

М. В. БЕБЕХ

незалежний дослідник

Astro Machine Corporation (дочірня компанія AstroNova, Inc.)

ORCID: 0009-0007-5126-5438

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АІ ДЛЯ ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ НАВЧАННЯ З 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДРУКУ В STEM-ОСВІТІ

Актуальність дослідження зумовлена низьким рівнем впровадження 3D-принтерів у закладах освіти України, відсутністю адаптивних методик навчання та складністю оволодіння 3D-технологіями без індивідуальної підтримки. З огляду на швидкий розвиток АІ та зростання ролі 3D-друку в інженерній освіті, виникає потреба у створенні ефективних інтелектуальних інструментів, здатних покращити засвоєння студентами технічних навичок. Метою дослідження є розробка й експериментальна перевірка моделі АІ-персоналізації навчання 3D-моделюванню й 3D-друку з використанням 3D-принтерів Vernerfab у курсах STEM-спрямування. Методологія ґрунтується на порівнянні результатів контрольної та експериментальної груп, де експериментальна взаємодіяла з АІ-модулем, що здійснював аналіз STL-файлів, генерував персоналізовані підказки, рекомендував параметри 3D-друку та адаптував складність завдань. Результати показали суттєві переваги АІ-підтримки: зменшення топологічних помилок на 67%, збільшення частки моделей, придатних до друку з першого разу, на 37 п.п., підвищення точності друку та скорочення часу виконання проєкту приблизно на 30%. Експериментальна група продемонструвала значно вищий приріст навичок складного моделювання та підготовки моделей до друку. Також виявлено позитивний вплив АІ на мотивацію, відчуття підтримки та задоволеність навчанням. У висновках підкреслено, що інтеграція АІ у навчання 3D-моделюванню та 3D-друку є дієвим шляхом персоналізації STEM-освіти та підвищення якості підготовки здобувачів. Застосована модель може бути масштабована для використання в освітніх закладах різного рівня. Перспективи подальших досліджень передбачають розширення функціоналу АІ-системи, інтеграцію багатокomпонентних моделей адаптивного навчання, вивчення довгострокового впливу АІ на успішність студентів.

Ключові слова: 3D-друк, 3D-принтер, АІ-інновації, STEM-освіта, 3D-принтери Vernerfab, АІ у навчанні.

М. В. БЕБЕХ

Independent Researcher

Astro Machine Corporation (a wholly owned subsidiary of AstroNova, Inc.)

ORCID: 0009-0007-5126-5438

PROSPECTS OF USING AI TO PERSONALIZE TEACHING IN 3D MODELING AND PRINTING IN STEM EDUCATION

The relevance of the study is due to the low level of implementation of 3D printers in educational institutions of Ukraine, the lack of adaptive teaching methods and the difficulty of mastering 3D technologies without individual support. Given the rapid development of AI and the growing role of 3D printing in engineering education, there is a need to create effective intellectual tools that can improve students' mastery of technical skills. The purpose of the study is to develop and experimentally test a model of AI-personalization of 3D modelling and 3D printing training using Vernerfab 3D printers in STEM courses. The methodology is based on comparing the results of the control and experimental groups, where the experimental group interacted with an AI module that analyzed STL files, generated personalized prompts, recommended 3D printing parameters and adapted the complexity of tasks. The results showed significant benefits of AI support: a 67% reduction in topological errors, a 37% increase in the proportion of models that are printable the first time, an increase in printing accuracy, and a reduction in project execution time by approximately 30%. The experimental group demonstrated a significantly higher increase in complex modelling skills and model preparation for printing. AI also had a positive impact on motivation, a sense of support, and satisfaction with learning. The conclusions emphasize that integrating AI into 3D modelling and 3D printing education is an effective way to personalize STEM education and improve the quality of student training. The applied model can be scaled for use in educational institutions of various levels. Prospects for further research include expanding the functionality of the AI system, integrating multi-component adaptive learning models, and studying the long-term impact of AI on student success.

Key words: 3D printing, 3D printer, AI innovation, STEM education, Vernerfab 3D printers, AI in education.

