

Ю. В. Максим'юк, О. М. Федчук, О. В. Строк

Київський національний університет будівництва і архітектури

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ В ТЕХНІЧНИХ НАУКАХ: ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

*Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оптимізації технічних процесів за допомогою технологій доповненої реальності (AR), які підвищують продуктивність, точність і ефективність. Метою є оцінювання впливу AR на технічні процеси та розроблення рекомендацій для її інтеграції. Методи включають аналіз літератури, моделювання економічного ефекту та прикладні розрахунки. Результати показують, що AR скорочує час виконання завдань, знижує витрати та покращує якість продукції. У висновках наголошено на необхідності розроблення стандартів, підготовки персоналу та впровадження пілотних проєктів для ефективною інтеграції AR.*

*Ключові слова:* віртуальні інтерфейси, цифрове моделювання, інтерактивні системи.

Y. Maksymiuk, O. Fedchuk, O. Strok

## RESEARCH ON AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES IN TECHNICAL SCIENCES: PRACTICAL APPLICATION

*The relevance of the study is determined by the need to optimize technical processes through augmented reality (AR) technologies, which enhance productivity, accuracy, and efficiency. The aim is to evaluate the impact of AR on technical processes and develop recommendations for its integration. Methods include literature analysis, modeling of economic effects, and applied calculations. The results demonstrate that AR reduces task completion time, lowers costs, and improves product quality. The conclusions emphasize the need for standardization, personnel training, and pilot projects to ensure effective AR integration.*

*Keywords:* virtual interfaces, digital modeling, interactive systems.

**Постановка проблеми.** Доповнена реальність як технологія, що інтегрує віртуальні елементи у фізичний простір, відкриває нові можливості для розв'язання складних технічних завдань, що раніше були недосяжними або обмеженими традиційними методами. У контексті технічних наук ця технологія дозволяє моделювати складні інженерні процеси, візуалізувати об'єкти, які ще не створені, та оптимізувати робочі процеси завдяки інтерактивній взаємодії між людиною та системою. Водночас широке застосування доповненої реальності зіштовхується з низкою проблем, зокрема високими вимогами до апаратного забезпечення, відсутністю універсальних стандартів розроблення, а також необхідністю адаптації до специфічних потреб різних галузей. Сучасні наукові дослідження спрямовані на подолання цих перешкод та створення ефективних рішень, які відповідають вимогам інженерної, виробничої та освітньої сфер. Практична цінність полягає у створенні інтерактивних середовищ для підготовки фахівців, моделювання технологічних процесів і підвищення продуктивності завдяки швидшому прийняттю рішень на основі візуалізованих даних. Такі завдання вимагають міждисциплінарного підходу та адаптації наявних моделей взаємодії в контексті технічних і соціальних викликів сучасності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Технології доповненої реальності (далі – AR) у контексті технічних наук охоплюють широкий спектр досліджень, які висвітлюють різні аспекти впровадження, застосування та перспектив розвитку цих інноваційних рішень. У статті В. Цибуленка та його співавторів детально розглянуто приклади використання AR у машинобудуванні, зокрема для оптимізації виробничих процесів, скорочення часу на виконання завдань і зниження витрат. Авторами також відзначено значний потенціал AR для зменшення кількості помилок у складальних процесах завдяки інтерактивним інструкціям та тривимірному моделюванню [1].

Термінологічні аспекти, а також специфіку комп'ютерних систем, які підтримують AR, дослідила В. Волинець. Ця наукова розвідка важлива для побудови чіткої класифікації технологій віртуальної, доповненої та змішаної реальності, що сприяє їх інтегрованому використанню в міждисциплінарних дослідженнях [2].

