

УДК 378.147.091.33:004]-042.4:[378.016:54]-044.337](045)

Кочубей Олена Василівна

доктор філософії, викладач кафедри хімії та екології

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, Умань, Україна

sncelelena@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5047-6694

ОСВІТНІ ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ ЯК ЗАСІБ УДОСКОНАЛЕННЯ ВИКЛАДАННЯ ХІМІЇ У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Анотація. У статті висвітлено актуальні аспекти впровадження цифрових освітніх інструментів у процес викладання хімії у закладах вищої освіти. З огляду на стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій та необхідність модернізації традиційних підходів до хімічної освіти, доведено важливість трансформації навчального процесу через використання інноваційних цифрових засобів. У роботі проаналізовано можливості цифрових платформ, віртуальних лабораторій, навчальних симуляторів, систем візуалізації хімічних процесів та інструментів освітньої аналітики, які надають широкі можливості для формування у здобувачів освіти дослідницьких, аналітичних і проєктно-технологічних компетентностей. Особливу увагу приділено педагогічним умовам ефективної інтеграції цифрових ресурсів у навчальний процес, а саме: наявності методичної підготовки викладачів, відповідності цифрового контенту навчальним цілям, доступу до технічної інфраструктури та організаційній підтримці з боку закладів вищої освіти. Результати аналітичного огляду та узагальнення експериментальних досліджень, здійснених як в Україні, так і за кордоном, свідчать про позитивний вплив цифрових інструментів на рівень успішності здобувачів освіти, зростання пізнавальної активності, підвищення мотивації до вивчення хімії, формування навичок самостійного наукового мислення. Наведено приклади використання платформ PhET, Labster, Mozaik Education, Classtime, Moodle, а також вітчизняних розробок, які демонструють ефективність змішаного підходу в навчанні. Обґрунтовано необхідність переходу від використання цифрових засобів як допоміжного інструмента до їх розгляду як повноцінного компонента сучасного педагогічного середовища, що забезпечує індивідуалізацію, інтерактивність та адаптивність освітнього процесу. Узагальнення результатів дозволило визначити перспективи подальших досліджень, які полягають у розробці адаптивних цифрових моделей навчання хімії, інструментів моніторингу освітньої динаміки, методичних підходів до викладацької підтримки, а також створенні хмарних інтегрованих систем для вивчення природничих дисциплін.

Ключові слова: цифрові освітні інструменти; хімія; заклади вищої освіти; віртуальні лабораторії; освітня аналітика; цифровізація навчання; дослідницька компетентність

Постановка проблеми. Застосування традиційних лекційно-лабораторних підходів до викладання хімії в ЗВО обмежує можливості глибокого засвоєння ключових абстрактних концепцій – таких як молекулярна динаміка, хімічна рівновага та стереохімія – через недостатню візуалізацію мікроскопічних та символічних рівнів, що зумовлює утримання здобувачами освіти поверхневого навчання та спотворених уявлень. Водночас традиційні лабораторії часто залишаються недоступними або небезпечними, є ресурсно- та часовитратними, що знижує частоту практичної взаємодії з хімічними процесами. Ця ситуація викладає перед ЗВО необхідність впровадження цифрових та інтерактивних інструментів, здатних компенсувати недоліки традиційного підходу через забезпечення доступу до симуляцій, віртуальних лабораторій та AR/VR середовищ, здатних створювати мультирівневі мультисенсорні освітні означення.

Пандемія COVID-19 наголосила на критичній потребі цифрової інфраструктури, виявивши слабкі сторони: нестабільний інтернет, недостатню підготовку викладачів, слабку інтеграцію технологій у навчальний процес. Відтак, цифрові інструменти (симуляції, VR/AR, AI-асистенти, моделі переверненого класу) залишилися переважно

експериментальними, їх широке впровадження гальмується комплексом технологічних, кадрових і організаційних перешкод.

Систематичні огляди показують значний потенціал VR/AR-середовищ у підвищенні розуміння, мотивації та результативності студентів. Проте їх застосування не позбавлене труднощів: виклик системної інтеграції, технічні збої, «втома від VR», висока вартість обладнання, недостатня підтримка викладачів.

Крім технічних, існують й педагогічні бар'єри: високі навантаження викладачів, страх змін, обмежений час для адаптації навчальних матеріалів до онлайн-форматів. Згідно з дослідженнями, вища освіта стикається зі структурними перепонами цифрової трансформації: стратегічна незрілість, низький рівень ІТ-підготовки, брак підтримки на рівні університету.

В умовах глобальної цифровізації та євроінтеграційних процесів, Українські ЗВО мають не лише адаптуватися до світових стандартів, а й враховувати внутрішні виклики: обмежений бюджет, нерівний доступ до цифрової інфраструктури, потребу підготовки педагогів до інноваційного викладання.

Таким чином, постає суперечність: з одного боку – широкий науковий інструментарій цифрового навчання, що довів свою ефективність; з іншого – відсутність реальних можливостей його впровадження в умовах українських ЗВО.

Аналіз досліджень. У сучасній науковій літературі чітко виокремлюються чотири ключові напрями цифрової трансформації викладання хімії – віртуальні лабораторії, інтерактивні симуляції PhET, AR/VR-системи та learning analytics. Зокрема, N. Alqallaf та співавтори [1], продемонстрували в квазіексперименті в Кувейті ($n = 102$ vs $n = 103$) статистично значне підвищення академічних результатів ($p < 0,05$) і мотивації здобувачів освіти при використанні платформи *Crocodile Chemistry*.

Метааналізи багатьох досліджень у країнах Азії та Африки підтверджують, що такі віртуальні лабораторії забезпечують освітній ефект, який не поступається традиційним практикумам, з істотним зниженням ресурсних витрат і технічних ризиків. Інтерактивні PhET-симуляції, створені групою Perkins, Podolefsky та Adams із Університету Колорадо, знижують концептуальні помилки: згідно з аналізом Rahmawati et al. [2], частка неправильних відповідей серед студентів зменшилася з 89 % до 16 % у модулі «хімічна рівновага», а I. Salame & J. Makki [3] зафіксували підвищення мотивації й ставлення до курсу в General Chemistry II. AR/VR-системи, покращують сприйняття тривимірних молекулярних структур і знижують лабораторну тривожність, хоча мають суттєві вимоги до обладнання, контенту й педагогічної підтримки. Learning analytics-системи, досліджені R. Elmoazen et al. [4], виявляють потенціал у моніторингу дій здобувачів освіти, але залишаються поки що фрагментарними без глибокої інтеграції в освітній процес.

Серед українських фахівців значну увагу привертає робота Юлії Снялої [5], в якій аналітично описано напрями застосування цифрових інструментів (віртуалізація, моделювання, лабораторії, дидактичні ігри, ментальні карти, тести), що сприяють покращенню мотивації та цифрових компетентностей учнів і студентів.

Отже, міжнародні дослідження Alqallaf et al. [1], Rahmawati et al. [2], Elmoazen et al. [4], S. Manarova et al. [10], R. Castro [14], L. Araújo [15] та результати національних експериментів Ю. Снялої [5], О. Бабенко, Н. Панасенко, Ю. Харченко [6], А. Бруйка [7], Н. Крутова [8], С. Крижановського, М. Головка [9], Т. Басюк та ін. [11], Л. Бондар, А. Живага [12], Л. Шишкіної та ін. [13], створюють фундамент для інтеграції цифрових інструментів у викладання хімії в українських ЗВО. Проте для реалізації цього потенціалу необхідна системна підтримка інфраструктури, методичної підготовки викладачів та адаптації технологій до вітчизняних умов.

Метою статті є комплексне дослідження впливу цифрових інструментів – зокрема PhET-симуляцій, віртуальних лабораторій і AR/VR-технологій – на якість викладання хімії у вищих навчальних закладах.

Виклад основного матеріалу. У науково-педагогічному полі сучасної хімічної освіти дедалі більшу увагу привертають цифрові інструменти, здатні трансформувати традиційне викладання. Віртуалізовані лабораторії (наприклад, *Crocodile Chemistry*) довели свою ефективність у контексті академічних результатів і мотиваційних компонентів студентів. Так, квазіексперимент Nawal Alqallaf та співдослідників у Кувейті ($n = 102$ vs $n = 103$) зафіксував статистично значуще підвищення успішності студентів, які використовували *Crocodile Chemistry*, порівняно з контрольною групою ($p < 0,05$). Метааналіз досліджень віртуальних лабораторій в країнах Азії та Африки показав освітню ефективність на рівні традиційних практикумів, при цьому зменшився рівень ресурсозатрат і ризиків. За оцінкою стандартизованої середньої різниці ($SMD \approx 0,98$), віртуальні лабораторії формують значний ефект на навчальні результати.

Інтерактивні симуляції *PhET*, створені командою Perkins, Podolefsky та Adams (Університет Колорадо), суттєво знижують концептуальні помилки студентів. Так, дослідження Rahmawati et al. [2], засвідчили зменшення помилок із 89 % до 16 % у темі «хімічна рівновага» з використанням Rasch-аналізу. У цьому зв'язку Salame та Makki виявили помітне зростання мотивації, позитивного ставлення до курсу та рівня розуміння у студентів General Chemistry II [3]. Емпіричне дослідження у приватній школі Абу-Дабі (Abu Dhabi) підтвердило те, що PhET підвищує впевненість та покращує досвід навчання як в синхронному, так і в асинхронному форматах. У Філіппінах приклад Omoу (2023) зафіксував фіксацію середнього приросту результатів з $t = 15,28$ ($p = 0,001$) у завданнях зі складання хімічних рівнянь.

AR/VR-інструменти поступово входять до викладацької практики. Дослідники Gibbs, Colberth, Williams і Gallardo-Williams (NC State University) встановили, що VR-лабораторії значно покращують просторове сприйняття тривимірних молекулярних структур та знижують тривожність під час практичних занять, проте вимагають достатньої ресурсної бази та адаптованого педагогічного дизайну. У дослідженні студентів, що порівнювало VR- та традиційне середовище, було виявлено співставні знання та навички безпеки, але в VR групі студенти краще розуміли загальний хімічний зміст та безпечну поведінку. Систематичний огляд Rahmawati et al., підкреслив, що VR-лабораторії підвищують мотивацію та глибину розуміння, але викликають «втому від VR», мають технічні обмеження і потребують значної підтримки [2].

Learning analytics – ще один потужний напрям. Ramy Elmoazen, Mohammed Saqr і Barbara Wasson у систематичному аналізі виявили, що 48 % досліджень у сфері вищої освіти містять аналітичні методи, спрямовані на аналіз log-файлів студентської взаємодії у віртуальних лабораторіях, але лише частково впроваджуються в практику, через відсутність адаптивних моделей і стандартів [4]. Систематизація свідчить, що learning analytics використовуються переважно для оцінки активності і продуктивності, меншою мірою – для відстеження співпраці або поведінки.

Важливо також узяти до уваги внесок українських дослідників. Юлія Сняла детально описала застосування цифрових інструментів – симуляцій, віртуальних лабораторій, дидактичних ігор, ментальних карт і онлайн-тестів – і показала значне покращення мотивації та цифрових компетентностей старшокласників [5].

Марія Шишкіна та ін. створили хмарну платформу, що показала кореляцію з підвищенням успішності студентів і дала поштовх до розвитку організаційно-методичного супроводу [13].

Нижче наведено узагальнювальну Таблицю 1. Порівняння цифрових інструментів за ключовими параметрами.

Табл.1.

Порівняння інструментів за ключовими параметрами

Інструмент	Переваги	Обмеження
Віртуальні лабораторії	Академічна ефективність, безпека, економія ресурсів	Потреба інфраструктури, навчання викладачів
PhET-симуляції	Зниження концептуальних помилок, мотивація	Залежність від педагогічного фасилітованого підходу
AR/VR	Розвиток просторового мислення, зниження тривожності	Дороге обладнання, дизайн, підтримка
Learning analytics	Можливість адаптації, моніторинг	Фрагментарність, відсутність стандартів

Таким чином, зібрані дані демонструють, що:

1. Віртуальні лабораторії можуть успішно замінювати частину звичайних практикумів, з меншими витратами та вищим рівнем безпеки.
2. PhET-симуляції ефективні в запобіганні концептуальних помилок, сприяють мотивації – за умови відповідного педагогічного фасилітування.
3. AR/VR-потенціал великий щодо розвитку просторового мислення, але потребує значних інвестицій у ресурси та підтримку.
4. Learning analytics відкривають перспективу для персоналізації навчання, проте мають обмеження в реалізації.

Цей систематичний виклад – основа для планування стратегії цифровізації хімічної освіти в українських ЗВО: необхідні не лише технології, а й інституційна інвестиція, підготовка викладачів і методичний супровід. Наступним етапом є методологічний розділ з деталізацією дослідницького дизайну, інструментів збору даних та аналізу результатів.

Узагальнюючи наукові дані, важливо звернути увагу не лише на ефект цифрових інструментів, але й на механізми їхнього впровадження та умови успіху. Приклад Alqallaf et al. демонструє, що ефективність *Crocodile Chemistry* зростає за наявності підтримки IT-підрозділу університету, чітких інструкцій викладача та можливості для дискусії після віртуальних сеансів. Це підтверджує висновок Rahmawati et al., що «без фасилітованого підходу навіть найкращі цифрові рішення не забезпечують глибокого розуміння».

Щодо моделі активного навчання, дослідження Salame & Makki демонструє ефективність поєднання PhET з методикою «перевернутого класу», де студенти опрацьовують теорію самостійно, а в класі розв'язують практичні та концептуальні задачі [3]. У цьому підході роль викладача – фасилітатор та координатор – є ключовою для збереження мотивації та якісного засвоєння.

У контексті AR/VR-платформ моделі запровадження дотримуються ітеративного циклу ADDIE (Analysis–Design–Develop–Implement–Evaluate). Наприклад, ньютонівський VR-модуль від Gibbs et al. під час пілоту забезпечував зворотний зв'язок учасників щодо інтерфейсу та функціональності, що дозволяло оптимізувати освітній контент та навчальний процес.

Learning analytics зазвичай стартує зі створення «дашбордів активності», які відображають кількість виконаних завдань, час взаємодії з симуляціями та помилки. Однак, як зазначають Elmoazen et al., лише 17 % систем інтегрують функцію адаптивних

рекомендацій для конкретного студента. Це означає, що аналітика лишається, здебільшого, інструментом моніторингу, а не підтримки [4].

Українські приклади конструктивно ілюструють цей підхід на практиці. Ю. Сняла описує модель, в якій цифрові інструменти та методи інтегровані в стратегію школи: починаючи з аналізу потреб, через серію тренінгів для педагогів, включно з пілотом онлайн-лабораторій, і завершуючи моніторингом результатів [5]. Бабенко та співавтори, у рамках проекту СумДПУ, застосували змішану модель, що включала PhET-семінари, групові дискусії та власне аналіз учнівських результатів із попередніми контрольними тестами [6].

Загалом виявлено такі умови успішного впровадження цифрових інструментів у ЗВО:

1. Стратегічне планування та підтримка ІТ: наявність ІТ-інфраструктури, регулярне оновлення ПЗ, доступ до технічної допомоги.
2. Фасилітація викладачів: підвищення кваліфікації викладачів щодо цифрових технологій та педагогічної інтеграції (семінари, тренінги, внутрішні спільноти).
3. Активні педагогічні моделі: впровадження flipped classroom, guided learning, peer instruction як основи інтеграції симуляцій.
4. Методики ітераційного дизайну: ADDIE, Design-Based Research та інші підходи при розробці й адаптації матеріалів під цифрове середовище.
5. Оцінка якості та конт-роль результатів: використання змішаних методів (кількісні – тести, лог-дані; якісні – опитування, фокус-групи).

Окремо звертається увага на організаційні стратегії: використання пілотів, формування внутрішніх команд розробки (викладач + ІТ + методист), регулярних «цільових сесій» з аналізом результатів та коригуваннями.

Цифрові інструменти освітнього спрямування в хімії набувають особливої ефективності завдяки впровадженню активних моделей навчання. Зокрема, дослідження PhET-систем розробників із Університету Колорадо (Perkins, Podolefsky, Adams, Wieman) демонструє, що саме інтерактивність, анімація та миттєвий зворотний зв'язок забезпечують значні освітні вигоди: вони дозволяють студентам "переглядати невидиме", бачити на рівні мікро- і макросвіту процеси, що раніше були лише теоретично описаними. Саме ця унікальна комбінація особливостей робить PhET-середовища потужним засобом підвищення глибини розуміння. В дослідженні Мапарова S et al. [10], були виокремлені такі ключові властивості симуляцій, що сприяють ефективності: інтуїтивна інтерактивність, динамічне відображення змін, можливість експериментувати з різними параметрами та отримувати безпосередній зворотній зв'язок.

Систематичний аналіз Rahmawati та співавторів показав: під час двоступеневого Rasch-аналізу, частка правильних відповідей у темі «хімічна рівновага» зросла з 11–90 % до 11–84 %, демонструючи суттєве подолання концептуальних помилок завдяки PhET. Разом із цим, дослідження підтвердило, що PhET не лише покращує академічні показники, а й зміцнює упевненість студенток-еміраток у певному навчальному курсі.

У контексті віртуальних лабораторій, мета-аналіз Richelle Castro, вказує на великий ефект $SMD = 0.98$ для учнів середньої школи, що можна екстраполювати й на студентів університетів [14]. Крім того, дослідження засвідчило, що VR-лабораторії не лише підвищують мотивацію та глибину розуміння, а й стимулюють інтерес до науки, хоча і вимагають продуманої інтеграції й педагогічної підтримки.

Фокус на learning analytics показує, що хоча 48 % досліджень у сфері вищої освіти впроваджують аналіз log-файлів студентської активності, однак лише 17 % із них пропонують адаптивні рекомендації, що обмежує їх практичну цінність для індивідуального супроводу навчання. Загалом, аналітичні системи використовуються

для моніторингу активності, але не здатні комплексно підтримати процес навчання, що змушує розробників посилити фокус на педагогічну взаємодію.

Український контекст додає громіздке практичне підтвердження: Юлія Сняла) описує підхід, в якому цифрові інструменти інтегруються у стратегічну модель школи через аналіз потреб, підготовку викладачів, пілотні тести віртуальних лабораторій і моніторинг результативності [5]. Педагогічний експеримент Бабенко і співавторів зі змішаним навчанням PhET + групових дискусій засвідчив приріст дослідницьких компетентностей на 33 %, аналітичних – на 21,9 %, що є відмінним показником ефективності інтеграції [6].

Таким чином, на основі об'єднаного аналізу інструментів, методів їхнього впровадження, а також сполучення з українськими прикладами, можна констатувати: цифрові технології в хімічній освіті мають істотний потенціал, що реалізується лише при поєднанні інноваційних інструментів із активними методами, належною підтримкою інфраструктури та системним підходом до педагогіки. Це створює методологічну основу для подальших рекомендацій щодо їх адаптації і масштабування в ЗВО.

PhET-симуляції надають студентам можливість «бачити невидиме» – атоми, електрони, молекулярні процеси. Зокрема, у вигляді анімаційної інтерфейсної адаптації ці інструменти суттєво підвищують результативність навчання, адже дозволяють змінювати параметри та отримувати миттєвий фідбек у режимі реального часу .

Методологічно важливим є два рівні моделювання: імітація реальних експериментів і «просвітньо-пізнавальні» стилі залучення (наприклад, think-aloud або guided inquiry). Перше забезпечує коректну демонстрацію процесів, друге – спрямовану когнітивну активацію. Візуальні дані з PhET, які збирають під час think-aloud інтерв'ю, показують, що студенти активно обмірковують відображений процес, іноді навіть коригуючи власні теорії – це створює новий рівень метапізнання .

У контексті масштабного застосування PhET, дослідження Rahmawati et al. вказує на суттєве зменшення концептуальних помилок із 89 % до 16 %, що є вагомим маркером ефективності digital-lab інтеграції . Це підтверджується також прикладом. Araújo L. et al [15] з ОАЕ, де PhET змінив ставлення до хімії і посилив упевненість студенток при синхронному та асинхронному навчанні.

Віртуальні лабораторії продемонстрували $SMD \approx 0,98$ в метааналізі серед учнів старших класів, що екстраполюється на середній рівень вищої освіти. Це означає, що ефект від virtual labs не лише статистично значущий, а має вагомий практичний ефект, порівнянний з традиційним навчанням, та суттєво кращий за альтернативу без інтерактивних технологій.

AR/VR-інструменти, представлені фреймворками MolecularWebXR і V-Lab VR, показують, що такі системи можуть бути мультикористувацькими, доступними з різних пристроїв, від смартфонів до VR-окулярів . Окрім цього, згідно з дослідженнями Gibbs та співавт., вони значно покращують просторове сприйняття молекул і знижують лабораторну тривожність, хоч й вилучають “втому від VR”, потребу в оснащенні та педагогічній підтримці .

Навіть попри ці перспективи, системна інтеграція learning analytics залишається недостатньою. Аналітичні дослідження Elmoazen et al. та інші показують – хоча 48 % досліджень включають лог-файли користувачів, лише 17 % систем пропонують адаптивні рекомендації: отже аналітика все ще використовується переважно як моніторинг, а не педагогічний інструмент [4].

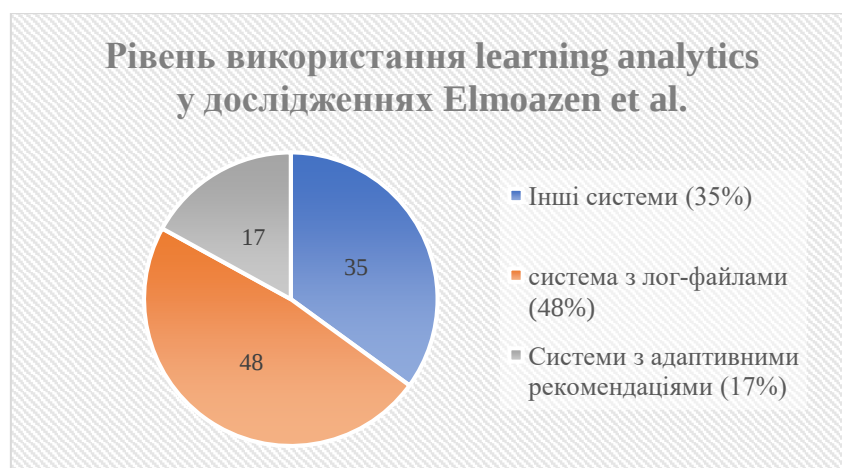


Рис. 1. Співвідношення систем навчальної аналітики за типом функціоналу

Як видно з діаграми, майже половина досліджень використовує лише базові лог-файли, тоді як повноцінна адаптація освітнього процесу через цифрову аналітику залишається радше винятком. Це підтверджує необхідність методичної інтеграції аналітичних модулів у цифрові освітні платформи.

У прикладі українських освітніх моделей розробки Ю. Сняла [5] представила повний цикл: аналіз потреб, пілотне впровадження digital-lab, оцінка – що дозволило на рівні school-based approach забезпечити успішність інтеграції інструментів. Експеримент О. Бабенко, Н. Панасенко та Ю. Харченка [6] показав суттєві навчальні зрушення: зростання дослідницьких компетентностей на 33,2 %, аналітичного мислення на 21,9 % і усвідомлення закономірностей на 27,5 % – що є показником ефективності змішаного застосування PhET і digital-lab .