Постановка проблеми

Розвиток STEM-освіти вимагає формування у здобувачів освіти компетентностей, пов'язаних з інженерією, цифровим проектуванням та технологічною творчістю. Важливою технологією сучасного інженерного середовища є 3D-моделювання та 3D-друк, що забезпечують повний цикл створення фізичних об'єктів: від проектування у цифровому середовищі до виготовлення на 3D-принтері. Однак ефективне засвоєння цих технологій потребує спеціалізованих знань і навичок, які значною мірою перевищують стандартні можливості шкільних програм.

Розвиваються AI-інновації у сфері освіти відкриває нові можливості персоналізації навчального процесу. Системи штучного інтелекту здатні адаптувати навчальні матеріали, аналізувати помилки, формувати індивідуальні рекомендації та забезпечувати зворотний зв'язок у режимі реального часу. Однак саме в контексті навчання 3D-моделювання та роботи з 3D-принтерами такі системи майже не застосовуються.

Таким чином, проблема полягає у необхідності розробки моделі штучного інтелекту для персоналізації навчання 3D-моделюванню та 3D-друку, яка б забезпечувала:

- адаптивне навчання роботі з 3D-моделями та 3D-принтерами;
- автоматичний аналіз STL-файлів, виявлення критичних помилок та формування рекомендацій;
- персоналізований супровід учня під час усіх етапів створення та друку моделі;
- зниження вхідного порогу у складні технології для тих, хто не має попередньої технічної підготовки;
- підтримку педагогів у використанні 3D-принтерів в умовах недостатнього досвіду та ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Низка робіт демонструє, що впровадження 3D-друку здатне значно підвищити інженерні компетентності учнів. У дослідженні [1] автори показали, що 3D-принтери забезпечують розвиток просторового мислення, інженерного підходу та креативності як у загальноосвітніх школах, так і в закладах для учнів з особливими освітніми потребами. Подібні результати подано в роботі [2], де доведено ефективність 3D-моделювання для інтерпретації складних фізичних явищ, підкресливши, що STEM-технології сприяють глибшому розумінню абстрактних концептів.

У публікації [3] встановлено, що застосування 3D-друку з повторюваним моделюванням підвищує професійний інтерес, стимулює інженерне мислення та розвиває уяву учнів. Подібно до цього, у науковій роботі [4] отримано висновок, що рівень інтеграції 3D-друку у навчальний процес корелює зі зростанням інтересу до STEM-кар'єр. Проте вказується, що ефективність залежить від підготовленості вчителя та наявності матеріально-технічної бази.

У науковій праці [5] зосереджено увагу на педагогічних аспектах: автори виявили значні відмінності в уявленнях учителів щодо використання 3D-моделювання та друку. Частина педагогів сприймає ці технології як інструмент творчого проектування, інші – як потенційно складний і ресурсовитратний компонент навчання, що потребує додаткової підтримки.

Популярним напрямком в дослідженнях є застосування AI для персоналізації навчальної діяльності. Авторі підкреслюють [6], що використання систем штучного інтелекту сприяє персоналізації способів подання матеріалу, зниженню когнітивного навантаження та формуванню адаптивних сценаріїв навчання. У статті [7] розглядаються виклики, пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту, зокрема технічні бар'єри, відсутність педагогічних моделей використання та етичні аспекти.

У дослідженні [8] обґрунтовано потенціал AI-підходів для підвищення індивідуалізації вищої STEM-освіти, зокрема завдяки автоматизованому аналізу помилок та адаптивним рекомендаціям. Подібні ідеї розвинуто у праці [9], які демонструють можливість застосування високопродуктивних обчислень та AI для створення систем персоналізації навчальних траєкторій.

Наукова стаття [10] присвячена ефективності AI-орієнтованих підходів для учнів молодшої та середньої школи: інтелектуальні системи допомагають вибудовувати індивідуальні програми, оптимізувати темп навчання та знижувати перешкоди при опануванні складних STEM-дисциплін.

Українські роботи підтверджують глобальні тенденції. У дослідженні [11] автори підкреслюють, що інформаційні технології та інтелектуальні системи є важливими чинниками розвитку STEM-освіти в Україні, однак їх впровадження обмежене ресурсно. У роботі [12] досліджують адаптивні платформи персоналізованого навчання та відзначають високу ефективність AI-інструментів для підтримки індивідуальних освітніх траєкторій.

