



UDC 378.147:004.8:66

## INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO THE TEACHING OF CHEMICAL TECHNOLOGY IN HIGHER EDUCATION: A SYSTEMATIC REVIEW

Michael A. Podzharsky

Oles Honchar Dnipro National University, 72, Nauky Ave., Dnipro 49010, Ukraine

Received 27 November 2025; accepted 29 December 2025; available online 23 March 2026

### Abstract

This article analyzes the strategic importance and practical aspects of incorporating artificial intelligence (AI) technologies into the training of chemical engineering students at higher education institutions. The study is based on a systematic scoping review of scientific publications from 2021 to 2025. Based on these sources, the author identifies six major applications of AI in education: modeling and optimizing technological processes with machine learning, using digital twins and augmented reality, incorporating generative AI into project-based learning, applying adaptive learning systems, enabling automated assessment, supporting academic integrity. The article provides empirical evidence illustrating the effectiveness of these approaches. Researchers report that machine learning methods can increase reactor design productivity by up to 60 %, and over 90 % of students positively evaluate the use of generative AI in project-based learning. The analysis emphasizes the role of digital twins in creating highly realistic and safe environments for developing professional skills, including those necessary for hazardous industrial settings. The author also examines how Ukrainian universities adopt AI amid wartime conditions and restricted access to in-person learning. Virtual laboratories and digital simulators help students compensate for limited access to specialized equipment. The article offers practical recommendations for educators, such as expanding computational infrastructure, utilizing digital simulators, and fostering collaboration with industry professionals. The author also shares their personal experience teaching with AI-driven adaptive learning. The conclusion emphasizes that, while AI can modernize chemical engineering education, it cannot replace critical thinking. Since AI-generated content often contains inaccuracies, students and instructors must carefully verify information. To reduce the risk of academic dishonesty, the author recommends increasing the proportion of in-person and oral assessments.

*Keywords:* artificial intelligence, chemical technology, digital twins, machine learning, course projecting, modeling, optimization, adaptive learning.

## ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ВИКЛАДАННЯ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИЩІЙ ШКОЛІ: СИСТЕМАТИЧНИЙ ОГЛЯД

Михайло А. Поджарський

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, просп. Науки, 72, Дніпро, 49010, Україна

### Анотація

У статті проаналізовані стратегічне значення та прикладні аспекти інтеграції технологій штучного інтелекту в підготовку фахівців з хімічної технології у ЗВО. Методологічну основу дослідження становить систематичний scoping-огляд наукових публікацій за 2021–2025 р. На підставі вивчення релевантних джерел виокремлено шість ключових напрямів застосування AI в освітньому процесі: моделювання та оптимізація технологічних процесів засобами машинного навчання; використання цифрових двійників та технологій доповненої реальності; залучення генеративних моделей у проєктно-орієнтованому навчанні; впровадження адаптивних освітніх систем; автоматизоване оцінювання результатів навчання; підтримання академічної доброчесності. Застосування методів машинного навчання для проєктування реакторів демонструє приріст їхньої продуктивності до 60 %, а використання генеративних систем у проєктному навчанні отримує позитивні відгуки від понад 90 % студентів. Особливу увагу приділено потенціалу цифрових двійників, які забезпечують безпечне та гіперреалістичне середовище для відпрацювання професійних компетентностей, зокрема на об'єктах підвищеної безпеки. Проаналізовані особливості імплементації AI в українських ЗВО в умовах воєнного стану та обмежених можливостей очного навчання. Показано, що віртуальні лабораторії та цифрові симулятори здатні частково компенсувати нестачу доступу до спеціалізованого обладнання. Наведені практичні рекомендації для викладачів, які передбачають розвиток обчислювальної інфраструктури, використання відкритих цифрових інструментів і посилення співпраці з промисловими підприємствами. Автор також поділився практичним педагогічним досвідом щодо впровадження AI-орієнтованих адаптивних методів навчання. Наголошено, що технології AI виступають потужним чинником модернізації хімічної освіти, проте не замінюють критичного мислення та вимагають обов'язкової перевірки достовірності результатів роботи моделей. Рекомендовано збільшити частку очних та усних форм контролю знань.

*Ключові слова:* штучний інтелект, хімічна технологія, цифрові двійники, машинне навчання, курсове проєктування, моделювання, оптимізація, адаптивне навчання.

Corresponding author: e-mail: [podzharsky@ua.fm](mailto:podzharsky@ua.fm)

© 2025 Oles Honchar Dnipro National University; doi: 10.15421/jchemtech.v34i1.344737

## Вступ

Наразі людство переживає четверту промислову революцію, піком якої є поява і швидкий розвиток явища, яке називають штучним інтелектом (Artificial Intelligence, AI). За останні роки цей напрямок інформаційних технологій проник у всі сфери життя: виробництво, військову справу, науку, мистецтво і багато іншого. Все, чого торкається AI, зазнає значної трансформації. Ці зміни дуже швидкі, кардинальні, і відсутність такої ж рішучої реакції на них може мати драматичні наслідки – передусім, безнадійне відставання від вимог часу. Не в останню чергу це стосується сфери вищої освіти.

Інтеграція штучного інтелекту в вищу освіту наразі є критично важливою. Це актуально для інженерних спеціальностей, які є найбільш інтелектуально насиченими, перебувають на стику фундаментальних та прикладних дисциплін, зокрема, для хімічної технології. Хоча серед освітян зростає занепокоєння з приводу потенціалу плагіату, який нівелює результати навчання, AI стає корисним інструментом у професійному середовищі хіміків-технологів [1].

Сучасний викладач хімічної технології веде лекції з термодинаміки, тепломасопереносу, основ проектування, процесів та апаратів, реакційної інженерії, проводить лабораторні роботи та практичні заняття, керує курсовими проектами з розробки хімічних апаратів та виробництв хімічної продукції, оцінює знання студентів через контрольні роботи та іспити. Він повинен постійно адаптуватися до стрімкого розвитку технологій і, відповідно, обсягу спеціальної інформації, що невпинно зростає. Утримувати високий освітній рівень, за звичною схемою «лекції–лабораторні/практичні–екзамен» під таким тиском важко, якщо взагалі можливо. Тому є нагальна потреба в докорінній зміні освітніх технологій.

