



УДК 378.147:54
DOI <https://doi.org/10.32999/ksu2413-1865/2026-113-19>

ПЕРЕДУМОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ЯК ЗАСОБУ ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ СТУДЕНТІВ

Ямборак Раїса Семенівна,
кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри хімії
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
raisa.yamborak@gmail.com
orcid.org/0000-0003-1865-9308

Крачан Тетяна Михайлівна,
кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри хімії
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
krachantm@pdatu.edu.ua
orcid.org/0000-0002-0618-4483

Анотація. Мета. Основною метою представленого дослідження є теоретико-методологічне обґрунтування, практична розробка та експериментальна перевірка ефективності впровадження комплексної дослідницько-орієнтованої моделі навчання хімії у закладах вищої освіти технічного профілю. Запропонована педагогічна модель базується на інтеграції класичного натурального лабораторного експерименту з віртуальним комп'ютерним моделюванням (використання технології «цифрових двійників») в єдине освітнє середовище. Актуальність роботи зумовлена нагальною необхідністю подолання існуючого розриву між теоретичними знаннями студентів та їхньою здатністю застосовувати набуті навички в реальних лабораторних і виробничих умовах, а також потребою адаптації освітнього процесу до викликів Індустрії 4.0 та вимог міжнародних стандартів STEM-освіти, які передбачають високий рівень адаптивності випускників.

Методи. Дослідження здійснено з використанням змішаного методологічного підходу (mixed-methods research), що передбачає триангуляцію кількісних та якісних даних для забезпечення об'єктивності та валідності результатів. У педагогічному експерименті, який тривав протягом семестру, взяли участь 84 студенти першого курсу спеціальності «Електрична інженерія». Респондентів було розподілено на контрольну та експериментальну групи з дотриманням умов статистичної однорідності. Навчання експериментальної групи відбувалося за циклічною індуктивною моделлю РОЕ (Predict–Observe–Explain). Методика включала три послідовні етапи: 1) створення «ідеального» цифрового двійника хімічного експерименту у віртуальному середовищі (з використанням платформи ChemCollective); 2) виконання відкритого натурального дослідження в реальній лабораторії без використання покрокових інструкцій; 3) рефлексивний аналіз розбіжностей між модельними прогнозами та реальними експериментальними результатами за методикою Error-Based Learning (навчання на помилках). Для перевірки статистичної значущості отриманих даних застосовано t-критерій Стьюдента для незалежних вибірок.

Результати. Проведене стандартизоване тестування на етапі контрольного зрізу засвідчило статистично значущу перевагу студентів експериментальної групи ($p < 0,05$). Абсолютний приріст показників якості знань склав 23,1% (зростання з 55,8% до 78,9%), тоді як у контрольній групі цей показник склав лише 12,3% (з 56,2% до 68,5%). Якісний контент-аналіз лабораторних звітів показав, що 85% студентів експериментальної групи набули стійкої здатності самостійно ідентифікувати джерела систематичних і випадкових помилок, а також аргументовано пояснювати вплив реальних умов середовища (температура, домішки, калібрування посуду) на перебіг хімічних процесів. У контрольній групі, яка навчалася за традиційною методикою, цей показник критичного осмислення результатів залишився на рівні 30%.

Висновки. Експериментально доведено, що інтеграція технології цифрових двійників та методики аналізу помилок трансформує лабораторний практикум із репродуктивного процесу відтворення інструкцій у творчу дослідницьку діяльність. Запропонована педагогічна технологія сприяє розвитку критичного мислення, формуванню стійкої дослідницької компетентності та вихованню культури наукової чесності, що повністю відповідає сучасним євроінтеграційним вимогам до вищої освіти в Україні та світовим трендам підготовки STEM-фахівців.

Ключові слова: лабораторний експеримент, цифрове моделювання, критичне мислення, дослідницькі компетентності, STEM-освіта, змішане навчання, цифрові двійники, Error-Based Learning.