Попри значну кількість публікацій, наукова література фактично не містить досліджень, присвячених застосуванню штучного інтелекту саме для персоналізації навчання з 3D-моделювання та 3D-друку. У більшості робіт роль AI обмежується загальними можливостями адаптації навчання, а роль 3D-принтерів – методами практичної діяльності у STEM. Зокрема не розглянуто розробки комплексних AI-систем, що супроводжують учня від створення моделі до її друку.

У зв'язку з цим виникає потреба у створенні та випробуванні моделі застосування AI для персоналізації навчання 3D-моделюванню та 3D-друку, що і визначає мету даного дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка та експериментальна перевірка моделі застосування штучного інтелекту для персоналізації навчання 3D-моделюванню та 3D-друку в STEM-освіті, яка забезпечує індивідуальний супровід учня на всіх етапах роботи.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі завдання:

1. Розробка прототипу AI-підсистеми, здатної здійснювати персоналізовану підтримку учнів у процесі створення та друку 3D-моделей, включно з підбором параметрів друку.
2. Провести експеримент, спрямований на оцінювання ефективності запропонованої моделі у навчанні здобувачів освіти навичкам 3D-моделювання та роботи з 3D-принтером.
3. Проаналізувати результати експерименту та визначити рівень впливу AI-персоналізації на засвоєння знань, якість створених моделей, кількість помилок друку, часову ефективність та мотивацію учнів.

Викладення основного матеріалу дослідження

У рамках дослідження була розроблена й реалізована інтелектуальна навчальна система (ІНС), що поєднувала:

- AI-тьютор – мовну модель, спеціально налаштовану для навчання 3D-моделюванню, підбору параметрів друку та оцінки якості моделей;
- модуль аналізу 3D-моделей – інструменти, що дозволяють AI виявляти помилки у файлах STL/OBJ (некоректні нормалі, недостатню товщину стінки, проблемні нависання, несущільну геометрію тощо);
- систему рекомендацій параметрів друку;
- адаптивний генератор навчальних завдань – система, яка формувала індивідуальні проекти для кожного студента.

Структура моделі персоналізації представлена на рис. 1.

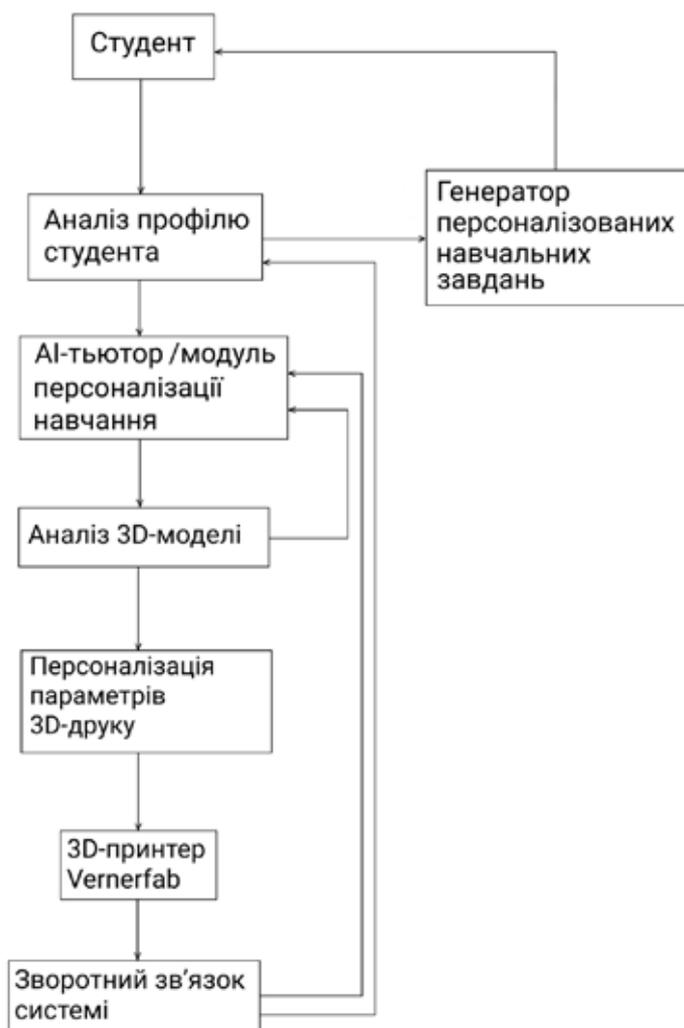


Рис. 1. Схема запропонованої моделі

AI-система працювала на основі трьох взаємопов'язаних механізмів:

1. Аналіз профілю студента.

На етапі діагностики проводилася оцінка просторового мислення, попереднього досвіду роботи з 3D-модельюванням, темпу виконання навчальних кроків, частоти помилок, переваг стилю навчання (візуальний, вербальний, кроковий, проблемно-орієнтований).

Отримані дані формували індивідуальний навчальний профіль, який використовувався AI-модулем для адаптації подальшого навчального контенту.

2. Адаптивна підтримка в процесі 3D-модельювання.

Під час виконання завдань AI аналізував дії студента та надавав динамічні підказки щодо використання інструментів модельювання, персоналізовані пояснення залежно від стилю навчання (візуальні схеми, текстові інструкції, відеофрагменти або покрокові алгоритми), рекомендації щодо топології моделі, попередження про конструктивні недоліки, які можуть вплинути на успішність друку.

3. Персоналізація параметрів 3D-друку.

AI аналізував STL-модель студента й автоматично пропонував оптимізовані параметри друку: висоту шару, заповнення, кількість оболонок, швидкість друку, структуру підтримок.

Під час роботи використовувався 3D-принтер Vernerfab, інтегрований до системи через модуль аналізу G-коду.

Хід експерименту. Експеримент було проведено з метою оцінювання ефективності запропонованої моделі застосування штучного інтелекту для персоналізації навчання 3D-модельюванню та 3D-друку. Дослідження здійснювалося у три етапи: підготовчий, формувальний та підсумковий.

1. На підготовчому етапі було здійснено добір учасників, визначення початкового рівня підготовки, налаштування матеріально-технічної бази, підготовка навчальних завдань.

У експерименті взяли участь 24 здобувачі освіти, розділені на експериментальну групу ($n = 12$) та контрольну групу ($n = 12$). Групи формувалися таким чином, щоб учасники мали приблизно однаковий початковий рівень володіння 3D-модельюванням.

Експериментальна група працювала з використанням AI-підсистеми, розробленої в межах дослідження, тоді як контрольна група виконувала завдання традиційним методом.

Була сформована серія з 6 однакових навчальних модулів, які включали:

- створення 3D-моделі;
- аналіз помилок;
- вибір параметрів друку;
- виконання друку;
- оцінку результатів.

2. Безпосередньо експеримент.

Учасники експериментальної групи виконували ті самі завдання, що й контрольна група, але з використанням таких функцій штучного інтелекту:

- аналіз STL-файлів;
- адаптивні рекомендації;
- автоматичний підбір параметрів друку;
- моніторинг та корекція у реальному часі;
- створення індивідуальних освітніх траєкторій.

Учасники контрольної групи виконували ідентичні завдання без AI-підтримки. Викладач забезпечував консультації у традиційному режимі, без автоматичних підказок, аналізаторів STL-файлів або адаптивних рекомендацій.

3. Підсумковий етап.

Після завершення навчальних модулів усім учасникам було запропоновано підсумкове завдання – створити складнішу 3D-модель та надрукувати її з першої спроби. На цьому етапі проводилося:

- оцінювання якості підсумкової моделі (за єдиними критеріями);
- підрахунок кількості помилок у підготовці до друку;
- вимірювання часу виконання завдання;
- фіксація кількості невдалих друків;
- опитування щодо суб'єктивного досвіду навчання, включно з рівнем упевненості, мотивації та зниженням труднощів.

Результати. Отримані значення контрольованих параметрів представлені в таблицях 1-6.

Дані таблиці 1 вказують на ефективність системи рекомендацій та автоматичних підказок, які допомагали студентам своєчасно виявляти і виправляти недоліки моделі.