Такі можливості надає впровадження технологій AI/ML [1–3; 13]. Наприклад, з'явилися можливості застосовувати AI для навчання студентів моделюванню складних багатофазних систем, оптимізації технологічних процесів, проектуванню реакторів з використанням CFD та ML, віртуальне тренування на цифрових двійниках промислових установок [10; 11].

Провідні університети світу (Carnegie Mellon, University of Tulsa, Politecnico di Milano та ін.) активно інтегрують AI в викладання

хімічної технології, створюючи спеціалізовані освітні програми та перебудовуючи традиційні курси [3; 4; 9].

University of Tulsa інтегрував AI в усі курси хімічної технології, починаючи з весни 2025 р [3]. Курс ChE 4103 Process Component Design трансформовано в AI Applications in Process Design, де студенти використовують AI для оптимізації теплообмінників, дистиляційних колон та реакційних апаратів. Додатково запущено новий елективний курс AI in Chemical Engineering для підготовки студентів до роботи з AI-enhanced engineering environments [3].

Carnegie Mellon University запустив першокласну магістерську програму MS in Artificial Intelligence Engineering – Chemical Engineering, де студенти вивчають фундаментальні ML-алгоритми, глибинні нейронні мережі, AI systems workflows, а також традиційні курси хімічної інженерії: Mathematical Modeling of Chemical Engineering Processes, Chemical & Reactive Systems, Analysis & Modeling of Transport Phenomena, Process Systems Modeling [4]. Студенти вчать інтегрувати AI з першого дня проектування систем, створюючи більш адаптивні та стійкі інженерні рішення. Програма готує фахівців для професій з високим попитом: Advanced Analytics Research Scientist, Data Scientist/Process Engineer, Deep Learning Research Engineer [4].

*Мета даного дослідження* – провести систематичний огляд наукової літератури щодо інтеграції штучного інтелекту в викладання хімічної технології, класифікувати основні шляхи такої інтеграції та визначити практичні рекомендації для викладачів українських ЗВО.

## Методика дослідження

Для дослідження була залучена інтелектуальна пошукова система Perplexity, якій було доручено підібрати релевантну літературу, провести її попередній аналіз та створити чорновий варіант тексту. Остаточний зміст, інтерпретація результатів, критичний аналіз та верифікація для забезпечення точності, релевантності та відповідності академічним стандартам, а також наукові висновки належать автору.

Дослідження проведено методом систематичного scoring-огляду (огляд предметного поля) згідно з протоколом PRISMA [20]. Пошук здійснювався в базах

Scopus, Web of Science та Google Scholar за період 2021–2025 рр.

*Пошукові запити.* Використовувались комбінації термінів:

– AI-технології: "artificial intelligence", "machine learning", "digital twin", "deep learning";

– хімічна технологія: "chemical engineering education", "process engineering", "unit operations", "chemical reactor design", "process design", "thermodynamics teaching";

– освіта: "teaching", "learning", "curriculum", "course".

Приклад запити: ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "digital twin") AND ("chemical engineering education" OR "process engineering" OR "unit operations") AND ("teaching" OR "learning") AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2026.

Критерії включення:

– рецензовані статті в наукових журналах, 2021–2025 рр;

– фокус на хімічній технології та процесній інженерії;

– наявність емпіричних даних або детальних практичних застосувань AI;

– релевантність до викладання в вищій школі (курси процесів та апаратів, термодинаміки, процесного дизайну, реакційної інженерії, контролю процесів).

Критерії виключення:

– загальна хімічна освіта (неорганічна, органічна, аналітична хімія);

– дослідження на рівні середньої школи;

– суто концептуальні роботи без практичних прикладів;

– популярні публікації без рецензування;

– джерела з Російської Федерації.

Процес відбору відбувався у чотири етапи:

Етап 1. Первинний пошук дав 312 потенційно релевантних публікацій.

Етап 2. Після видалення дублікатів залишилось 247 унікальних джерел.

Етап 3. Відбір за назвою та анотацією з фокусом на хімічній технології (не загальній хімії) залишив 78 джерел.

Етап 4. Повнотекстовий аналіз дозволив відібрати 35 найбільш релевантних джерел саме для викладання хімічної технології. Три з них автор виключив, після чого додав ще 7.

Слід урахувати, що будь-які інновації провідних університетів робляться за участю студентів або використовуються для навчання. Тому навіть якщо матеріал, опублікований співробітниками університету,

не містить прямих даних про освітній процес, він все одно брався до уваги в цьому огляді.

## Результати та їх обговорення

Аналіз відібраних джерел дозволив виокремити шість основних напрямів інтеграції штучного інтелекту в викладання хімічної технології:

1. Моделювання та оптимізація процесів з використанням машинного навчання.

2. Цифрові двійники хімічних процесів та установок інтегровані з AI.

3. Використання генеративного AI в проєктних курсах (PBL).

4. Адаптивне навчання в засвоєнні складних тем хімічної технології.

5. Автоматичне оцінювання результатів навчання.

6. Академічна доброчесність у сфері генеративного AI.

### *Моделювання та оптимізація процесів з використанням машинного навчання*

Машинне навчання (ML) — це галузь штучного інтелекту, яка дозволяє AI навчатися на даних і самостійно приймати рішення або робити прогнози без явного програмування. ML стає потужним інструментом для моделювання та оптимізації хімічних процесів у дослідницькому та навчальному середовищах [10; 25].

*ML-дизайн реакторів.* Savage та колеги з Imperial College London [10] продемонстрували революційний підхід до розробки хімічних реакторів, поєднуючи високовимірні параметризації (>100 параметрів дизайну), обчислювальну гідродинаміку (CFD) та багаторівневу байєсівську оптимізацію. ML-асистований підхід дозволив ідентифікувати ключові характеристики оптимальних конструкцій спіральних реакторів. Експериментальна перевірка показала, що ефективність вдосконалених таким чином реакторів витиснення на ~60 % вища, ніж у відомих прототипів [10].