Робота Е. Abad-Segura і його команди є аналізом того, як AR-технології впливають на стійкість освітніх систем, забезпечуючи інтерактивність, залучення користувачів і підвищення мотивації до навчання. Їхній підхід має значення для використання AR в освітніх програмах

© Ю. В. Максим'юк, О. М. Федчук, О. В. Строк

технічних наук, де складний матеріал може бути візуалізований у реальному часі [3]. R. Hidayat та Y. Wardat систематизували наявні дослідження щодо застосування AR у STEM-дисциплінах, демонструючи, як ці технології сприяють підвищенню навчальних результатів і зацікавленості здобувачів вищої освіти [4]. Результати експериментів, які підтверджують позитивний вплив AR на мотивацію користувачів в освітніх середовищах, зокрема в технічних галузях, представлено в статті J. Cabero-Almenara [5].

Вплив AR на промислове виробництво, особливо в умовах Індустрії 4.0, проаналізували E. Bottani та G. Vignali. Їх дослідження підкреслює ефективність AR у забезпеченні точності виробничих процесів, моніторингу стану обладнання та підвищенні безпеки на виробництві [6]. F. Arena та колеги розглянули широкий спектр можливостей AR, підкресливши її важливість для проектування складних технічних систем і тестування їх функціональності [7]. Y. Chen зі співавторами сфокусувалися на використанні AR для візуалізації даних у реальному часі, що дозволяє значно покращити точність прийняття рішень у складних системах [8].

T. Syed та ін. зосередили увагу на технічних аспектах AR, як-от трекінг, інструменти розроблення та AR-дисплеї, а також підкреслили необхідність посилення безпеки даних під час роботи з такими системами. Ці аспекти є ключовими для масштабного впровадження AR у промисловості [9]. У дослідженні B. Bergman і D. Pollack представили стратегії успішного впровадження AR у бізнес-середовищі, акцентуючи на таких організаційних бар'єрах, як навчання персоналу та адаптація процесів до нових технологій [10].

Комплексний аналіз впровадження AR у промислових галузях, включаючи виклики інтеграції та перспективи адаптації технологій до різних виробничих середовищ, провели L. De Souza Cardoso, F. Mariano та E. Zorza [11]. M. Gattullo і його колеги розробили методіку створення інтерактивних інструкцій для роботи з AR у промисловості, що підвищує ефективність і точність виконання завдань [12]. Застосування AR у будівництві проаналізували A. Oke і V. Agowoiya, наголошуючи на її потенціалі для покращення управління проектами та оцінки конструкцій [13].

S. Zollmann, T. Langlotz, R. Grasset, W. Lo, S. Mori та H. Regenbrecht запропонували класифікацію методів візуалізації в AR, які можна адаптувати для широкого спектра технічних завдань. Ця робота є важливим внеском у розвиток методологічної бази для роботи з AR [14].

Таким чином, у дослідженнях підтверджено значний потенціал AR у підвищенні ефективності технічних процесів, поліпшенні візуалізації даних, автоматизації виробничих рішень і навчанні. Водночас підкреслено про необхідність подальших досліджень щодо відповіді на виклики інтеграції, створення стандартів і покращення методів безпеки.

Попри значний прогрес у дослідженні технологій доповненої реальності (AR), залишаються не досить вивченими кілька важливих аспектів. Відсутній комплексний аналіз сучасного стану розвитку AR у контексті технічних наук, що ускладнює розуміння загальних тенденцій та можливостей їх застосування. Можливості AR для оптимізації інженерних процесів і цифрового моделювання досліджено недостатньо, особливо в практичних умовах, де їхній вплив на продуктивність та ефективність потребує більш глибокої емпіричної оцінки.

Технічні та організаційні виклики, як-от відсутність стандартів, складності інтеграції з наявними системами та навчання персоналу, залишаються недопрацьованими, що стримує масштабування AR. Крім того, відсутність універсальних методів оцінювання впливу AR на продуктивність обмежує можливість об'єктивного порівняння результатів у різних галузях.