Показники успішності друку підкріплюють тенденцію, виявлену в моделюванні. Експериментальна група отримала успішний друк із першої спроби у 74% випадків, що майже вдвічі більше за контрольну (38%). Зменшення середньої кількості повторних друків ($2,1 \rightarrow 1,3$) демонструє економію часу та матеріалів. Також

значно покращилась точність виготовлених деталей, про що свідчить майже трикратне зменшення відхилень від номінальних розмірів (1,42 мм → 0,58 мм). Зниження частоти дефектів (27% → 11%) вказує на те, що AI-рекомендації щодо налаштувань друку мали суттєвий практичний ефект.

Таблиця 1

Успішність виконання 3D-моделей

Показник	Контрольна	Експериментальна (AI)	Різниця
Середня кількість критичних топологічних помилок	3,4	1,1	-67%
Середня кількість некритичних помилок (нормалі, стінки)	7,9	3,2	-59%
Частка моделей, придатних до друку з першого разу	41%	78%	+37 п.п.

Таблиця 2

Успішність 3D-друку

Показник	Контрольна	Експериментальна (AI)
Успішні друки з першого разу	38%	74%
Середня кількість повторних друків	2,1	1,3
Відхилення від розмірів (мм)	1.42 мм	0.58 мм
Частота дефектів (деформація, delamination)	27%	11%

Таблиця 3

Динаміка навчання (Pre-test → Post-test)

Навичка	Контрольна (Δ%)	Експериментальна (Δ%)	Приріст переваги AI
Прості операції 3D-моделювання	22%	48%	+26 п.п.
Складне моделювання (механічні частини)	11%	39%	+28 п.п.
Розуміння топології	18%	51%	+33 п.п.
Підготовка до друку (slicing)	14%	46%	+32 п.п.

Дані таблиці 3 свідчать, що студенти експериментальної групи демонстрували істотно вищий приріст результатів у всіх оцінюваних компетентностях.

Таблиця 4

Час виконання завдань

Показник	Контрольна	Експериментальна (AI)
Час створення моделі (середній)	4 год 12 хв	3 год 05 хв
Час підготовки до друку	38 хв	21 хв
Загальний час на проєкт	5 год 31 хв	3 год 47 хв

Результати в таблиці 4 дозволяють зробити висновок, що AI-підтримка сприяє істотній оптимізує часових витрат на всіх етапах.

Таблиця 5

Рівень мотивації і задоволеності

Показник	Контрольна	Експериментальна
Мотивація виконувати наступні завдання	3,2	4,6
Відчуття підтримки	2,9	4,8
Чіткість пояснень	3,4	4,7
Відчуття прогресу	3,1	4,5
Загальна задоволеність курсом	3,5	4,8

Показники опитування показують суттєве покращення емоційного та освітнього досвіду студентів експериментальної групи.

Аналіз логів персоналізації підтверджує активне використання AI-системи студентами та її реальний вплив на процес навчання.

Таблиця 6

Логи персоналізації

Метрика	Значення
Середня кількість персоналізованих підказок на студента	27,4
Кількість автоматичних виправлень STL-моделей	6,1
Кількість змін у складності завдань	3,7
Середня кількість рекомендованих оптимізацій параметрів друку	4,9

Висновки

Проведене експериментальне дослідження підтвердило ефективність інтеграції штучного інтелекту у процес навчання 3D-моделюванню та 3D-друку в STEM-освіті. Аналіз результатів показав, що використання AI-підтримки значно підвищує якість створюваних студентами моделей, скорочує кількість технічних помилок та підвищує успішність 3D-друку. Отримані дані свідчать про систематичне покращення навчальних результатів у всіх основних розділах: засвоєнні базових і складних операцій 3D-моделювання, розумінні топології та підготовці моделей до друку.

Студенти експериментальної групи продемонстрували суттєво вищий приріст навчальних результатів у порівнянні з контрольною групою. Найбільший ефект AI простежується у зменшенні критичних помилок моделювання (-67%), покращенні придатності моделей до друку з першого разу (+37 п.п.) та підвищенні точності виготовлення деталей (зменшення відхилення від розмірів у 2,5 раза). Це свідчить про те, що AI сприяв кращому розумінню студентами логіки побудови 3D-моделі та формуванню стійких практичних навичок.

Також було встановлено, що застосування інтелектуальних рекомендацій і автоматичних підказок суттєво оптимізує часові витрати студентів. Експериментальна група виконувала проєкт швидше приблизно на 30%, що пояснюється зменшенням кількості повторних спроб, більш ефективною підготовкою моделей до друку та уникненням типових топологічних помилок. Це свідчить про потенціал AI-технологій не лише підвищувати якість навчання, а й робити його більш раціональним та ресурсоефективним.

Студенти експериментальної групи повідомили про відчутно вищий рівень підтримки, зрозумілості пояснень та усвідомлений прогрес у навчанні. Зростання внутрішньої мотивації, задоволеності курсом та відчуття контролю над процесом опанування складних технічних навичок підтверджує, що AI може виступати ефективним інструментом персоналізації освітнього досвіду.

Отже, впровадження AI у процес навчання 3D-моделюванню та друку забезпечує комплексний позитивний ефект – когнітивний, практичний, часовий та психологічний. Це дозволяє стверджувати, що такі технології мають високий потенціал для масштабування в системі STEM-освіти, особливо в умовах недостатнього доступу до обладнання та високої варіативності рівня підготовки студентів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням AI-моделей персоналізації, розробкою спеціалізованих навчальних середовищ з адаптивними сценаріями та вивченням довгострокового впливу таких підходів на освітні траєкторії.

Список використаної літератури

1. Kefalis C., Skordoulis C., Drigas A. The Role of 3D Printing in Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Education in General and Special Schools. *International Journal of Online & Biomedical Engineering*. 2024. № 20(12). DOI: 10.3991/ijoe.v20i12.48931
2. Usembayeva I., Kurbanbekov B., Ramankulov S., Batyrbekova A., Kelesbayev K., Akhanova A. 3D Modeling and Printing in Physics Education: The Importance of STEM Technology for Interpreting Physics Concepts. *Qubahan Academic Journal*. 2024. № 4(3). P. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.48161/qaj.v4n3a727>
3. Lin K. Y., Lu S. C., Hsiao H. H., Kao C. P., Williams P. J. Developing student imagination and career interest through a STEM project using 3D printing with repetitive modeling. *Interactive Learning Environments*. 2023. № 31(5). P. 2884–2898. DOI: <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.1913607>
4. Cheng L., Antonenko P. P., Ritzhaupt A. D., MacFadden B. Exploring the role of 3D printing and STEM integration levels in students' STEM career interest. *British Journal of Educational Technology*. 2021. № 52(3). P. 1262–1278. DOI: <https://doi.org/10.1111/bjet.13077>
5. Anđić B., Ulbrich E., Dana-Picard T., Cvjetičanin S., Petrović F., Lavicza Z., Maričić M. A phenomenography study of STEM teachers' conceptions of using three-dimensional modeling and printing (3DMP) in teaching. *Journal of Science Education and Technology*. 2023. № 32(1). P. 45–60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10956-022-10005-0>
6. Barkoczi N., Maier M. L., Horvat-Marc A. The impact of artificial intelligence on personalized learning in STEM education. In: *INTED2024 Proceedings. IATED*. 2024. P. 4980–4989. DOI: 10.21125/inted.2024.1289
7. Joseph O. B., Uzundu N. C. Integrating AI and Machine Learning in STEM education: Challenges and opportunities. *Computer Science & IT Research Journal*. 2024. № 5(8). P. 1732–1750. DOI: 10.51594/csitrj.v5i8.1379

8. Nikhil V. A Comprehensive Study on AI-Enhanced Personalized Learning in STEM Courses. In: Adopting Artificial Intelligence Tools in Higher Education. CRC Press. 2024. P. 149–170.
9. Huang J., Zhong Y., Chen X. Adaptive and personalized learning in STEM education using high-performance computing and artificial intelligence. The Journal of Supercomputing. 2025. № 81(8). P. 981. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07481-7>
10. Zhang L., Qu J., Zhang Z. The Impact of Personalized Learning Driven by Artificial Intelligence on STEM Education in Primary and Secondary Schools. International Journal of New Developments in Education. 2024. № 6(10). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.01666>
11. Серденко Т. В., Рейс Т. Т., Панченко О. Д. Інформаційні технології як ключовий інструмент у STEM-освіті: сучасний стан і перспективи. 2024. URL: <http://dspace.msu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/12491>
12. Мисюк О. Ю., Постова С. А., Черняк Ю. Г. Персоналізація STEM-навчання за допомогою ШІ: адаптивні платформи. Педагогічна Академія: наукові записки. 2025. № 16. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15109471>

References

1. Kefalis, C., Skordoulis, C., & Drigas, A. (2024). The Role of 3D Printing in Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Education in General and Special Schools. International Journal of Online & Biomedical Engineering, 20(12). <https://doi.org/10.3991/ijoe.v20i12.48931>
2. Usembayeva, I., Kurbanbekov, B., Ramankulov, S., Batyrbekova, A., Kelesbayev, K., & Akhanova, A. (2024). 3D Modeling and Printing in Physics Education: The Importance of STEM Technology for Interpreting Physics Concepts. Qubahan Academic Journal, 4(3), 45-58. <https://doi.org/10.48161/qaj.v4n3a727>
3. Lin, K. Y., Lu, S. C., Hsiao, H. H., Kao, C. P., & Williams, P. J. (2023). Developing student imagination and career interest through a STEM project using 3D printing with repetitive modeling. Interactive Learning Environments, 31(5), 2884-2898. <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.1913607>
4. Cheng, L., Antonenko, P. P., Ritzhaupt, A. D., & MacFadden, B. (2021). Exploring the role of 3D printing and STEM integration levels in students' STEM career interest. British journal of educational technology, 52(3), 1262-1278. <https://doi.org/10.1111/bjet.13077>
5. Anđić, B., Ulbrich, E., Dana-Picard, T., Cvjetićanin, S., Petrović, F., Lavicza, Z., & Maričić, M. (2023). A phenomenography study of STEM teachers' conceptions of using three-dimensional modeling and printing (3DMP) in teaching. Journal of Science Education and Technology, 32(1), 45-60. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-10005-0>
6. Barkoczi, N., Maier, M. L., & Horvat-Marc, A. (2024). The impact of artificial intelligence on personalized learning in STEM education. In INTED2024 proceedings (pp. 4980-4989). IATED. <https://doi.org/10.21125/inted.2024.1289>
7. Joseph, O. B., & Uzodu, N. C. (2024). Integrating AI and Machine Learning in STEM education: Challenges and opportunities. Computer Science & IT Research Journal, 5(8), 1732-1750. <https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i8.1379>
8. Nikhil, V. (2024). A Comprehensive Study on AI-Enhanced Personalized Learning in STEM Courses. In Adopting Artificial Intelligence Tools in Higher Education (pp. 149-170). CRC Press.
9. Huang, J., Zhong, Y., & Chen, X. (2025). Adaptive and personalized learning in STEM education using high-performance computing and artificial intelligence. The Journal of Supercomputing, 81(8), 981. <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07481-7>
10. Zhang, L., Qu, J., & Zhang, Z. (2024). The Impact of Personalized Learning Driven by Artificial Intelligence on STEM Education in Primary and Secondary Schools. International Journal of New Developments in Education, 6(10). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.01666>
11. Serdenko, T. V., Reis, T. T., & Panchenko, O. D. (2024). Informatsiyini tekhnolohii yak kliuchovyi instrument u STEM-osviti: suchasnyi stan i perspektyvy [Information Technology as a Key Tool in STEM Education: Current Status and Prospects]. Retrieved from <http://dspace.msu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/12491> [in Ukrainian].
12. Mysiuk, O. Yu., Postova, S. A., & Cherniak, Yu. H. (2025). Personalizatsiia STEM-navchannia za dopomohoiu ShI: adaptivni platformy [Personalization of STEM Learning Using AI: Adaptive Platforms]. Pedagogichna Akademiia: naukovy zapysky, № 16. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15109471> [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025