*Практичні застосування у дослідженнях.* University of Michigan [25] демонструє використання ML викладачами та студентами для прискорення інновацій у дослідженнях з хімічної інженерії: reinforcement learning (навчання з підкріпленням) та generative modeling (генеративне моделювання) для генерації органічних молекул для редокс-батареї, інтерпретовані ML-моделі для розуміння гетерогенних каталізаторів, предикативні моделі розчинності органічних

молекул та декодування сенсорних даних для очищення стічних вод. ChIMES структура використовується для розробки нових мембран для синтезу аміаку та високопродуктивних методів синтезу наноматеріалів нового покоління [25].

*Виклики.* Woinaroschy [11] підкреслює, що AI дозволяє вирішувати такі важливі технічні та економічні проблеми в хімічній інженерії, традиційне рішення яких було б неможливим або потребувало б величезного обчислювального часу: вибір найефективнішого каталізатора, визначення оптимальної послідовності процесів розділення багатокomпонентних сумішей у рідкому стані. Однак розробка ефективних ML-моделей потребує значних обчислювальних ресурсів та даних, отриманих з промислових процесів.

#### **Цифрові двійники хімічних процесів та установок, інтегрованих з AI**

Цифрові двійники (Digital Twins, DT) – віртуальні репліки реальних хімічних установок, що дозволяють студентам практикуватися в безпечному середовищі [8; 9; 12; 26–32].

*Теоретичні основи.* Цифровий двійник є цифровим представленням фізичного апарату, процесу або системи, синхронізованим через двосторонні потоки даних у реальному часі для онлайн («живого») прогнозування та оптимізації [31]. У хімічній промисловості DT дозволяють здійснювати безперервний моніторинг та контроль процесів, предикативне обслуговування обладнання, симуляцію «what-if» сценаріїв [28]. Це особливо цінно для навчання, оскільки дозволяє студентам експериментувати без ризиків для безпеки.

*DTLAB для небезпечних виробництв.* Shin та Son розробили платформу DTLAB для навчання та тренування в небезпечних хімічних виробництвах [8]. Платформа інтегрує VR, IoT, робототехніку, DTech та AIVCGT, створюючи гіперреалістичне навчальне середовище. Це дозволяє розв'язувати проблему традиційного on-the-job training (навчання на робочому місці), внаслідок того, що студенти та стажисти набувають досвід роботи зі складними промисловими системами без ризику для безпеки, також зменшуючи просторові та бюджетні обмеження [8].

*VR/AR у процесній інженерії.* Galeazzi та колеги [9] описали впровадження DT та VR у

програму магістратури з хімічної інженерії в Politecnico di Milano. Використання комплексного динамічного симулятора процесів Dynsim для динамічного моделювання та програмне забезпечення AVEVA XR, що використовує технології XR, такі як AR/VR/MR, дозволило студентам виконувати завдання з управління технологічними лініями в реалістичному віртуальному середовищі. 69 студентів надали позитивний зворотний зв'язок, підкресливши ефективність підходу в з'єднанні теоретичних знань та практичних навичок [9]. Застосування AR у підготовці інженерів-хіміків-технологів охоплює широкий діапазон можливостей – від демонстрації віртуальних лабораторних робіт до розвитку повноцінних DT [27].

*Тренажери для навчання операторів.* Використання існуючих тренажерів для навчання операторів, які є по суті DT нових промислових установок, створює унікальну можливість для експериментального навчання – навчання через досвід. [26]. Симулюючи технологічний процес у інтерфейсі Aspen HYSYS разом з елементами реальної промислової системи контролю та online-візуалізацією результатів, студенти можуть зрозуміти фізико-хімічні принципи через власний вплив та відчуття наслідків [26]. Здатність тренажерних симуляторів точно відображати поточні процеси може бути верифікована студентами під час екскурсій на виробничій установці.

*DT у промисловості.* Rebello та колеги [12] представили комплексну основу для розробки та впровадження DT у технологічні установки, з застосуваннями в газопідйомних системах і погружних насосах. Концептуальна платформа операційного DT на AI включає управління даними, моделювання та оптимізацію процесів, планування виробництва, контроль процесів з особливим акцентом на розширену ієрархію управління [12]. Інтеграція ML дозволяє створювати сурогатні моделі, предикативні моделі та здійснювати їх оптимізацію та контроль за допомогою штучного інтелекту.

*Виклики.* Розробка повноцінних цифрових двійників є ресурсомісткою як з погляду на обчислювальні потужності, так і фінансові витрати [28; 31]. Управління даними, включаючи управління ризиками, є критично важливим для точності DT [31]. Не кожен аспект системи потребує дублювання в

динамічній формі – різні застосування потребують різних типів DT на різних стадіях життєвого циклу виробництва [31].

### **Використання генеративного AI в проєктних курсах (PBL)**

*PBL у проєктуванні та оптимізації промислових установок.* Ramos та Condotta [2] розробили інноваційний підхід до PBL у курсі проєктування та оптимізації промислових установок з використанням ChatGPT для проєктування промислових сушарок. Студентам було запропоновано 8 різних тем (сушіння фармацевтичної суміші, кавових ягід, яблучних скибочок, каталізаторів тощо), кожна з яких відповідала реальним потребам бразильської промисловості. Ключова інновація – використання ChatGPT для генерації даних моделювання: кривих сушіння та розподілу розмірів частинок, які студенти потім використовували в симуляціях програмного пакету ASPEN Plus. По результатам впровадження PBL понад 90 % студентів повідомили про:

- підвищення залученості;
- покращення командної взаємодії;
- посилення навчання;
- відчуття мотивації;
- зростання впевненості в здатності розв'язання реальних проблем [2].

Порівняльний аналіз між LLM-aided активністю та традиційною PBL-активністю показав нюансовані різниці в успішності студентів та їх вподобаннях, що свідчить про те, що впровадження LLM для розв'язання складних проблем може сприяти багатішому та більш різноманітному навчальному досвіду [2].