PREREQUISITES OF USING DIGITAL TWINS AS A MEANS OF FORMING STUDENTS' RESEARCH COMPETENCE

Yamborak Raisa Semenivna,
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry
State Higher Education Institution "Podillia State University"
raisa.yamborak@gmail.com
orcid.org/0000-0003-1865-9308

Krachan Tetiana Mykhailivna,
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Chemistry
State Higher Education Institution "Podillia State University"
krachantm@pdatu.edu.ua
orcid.org/0000-0002-0618-4483

Abstract. Purpose. The fundamental purpose of this study is the theoretical justification, methodological development, and experimental verification of the effectiveness of implementing a comprehensive inquiry-based chemistry teaching model in higher education institutions of technical profile. The proposed pedagogical model is based on the integration of classical real laboratory experiments with virtual computer simulations (utilizing "digital twin" technology) within a unified educational environment. The relevance of the work is driven by the urgent need to bridge the persistent gap between students' theoretical knowledge and their ability to apply acquired skills in real laboratory and industrial conditions. Furthermore, the study aims to adapt the educational process to the challenges of Industry 4.0 and align it with current international standards of STEM education, which require a high level of graduate adaptability and problem-solving skills.

Methods. The research was conducted using a mixed-methods approach, employing data triangulation of quantitative and qualitative indicators to ensure the objectivity and validity of the findings. The pedagogical experiment, which lasted for one semester, involved 84 first-year students majoring in "Electrical Engineering". The respondents were divided into control and experimental groups whilst maintaining statistical homogeneity. The experimental group was taught using the cyclic inductive POE (Predict–Observe–Explain) model. This methodology included three distinct stages: 1) creating an "ideal" digital twin of the chemical experiment in a virtual environment (using the ChemCollective platform); 2) conducting an open-ended real experiment in a physical laboratory without detailed step-by-step instructions; 3) performing a reflective analysis of discrepancies between simulated predictions and real experimental results using Error-Based Learning principles. Statistical significance of the academic performance differences was assessed using the Student's t-test for independent samples.

Results. Standardized testing at the control stage demonstrated a statistically significant advantage of the experimental group ($p < 0.05$). The absolute increase in academic performance quality was 23.1% (increasing from 55.8% to 78.9%), whereas in the control group this indicator was only 12.3% (from 56.2% to 68.5%). Qualitative content analysis of laboratory reports revealed that 85% of students in the experimental group developed a robust ability to independently identify sources of systematic and random errors and to provide reasoned explanations for the influence of real environmental conditions (temperature, impurities, glassware calibration) on chemical processes. In contrast, only 30% of students in the control group, who were taught using traditional methodology, demonstrated a similar level of critical understanding of the results.

Conclusions. It has been experimentally proven that integrating digital twin technology with error-based analysis transforms laboratory practice from a reproductive procedure of following instructions into a creative research-oriented activity. The proposed pedagogical technology effectively promotes critical thinking, fosters robust research competence, and cultivates a culture of scientific integrity, fully complying with modern European integration requirements for higher education in Ukraine and global trends in STEM specialist training.

Keywords: laboratory experiment, virtual modeling, critical thinking, research competence, STEM education, blended learning, digital twins, Error-Based Learning.

Вступ. Сучасна вища освіта у галузі природничих наук перебуває на етапі докорінної трансформації, зумовленої переходом суспільства до епохи Індустрії 4.0. Цей новітній етап економічного розвитку, що характеризується інтеграцією кіберфізичних систем, вимагає від випускників не лише фундаментальних

знань з хімії, але й адаптивності та здатності до комплексного вирішення проблем. Однак викладання хімії у багатьох закладах вищої освіти часто залишається консервативною, ігноруючи технологічні зміни. Традиційні «рецептурні» методи викладання, де студент виконує лабораторні роботи за деталізованим



алгоритмом методичної літератури, демонструють зниження дидактичної ефективності (Kagan, 2024). Такий підхід формує ілюзію компетентності: студент механічно відтворює дії, не розуміючи хімічної суті явищ. Головною проблемою залишається розрив між теоретичними абстракціями та реальною виробничою практикою. Сучасні виклики STEM-освіти вимагають оновлення методів навчання, інтеграції цифрових технологій і формування оцінювання для розвитку критичного мислення, адаптивності та дослідницьких компетентностей студентів.