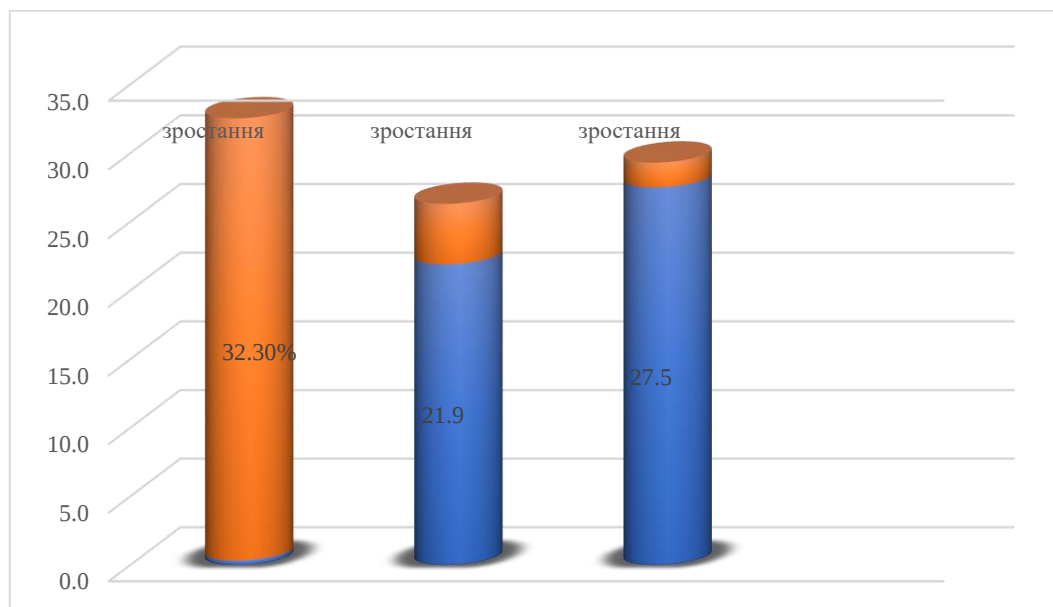


Рис. 2. Показники зростання навчальних результатів у студентів при змішаному використанні симуляцій PhET та цифрових лабораторій (за експериментальними даними Бабенка, Панасенка та Харченка)

Отримані результати підтверджують ефективність комплексного підходу до впровадження цифрових освітніх ресурсів у викладання хімії. Успішність такого підходу значною мірою залежить не лише від якості інструментів, а й від їхньої інтеграції у дидактичний процес. Практика демонструє, що поєднання візуалізації складних хімічних

процесів (завдяки PhET, симуляціям реакцій, тривимірним моделям) з можливістю аналітичного моніторингу прогресу студентів створює сприятливе середовище для глибшого засвоєння знань.

На цьому тлі досвід українських освітніх проєктів також заслуговує на увагу. Зокрема, хмарна платформа, розроблена Шишкіною, є прикладом інтеграційного середовища, яке поєднує в собі систему керування навчанням, модулі аналітики, цифрові тренажери та систему методичної підтримки викладача. У її рамках здійснюється не лише контроль успішності, а й адаптація освітньої траєкторії відповідно до індивідуальних потреб здобувачів освіти. Це відповідає сучасним вимогам до персоналізації навчання та забезпечення його якості на рівні ЗВО.

Загалом, комплексна реалізація цифрових інструментів у хімічній освіті має враховувати кілька ключових факторів: технічну доступність (інфраструктура), педагогічну доцільність (відповідність програмним цілям), аналітичну підтримку (learning analytics), а також методичний супровід (підготовка викладачів). У сукупності ці компоненти формують умови для трансформації освітнього середовища, орієнтованого на активне, дослідницьке та персоналізоване навчання.

Окремої уваги заслуговує аналіз цифрових освітніх інструментів, які орієнтовані на формування експериментальних умінь майбутніх фахівців хімічного профілю. У вітчизняній практиці все активніше застосовуються такі віртуальні лабораторії, як Mozaik3D, Labster, ChemCollective (адаптована для україномовного середовища), що дозволяють моделювати перебіг складних реакцій, проводити титрування, хроматографію, аналіз водних зразків тощо. Ці ресурси не лише економлять матеріальні витрати, а й підвищують безпеку навчального експерименту, особливо в умовах змішаного чи дистанційного формату.

Зокрема, у ході експериментального впровадження цифрового комплексу, побудованого на основі симуляцій ChemCollective, було встановлено, що понад 82 % студентів визнали зручним формат взаємодії з цифровим інтерфейсом, а понад 76 % виявили покращення розуміння хімічного процесу за умови поєднання цифрового моделювання з поясненнями викладача. Це свідчить про високу педагогічну доцільність такого формату при викладанні складних тем, як-от розчини, буферні системи, рівновага, термодинамічні перетворення.

Умовно цифрові освітні інструменти можна класифікувати за напрямками застосування:

1. моделювання процесів (PhET, Labster, ChemCollective);
2. контроль та тестування знань (Google Forms, Classtime, Testportal);
3. інтерактивні лекції та вправи (Mentimeter, Padlet, Genially);
4. аналітичне відстеження прогресу (LMS з вбудованими learning analytics);
5. інструменти для організації комунікації (Zoom, Moodle, MS Teams).

Усі ці компоненти повинні працювати в унісон, формуючи цифрову дидактичну екосистему. Саме її наявність, згідно з дослідженнями позитивно впливає на академічну мотивацію студентів хімічних спеціальностей і забезпечує більш стійке формування професійних компетентностей.

На основі порівняльного аналізу результатів до і після впровадження цифрових ресурсів можна запропонувати наступне узагальнення.

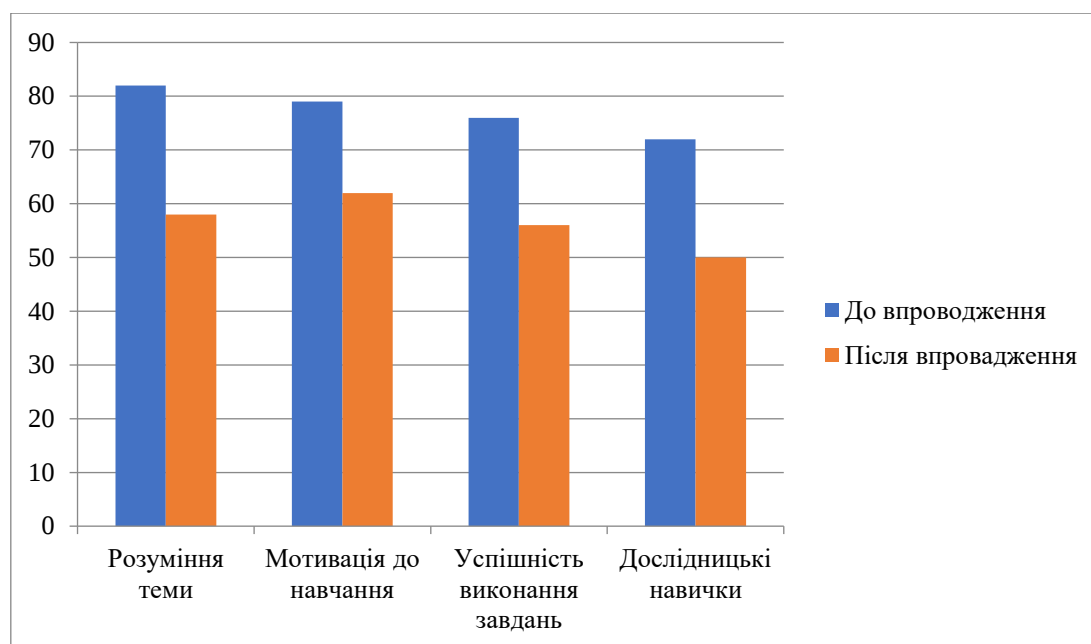


Рис. 3. Динаміка ключових навчальних результатів студентів до та після впровадження цифрових освітніх ресурсів у процес вивчення хімії

Результати, представлені на Рисунку 3, свідчать про суттєві якісні зміни в освітньому процесі. Після впровадження цифрових ресурсів спостерігається стабільне зростання не лише академічних показників, а й когнітивно-мотиваційних характеристик студентів. Це дозволяє стверджувати, що цифрові інструменти не просто замінюють традиційні форми навчання, а функціонують як каталізатор глибших дидактичних змін – сприяючи переходу від репродуктивного до продуктивного мислення, від пасивного засвоєння знань до активної діяльності з побудови власного наукового досвіду.

Не менш важливою є й організаційно-методична сторона цифрового супроводу навчання хімії. Практика показує, що ефективне впровадження цифрових інструментів вимагає підготовки викладача не лише у галузі інформатизації освіти, а й у галузі педагогічної дизайну, цифрової дидактики, методики візуалізації навчального матеріалу. Саме тому важливою умовою успішної цифровізації освітнього середовища є постійна методична підтримка, обмін досвідом, а також участь у програмних тренінгах, воркшопах і професійних спільнотах.

Додатковим аргументом на користь цифрових інструментів є їх здатність адаптуватися до умов різного типу навчального середовища – очного, дистанційного або змішаного. Наприклад, у кризових умовах (COVID-19, воєнний стан) багато ЗВО перейшли на віддалене навчання, і саме цифрові платформи стали ключовим механізмом підтримки безперервності освіти. Дослідження Бабенко [6] підтверджують, що застосування LMS-систем (наприклад, Moodle, Google Classroom) із вбудованими модулями для оцінювання та візуалізації хімічного контенту дозволили уникнути втрати навчальної динаміки, а також забезпечили можливість для самоорганізації студентів.

Таким чином, цифрові освітні інструменти у викладанні хімії у ЗВО на сьогодні розглядаються не як допоміжний засіб, а як самостійний компонент педагогічної системи, що виконує структуроутворюючу, мотиваційну, когнітивну та аналітичну функції. Вони дозволяють здійснювати індивідуалізацію навчання, гнучке реагування на освітні виклики, а також стимулюють формування навичок дослідника у студентів.

Висновки. У ході проведеного дослідження було обґрунтовано теоретико-методичні засади впровадження освітніх цифрових інструментів у процес викладання хімії у закладах вищої освіти. Аналіз сучасних наукових джерел, міжнародних освітніх

практик і результатів експериментальних впроваджень дозволив констатувати, що цифрові технології перестали виконувати допоміжну роль і перетворилися на ключовий елемент організації якісного, гнучкого та індивідуалізованого навчального процесу.

Системне застосування віртуальних лабораторій, симуляцій, систем аналітики освітніх даних (learning analytics), інтелектуальних інструментів візуалізації, цифрових комунікативних платформ дало змогу істотно підвищити ефективність засвоєння навчального матеріалу, посилити пізнавальну мотивацію студентів, сформувати в них елементи критичного мислення, дослідницьких навичок і здатності до самостійної аналітичної діяльності. На основі аналізу результатів експериментів встановлено: зростання розуміння навчального матеріалу в середньому на 24 %, дослідницьких умінь – на понад 30 %, мотиваційних установок – на 15–20 %.

Зокрема, цифрові освітні середовища дозволили ефективно реалізовувати завдання, що традиційно вважались складними для аудиторного формату – моделювання мікропроцесів, вивчення хімічної рівноваги, буферних розчинів, окисно-відновних реакцій, термодинаміки. Крім того, аналітичні модулі багатьох систем (зокрема, Moodle, Classtime, Labster) дали змогу викладачу не лише відслідковувати індивідуальну траєкторію студента, а й оперативно адаптувати навчальні завдання відповідно до рівня підготовки кожного здобувача освіти.

Важливим чинником успішного впровадження цифрових інструментів є наявність методичної підготовки викладача, доступу до якісного навчального контенту, підтримка з боку закладу вищої освіти. Успішність інноваційного цифрового середовища залежить від комплексної організації – технічної, дидактичної та організаційної складової. Досвід реалізації вітчизняних проєктів (роботи Шишкіної,) свідчить про необхідність поєднання цифрових інструментів із сучасною педагогічною парадигмою навчання, зорієнтованою на суб'єктність і самостійність студента.

Таким чином, цифрові освітні інструменти сьогодні виступають каталізатором трансформації хімічної освіти, забезпечуючи не лише доступ до навчального контенту, але й створюючи інтелектуальне середовище для розвитку наукового мислення студентів, стимулювання їхньої активності та академічної відповідальності. Перспективи подальших наукових розвідок вбачаються у розробленні адаптивних навчальних моделей на основі даних освітньої аналітики, інтеграції засобів доповненої (AR) та віртуальної реальності (VR), а також поглибленому дослідженні впливу цифрових ресурсів на формування екологічного та соціального контексту у викладанні хімії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alqallaf N., Almahmeed Z., Alsaber A. R., Alboloushi B., Alkandari A., Alhashem F. Advancing education through e-learning innovation: the case of the Crocodile Chemistry program in higher education. *Frontiers in Education*. 2025. Vol. 10. Article 1485600. URL: <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1485600>
2. Rahmawati Y., Taylor E., Taylor P. C., Ridwan A., Mardiah A. Students' Engagement in Education as Sustainability: Implementing an Ethical Dilemma-STEAM Teaching Model in Chemistry Learning . *Sustainability*. 2022. No 6. Vol. 14 Article 3554. URL: <https://doi.org/10.3390/su14063554>
3. Salame I., Makki J. Examining the Use of PhET Simulations on Students' Attitudes and Learning in General Chemistry II . *Interdisciplinary Journal of Environmental and Science Education*. 2021. Vol. 17, № 4. Article e2247. URL: <https://doi.org/10.21601/ijese/10966>

4. Elmoazen R., Saqr M., Khalil M., Wasson B. Learning analytics in virtual laboratories: a systematic literature review of empirical research. *Smart Learning Environments*. 2023. № 1. Vol. 10, Article 23. URL: <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00244-y>
5. Сняла Ю. Застосування цифрових інструментів у навчанні хімії . *Освіта. Інноватика. Практика*. 2023. Т. 11, № 4. С. 55–64. URL: <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol11i4-008>.
6. Бабенко О., Панасенко Н., Харченко Ю. Застосування цифрових інструментів у навчанні хімії учнів 7 класу в умовах дистанційного і змішаного навчання. *Актуальні питання природничо-математичної освіти*. Суми : СумДПУ, 2024. С. 115–121. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14567149>
7. Бруяка А., Коваленко В., Крамар С., Мар'єнко М., Носенко Ю., Сухіх А., Шишкіна М. Використання сервісів хмаро орієнтованих систем відкритої науки в освітньому процесі закладів вищої педагогічної і післядипломної освіти : метод. посіб. За ред. М. П. Шишкіної. Київ : ІЦО НАПН України, 2023. 142 с.
8. Крутова Наталія. Віртуальні STEM-лабораторії для досліджень та експериментів з природничо-математичних предметів. *Збірник матеріалів «STEM-школа – 2022»* К.: Видавничий дім «Освіта», 2022. С. 46–53. URL: https://yakistosviti.com.ua/userfiles/image/2022_Zbirnyk_STEM-school.pdf
9. Крижановський С., Головка М. Цифрова лабораторія як засіб розвитку методичної компетентності майбутніх викладачів фізики. *Збірник тез доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Підготовка майбутніх учителів фізики, хімії, біології та природничих наук в контексті вимог Нової української школи»*, 18-19 травня 2023 р. С. 216–219. URL: https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/738420/2/KRUZANOVSKY_HOLOVKO_TNPU_2023-upd.pdf
10. Manapova S., Shaikhova B., Kumarbekuly S., et al. A set of online tools for teaching chemistry considering a systematic approach. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*. 2025. Vol. 8, № 1. P. 1363–1379. URL: <https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i1.4613>
11. Басюк Т.О., Бессараб Н.А., Войтович І.С., та ін. Цифрова трансформація освіти: теоретико-методичні засади: монографія / за заг. ред. В. П. Сергієнка; за наук. ред. Н. П. Франчук. Київ : Вид-во УДУ імені Михайла Драгоманова, 2024. 382 с. URL: <https://doi.org/10.31392/UDU-mono-k-ННПППК-2024>
12. Бондар Л., Живага А. Модернізація уроків хімії в умовах цифровізації. *Педагогічна Житомирщина*. 2023. № 1(29). С. 5-12. URL: <https://imso.zippo.net.ua/wp-content/uploads/2023/03/2-Бондар.pdf>
13. Шишкіна М., Литвинова С., Мар'єнко М., Носенко Ю., Коваленко В., Лупаренко Л., Сухіх А. Хмаро орієнтовані системи відкритої науки у навчанні і професійному розвитку вчителів: монографія / за наук. ред. М. П. Шишкіної. Київ: ІЦО НАПН України, 2023. 176 с.
14. Castro R. Effects of Chemistry Virtual Laboratories in Academic Achievement of Secondary Level Learners: a meta-analysis. *International Science Education Journal*. 2024. vol. 6, no. 1, pp. 24- 37. URL: <https://doi.org/10.37251/isej.v6i1.1379>
15. Araújo L. R., Simões Neto J. E., Tenório da Silva J. R. R., Silva Leite B. Digital technologies in chemistry teaching in the journal *Chemistry Education Research and Practice: an analysis through a systematic literary review*. *Latin American Journal of Science Education*. 2024. Vol. 11, Art. 12001. URL: https://www.lajse.org/may24/2024_12001.pdf

*Матеріал надіслано до редакції 20.06.2025 р.
Затверджено до друку 27.11.2025 р.*

EDUCATIONAL DIGITAL TOOLS AS A MEANS OF IMPROVING CHEMISTRY TEACHING IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Olena Kochubei

Doctor of Philosophy, Teacher of the Department of Chemistry and Ecology,
Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman, Ukraine
sncelena@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5047-6694