*Промпт-інженерія для організації PBL.* Ramos [2] навів приклади структурованих prompts для ChatGPT: «Я хотів би розробити завдання для проєктного навчання, в якому група студентів старших курсів хімічної інженерії мала б розробити процес сушіння за допомогою ASPEN Plus. Чи можете ви запропонувати цікаву тему?», «Чи можете ви допомогти мені розробити інструкції для проєктного навчання?», «Допоможіть мені написати опис завдання», «Створіть набір даних, який студенти зможуть використовувати як відправну точку для свого моделювання». За його словами, ChatGPT виступав як «педагогічний каталізатор», полегшуючи перехід від традиційної лекції до створення середовища активного навчання [2].

*Виклики.* Досвід використання AI показав, що дані, надані ChatGPT, часто були нереалістичними, тому Bruno Ramos доводилося додатково обробляти їх, урахувавши результати експериментів [2]. Це говорить про те, що яким би досконалим інструментом не був AI, критична оцінка та редагування згенерованого матеріалу викладачем залишаються обов'язковими [13; 19].

### **Адаптивне навчання в засвоєнні складних тем хімічної технології**

Адаптивні системи навчання особливо корисні для таких складних тем, як термодинаміка, тепломасоперенос, хімічна кінетика [1; 6; 16].

*IDEE Framework.* Keith [1] та колеги з University of Surrey розробили IDEE Framework для інтеграції генеративного AI в вищу освіту з хімічної технології. Його було застосовано на лабораторних заняттях, на яких студенти використовували ChatGPT для розробки моделі, яка потім оцінювалась та еволюціонувала. Це дозволило їм критично оцінювати можливості та обмеження AI в контексті завдань хімічної інженерії [1].

*Переваги адаптивного навчання.* Ghasem [6] підкреслює, що адаптивне навчання на основі AI посилює залученість, рівність та ефективність у вищій освіті з хімічної технології. У міру того, як алгоритми стають складнішими, вони можуть краще адаптуватися до індивідуальних потреб студентів, надаючи персоналізовані траєкторії навчання для таких складних тем, як термодинаміка, явища переносу, реакційна інженерія.

*Вивчення термодинаміки.* Suran [5] розробила модуль для курсу термодинаміки, де студенти аналізували 7 прикладів з практики застосування AI для вивчення роботи атомної електростанції. Приклади охоплювали: управління ядерним паливом, автономне управління фіксованими процедурами, виявлення та діагностика несправностей, аварійна сигналізація, допомога в прийнятті рішень. Студенти повідомили, що модуль змінив їх сприйняття AI: «Я не розумів, яку роль відіграє штучний інтелект у технологіях та інноваціях, окрім ChatGPT», «Раніше думав, що це просто алгоритм, який використовується в соціальних мережах, не знав, що алгоритми можна використовувати для вирішення та реалізації реальних проблем» [5].

**Виклики.** Студенти відзначили складність AI-контенту та необхідність більшого обсягу базових знань для того, щоб починати прикладні дослідження [5]. Рекомендується виділити додатковий час для надання бекграунду для технологічного використання AI, або створювати якісно зроблені відео на кожну тему, які студенти можуть використовувати під час роботи [5].

#### **Автоматичне оцінювання результатів навчання**

Автоматичне оцінювання з використанням NLP та LLM особливо корисне для оцінки лабораторних звітів, курсових проєктів та есе [15].

**Оцінювання лабораторних звітів.** Rudnii [15] розробив систему на основі штучних нейронних мереж для автоматичного оцінювання та надання зворотного зв'язку в лабораторних звітах з хімії. Гібридна архітектура, що поєднує конволюційні та рекурентні шари, досягла точності до 89 % для класифікації за рубриками оцінювання. Система також генерує автоматичні коментарі для студентів, заощаджуючи час викладачів та забезпечуючи швидший зворотний зв'язок [15].

**LLM для оцінювання проєктів.** Дослідження показують, що GPT-4 може оцінювати есе та звіти з проєктування з високою узгодженістю з оцінками викладачів (коефіцієнт квадратичного зважуваного каппа до 0.68). Однак важливою є розробка детальних критеріїв оцінювання та використання промпт-інженерії для підвищення точності [15].

**Виклики.** Основні проблеми:

- складність оцінювання креативності та оригінальності інженерного мислення;
- потенційні алгоритмічні похибки, що можуть дискримінувати певні групи студентів;
- необхідність перевірки автоматично оцінених завдань викладачами [15].

Надмірна автоматизація може знизити якість обратного зв'язку, якщо не супроводжується детальними коментарями [15].

#### **Академічна доброчесність у сфері генеративного AI**

Широке поширення генеративного AI

порушило серйозні питання академічної доброчесності [17; 18].

**Детекція AI-генерованого контенту.** Desaire та співавтори [17] розробили метод класифікації для детекції AI-генерованого тексту в хімічних публікаціях, який виявився ефективним на текстах із 13 різних хімічних журналів з точністю понад 96 %. Однак детектори AI мають високий рівень хибних позитивних результатів, особливо для текстів, написаних особами, для яких мова написання не є рідною [17; 18], що створює ризики необґрунтованих звинувачень.

**Академічна політика.** Perkins [18] підкреслює, що не саме використання AI студентами визначає порушення академічної доброчесності, а те, чи розкривають його студенти. ЗВО повинні розробити чіткі політики щодо допустимого використання AI в різних типах завдань та інтегрувати в навчальні програми матеріали про його відповідальне використання [18].

**Переосмислення методів оцінки.** Дослідники рекомендують переглянути методи оцінювання для зменшення можливостей недоброчесного використання AI [18]:

- збільшення ваги усних презентацій та практичних демонстрацій;
- використання завдань, що вимагають рефлексії та особистого досвіду;
- застосування PBL з чіткими етапами та документуванням процесу [2].

В контексті хімічної технології це означає більше робити наголос на практичному досвіді в лабораторних роботах, проведенні усних захистів курсових проєктів, та проведення занять з розв'язання задач у класі.

**Сприйняття студентами.** Дослідження серед студентів показало, що спочатку вони скептично ставилися до ролі AI, але з часом розвинули нюансоване розуміння, визнаючи AI як додатковий інструмент з обмеженнями та ризиками для результатів навчання [7]. Студенти підкреслили необхідність чітких інституційних рекомендацій та навчання щодо ефективного використання AI.

#### **Класифікація шляхів інтеграції AI в викладання хімічної технології**

Основні результати аналізу джерел інформації наведені в наступних таблицях.

## Trends in Integrating Artificial Intelligence into the Teaching of Chemical Technology

Table 1

Таблиця 1

## Напрями інтеграції штучного інтелекту в викладання хімічної технології

Напрямок інтеграції AI	Основні технології	Застосування у викладанні	Джерела інформації
Процесне моделювання та оптимізація	ML для моделювання хімічних реакторів, процесних симуляторів (ASPEN Plus, Dynsim)	Оптимізація реакторів, апаратів для дистиляції, теплообмінників; курси проектування процесів	[3; 4; 10; 11; 25]
Цифрові двійники хімічних установок інтегровані з AI	DT, VR/AR, IoT для моніторингу процесів, навчання студентів та стажистів	Віртуальне тренування на небезпечних виробництвах; практичні навички	[8; 9; 12; 26–32]
AI у проєктних курсах	ChatGPT для генерації даних симуляцій, PBL-сценаріїв	Проєкти технологічних установок: сушарок, реакторів, апаратів для розділення	[2; 13; 19]
Автоматичне оцінювання	NLP, глибоке навчання, LLM для оцінки звітів	Оцінка курсових проєктів, лабораторних звітів	[15]
Адаптивне навчання	ITS для складних тем (термодинаміка, тепломасоперенос)	Персоналізоване навчання за темами термодинаміки, тепломасопереносу	[1; 5; 6; 16]
Академічна доброчесність	Проблематика AI-контенту, політики використання	Виявлення порушень, формування інституційних політик	[2; 7; 17; 18]

Table 2

## Key sources by subject area

Таблиця 2

## Ключові джерела за тематичними областями

Автори та рік	Тематична область	Країна	Ключові результати
Keith et al., 2025 [1]	Генеративний AI в хімічній інженерії	Велика Британія	IDEE Framework покращує AI-грамотність студентів
Ramos & Condotta, 2024 [2]	AI-асистована PBL для технологічних установок	Бразилія	90 %+ студентів відзначили покращення залученості та навчання
UTulsa ChE, 2025 [3]	Інтеграція AI в усі курси хімічної інженерії	США	AI інтегровано в усі курси з весни 2025
Carnegie Mellon University, 2024 [4]	Магістерська програма AI+хімічна інженерія	США	Першокласна програма для поєднання ML та освіти з хімічної технології
Supan, 2024 [5]	AI-теми у термодинаміці	США	Студенти змінили сприйняття AI через приклади з практики атомних електростанцій
Savage et al., 2024 [10]	ML-дизайн реакторів	Велика Британія	ML покращив продуктивність проєктованих реакторів на 60 %
Ghasem, 2025 [6]	ML та адаптивне навчання в хімічній інженерії	ОАЕ	Адаптивне навчання підвищує рівність у вивчанні хімічної інженерії
Shin & Son, 2024 [8]	Цифрові двійники для небезпечних виробництв	Корея	DTLAB створює гіперреалістичне навчальне середовище
Galeazzi et al., 2024 [9]	VR/цифрові двійники в ChE	Італія	69 студентів дали позитивний відгук про VR/DT
Rebello et al., 2025 [12]	Цифрові двійники хімічних процесів	Бразилія	Комплексна платформа DT для технологічних установок

**Впровадження AI в Україні**

Впровадження AI в викладання хімічної технології в українських ЗВО має свою специфіку, зумовлену як загальними трендами цифрової трансформації, так і викликами воєнного часу.

**Цифрова трансформація освіти.** Україна визнала цифровізацію освіти стратегічним пріоритетом [21; 22]. З 2022 р значно покращився технічний доступ до

дистанційного навчання: розповсюджено понад 260000 цифрових пристроїв, створено понад 300 центрів цифрового навчання [22]. Це створює інфраструктурну основу для впровадження AI-технологій.

**Виклики воєнного часу.** Повномасштабна війна створила безпрецедентні виклики, включаючи обмеження можливостей очного навчання [21]. В цьому контексті цифрові двійники та віртуальні лабораторії можуть

частково компенсувати відсутність доступу до університетських лабораторій, а чат-боти – надавати підтримку студентам, які навчаються дистанційно.

*STEM-освіта та міжнародна співпраця.* Україна активно впроваджує STEM-освіту та інноваційні методології [23]. Так, Київський університет імені Тараса Шевченка є партнером у програмі Erasmus Mundus ChEMoinformaticsPlus, яка готує фахівців з хімічної інформатики, молекулярного моделювання та AI для хімії [24]. Це свідчить про наявність потенціалу для розвитку AI-орієнтованої освіти в хімічній технології.

*Рекомендації для українських ЗВО:*

1. *Розширення обчислювальної інфраструктури:* забезпечення повноцінного доступу до процесних симуляторів (ChemCAD, Aspen HYSYS, DWSIM та ін.) та ML платформ (ML.NET, Microsoft Azure AI, Google Cloud AI, Amazon SageMaker та ін.). Актуальним є використання безплатних ресурсів таких, як DWSIM [33], ML.NET [34]

2. *Навчання викладачів:* організація семінарів і тренінгів з AI-грамотності та методик інтеграції AI в тематичні навчальні курси. Слід відзначити тренінги «Академії III для освітян від Google», де викладачів знайомлять з останніми AI-продуктами Google [35].

3. *Партнерство з промисловістю:* співпраця з українськими хімічними підприємствами з метою доступу до промислових даних для навчання ML-моделей. Такі можливості можуть надати: “Science City” (ініціатива Міністерства освіти і науки) [36], Кластер інформаційних промислових технологій [37].

4. *Адаптація до воєнних реалій:* розробка VR/AR-лабораторій та DT для навчальних курсів, де натурні експерименти обмежені.

5. *Міжнародна співпраця:* участь у європейських освітніх проєктах (Erasmus+) для обміну досвідом з провідними університетами [38].

**Власний досвід автора.**

*Лекції.* Автор використовував штучний інтелект (AI/LLM) як допоміжного викладача. На лекціях студентам надавались лише ключові питання технологій виробництва хімічних продуктів, а потім пропонувалося самостійно скласти детальні конспекти для підготовки до екзамену за допомогою LLM (ChatGPT, Copilot, Gemini, DeepSeek).

Попередньо їх ознайомили з основами промпт-інжинірингу. Отримані результати:

- студенти взяли за роботу із задоволенням;
- Copilot виявився найменш корисним (короткі неінформативні відповіді);
- ChatGPT давав повні, але громіздкі відповіді з зайвим текстом;
- Google Gemini та DeepSeek надавали повну інформацію з актуальними посиланнями, але стисло, без «води», що виявилось найбільш прийнятним;
- під контролем лектора студенти створили якісні конспекти для підготовки до екзамену.

Такий підхід можна рекомендувати як метод адаптивного навчання, що відповідає індивідуальним можливостям студентів.

*Контрольні роботи.* LLM, як-от ChatGPT-5, можуть розв'язувати прості задачі з підручників, що призводить до списування на дистанційних контрольних.

*Способи боротьби:* доводити на заняттях способи розрахунку, які LLM не використовують (перевіривши заздалегідь), а на контрольних вимагати розв'язувати задачі «як у класі», або задавати завдання, що вимагають «ручної праці» – наприклад, графічні розрахунки колон. Принципове рішення: проведення контрольних робіт очно із заборонаю гаджетів.

*Курсове проєктування.* LLM корисні для формування літературного огляду, пошуку прототипів обладнання, методів розрахунку та допомоги в використанні програмних пакетів ChemCAD [39], Aspen HYSYS, DWSIM та ін. Створити весь проєкт відповідно до вимог ВНЗ LLM наразі не можуть.

*Виклики.* Відповіді LLM можуть містити неповні, зайві або невірні дані («галюцинації»). Студент-початківець не завжди здатен це верифікувати. Крім того, AI аналізує лише тексти на сторінках сайтів, але не може самостійно завантажувати файли книг у форматах pdf, djvu, відкривати захищені або платні ресурси, і взагалі не «бачить» неоцифрованих книг. Тому цінні джерела інформації залишаються поза увагою.

*Загальне враження.* Всі освітні процеси за участю AI потребують прискіпливої уваги та контролю викладача. Штучний інтелект робить викладацький труд різноманітнішим та плідотворнішим, але аж ніяк не легшим і не економить робочий час, а, можливо, навіть збільшує його.

## Висновки

Проведений систематичний огляд дозволив виокремити та проаналізувати шість основних шляхів інтеграції AI в викладання хімічної технології: процесне моделювання та оптимізація з ML, цифрові двійники хімічних установок, інтегрованих з AI, використання генеративного AI в проектних курсах, адаптивне навчання складним темам, автоматичне оцінювання результатів навчання та забезпечення академічної доброчесності.

*Емпіричні докази ефективності.* ML-дизайн реакторів може забезпечити покращення продуктивності проєктованих апаратів на ~60 % [10], понад 90 % студентів позитивно оцінюють PBL з ChatGPT у проєктуванні технологічних апаратів [2], цифрові двійники створюють гіперреалістичні навчальні середовища [8], автоматичне оцінювання досягає точності 89 % [15], а адаптивне навчання підвищує рівність у підготовці інженерів-хіміків-технологів [6].

*Ключові виклики.* Технічні: висока вартість розробки DT, необхідність потужної обчислювальної інфраструктури, проблема «галюцинацій» LLM [2; 31], неможливість для LLM самостійного аналізу вкладених файлів і неоцифрованих книг. Педагогічні: ризик надмірної залежності студентів від AI, зниження критичного мислення, необхідність значних базових знань перед використанням сучасних AI-інструментів [5; 7]. Етичні: академічна доброчесність, конфіденційність даних, алгоритмічні упередження в автоматичній оцінці [17; 18].

*Практичні рекомендації для викладачів хімічної технології:*

1. *Лекції:* розробити AI-теми для демонстрації реальних застосувань [5; 35]; використовувати методики адаптивного навчання для персоналізованої підтримки студентів [6; 35].

2. *Лабораторні практикуми:* впровадити DT в лабораторні практикуми; використовувати VR/AR для моделювання технологічних процесів [8; 9].

3. *Курсове проєктування:* інтегрувати ML для оптимізації проєктування технологічних апаратів; використовувати LLM для огляду літератури та попередніх розрахунків, а також для допомоги в використанні складних програмних пакетів, але завжди критично перевіряти результати [2; 3].

4. *Стратегії оцінювання:* поєднувати автоматичне оцінювання для рутинних завдань з ручним оцінюванням для складних проєктів; збільшити частку очних контрольних робіт, усних презентацій та практичних демонстрацій студентів для мінімізації академічної недоброчесності [15; 18]

5. *Грамотність у сфері штучного інтелекту:* включити короткі модулі про можливості та обмеження AI в курси хімічної технології; навчити студентів основам промпт-інженерії та критичної оцінки результатів роботи з AI [1; 35].

6. *Співпраця з промисловістю:* створити партнерства з промисловістю для доступу до реальних даних про процеси [4; 28; 36; 37].

*Напрями подальших досліджень:*

1. довгострокові дослідження впливу AI-інтегрованих курсів на кар'єрні результати випускників;

2. розробка метрик для оцінки AI-грамотності студентів;

3. створення відкритих платформ DT для освіти в галузі хімічної технології;

4. вирішення питань справедливості та доступності під час використання дорогих AI інструментів;

5. розробка україномовних AI інструментів для хімічної технології.