Теоретичне обґрунтування проблеми.

Аналіз сучасного наукового дискурсу у галузі STEM-освіти дозволяє виокремити ключові тенденції, що визначають розвиток методики викладання природничих дисциплін. Фундаментальною проблемою традиційної освіти є пасивність студента. Дослідження показують, що розвиток навичок наукового запиту є більш значущим для майбутнього фахівця, ніж просте запам'ятовування фактів (Guniš, Klein, Kireš, 2022). Коли студент виступає у ролі «першопошукача» закону, рівень когнітивного залучення зростає експоненціально. Активне навчання також дозволяє студентам зі слабкою підготовкою досягати високих результатів, знижуючи академічний ризик (Lagubeau, Tesran, Hernandez, 2019). Окремий вектор досліджень стосується специфіки хімії. Традиційна методика часто критикується за надмірний формалізм. Сучасні дослідники наголошують, що оновлення лабораторного практикуму вимагає зміни методичного підходу: робота має стати майданчиком для перевірки теоретичних моделей (Чернова, 2025). Важливим є акцент на хмарних технологіях, адже методика повинна поєднувати візуальний експеримент із комп'ютерним моделюванням (Демкова, 2023). У викладанні хімії складність математичного апарату та абстрактність понять часто призводять до помилок. Пропонується розглядати їх як діагностичний інструмент (Онічкіна, Камінський, Романишина, 2021). Попередні дослідження авторів доводять, що використання інструментарію формування оцінювання перетворює контроль знань із фіскальної процедури на механізм зворотного зв'язку, що стимулює розвиток дослідницьких навичок (Ямборак, 2025).

Методологія та методи. Дослідження ґрунтується на використанні змішаного методу за стратегією тріангуляції. Це дозволило поєднати кількісні дані, що демонструють динаміку навчальних досягнень, з якісним аналізом, що розкриває механізми формування дослідницьких компетентностей. Педагогічний експеримент проводився протягом одного навчального семестру на базі лабораторій кафедри хімії. Вибірку склали 84 студенти 1-го курсу за

спеціальністю «Електрична інженерія». Перед початком експерименту було проведено діагностику вхідного рівня знань, яка підтвердила статистичну однорідність груп. Контрольна група (КГ, $n=42$) навчалася за традиційною дедуктивною моделлю з використанням детальних інструкційних карт. Експериментальна група (ЕГ, $n=42$) навчалася за розробленою індуктивною моделлю дослідницько-орієнтованого навчання (IBL), яка враховує принципи STEM-інтеграції (Ямборак, 2024). Архітектура заняття в ЕГ базувалася на циклічній моделі POE (Predict – Observe – Explain). На першому етапі (Predict) студенти працювали у віртуальному середовищі (наприклад, ChemCollective), створюючи «ідеальну модель» експерименту або цифровий двійник (Міністерство освіти і науки України, 2023). На другому етапі (Observe) відбувся перехід до роботи з реальним обладнанням без покрокових інструкцій. На третьому етапі (Explain) студенти порівнювали дані, отримані в ідеальній моделі та реальному експерименті. Основний акцент робився на інтерпретації розбіжностей (Error-Based Learning).

Результати та дискусії. Комплексний аналіз отриманих даних дозволив зафіксувати позитивну динаміку формування фахових компетентностей студентів. На етапі вхідного зрізу групи знаходилися в рівних умовах. Результати вихідного тестування (див. таблицю 1, рис. 1) показали суттєву відмінність.

Деталізований аналіз показав, що приріст у КГ відбувся переважно за рахунок завдань репродуктивного характеру. Водночас, ЕГ продемонструвала значний прогрес у завданнях високого когнітивного рівня (аналіз графіків, прогнозування). Для перевірки достовірності результатів застосовано t -критерій Стьюдента для незалежних вибірок. Отримане значення $p < 0,05$ свідчить про статистичну значущість різниці. Найбільш показовими є результати якісного аналізу лабораторних звітів. У контрольній групі лише 30% студентів змогли вийти за межі формальних пояснень. В експериментальній групі 85% студентів продемонстрували здатність до глибокого аналізу причинно-наслідкових зв'язків, ідентифікуючи конкретні джерела систематичних помилок та пропонуючи конструктивні шляхи вдосконалення експерименту (Ogle, 1986). Ключовим фактором успіху стало системне використання цифрових двійників, що є особливо актуальним в умовах дистанційного або змішаного навчання (Мельниченко, Стаднічук, Кучер, 2023). Попереднє моделювання формує у свідомості студента «еталон» процесу. Коли реальний експеримент відхиляється від цього еталону, виникає когнітивний дисонанс, який стимулює критичне мислення. Студент змушений шукати відповідь на питання «Чому?», переходячи з рівня запам'ятовування на рівень аналізу.

Таблиця 1

Динаміка навчальних досягнень студентів (% правильних відповідей)

Група	Вхідне тестування	Вихідне тестування	Абсолютний приріст	Відносний приріст
Контрольна (КГ)	56,2	68,5	+12,3	21,9 %
Експериментальна (ЕГ)	55,8	78,9	+23,1	41,4 %

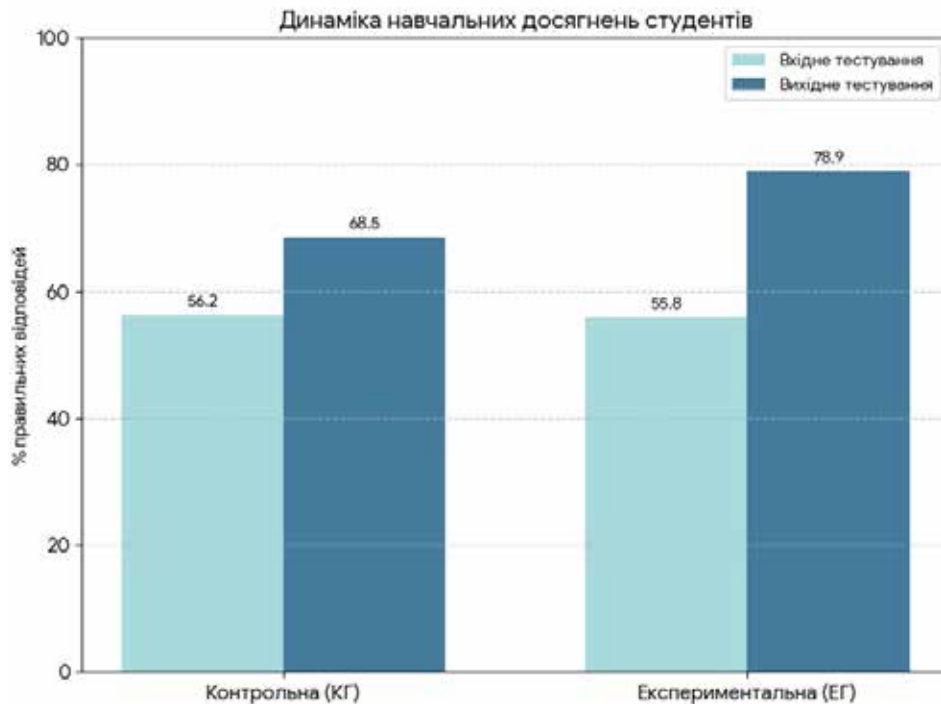


Рис. 1. Порівняльна гістограма динаміки навчальних досягнень студентів контрольної та експериментальної груп

Висновки. Експериментально доведено, що інтеграція технології цифрових двійників та методики Error-Based Learning трансформує лабораторний практикум із рутинної методичної процедури на творчий процес. Запропонована модель сприяє формуванню культури наукової доброчесності та дослідницької компетентності, що узгоджується з міжнародними стандартами STEM-освіти. Перспективи подальших досліджень вбачаємо у розробці адаптивних сценаріїв лабораторних робіт із використанням елементів штучного інтелекту для персоналізації навчання хімії.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Демкова В. Лабораторні роботи з фізики засобами хмарних технологій. *Теорія та методика навчання фізики, астрономії*. 2023. № 5.
2. