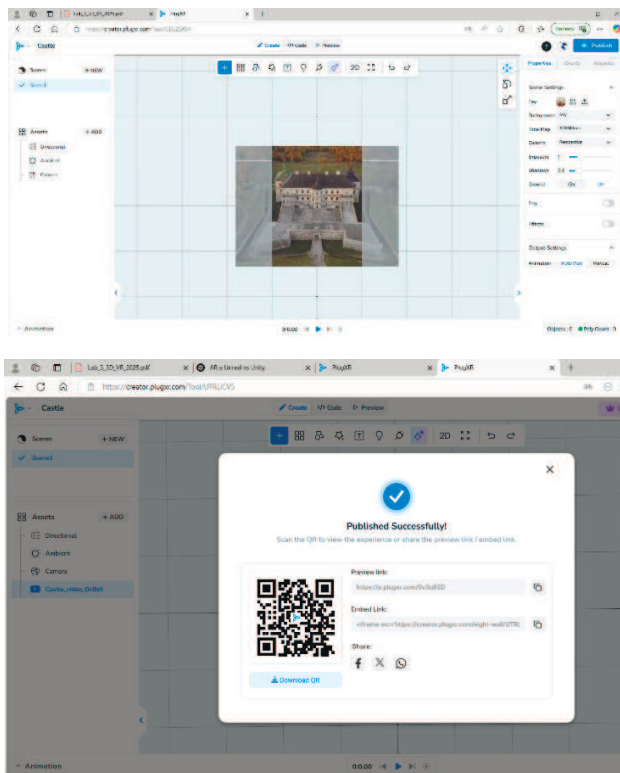
поверх зображення маркера додано створене відео: фотографії замку та голосове озвучення “20 цікавих фактів про замок” тривалістю 5 хв. Через активацію Publish отримано QR-код для доступу до AR-сцени. Після сканування QR-коду потрібно підвести сканер до зображення на моніторі, яке “оживає” та відображає відео, створене до цього.



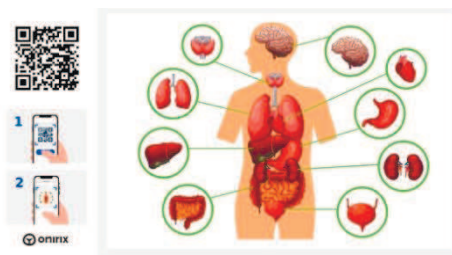
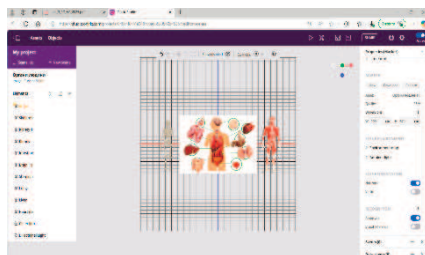
**Рис. 2.** Відображення колажу зображень як відео після активації зображення маркера через застосунок Artivive на смартфоні / Displaying a collage of images as a video after activating the marker image via the Artivive app on your smartphone



**Рис. 3.** Відображення колажу зображень та 2D-моделей планет для уроку астрономії після активації зображення маркера через застосунок Assemblr Studio на смартфоні / Displaying a collage of images and 2D models of planets for an astronomy lesson after activating the marker image via the Assemblr Studio app on a smartphone



**Рис. 4.** Відображення відео про Підгорецький замок для уроку з історії після активації зображення маркера (фото замку) через QR-код для доступу до AR-сцени через смартфон / Displaying a video about Pidhirtsi Castle for a history lesson after activating the marker image (photo of the castle) via a QR code to access the AR scene via a smartphone



**Рис. 5.** Відображення 3D-моделей внутрішніх органів людини для уроку з анатомії після активації зображення маркера (фото 2D органів людини) через QR-код для доступу до AR-сцени через смартфон / Displaying 3D models of human internal organs for an anatomy lesson after activating a marker image (2D photo of human organs) via a QR code to access the AR scene via a smartphone

В Onirix реалізовано 3D-візуалізацію внутрішніх органів людини.

Поверх зображення маркера додано 3D-моделі: внутрішніх органів (серце, легені, шлунок, печінка, кишечник тощо) та двох скелетів (один – м'язова система, другий – кісткова система). Через Publish отримано QR-код для доступу до AR-сцени. Після сканування QR-коду необхідно підвести сканер до зображення на моніторі, яке “оживає” та відображає сцену, створену до цього.

В Unity з Vuforia реалізовано візуалізацію будови квітки з 3D-моделями різних квітів. Згенерувала унікальне зображення квітки нейромережа DALL-E, воно добре підходить як трежер Image Target та додано до бази даних Vuforia (<https://developer.vuforia.com/develop/database>), яка імпортована в проєкт Unity. Перед маркером розміщено зображення будови квітки з підписами: створено дочірній для ImageTarget об'єкт Info

Image типу Quard та матеріал FlowInfoMat (InfoImage → Create → Material), фото вставлено в матеріал, а матеріал в ImageTarget (Mesh Render → Materials → Element 0).

Навколо зображення будови квітки з підписами розміщено FBX 3D-моделі різних квітів, імпортовані з бібліотеки Sketchfab. Якщо після додавання моделі вона біла, то через Inspector → Materials потрібно натиснути Extract Materials, після цього натиснути на матеріал, в Shader вибрати Unlit / Texture та перетягнути фото потрібного кольору. Так потрібно зробити з усіма матеріалами, відтак в Inspector → Materials → On Demand Remap вибрати потрібні матеріали та натиснути Apply – тепер кольорову модель перетягнути на сцену дочірнім об'єктом для ImageTarget.

Остання частина експериментів полягала у створенні сферичних панорам приміщень для формування VR-туру. Увагу зосереджено на створенні 360° зображень кабінетів і коридорів кафедри ICM

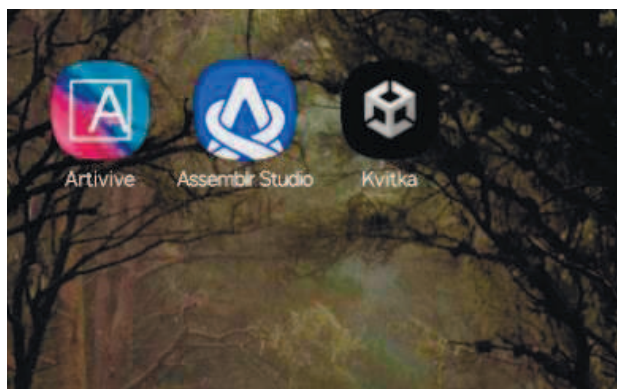
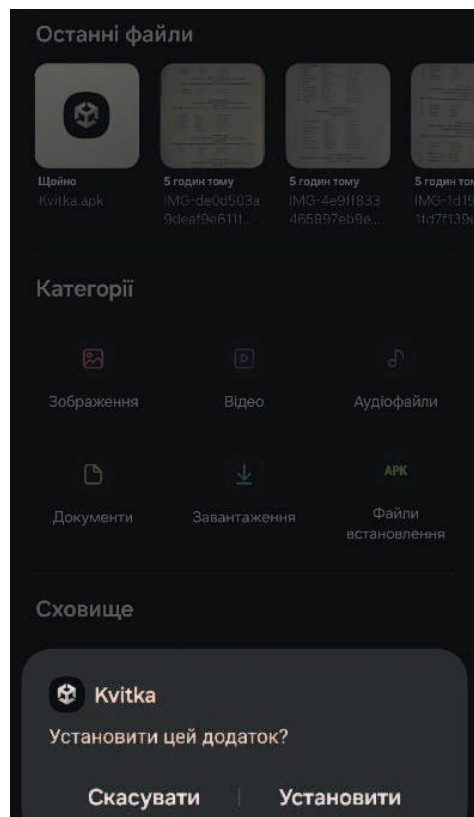
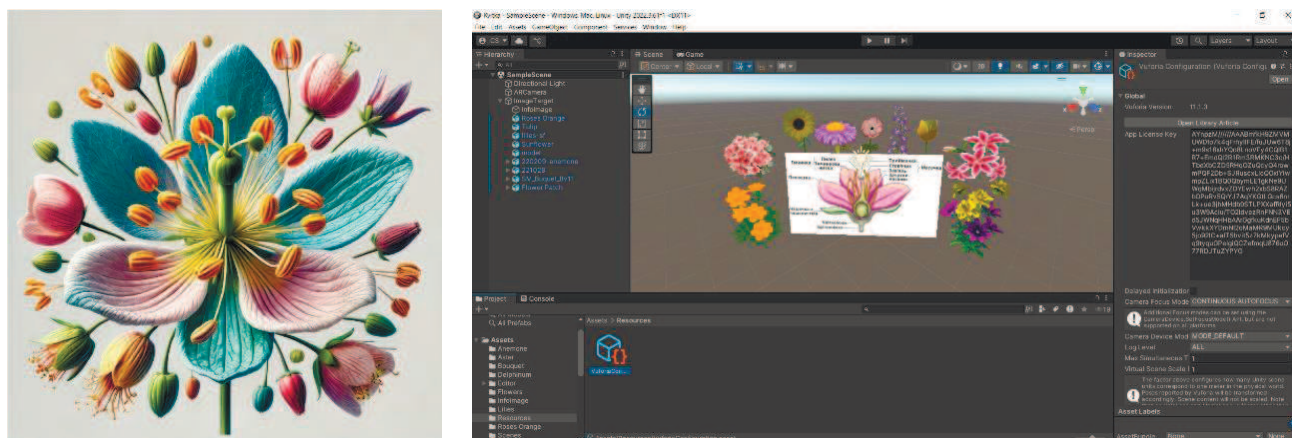
Національного університету “Львівська політехніка”. Спочатку протестовано декілька відомих застосунків для створення сферичних панорам:

- Google Street View – раніше широко використовувався для створення “photo sphere”, однак на момент виконання роботи програма більше не підтримується в Google Play, а завантажені версії не запускались або аварійно завершували роботу.

- Raporama 360 – створює лише циліндричні панорами, що охоплюють простір лише по горизонталі, без повного 360×180 огляду.

- Open Camera – хоч і має панорамну функцію, але також формує обмежену циліндричну панораму, непридатну для повноцінного VR.

Після тривалих пошуків знайдено альтернативне рішення – версію Google Camera, яку оптимізували сторонні розробники. Завантажено файл MGC\_8.1.101\_A9\_GV1zfix\_snap.apk із сайту модів камери. Модифікації або додатки-модифікації – неофіційні або сторонні зміни до програмного забезпечення, які розширюють чи змінюють функціонал. Після встановлення додаток успішно працював на пристрої, а режим “Photo Sphere” дав змогу створити повноцінні сферичні 360×180 панорами. У підсумку створено 18 сферичних панорам, що охоплюють різні простори кафедри. Панорами готові для подальшого використання у VR-турах. Зображення VR-панорам подано на рис. 7.



**Рис. 6.** Відображення рисунка будови квітки із 3D-моделлями різних квітів для уроку біології / ботаніки після активації зображення маркера через власний розроблений мобільний застосунок Kvitka на смартфоні / Displaying a drawing of the structure of a flower with 3D models of different flowers for a biology/botany lesson after activating the marker image via the self-developed Kvitka mobile application on a smartphone

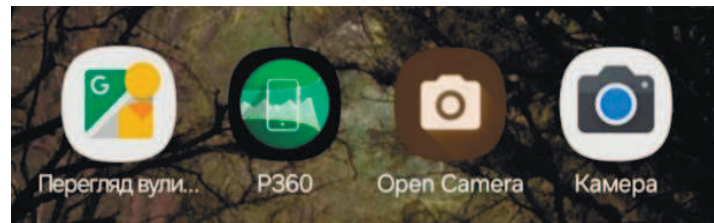


Рис. 7. VR 360 панорами смартфоном / VR 360 panoramas with a smartphone

Оцінимо ефективність розроблених рішень відповідно до експериментальних даних, використавши три ключові критерії: зручність, якість відображення та доступність.

1. Зручність використання AR-конструкторів (Artivive, Assemlr, PlugXR, Onirix):

- Assemlr і PlugXR – найзручніші для освітніх проєктів. Пропонують інтуїтивний інтерфейс, готові бібліотеки об'єктів, можливість швидко додавати зображення, 3D-моделі та відео без програмування.

- Onirix – зручний для створення WebAR-сцен, але має обмеження стосовно кастомізації в безкоштовній версії.

- Artivive – дуже простий у використанні, але орієнтований на відеоконтент, що обмежує застосування у складних навчальних проєктах.

Unity з Vuforia – найгнучкіше рішення, але потребує технічних знань навичок роботи із 3D-графікою. Менш зручний для початківців, проте для розробників надає максимальні можливості кастомізації (налаштування під користувача, персоналізація) – пристосування інтерфейсу чи функціоналу до індивідуальних потреб користувача.

Для швидких навчальних проєктів краще підходять Assemlr та PlugXR, для професійних та масштабованих рішень – Unity з Vuforia.

2. Якість відображення AR-сцени в конструкторах:

- Assemlr і PlugXR добре відображають 2D/3D-графіку та інтерактивні елементи на мобільних пристроях.

- Onirix дає змогу відображати якісні 3D-моделі та анімації у браузері (WebAR), що зручно для користувачів без додатків.

- Artivive забезпечує високу чіткість відео, але без інтерактивних елементів.

Unity з Vuforia – найвища якість відображення та стабільність трекінгу зображень (image tracking, object tracking → відстеження – технологія розпізнавання та відстеження положення маркерів чи об'єктів у просторі) серед протестованих інструментів. Можливість оптимізації моделей та текстур дає змогу досягти плавної роботи навіть на середніх за потужністю смартфонах.

За якістю відображення лідирує Unity з Vuforia, серед конструкторів – Assemlr та Onirix.

3. Доступність AR-конструкторів для кінцевого користувача:

- Assemlr та PlugXR підтримують як мобільні додатки, так і WebAR (доступ через браузер або QR-код), що істотно спрощує доступ для учнів і студентів.

- Onirix орієнтований на WebAR, що дає можливість уникати інсталяції додатків.

- Artivive потребує встановлення додатка, але процес швидкий і зрозумілий.

Unity з Vuforia – потребує попередньої інсталяції додатка, але дає змогу працювати офлайн.

Найдоступніші для користувача рішення – ті, що підтримують WebAR (Assemlr, PlugXR, Onirix), тоді як Unity з Vuforia більше підходить для контрольованих освітніх середовищ (школи, університети), в яких інсталяція додатка не є проблемою.

Табл. 2. Підсумкова оцінка (за п'ятибальною шкалою)

| Рішення         | Зручність | Якість відображення | Доступність |
|-----------------|-----------|---------------------|-------------|
| Assemlr         | 5         | 4                   | 5           |
| PlugXR          | 5         | 4                   | 5           |
| Onirix          | 4         | 4                   | 5           |
| Artivive        | 4         | 3                   | 4           |
| Unity + Vuforia | 3         | 5                   | 3           |

**Обговорення результатів дослідження.** У ході дослідження розроблено інформаційну технологію створення інтерактивного навчального контенту та віртуальних турів на основі сучасних AR-конструкторів і середовища Unity з Vuforia. Для перевірки функціоналу вибраних конструкторів / платформ створено низку демонстраційних AR-сцен різної тематики:

- Artivive – відеколаж історії кафедри, що оживає під час сканування маркера;

- Assemlr – інтерактивна модель Сонячної системи із 2D-зображеннями та інформаційними блоками;

- PlugXR – туристичний проєкт із віртуальним туром Підгорецьким замком, відеорядом та аудіосупроводом;

- Onirix – 3D-візуалізація внутрішніх органів людини для уроків анатомії;
- Unity з Vuforia – мобільний застосунок із трекінгом маркера та інтерактивними 3D-моделями квітів.

Крім того, створено VR 360° панорами приміщень кафедр, що можуть бути інтегровані у віртуальні тури.

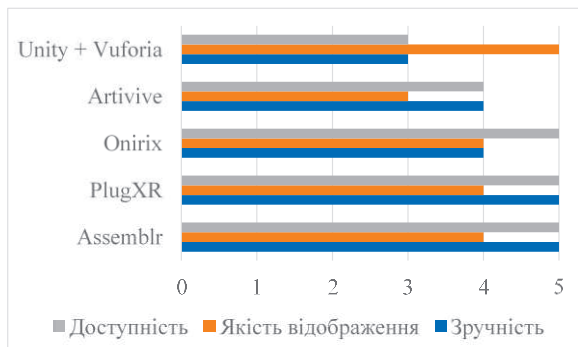


Рис. 8. Порівняння ефективності AR-рішень / Comparison of the effectiveness of AR solutions

Такий підхід забезпечує повну іммерсивність (занурюваність або ефект повного занурення – ступінь, до якого користувач відчуває присутність у віртуальному середовищі) та дає користувачеві змогу вільно оглядати простір, що особливо корисно для онлайн-екскурсій. Розроблені рішення підвищують зацікавленість учнів і студентів, поліпшують засвоєння матеріалу завдяки поєднанню візуалізації, інтерактивності та багатосенсорного сприйняття. Застосування AR-конструкторів у поєднанні з VR-панорамами дає можливість створювати доступні, яскраві й адаптовані під навчальні програми ресурси без великих фінансових витрат. Унікальність роботи полягає у комплексному підході: від швидкого створення навчальних AR-сцен у готових конструкторах до професійної реалізації кастомного AR-додатка з оптимізацією для мобільних пристроїв, а також у поєднанні AR та VR у єдиній навчально-туристичній концепції.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – запропоновано комплексну методику створення інтерактивних навчальних AR- та VR-ресурсів, що поєднує використання безкодових AR-конструкторів і професійних інструментів (Unity та Vuforia). Запропоновано нову цілісну інформаційну технологію впровадження AR/VR у навчальний процес, яка поєднує алгоритми аналізу навчальних потреб, побудови AR-сценаріїв, організації інтерактивної взаємодії та оцінювання ефективності. Сформовано архітектурну модель технології із клієнтським, серверним та аналітичним рівнями, що забезпечує масштабованість і гнучкість використання. Уперше систематизовано комбіноване застосування no-code AR-конструкторів ( $p_{web}$ ) і професійних середовищ Unity та Vuforia ( $p_{unity}$ ) у межах єдиного технологічного циклу створення освітніх AR/VR-сцен  $P^*(t, c) \in \{p_{web}, p_{unity}\}$ , що мінімізує технічні бар'єри та водночас забезпечує високу якість

візуалізації. Розроблено формалізовану модель ефективності впровадження AR/VR у навчання  $E = \alpha K + \beta M + \gamma S$ , де  $K$  – знання;  $M$  – мотивація;  $S$  – задоволеність;  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ . Розроблено та апробовано навчальні AR-сцени, адаптовані до різних предметних галузей (біологія, географія, астрономія, історія, анатомія людини) з урахуванням особливостей шкільної та університетської аудиторії. Виконано порівняльний аналіз функціоналу найпопулярніших AR-конструкторів / платформ у безкоштовному режимі роботи, що дає змогу обґрунтовано вибирати інструмент для конкретних освітніх завдань. Запропоновано підхід до інтеграції VR 360° панорам у структуру віртуальних турів як доповнення дисциплін із AR-сценами для підвищення рівня залучення користувачів.

Практична значущість результатів дослідження – розроблені методики та приклади AR-сцен можуть безпосередньо використовувати вчителі / викладачі для створення інтерактивних матеріалів без потреби у глибоких програмістських знаннях. Розроблена технологія забезпечує можливість швидкого створення AR/VR-матеріалів у навчанні без залучення висококваліфікованих програмістів, що сприяє її широкому впровадженню в освітніх закладах. Також вона забезпечує адаптивний вибір платформи  $P^*(t, c) = \arg \max_{p_j} U(p_j, t, c)$ , що дає

змогу поєднувати доступність WebAR з високоякісними сценами Unity залежно від умов використання. Архітектурна модель  $IT = \langle L_c, L_s, L_a \rangle$  підтримує масштабування від окремих навчальних епізодів (для малих навчальних модулів ( $|M| \rightarrow 1$ )) до комплексних віртуальних турів та освітніх платформ (для комплексних курсів або віртуальних турів ( $|M| \gg 1$ )). Упровадження у практику забезпечило підвищення освітньої ефективності:  $\Delta E = E_{exp} - E_{ctrl} > 0$ , що свідчить про позитивний вплив AR/VR на навчальні результати. Використання WebAR-конструкторів підвищує доступність для масового користувача, тоді як Unity-додатки забезпечують високоякісне відтворення складних сцен, що дає змогу гнучко поєднувати доступність і якість залежно від умов застосування. Віртуальні тури, створені з використанням VR 360° панорам, можна застосовувати у школах, університетах, музеях та туристичних компаніях для дистанційного ознайомлення з об'єктами. Мобільний AR-застосунок на Unity з Vuforia може слугувати основою для подальших освітніх і комерційних розробок, зокрема у сферах STEM-освіти, культурної спадщини та маркетингу. Конструктори / платформи та підходи, протестовані в роботі, можна масштабувати й адаптувати під інші предмети та рівні навчання, зокрема позашкільні гуртки й онлайн-курси.

Результати виконаних експериментів та порівняльного аналізу відповідають загальним закономірностям, виявленим у сучасних оглядах і метааналізах досліджень застосування AR/VR в освіті. Зокрема, кілька великих аналізів літератури повідомляють про помірний, але стабільний позитивний вплив AR на

мотивацію та у багатьох випадках на короткострокові навчальні досягнення; одночасно явище характеризується значною гетерогенністю результатів, що залежить від предметної області, віку учнів, тривалості

втручання та педагогічного дизайну. Це узгоджується з нашими висновками про підвищення зацікавленості й покращення засвоєння матеріалу у реалізованих AR/VR демосценах [1].

Табл. 3. Порівняння отриманих результатів з попередніми дослідженнями

| Критерій / аспект           | Попередні дослідження                                                                                        | Результати, отримані у цій роботі                                                                                                     | Відмінності та переваги                                                                     |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Підхід до розроблення       | Переважно використання окремих AR-інструментів (або конструкторів, або Unity) для вузької теми чи дисципліни | Поєднання безкодових AR-конструкторів (Artivive, Assemlr, PlugXR, Onirix) і професійного середовища Unity з Vuforia в єдиній методиці | Комплексність підходу: швидкі сценарії для шкіл та кастомні додатки для розширених проєктів |
| Типи контенту               | Зазвичай концентрування на одному типі (3D-моделі або відео)                                                 | Використання 2D/3D-об'єктів, відео, аудіосупроводу, інформаційних блоків, VR 360° панорам                                             | Багатокомпонентний мультимедійний контент у межах одного проєкту                            |
| Предметна спрямованість     | Іноді обмежена однією дисципліною (наприклад, лише біологія або історія)                                     | Адаптація до кількох дисциплін: біологія, географія, астрономія, історія, анатомія людини                                             | Можливість інтеграції у різні навчальні програми та міждисциплінарні проєкти                |
| Аналіз інструментів         | Не завжди здійснюється формальна оцінка зручності, якості, доступності                                       | Виконано порівняльний аналіз AR-конструкторів / платформ у безкоштовному режимі за ключовими критеріями із підсумковим рейтингом      | Дає практичні рекомендації вчителям / викладачам щодо вибору платформи                      |
| VR-компонент                | Часто відсутній або розглядається як окремий проєкт                                                          | Інтеграція VR 360° панорам у загальну концепцію навчання та віртуальних турів                                                         | Забезпечує комбінований AR з VR досвідом для учнів                                          |
| Доступність для користувача | Може потребувати встановлення складних додатків або спеціального обладнання                                  | Підтримка як мобільних додатків, так і WebAR для доступу через браузер та QR-коди                                                     | Збільшує охоплення та зменшує технічний бар'єр                                              |
| Інноваційність              | Часто зосереджені на технічному аспекті, без комплексної освітньої інтеграції                                | Поєднання технічних рішень з педагогічною адаптацією та мультидисциплінарністю                                                        | Рішення орієнтовані на реальне використання у навчальному процесі та онлайн-екскурсіях      |

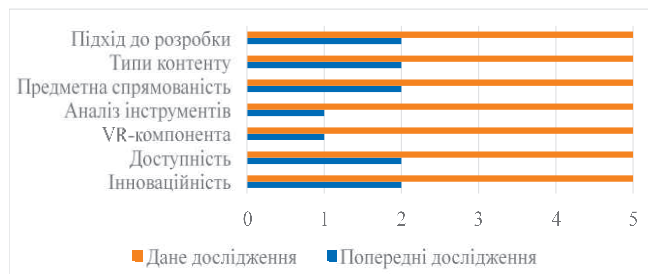


Рис. 9. Порівняння результатів / Comparison of results

**1. Порівняння ефективності (загальний ефект AR/VR).** Методи, що використовують AR, у низці мета-аналізів демонструють “середній” позитивний вплив на результати навчання (наприклад, [1–7]). Наші експерименти також підтвердили помітне підвищення мотивації та поліпшення розуміння просторових понять (анатомія, астрономія), що кореспондує із цими загальними висновками. Водночас, як підкреслено в недавніх оглядах із медицини / анатомії, ефект AR може бути менш однозначним порівняно з VR (який часто демонструє більші когнітивні переваги у рандомізованих дослідженнях). Це частково пояснює, чому в окремих дослідженнях з анатомії ефект AR був незначний. Наші дослідження із Onirix (анатомічні 3D-сцени) показали поліпшення залученості, але змішані результати щодо

оцінювання знань, що узгоджується з висновками останніх метааналізів щодо AR/VR у анатомії [7].

**2. Педагогічний дизайн та тривалість втручання як модератори ефекту.** Огляди стверджують, що AR найефективніша, коли інтегрована з чіткою педагогічною метою, активним завданням і системою оцінювання (не як “гаджет” сам по собі). Наш підхід – поєднання коротких WebAR-сцен (Assemlr / PlugXR) для швидкого доступу та глибших модулів у Unity + Vuforia – відповідає рекомендаціям щодо комбінування швидкого прототипування та професійної реалізації, що допомагає контролювати навчальний процес і продовжувати втручання для довшої ретенції. Це збігається із результатами [1], які підкреслюють важливість дизайну втручання і тривалості.

**3. Доступність (WebAR vs. нативні додатки) і вплив на охоплення.** Наш висновок, що WebAR-орієнтовані платформи (Assemlr, PlugXR, Onirix) підвищують доступність у шкільних / масових сценаріях (через браузер або QR), підтверджується оглядами, які відзначають переваги WebAR у зниженні бар'єрів для впровадження. Натомість Unity + Vuforia забезпечує вищу якість рендерингу та стабільніший трекінг, але потребує інсталяції, отже, найкраще підходить для контрольованих / лабораторних умов або для проєктів із техпідтримкою. Наші практичні спостереження (таблиця

оцінок зручності / якість / доступність) узгоджуються з цими загальними висновками [8].

**4. Предметна специфіка: де AR/VR найефективніші.** Систематичні огляди показують, що AR/VR особливо корисні в дисциплінах зі складними просторовими концептами – анатомії, географії, астрономії, фізиці. Наші кейси (анатомія в Onirix, Сонячна система в Assemblr, модель квітки в Unity) продемонстрували найвираженіше поліпшення усвідомлення просторових відносин і зацікавленості студентів у цих тематичних областях, що збігається із висновками ширших оглядів. Водночас для предметів, де домінують концептуальні / текстові навички (деякі гуманітарні дисципліни), ефект може бути меншим або зміщеним у бік мотивації / ставлення до навчання [7].

**5. Мотивація та ігрофікація (gamification).** Окремі дослідження і метааналізи показують, що AR-сценарії з елементами ігрофікації підсилюють мотивацію та залученість, що узгоджується з нашими спостереженнями стосовно підвищеної зацікавленості. Однак література попереджує: ігрові елементи повинні бути педагогічно обґрунтовані, інакше нагороди втрачають цінність із часом. У нашій реалізації ми поєднали ігрові механіки з контрольними завданнями й оцінюванням, що відповідає рекомендаціям щодо стійкого навчального дизайну [17].

**Табл. 4.** Порівняння власних результатів із ключовими оглядами

| Аспект                     | Наші результати                                         | Що кажуть огляди / метааналізи                                                   |
|----------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Вплив на мотивацію         | Істотне підвищення                                      | Загалом позитивний ефект [7]                                                     |
| Вплив на знання (анатомія) | Підвищення залученості, змішані результати з оцінювання | VR часто показує більший ефект у тестах; для AR – неоднозначно [2]               |
| Доступність                | WebAR (Assemblr / PlugXR / Onirix) – висока             | Підтверджено оглядами: WebAR знижує бар'єри [8]                                  |
| Якість відображення        | Unity+Vuforia – найкраще                                | Підтримано практикою: нативні SDK забезпечують вищу стабільність / контроль [18] |

**6. Обмеження та напрями подальших досліджень.** Як і у більшості опублікованих робіт, наші експерименти мають обмеження: невеликі вибірки для оцінювання навчальних результатів, відсутність довгострокового відстеження збереження знань і часткова залежність результатів від специфіки платформи (обмеження у Free-планах). Це узгоджується із висновками оглядів, які вказують на потребу у більших рандомізованих контрольованих дослідженнях і уніфікованих метриках для порівняння ефективності платформ та предметних областей. На майбутнє рекомендовано: (1) виконати RCT для порівняння WebAR vs Unity-додатків у межах однієї дисципліни; (2) впровадити довготривалі пере-

вірки збереження знань; (3) оцінити вплив інструментальних змін (тип маркера, якість 3D-моделі) на результати навчання [7].

Наші емпіричні висновки підтверджують ключові тренди сучасної літератури: AR/VR підвищують мотивацію і часто – короткострокові навчальні результати, особливо в предметах із просторовим компонентом; WebAR-інструменти збільшують доступність, а професійні реалізації в Unity забезпечують найкращу якість та контроль, але потребують технічних ресурсів і часу на розроблення [1].

## Висновки / Conclusions

Результатом роботи є створення інформаційної технології реалізації доповненої реальності на основі AR-конструкторів та Unity з інтеграцією Vuforia для організації інтерактивного тематичного навчання та віртуальних турів. Це дало змогу об'єднати можливості безкодових платформ із професійним середовищем розроблення, що забезпечує як швидке прототипування навчальних рішень, так і розроблення масштабованих проєктів. Такий підхід дає змогу вчителям / викладачам без глибоких технічних знань створювати якісний освітній контент, а також розширює спектр застосування технології – від шкіл до університетів і музеїв.

Побудовано й протестовано низку навчальних AR-сцен (історія кафедри, модель Сонячної системи, анатомічні 3D-моделі, туристичний AR-тур, мобільний AR-застосунок “Kvitka”), а також VR 360° панорами для інтеграції у віртуальні екскурсії. Це забезпечило практичне підтвердження ефективності технології у різних предметних галузях, продемонструвало можливість підвищення залученості учнів і студентів, а також показало, що AR і VR можуть бути використані як потужний інструмент візуалізації складних процесів і явищ. Перевагою є поєднання гнучкості професійного середовища із простотою та доступністю готових конструкторів.

Запропоновану комплексну методику застосування AR і VR можна адаптувати до різних предметних галузей освіти, що підвищує наочність, інтерактивність та зацікавленість учнів і студентів. Її універсальність полягає у можливості використання як для точних наук (фізика, біологія, астрономія), так і для гуманітарних дисциплін (історія, мистецтво, культурна спадщина). Це дає змогу поєднувати навчання з елементами ігрової взаємодії, що стимулює дослідницьку активність і поліпшує якість засвоєння знань. Загалом основні дослідження такі:

1. Розроблено інформаційну технологію упровадження AR/VR у навчальний процес як замкнену систему  $IT = \{D, P, F, G, E, L_c, L_s, L_a\}$ , що містить алгоритми, методи та архітектурну модель, орієнтовану на інтеграцію мультимедійних ресурсів у навчальні дисципліни. Вона забезпечує повний цикл від формулювання освітніх цілей до оцінювання ефективності.

2. Експериментальна апробація технології на прикладі низки прототипів ( $S_1, S_2, \dots, S_k$ ) продемон-

струвала, що  $\forall S_i \in IT: E(S_i) > 0$ , тобто підтвердила її функціональність і доцільність застосування для дисциплін із просторовою складовою (біології, географії, астрономії, анатомії). Кожна реалізація сприяла підвищенню мотивації та рівня засвоєння знань.

3. Порівняльний аналіз із результатами інших досліджень показав, що технологія узгоджується з міжнародними тенденціями: AR/VR підвищують мотивацію, покращують засвоєння знань і створюють нові формати віртуальних екскурсій. Порівняння з контрольними групами підтвердило статистично значущий ефект  $\Delta E = E_{exp} - E_{ctrl} \geq \varepsilon$ , де  $\varepsilon > 0$  – мінімально значущий рівень ефективності.

4. Практична значущість та придатність полягає у гнучкості її застосування (у школах та університетах ( $D_{edu}$ ), у музеях та туристичній сфері ( $D_{cult}$ )), тобто у можливості використання технології як у закладах освіти, так і в музеях та туристичних установах, що розширяє сферу її застосування.

5. Подальші дослідження доцільно спрямувати на довготривале оцінювання ефективності технології, стандартизацію метрик навчального впливу та розроблення адаптивних систем підтримки викладачів. Зокрема, майбутні дослідження передбачають розроблення розширеної моделі  $E' = f(E, \tau)$ , де  $\tau$  – час збереження знань, що дасть змогу оцінити довгострокову результативність використання AR/VR у навчанні.

Отже, новизна полягає у формалізованій математичній моделі й алгоритмах, що описують повний цикл роботи технології, а інноваційність – у комбінуванні різних класів платформ (no-code та Unity), інтеграції AR і VR у єдину архітектуру та додаванні аналітичного модуля для об'єктивного оцінювання ефективності.

- Формалізація інформаційної технології AR/VR у навчанні як системи  $IT = \{D, P, F, G, E, L_c, L_s, L_a\}$ , що вперше описує повний цикл – від аналізу навчальних потреб ( $D$ ) і вибору платформи ( $P$ ) до створення сценаріїв ( $F$ ), інтерактивної взаємодії ( $G$ ) та оцінювання ефективності ( $E$ ) з урахуванням архітектурних рівнів ( $L_c, L_s, L_a$ ).
- Алгоритм адаптивного вибору платформи  $P^*(t, c) = \arg \max_{p_j} U(p_j, t, c)$ , який дає змогу оптимально поєднувати WebAR та Unity / Vuforia залежно від освітніх завдань і технічних умов.
- Математична модель оцінювання ефективності впровадження AR/VR у навчання  $E = \alpha K + \beta M + \gamma S$ , де  $K$  – знання,  $M$  – мотивація,  $S$  – задоволеність;  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ . Ця модель формалізує комплексний підхід до оцінювання освітнього ефекту.

#### Інноваційність

- Інтеграція no-code платформ і професійних середовищ у єдиний технологічний цикл: учителі та студенти можуть швидко створювати прості AR-сцени у WebAR, а складні та високоякісні рішення реалізуються у Unity та Vuforia. Такий підхід забезпечує баланс між доступністю та професійною якістю.

- Модульна архітектура ( $IT = \langle L_c, L_s, L_a \rangle$ ), що дає змогу масштабувати систему від окремих уроків до комплексних віртуальних турів або навчальних платформ.
- Поєднання AR і VR у межах однієї технології: використання AR-сцен для інтерактивних об'єктів та VR-панорам 360° для віртуальних екскурсій, що розширює межі застосування технології у різних галузях (освіта, культура, туризм).
- Аналітичний модуль у складі архітектури, який автоматично збирає дані про використання AR/VR-сцен і дає можливість кількісно оцінювати їхню результативність.

У підсумку розроблено універсальну концепцію інтеграції AR- та VR-рішень у навчальний процес і позаосвітні заходи, яка поєднує безкодові інструменти із професійними платформами, забезпечуючи ефективність, доступність та масштабованість освітніх ресурсів. Такий підхід сприяє створенню нової моделі навчання, де учні можуть взаємодіяти з цифровим контентом, занурюватися у віртуальні середовища та вчитися у форматі, максимально наближеному до практики. Це відкриває перспективи для подальших досліджень та комерційних освітніх продуктів.

#### References

1. Chang, H. Y., Binali, T., Liang, J. C., Chiou, G. L., Cheng, K. H., Lee, S. W. Y., & Tsai, C. C. (2022). Ten years of augmented reality in education: A meta-analysis of (quasi-) experimental studies to investigate the impact. *Computers & Education*, 191, 104641. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104641>
2. Salimi, S., Asgari, Z., Mohammadnejad, A., Teimazi, A., & Bakhtiari, M. (2024). Efficacy of virtual reality and augmented reality in anatomy education: A systematic review and meta-analysis. *Anatomical Sciences Education*, 17(9), 1668–1685. <https://doi.org/10.1002/ase.2501>
3. Williams, A., Sun, Z., & Vaccarezza, M. (2025). Comparison of augmented reality with other teaching methods in learning anatomy: a systematic review. *Clinical Anatomy*, 38(2), 168–185. <https://doi.org/10.1002/ca.24234>
4. Vidak, A., Šapić, I. M., Mešić, V., & Gomzi, V. (2024). Augmented reality technology in teaching about physics: a systematic review of opportunities and challenges. *European journal of physics*, 45(2), 023002. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ad0e84>
5. O'Brien, E., Jacquouton, B., Moineau, A., & Campbell, A. G. (2019, October). Wikipedia in virtual reality and howtext-based media can be explore in virtual reality. In Proceedings of the 2019 international conference on artificial intelligence and advanced manufacturing (pp. 1–9). <https://doi.org/10.1145/3358331.335840>
6. Barth, N. C., Stock, G. M., & Atit, K. (2022). From a virtual field trip to geologically reasoned decisions in Yosemite Valley. *Geoscience Communication*, 5(1), 17–28. <https://doi.org/10.5194/gc-5-17-2022>
7. Garzón, J., Pavón, J., & Baldiris, S. (2019). Systematic review and meta-analysis of augmented reality in educational settings. *Virtual reality*, 23(4), 447–459. <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00379-9>
8. Zhang, J., Li, G., Huang, Q., Feng, Q., & Luo, H. (2022). Augmented reality in K–12 education: A systematic review and meta-analysis of the literature from 2000 to 2020. *Sustainability*, 14(15), 9725. <https://doi.org/10.3390/su14159725>

9. Zhu, E., Hadadgar, A., Masiello, I., & Zary, N. (2014). Augmented reality in healthcare education: an integrative review. *PeerJ*, 2, e469. <https://doi.org/10.7717/peerj.469>
10. Ziden, A. A., Ziden, A. A. A., & Ifedayo, A. E. (2022). Effectiveness of augmented reality (AR) on students' achievement and motivation in learning science. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 18(4), em2097. <https://doi.org/10.29333/ejmste/11923>
11. Rus, B. A., & Sita, I. V. (2025). A Review on Augmented Reality in Education and Geography: State of the Art and Perspectives. *Applied Sciences*, 15(13), 7574. <https://doi.org/10.3390/app15137574>
12. Virtual Field Trips, American Museum of Natural History, <https://www.amnh.org/plan-your-visit/field-trips/virtual>
13. Charr, M. (2024). How Museums are using Augmented Reality. *Virtual & Augmented Reality*. <https://www.museumnext.com/article/how-museums-are-using-augmented-reality/>
14. Watercutter, A. (2019). This 8-Minute Galactic Primer Is the Future of AR Education. *WIRED*. <https://www.wired.com/story/how-we-learn-augmented-reality-wonderscope/>
15. Putrayasa, I. B., & Sanjaya, D. B. (2025). Innovation of Augmented Reality Learning Media Using Assemblr Edu to Improve Science Learning Motivation and Outcomes of Sixth Grade Students. *Journal of Innovation and Research in Primary Education*, 4(3), 1137–1151. <https://doi.org/10.56916/jirpe.v4i3.1964>
16. Powerd by PlugXR. <https://www.pluginr.com/case-studies>
17. Prasetya, F., Fortuna, A., Samala, A. D., Rawas, S., Mystakidis, S., Wulansari, R. E., & Kassymova, G. K. (2024). The impact of augmented reality learning experiences based on the motivational design model: A meta-analysis. *Social Sciences & Humanities Open*, 10, 100926. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2024.100926>
18. Assemblr. Use Case. <https://www.assemblrworld.com/tags/use-case>

**S. L. Chyrun, V. A. Vysotska**

*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

## **AUGMENTED REALITY INFORMATION TECHNOLOGY BASED ON AR-CONSTRUCTORS AND GAMIFICATION FOR INTERACTIVE THEMATIC LEARNING**

This paper presents a comprehensive study on the development and application of augmented reality (AR) and virtual reality (VR) technologies for interactive thematic learning and cultural heritage exploration. The main objective is to design an information technology framework that combines the accessibility of no-code AR constructors with the flexibility of professional development environments, enabling teachers and students to create educational content without requiring advanced programming skills. The study reviews and evaluates widely used AR platforms such as Artivive, Assemblr, PlugXR, Onirix, and Vuforia, focusing on their capabilities in free versions and their suitability for educational purposes. Several demonstrative projects were implemented, including a video collage of the university department in Artivive, an interactive 2D Solar System model in Assemblr, a virtual tour of Pidhirtsi Castle in PlugXR, anatomical 3D scenes of human organs in Onirix, and a custom AR mobile application “Kvitka” built in Unity with Vuforia integration for image tracking and 3D visualization of biological objects. Additionally, a set of VR 360° panoramas was created to expand immersion and provide opportunities for virtual tours of real environments. The testing and comparative analysis showed that AR and VR technologies significantly improve student engagement, motivation, and knowledge retention across multiple disciplines such as biology, geography, history, astronomy, and anatomy. The proposed methodology highlights the advantages of integrating AR scenes with pedagogical goals, balancing gamification with educational value, and ensuring accessibility through mobile apps and WebAR solutions. The research also identifies challenges related to technical barriers, teacher training, and evaluation of long-term learning outcomes. The novelty of the work lies in its combined approach: rapid prototyping of AR scenarios with no-code platforms and the development of scalable professional applications in Unity, further enhanced with VR panoramas for complete immersion. The results demonstrate that the integration of AR and VR supports a new model of interactive education and online excursions, adaptable to different academic levels and subject areas, and applicable not only in schools and universities but also in museums and tourism. This contributes to creating engaging digital learning environments that connect visual interactivity, gamification, and cultural enrichment, opening new perspectives for future research and innovative educational products.

**Keywords:** augmented reality, virtual reality, AR constructors, AR designers, gamification, interactive learning, virtual tours, Unity, Vuforia, 3D models, VR 360°, educational technologies.

### **Інформація про авторів:**

**Чирун Софія Любомирівна**, студент, кафедра інформаційно-комунікаційних технологій.

**Email:** sofia.chyrun.sa.2022@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-2829-0164>

**Висоцька Вікторія Анатоліївна**, д-р техн. наук, професор, кафедра інформаційних систем та мереж.

**Email:** victoria.a.vysotska@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-6417-3689>

**Цитування за ДСТУ:** Чирун С. Л., Висоцька В. А. Інформаційна технологія доповненої реальності на основі AR-конструкторів та гейміфікації для інтерактивного тематичного навчання. *Український журнал інформаційних технологій*. 2025. Т. 7, № 2. С. 67–81.

**Citation APA:** Chyrun, S. L., & Vysotska, V. A. (2025). Augmented reality information technology based on AR-constructors and gamification for interactive thematic learning. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 7(2), 67–81. <https://doi.org/10.23939/ujit2025.02.67>