Запропоноване дослідження сприятиме заповненню цих прогалів, зокрема через системний аналіз, оцінювання практичного впливу AR на технічні процеси, а також розроблення рекомендацій для подолання бар'єрів і впровадження AR у різні сфери. Це дозволить розширити наукове розуміння доповненої реальності й створити базу для подальших міждисциплінарних досліджень.

**Метою статті** є дослідження практичних можливостей застосування технологій доповненої реальності в технічних науках з акцентом на їх вплив на вдосконалення цифрового моделювання, створення інтерактивних систем та інтеграцію віртуальних інтерфейсів у виробничі й освітні процеси.

Завдання статті:

- 1) провести аналіз сучасного стану розвитку технологій доповненої реальності в контексті технічних наук та визначити перспективи їх застосування;
- 2) дослідити можливості використання доповненої реальності для оптимізації інженерних процесів і цифрового моделювання з акцентом на підвищенні ефективності технічних рішень;

3) розробити рекомендації для подолання технічних та організаційних бар'єрів упровадження AR у практичну діяльність з огляду на її вплив на продуктивність і специфіку різних галузей.

**Виклад основного матеріалу.** Технології доповненої реальності (AR) займають дедалі вагомніше місце в технічних науках, надаючи нові можливості для розв'язання складних завдань. Вони дозволяють інженерам і проєктувальникам інтерактивно працювати з віртуальними об'єктами, моделювати процеси, проводити випробування в цифровому середовищі та вдосконалювати виробничі операції. Від розроблення нових механізмів до моніторингу стану складних систем, AR забезпечує інноваційний підхід до створення рішень, спрямованих на підвищення ефективності, точності та економічності. У технічних науках AR стає особливо актуальною в умовах сучасних викликів та змін у технологічному середовищі (табл. 1).

Табл. 1

**Можливості та перспективи використання технологій доповненої реальності в технічних науках**

Напрямок застосування	Технологічні можливості	Результати
Машинобудування	Моделювання конструкцій, інтерактивне тестування прототипів, візуалізація роботи механізмів	Зменшення потреби у фізичних моделях, скорочення часу розроблення
Енергетика	Моніторинг стану обладнання, прогнозування несправностей, оптимізація аварійних сценаріїв	Підвищення безпеки експлуатації та зниження ризиків простою
Автоматизація виробничих процесів	Інтерактивні інструкції для операторів, моделювання роботизованих систем	Покращення точності виконання складальних операцій
Архітектурне моделювання	Цифрові двійники проєктів, оцінювання інтеграції об'єктів у навколишнє середовище	Полегшення етапу планування та оптимізація проєктних рішень

Джерело: сформовано авторами на підставі [1; 4; 6; 11; 13]

У машинобудуванні використання AR дозволяє відмовитися від дорогих фізичних моделей, адже всі тестування та моделювання можна провести віртуально. Наприклад, інженери можуть взаємодіяти із цифровими двійниками механізмів, аналізувати їх роботу та одразу вносити корективи в проєкт. У галузі енергетики AR допомагає забезпечувати безперервну роботу обладнання, дозволяючи операторам у реальному часі відслідковувати його стан та прогнозувати можливі поломки. Такі рішення мінімізують ризики аварій і забезпечують стабільність енергопостачання.

У сфері автоматизації виробничих процесів AR інтегрується в складальні лінії, де працівники за допомогою інтерактивних інструкцій можуть швидко й точно виконувати складні операції. Це не тільки скорочує час виконання завдань, а й знижує ймовірність помилок. В архітектурному моделюванні AR сприяє створенню детальних цифрових моделей, які дозволяють оцінити інтеграцію будівель у реальне середовище та своєчасно внести необхідні зміни, забезпечуючи відповідність проєкту технічним і естетичним вимогам.