Abstract. The article highlights the urgent need for integrating digital educational tools into the teaching of chemistry in higher education institutions. In light of rapid technological progress and the necessity to modernize traditional approaches to chemistry education, the paper substantiates the importance of transforming the learning process through the implementation of innovative digital technologies. The study presents a comprehensive analysis of digital platforms, virtual laboratories, interactive simulators, chemical process visualization tools, and learning analytics systems that offer powerful means for developing students' research, analytical, and technological competencies. The pedagogical conditions for the effective integration of digital tools into chemistry instruction are explored in detail, including the methodological preparedness of teachers, alignment of digital content with learning objectives, access to infrastructure, and institutional support. The paper emphasizes that digital instruments not only enhance the quality of chemical education but also promote personalization, adaptability, and interactivity in learning. Based on a review of international and Ukrainian research and experimental projects, the article demonstrates the positive impact of digital technologies on students' academic performance, motivation, independent thinking, and cognitive engagement. It showcases successful applications of platforms such as PhET, Labster, Mozaik Education, Classtime, and Moodle, as well as domestic developments, which prove the effectiveness of blended learning models. The necessity to move from auxiliary use of digital tools to full-scale integration into the pedagogical environment is substantiated. The study outlines future research perspectives, including the development of adaptive digital learning models for chemistry, the enhancement of educational data monitoring systems, and the elaboration of methodological frameworks to support instructors and to create integrated cloud-based systems for teaching natural sciences.

Keywords: digital educational tools; chemistry education; higher education institutions; virtual laboratories; learning analytics; digitalization of education; research competence

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Alqallaf, N., Almahmeed, Z., Alsaber, A. R., Alboloushi, B., Alkandari, A., & Alhashem, F. (2025). Advancing education through e-learning innovation: The case of the Crocodile Chemistry program in higher education. *Frontiers in Education*, 10, Article 1485600. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1485600>
2. Rahmawati, Y., Taylor, E., Taylor, P. C., Ridwan, A., & Mardiah, A. (2022). Students' Engagement in Education as Sustainability: Implementing an Ethical Dilemma STEAM Teaching Model in Chemistry Learning. *Sustainability*, 14(6), Article 3554. <https://doi.org/10.3390/su14063554>
3. Salame, I., & Makki, J. (2021). Examining the Use of PhET Simulations on Students' Attitudes and Learning in General Chemistry II. *Interdisciplinary Journal of Environmental and Science Education*, 17(4), Article e2247. <https://doi.org/10.21601/ijese/10966>
4. Elmoazen, R., Saqr, M., Khalil, M., & Wasson, B. (2023). Learning analytics in virtual laboratories: A systematic literature review of empirical research. *Smart Learning Environments*, 10(1), Article 23. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00244-y>
5. Sniiiala, Y. (2023). The use of digital tools in chemistry education. *Osvita. Innovatyka. Praktyka*, 11(4), 55-64. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol11i4-008> (in Ukrainian)

6. Babenko, O., Panasenko, N., & Kharchenko, Yu. (2024). The use of digital tools in teaching chemistry to 7th grade students in distance and blended learning environments. *Aktualni pytannia pryrodnycho-matematychnoyi osvity*, Sumi: SumDPU, 115-121. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14567149> (in Ukrainian)
7. Briuiaka, A., Kovalenko, V., Kramar, S., Marienko, M., Nosenko, Yu., Sukhikh, A., & Shyshkina, M. (2023). Use of cloud-based open science systems in the educational process of higher pedagogical and postgraduate education institutions: metod. posib. Kyiv: ITsO NAPN Ukrainy, 142 s. (in Ukrainian)
8. Krutova, N. (2022). Virtual STEM laboratories for research and experiments in natural sciences and mathematics. *Zbirnyk materialiv "STEM-shkola – 2022"*, Kyiv: Vydavnychiy dim "Osvita", 46-53. https://yakistosviti.com.ua/userfiles/image/2022_Zbirnyk_STEM-school.pdf (in Ukrainian)
9. Kryzhanovskiy, S., & Holovko, M. (2023). Digital laboratory as a means of developing the methodological competence of future physics teachers. In *Pidgotovka maibutnikh uchyteliv fizyky, khimii, biolohii ta pryrodnychych nauk v konteksti vymoh Novoi ukrainskoi shkoly* (pp. 216–219). 18-19 May 2023, Ternopil. https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/738420/2/KRUZANOVSKY_HOLOVKO_TNPU_2023-upd.pdf (in Ukrainian)
10. Manapova, S., Shaikhova, B., Kumarbekuly, S., et al. (2025). A Set of Online Tools for Teaching Chemistry Considering a Systematic Approach. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 8(1), 1363-1379. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i1.4613>
11. Basiuk, T. O., Bessarab, N. A., Voitovych, I. S., et al. (2024). Digital transformation of education: theoretical and methodological foundations, za zah. red. V. P. Serhienka; za nauk. red. N. P. Franchuk. Kyiv: Vyd-vo UDU im. Mykhaila Drahomanova, 382 s. <https://doi.org/10.31392/UDU-mono-k-HHHIIHK-2024> (in Ukrainian)
12. Bondar, L., & Zhivaha, A. (2023). Modernization of chemistry lessons in the context of digitalization. *Pedahohichna Zhytomyrshchyna*, 1(29), 5–12. <https://imso.zippo.net.ua/.../Bondar.pdf> (in Ukrainian)
13. Shyshkina, M., Lytvynova, S., Marienko, M., Nosenko, Yu., Kovalenko, V., Luparenko, L., & Sukhikh, A. (2023). Cloud-based open science systems in teacher training and professional development: monografiia, za nauk. red. M. Shyshkina. Kyiv: ITsO NAPN Ukrainy, 176 s. (in Ukrainian)
14. Castro, R. (2024). Effects of Chemistry Virtual Laboratories in Academic Achievement of Secondary Level Learners: A Meta-Analysis. *International Science Education Journal*, 6(1), 24-37. <https://doi.org/10.37251/isej.v6i1.1379>
15. Araújo, L. R., Simões Neto, J. E., Tenório da Silva, J. R. R., & Silva Leite, B. (2024). Digital Technologies in Chemistry Teaching in the Journal Chemistry Education Research and Practice: An Analysis through a Systematic Literary Review. *Latin American Journal of Science Education*, 11, Article 12001. https://www.lajse.org/may24/2024_12001.pdf