*Заключне слово.* Інтеграція штучного інтелекту в викладання хімічної технології пропонує потужні інструменти для покращення інженерної освіти. Успішне впровадження вимагає збалансованого підходу, що поєднує технічні можливості з педагогічною мудрістю, етичною відповідальністю та чутливістю до потреб студентів. Викладачі хімічної технології повинні бути не просто користувачами інструментів штучного інтелекту, а активними формувальниками їх ролі в інженерній освіті. Наш професійний обов'язок використовувати штучний інтелект для того, щоб посилювати глибоке навчання, критичне мислення, навички вирішення проблем та академічну доброчесність у майбутніх інженерів-хіміків.

## Заява про використання штучного інтелекту

Під час підготовки цієї роботи автор використовував інтелектуальну пошукову систему на базі штучного інтелекту Perplexity для збору та попереднього аналізу даних, а

також для формулювання чорнового варіанту тексту. Остаточний зміст, інтерпретація результатів, критичний аналіз та верифікація для забезпечення точності, релевантності та відповідності академічним стандартам, а також наукові висновки належать автору, який несе повну відповідальність за точність і добросовісність представленої інформації. Використання AI розкрито відповідно до принципів наукової прозорості та академічної добросовісності.

### Скорочення

AI – Artificial Intelligence, штучний інтелект.

AIVCGT – AI Virtual Chat-GPT Trainer, віртуальний чат-тренажер GPT на базі штучного інтелекту.

AR – Augmented Reality, доповнена реальність.

CFD – Computational Fluid Dynamics, обчислювальна гідрогазодинаміка.

ChIMES – Chebyshev Interaction Model for Efficient Simulation, Модель взаємодії Чебишева для ефективного моделювання.

DT – Digital Twins, цифрові двійники.

DTech – Data Technologies, цифрові технології.

DTLAB – Digital Twin Laboratory, лабораторія цифрових двійників.

IDEE – Introduce, Design, Evaluate, Evolve, впровадження, проектування, оцінка, розвиток.

IoT – Internet of Things, інтернет речей.

ITS – Intelligent Tutoring System, інтелектуальна система навчання, яка застосовується для персоналізації освітнього процесу.

LLM – Large language Model, велика мовна модель.

ML – Machine Learning, машинне навчання.

MR – Mixed Reality, змішана реальність.

NLP – Natural Language Processing, обробка природної мови.

PBL – Project-Based Learning, проектне навчання.

PCA – principal component analysis, метод головних компонент.

PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, Рекомендовані елементи звітності для систематичних оглядів та метааналізів.

VR – Virtual Reality, віртуальна реальність.

XR – Extended Reality, розширена реальність.

### References

- [1] Keith, M., Keiller, E., Windows-Yule, Ch., Kings, I., Robbins, Ph. (2025). Harnessing generative AI in chemical engineering education: Implementation and evaluation of the large language model ChatGPT v3.5. *Education for Chemical Engineers*, 50, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2025.01.002>.
- [2] Ramos, B., Condotta, R. (2024). Enhancing Learning and Collaboration in a Unit Operations Course: Using AI as a Catalyst to Create Engaging Problem-Based Learning Scenarios. *Journal of Chemical Education*, 101(8), 3246–3254. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00244>.
- [3] University of Tulsa. (2025). UTulsa's chemical engineering program integrates AI into every course. <https://utulsa.edu/news/utulsas-chemical-engineering-program-integrates-ai-into-every-course/>.
- [4] Carnegie Mellon University. (2024). Master's in Artificial Intelligence Engineering-Chemical Engineering. <https://wwwcheme.engineering.cmu.edu/education/graduate-programs/masters/aie-che.html>.
- [5] Supan, K. (2024). Using artificial intelligence case studies in a thermodynamics course. *ASEE Annual Conference Proceedings*. <https://peer.asee.org/using-artificial-intelligence-case-studies-in-a-thermodynamics-course.pdf>.
- [6] Ghasem, N. (2025). The significance of artificial intelligence and machine learning in contemporary chemical engineering curriculum. *Cogent Engineering*, 12(1), 2560057. <https://doi.org/10.1080/2331186X.2025.2560057>.
- [7] Bilgin, B. (2025). Generative AI in chemical engineering education: Rebuilding courses and students' perception of AI. *ASEE Annual Conference*, Paper ID 2025-123. <http://doi.org/10.18260/1-2--56640>.
- [8] Shin, J., Son, J. (2024). Education and Training Using Digital Twin in Hazardous Chemical Manufacturing Plants. In: Tareq Ahram and Waldemar Karwowski (eds) *Human Factors in Design, Engineering, and Computing. AHFE (2024) International Conference. AHFE Open Access*, 59. <http://doi.org/10.54941/ahfe1005762>.
- [9] Galeazzi, A., Marengi, P., Duo, L., Galardo, M., Rota, R., Sancassani, S., Manenti, F. (2024). Virtual reality and digital twins for enhanced learning in chemical engineering. *Computer Aided Chemical Engineering*, 53, 3535–3540. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28824-1.50590-1>.
- [10] Savage, T., Basha, N., McDonough, J., Krassowski, J., Matar, O., del Rio Chanona, E. A. (2024). Machine learning-assisted discovery of flow reactor designs. *Nature Chemical Engineering*, 1, 522–531. <https://doi.org/10.1038/s44286-024-00099-1>.
- [11] Woinaroschy, A. (2021). Interdisciplinarity: Artificial intelligence and chemical engineering. *Journal of Engineering Studies and Innovation*, 6(4), 473–480.
- [12] Rebello, C. M., Nogueira, I. B. R. (2025). Digital twins in chemical engineering: An integrated framework for identification, implementation, online learning, and uncertainty assessment. *Computers & Chemical Engineering*, 200, 109178. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2025.109178>.
- [13] Yuriev, E., Wink, D. J., Holme, T. A. (2024). The dawn of generative artificial intelligence in chemistry education. *Journal of Chemical Education*, 101(8), 2957–2959. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00836>.
- [14] Wu, M., Boase, N. R. B. (2023). An artificial intelligence

- course for chemical engineers. *Education for Chemical Engineers*, 45, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2023.09.004>.
- [15] Rudniy, A. (2024). Artificial intelligence for automated scoring and feedback in chemistry courses. *Journal of Writing Analytics*, 7(1), 49–75. <https://doi.org/10.37514/JWA-J.2024.7.1.02>.
- [16] Vincent-Ruz, P., Boase, N. R. B. (2022). Activating discipline specific thinking with adaptive learning. *PLOS ONE*, 17(11), e0276546. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276086>.
- [17] Desaire, H., Chua, A. E., Kim, M.-G., Hua, D. (2023). Accurately detecting AI text when ChatGPT is told to write like a chemist. *Cell Reports Physical Science*, 4(11), 101672. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101672>.
- [18] Perkins, M. (2023). Academic integrity considerations of AI large language models in the post-pandemic era. *Journal of University Teaching & Learning Practice*, 20(2), 1–18. <https://doi.org/10.53761/1.20.02.07>.
- [19] Araújo, J. L., Saúde, I. (2024). Can ChatGPT enhance chemistry laboratory teaching? Using prompt engineering to enable AI in generating laboratory activities. *Journal of Chemical Education*, 101(5), 1858–1864. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00745>.
- [20] Chiu, W.-K. (2021). Pedagogy of emerging technologies in chemical education during the era of digitalization and AI: A systematic review. *Education Sciences*, 11(11), 709–732. <https://doi.org/10.3390/educsci11110709>.
- [21] Pasichnyi, R., Serhieiev, V., Shevchenko, S., Petrukha, N., Hryvna, B. (2024). Digital transformation of higher education as a driver of Ukraine's integration. *Brazilian Journal of Technology and Society*, 17(4), 232–245. <https://dx.doi.org/10.14571/brajets.v17.nse4.2024>.
- [22] Eurydice. (2025). Ukraine: Digital transformation of education as a strategic path to resilience. *Eurydice News*, 27. <https://eurydice.eacea.ec.europa.eu/news/ukraine-digital-transformation-education-strategic-path-resilience-and-innovation>.
- [23] Kudria, O., Skovronskyi, B., Marushchak, O., Honcharova, N., Sipi, V. (2024). The Role of Innovative Techniques in Development of STEM-education in Ukraine. *ACADEMIA*, 35-36. 132–155. <https://doi.org/10.26220/aca.5006/>
- [24] Masterchemoinfo. (2025). ChEMoinformaticsPlus: the Erasmus Mundus Master degree in Chemoinformatics across Europe and beyond. <https://masterchemoinfo.u-strasbg.fr>.
- [25] University of Michigan ChE. (2025). Accelerating innovation with machine learning. Retrieved from <https://che.engin.umich.edu/2025/02/24/accelerating-innovation-with-machine-learning/>.
- [26] Bělohav, V., Jirout, T., Malecky, M., Herink, T. (2024). Effective application of operator training simulator in experiential education. *Computer Applications in Engineering Education*, 32(4), e22743. <https://doi.org/10.1002/cae.22743>.
- [27] Zhou, Z., Oveissi, F., Langrish, T. (2024). Applications of augmented reality (AR) in chemical engineering education: Virtual laboratory work demonstration to digital twin development. *Computers & Chemical Engineering*, 188, 108784. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108784>
- [28] Mane, S., Dhote, R. R., Sinha, A., Thirumalaiswamy, R. (2024). Digital twin in the chemical industry: A review. *IET Digital Twins*, 1(2), 118–130. <https://doi.org/10.1049/dgt2.12019>.
- [29] Zhang, Y., Wang, W., Yang Q., Tang X., Ruan, W., Li, Y., Daoerji, S., Zhang, X., Ye, Y., Huang, J., Li, J., Yang, Y., Wu, X., Yang, H., Cao, T. (2024). Promoting digital twin technology application for process industry: A novel generation modelling platform and its implementations. *IET Digital Twins*, 1(1), 51–74. <https://doi.org/10.1049/dgt2.12010>.
- [30] ChemCopilot. (2025). Digital Twins and PLM: Creating digital twins of chemical products for lifecycle optimization. <https://www.chemcopilot.com/blog/digital-twins-and-plm-lifecycle-optimization>.
- [31] Tanner, J., Newbery, C. (2022). Digital twins in the chemical process industries. *The Chemical Engineer*, 29. <https://www.thechemicalengineer.com/features/digital-twins-in-the-chemical-process-industries>.
- [32] Laub, J.-F., Zhang, J., Heyer, M., Lapkin, A. (2025). Automated generation of mechanistic models for chemical processes. *ChemRxiv Preprint*. <https://chemrxiv.org/engage/chemrxiv/article-details/67dd89d681d2151a02545d2c>.
- [33] DWSIM - Open Source Process Simulator/ URL: <https://sourceforge.net/projects/dwsim/>
- [34] ML.NET. [https://dotnet.microsoft.com/en-us/apps/ai/ml-dotnet?utm\\_source=chatgpt.com/](https://dotnet.microsoft.com/en-us/apps/ai/ml-dotnet?utm_source=chatgpt.com/)
- [35] Akademija Shi dlja osvitanja vid Google. URL: <https://google.brandlive.com/AI-Academy-for-University-Teachers-Cohort-2/uk/home/> Data zvernennya 15.11.2025.
- [36] Science City: New Opportunities for Business, Science, and Innovation. <https://mon.gov.ua/en/news/science-city-novi-mozhlyvosti-dlia-biznesu-nauky-ta-innovatsii/> Data zvernennya 15.11.2025.
- [37] Klaster informacijnykh promyslovykh tekhnologij. <https://www.iitc.org.ua/>
- [38] National Office Erasmus+UA. <https://erasmusplus.org.ua/>
- [39] Podzharsky, M. A., Nesterov, A. M. (2021). Modeling of the technological process of sulfur dioxide oxidation using the CHEMCAD program. *Journal of Chemistry and Technologies*, 29(4), 576–585. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v29i4.244347>.