Технології доповненої реальності активно впроваджуються в інженерні процеси, забезпечуючи значну оптимізацію моделювання, проєктування та аналізу. Використання AR дозволяє створювати інтерактивні моделі, які дають змогу інженерам проводити віртуальне тестування, оцінювати конструктивні рішення та здійснювати модифікації в реальному часі. Це не лише прискорює розроблення складних технічних систем, але й знижує витрати на виготовлення фізичних прототипів [8]. Технологія забезпечує можливість інтегрувати віртуальні об'єкти в реальне середовище, що сприяє покращенню точності моделювання та дозволяє враховувати специфіку експлуатаційних умов. AR також є інструментом для аналізу ризиків і перевірки альтернативних рішень на ранніх етапах проєктування (табл. 2).

Доповнена реальність суттєво трансформує інженерні процеси на всіх етапах їх реалізації. У проєктуванні вона забезпечує можливість створювати віртуальні моделі з інтерактивною перевіркою відповідності технічним вимогам. Це дозволяє зменшити кількість помилок ще до початку виготовлення фізичних деталей. На етапі тестування AR використовується для

моделювання поведінки механізмів під різними навантаженнями, що допомагає оцінювати надійність і безпеку конструкцій без фізичних експериментів. У виробництві інтерактивні інструкції дозволяють працівникам виконувати складальні операції з високою точністю, навіть без глибокого досвіду. Наприклад, у робототехніці AR застосовується для програмування складальних робіт із покроковими вказівками. У контролі якості доповнена реальність дає змогу оперативно виявляти дефекти в продукції, що дозволяє уникнути серйозних витрат на їх виправлення в майбутньому.

Табл. 2

**Використання технологій доповненої реальності на етапах інженерного процесу**

Етапи інженерного процесу	Можливості доповненої реальності	Очікуваний ефект
Проектування	Віртуальне моделювання деталей, інтерактивна перевірка відповідності технічним вимогам	Підвищення точності, зменшення кількості помилок
Тестування	Симуляція роботи механізмів у реальних умовах, аналіз навантажень	Скорочення часу на перевірку рішень, підвищення безпеки
Виробництво	Інтерактивні інструкції для збирання та налаштування обладнання	Покращення продуктивності, мінімізація ризику людських помилок
Контроль якості	Візуалізація дефектів у реальному часі, моніторинг стану обладнання	Зниження витрат на усунення дефектів

Джерело: сформовано авторами на підставі [8; 9]

До того ж технології доповненої реальності суттєво розширюють можливості цифрового моделювання, яке є важливою складовою частиною сучасних інженерних процесів [2]. Завдяки AR створюються інтерактивні тривимірні моделі, що дозволяють проєктувальникам і конструкторам не лише візуалізувати об'єкти у віртуальному середовищі, а й інтегрувати їх у реальний контекст. Це відкриває доступ до більш точного аналізу параметрів конструкцій, їх функціонування та відповідності заданим умовам. Доповнена реальність дозволяє моделювати поведінку систем у реальному часі, включаючи аналіз їх взаємодії з навколишнім середовищем, що є критично важливим для складних інженерних рішень (табл. 3).

Цифрове моделювання з використанням доповненої реальності відкриває нові горизонти для аналізу, оптимізації та інтеграції конструкцій у реальне середовище. Візуалізація складних об'єктів у тривимірному просторі сприяє кращому розумінню їхньої структури і функціональності [3]. Наприклад, у машинобудуванні інженери можуть візуалізувати внутрішні механізми двигунів, що забезпечує спільне прийняття рішень у командах. Аналіз конструкцій з використанням AR дозволяє моделювати поведінку об'єктів під час навантажень, виявляти слабкі місця і швидко коригувати їх у віртуальному середовищі. Це скорочує час і витрати на фізичні тестування.

Оптимізація за допомогою AR дає можливість створювати і тестувати кілька альтернативних варіантів конструкцій, що дозволяє вибрати найбільш ефективне рішення. Наприклад, у будівництві архітектори можуть випробовувати різні типи фасадних матеріалів, оцінюючи їх стійкість до кліматичних умов. Контекстне моделювання є ще одним важливим аспектом: AR дозволяє перевірити, як конструкція виглядатиме та функціонуватиме в реальних умовах, ураховуючи просторові, екологічні або кліматичні фактори [8]. Це критично важливо, наприклад, для проєктування мостів або висотних споруд, де точність і адаптивність є ключовими показниками успішності.

Доповнена реальність (AR) здатна значно підвищувати продуктивність та знижувати витрати в технічних процесах завдяки оптимізації часу виконання завдань, зменшенню кількості помилок і підвищенню якості продукції. Основним економічним ефектом від використання AR є скорочення витрат на виробництво, зменшення часу виконання робіт і забезпечення точності операцій. Щоб об'єктивно оцінити ефективність упровадження AR, слід застосовувати підхід, заснований на розрахунку економії ресурсів і фінансових вигод.

**Можливості доповненої реальності в цифровому моделюванні**

Аспекти цифрового моделювання	Можливості доповненої реальності	Результат
Візуалізація	Створення інтерактивних 3D-моделей, інтеграція об'єктів у реальний простір	Покращення комунікації між командами розробників
Аналіз конструкцій	Симуляція навантажень, оцінювання деформацій, перевірка відповідності технічним стандартам	Скорочення потреби у фізичних прототипах
Оптимізація	Перевірка альтернативних варіантів рішень у віртуальному середовищі	Вибір найефективніших варіантів рішень
Контекстне моделювання	Інтеграція моделей у реальні умови, аналіз їх функціональності на місцевості	Точний прогноз функціональності в реальних умовах

*Джерело: сформовано авторами на підставі [12; 14]*

Основні показники включають скорочення тривалості виробничого циклу, підвищення продуктивності працівників і зменшення витрат на помилки. Практичний економічний ефект від AR визначається на основі часу, що зекономлено, та відповідного зниження витрат. Формули розрахунку:

1. Часова економія:

$$\Delta T = T_{\text{без AR}} - T_{\text{з AR}}, \quad (1)$$

де  $\Delta T$  – скорочення часу,  $T_{\text{без AR}}$  – час виконання завдання до впровадження AR,  $T_{\text{з AR}}$  – час після впровадження AR.

2. Економія витрат на оплату праці:

$$E_{\text{праці}} = \Delta T * C_{\text{години}} * N, \quad (2)$$

де  $E_{\text{праці}}$  – економія витрат на робочу силу,  $C_{\text{години}}$  – вартість години роботи,  $N$  – кількість працівників.

3. Загальний економічний ефект:

$$E_{\text{загальний}} = E_{\text{праці}} - E_{\text{впровадження}}, \quad (3)$$

де  $C_{\text{впровадження}}$  – витрати на впровадження AR (обладнання, навчання, обслуговування).

Припустимо, на виробничому підприємстві здійснюється виготовлення складного механізму. До впровадження доповненої реальності час складання одного механізму становив 120 хвилин, а в процесі брали участь двоє працівників, кожен із середньою погодинною оплатою 400 гривень. Після впровадження AR час виконання завдання скоротився до 90 хвилин завдяки інтерактивним інструкціям та віртуальній візуалізації порядку складання. Загальні витрати на впровадження AR, включаючи закупівлю обладнання, навчання персоналу та налаштування системи, становили 60 000 гривень. У місяць підприємство виробляє 300 таких механізмів.

На кожному механізмі завдяки AR економлять 30 хвилин часу, тобто 0,5 години. Якщо врахувати, що працюють двоє працівників, то загальна економія часу становить 1 людино-годину на кожному механізмі. З огляду на погодинну оплату праці 400 гривень економія на складанні одного механізму становить саме 400 гривень. Для всіх 300 механізмів, що виготовляються протягом місяця, загальна економія – 120 000 гривень.

Витрати на впровадження AR окупуються за один місяць, адже загальна економія вдвічі перевищує початкові інвестиції в 60 000 гривень. До того ж скорочення часу виконання завдань дає змогу збільшити обсяги виробництва без додаткових витрат, а використання інтерактивних інструкцій знижує кількість помилок під час складання, що додатково зменшує витрати на усунення дефектів і підвищує якість продукції.

Так, застосування AR на підприємстві демонструє значний практичний ефект, адже не тільки сприяє економії часу та коштів, але й підвищує ефективність і якість технічних процесів, створює конкурентні переваги для підприємств, дозволяючи їм залишатися інноваційними й адаптивними до сучасних викликів.

Впровадження технологій доповненої реальності (AR) у практичну діяльність відкриває перед інженерами, розробниками та керівниками організацій широкі перспективи, проте цей процес супроводжується низкою технічних і організаційних викликів, які формують нову реальність взаємодії з інноваціями. Одним із найбільших технічних бар'єрів є потреба у високопродуктивному апаратному забезпеченні, яке здатне створити реалістичну візуалізацію та точну синхронізацію віртуальних об'єктів із реальним середовищем. Наприклад, шоломи доповненої реальності чи інтерактивні дисплеї часто вимагають значних обчислювальних ресурсів, що робить їх інтеграцію в мобільні чи віддалені умови надзвичайно складним завданням. Необхідність стабільного підключення до високошвидкісного інтернету або локальних мереж також суттєво поглиблює цю проблему.

Іншою серйозною проблемою є нестача стандартизації у сфері AR. Кожен розробник використовує власні платформи, інструменти та архітектури, що ускладнює інтеграцію цих рішень із наявними системами. Наприклад, у виробничій сфері часто необхідно налаштувати AR-додатки так, щоб вони взаємодіяли з роботизованими механізмами або ERP-системами, а відсутність єдиних стандартів ускладнює цей процес, змушуючи організації витрачати ресурси на розроблення кастомізованих рішень.

З організаційного погляду важливо враховувати людський фактор, адже AR не лише змінює підхід до виконання завдань, але й вимагає від працівників нового способу мислення. Наприклад, технічний персонал, який звик працювати з традиційними інструментами, може скептично ставитися до впровадження AR через страх утратити контроль над процесами. Навчання та підвищення кваліфікації працівників є важливою складовою частиною впровадження, але потребує часу і значних витрат. До того ж менеджери зіштовхуються з питанням адаптації робочих процесів до нових технологій, які часто порушують усталені алгоритми роботи.

Фінансові аспекти додають ще один шар складності. Інвестиції в AR включають не лише закупівлю обладнання, але й створення унікального програмного забезпечення, налаштування технічної інфраструктури та витрати на підтримку цих систем. Однак навіть після впровадження виникає потреба в постійній модернізації, оскільки технології швидко оновлюються і невідповідність сучасним вимогам може стати причиною втрати конкурентних переваг.

Символічно, що саме AR – технологія, яка стирає межі між віртуальним і реальним – сама стає об'єктом цього протистояння: нові технічні можливості зіштовхуються із застарілими підходами до організації робочих процесів.

Інтеграція технологій доповненої реальності в технічні науки та суміжні галузі вимагає системного підходу, що враховує специфіку використання AR у різних сценаріях. Першочерговим завданням є створення інфраструктури, здатної підтримувати обчислювальні потреби AR-систем. Це включає вибір апаратного забезпечення, яке відповідає специфічним вимогам галузі, та адаптацію наявних систем до роботи з AR. Наприклад, для промислових підприємств важливо інтегрувати AR із системами автоматизації виробничих процесів, як-от SCADA або ERP, щоб забезпечити безперебійну роботу на всіх етапах виробництва [7].

Важливим аспектом є підготовка персоналу до роботи з новими технологіями. Навчальні програми повинні поєднувати теоретичну базу з практичними заняттями, які дозволяють працівникам не лише зрозуміти можливості AR, але й адаптувати її до специфіки своєї діяльності. У технічних науках це може включати симуляції для підготовки інженерів, які працюватимуть із тривимірними моделями механізмів, чи віртуальні лабораторії для тестування конструктивних рішень.

Значну увагу необхідно приділити розробленню та впровадженню стандартів для використання AR. Відсутність уніфікованих підходів ускладнює процес інтеграції, особливо для міждисциплінарних проєктів [7]. Розв'язання цього питання можливе через створення універсальних протоколів взаємодії між AR-додатками та наявними інформаційними системами [15]. Для архітектурного моделювання це може бути стандартизація форматів даних, що дозволить легше інтегрувати AR у BIM-системи, а в машинобудуванні – розроблення протоколів для обміну даними між CAD-моделями та AR-додатками.

Розроблення програмного забезпечення для AR має враховувати гнучкість системи та можливість її масштабування [10]. Це дозволить адаптувати рішення для різних галузей, зокрема інженерії, енергетики чи робототехніки. Наприклад, для виробничих підприємств важливо

забезпечити можливість оновлення AR-додатків відповідно до змін у процесах або появи нових вимог до обладнання.

Окремим питанням є оптимізація витрат на впровадження AR. Це можна досягти через залучення партнерів, які спеціалізуються на розробленні відповідних рішень, а також через державні програми підтримки інновацій. Для закладів освіти це може бути спільна розробка програм із компаніями-розробниками, що дозволить створити навчальні симулятори без суттєвого навантаження на бюджет.

Ефективна інтеграція AR потребує оцінювання потенційних ризиків, як-от кібербезпека чи конфіденційність даних, особливо у виробничих середовищах [10]. Впровадження рішень має враховувати можливі загрози та передбачати механізми їх запобігання. Наприклад, у робототехніці та автоматизації виробництва необхідно забезпечити захист від несанкціонованого доступу до систем, що використовують AR.

Практична інтеграція AR також передбачає проведення пілотних проєктів, які дозволяють оцінити ефективність рішень і виявити можливі недоліки ще до масштабного впровадження. Вибір сценаріїв для таких проєктів має враховувати як технічні можливості, так і актуальні потреби галузі. Наприклад, для архітектурних бюро це може бути тестування AR для візуалізації великих об'єктів, а для інженерних підприємств – оптимізація збирання складних механізмів за допомогою інтерактивних інструкцій.

**Висновки.** Встановлено, що технології доповненої реальності (AR) стають важливим інструментом для оптимізації технічних процесів у таких галузях, як машинобудування, енергетика, автоматизація виробництва та архітектурне моделювання. Використання AR сприяє скороченню часу виконання завдань, підвищенню точності операцій і зниженню витрат на виготовлення фізичних прототипів. Завдяки інтеграції AR забезпечується можливість віртуального тестування та моделювання в реальному часі, що суттєво розширює можливості аналізу та проєктування складних технічних рішень.

Основними проблемами впровадження технологій AR є високі вимоги до апаратного забезпечення, відсутність стандартів розроблення програмного забезпечення, складності інтеграції AR з наявними системами та потреба в підготовці персоналу. Крім того, значним бар'єром є високі початкові інвестиції, необхідні для впровадження технологій AR, а також потреба в розв'язанні питань кібербезпеки та конфіденційності даних.

Рекомендації щодо подолання цих проблем включають розроблення стандартів для інтеграції AR у різні галузі, створення навчальних програм для підготовки фахівців, упровадження пілотних проєктів для тестування ефективності технологій, а також розвиток державно-приватного партнерства для фінансування впровадження AR. Особливу увагу слід приділити адаптації міжнародного досвіду та розробленню універсальних протоколів взаємодії між AR-додатками та наявними інформаційними системами.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з аналізом довгострокового впливу технологій AR на продуктивність та інноваційність технічних процесів, оцінюванням економічної ефективності впровадження AR у масштабних проєктах та розробленням нових моделей інтеграції AR у національну політику. Крім того, важливо вивчити можливості адаптації AR для використання в умовах обмеженого фінансування, а також розробити методології для оцінювання її ефективності в різних галузях.

#### Список використаних джерел:

1. Цибуленко В. О., Шульга Л. І., Назаренко М. С. VR/AR-технології та їх застосування в машинобудуванні. *Інновації молоді в машинобудуванні*. 2020. № 2. С. 478–484. URL: <https://jpaic.aaukr.org/index.php/wissn087/article/view/202559> (дата звернення: 23.11.2024).
2. Волинець В. О. Віртуальна, доповнена і змішана реальність: сутність понять та специфіка відповідних комп'ютерних систем. *Питання культурології*. 2021. № 37. С. 231–243. DOI: <https://doi.org/10.31866/2410-1311.37.2021.237322> (дата звернення: 23.11.2024).
3. Abad-Segura E., González-Zamar M. D., Luque-de la Rosa A., Morales M. E. Sustainability of educational technologies: An approach to augmented reality research. *Sustainability*. 2020. № 12(10). Article 4091. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12104091> (date of access: 23.11.2024).

4. Hidayat R., Wardat Y. A systematic review of augmented reality in science, technology, engineering and mathematics education. *Education and Information Technologies*. 2024. № 29(8). P. 9257–9282. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12157-x> (date of access: 23.11.2024).
5. Cabero-Almenara J., Roig-Vila R. The motivation of technological scenarios in augmented reality (AR): Results of different experiments. *Applied Sciences*. 2019. № 9(14). Article 2907. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9142907> (date of access: 23.11.2024).
6. Bottani E., Vignali G. Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *Iise Transactions*. 2019. № 51(3). P. 284–310. DOI: <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244> (date of access: 23.11.2024).
7. Arena F., Porto S., Pau G., Severino A. An overview of augmented reality. *Computers*. 2022. № 11(2). Article 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers11020028> (date of access: 23.11.2024).
8. Chen Y., Guo Y., He C. An overview of augmented reality technology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. № 1237(2). Article 022082. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1237/2/022082> (date of access: 23.11.2024).
9. Syed T. A., Mariyam H., Bilal M., Zafar S., Tahir M., Zafar N. In-depth review of augmented reality: Tracking technologies, development tools, AR displays, collaborative AR, and security concerns. *Sensors*. 2022. № 23(1). Article 146. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23010146> (date of access: 23.11.2024).
10. Berman B., Pollack D. Strategies for the successful implementation of augmented reality. *Business Horizons*. 2021. № 64(5). P. 621–630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2021.02.027> (date of access: 23.11.2024).
11. De Souza Cardoso L. F., Mariano F. C. M. Q., Zorzal E. R. A survey of industrial augmented reality. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. № 139. Article 106159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106159> (date of access: 23.11.2024).
12. Gattullo M., Fiorentino M., Uva A. E., Debernardis S., Monno G. Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019. № 56. P. 276–286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.001> (date of access: 23.11.2024).
13. Oke A. E., Arowoia V. A. An analysis of the application areas of augmented reality technology in the construction industry. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2022. № 11(4). P. 1081–1098. DOI: <https://doi.org/10.1108/sasbe-11-2020-0162> (date of access: 23.11.2024).
14. Zollmann S., Langlotz T., Grasset R., Lo W. H., Mori S., Regenbrecht H. Visualization techniques in augmented reality: A taxonomy, methods and patterns. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2021. № 27(9). P. 3808–3825. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2986247> (date of access: 23.11.2024).
15. Masood T., Egger J. Adopting augmented reality in the age of industrial digitalisation. *Computers in Industry*. 2020. № 115. Article 103112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.07.002> (date of access: 23.11.2024).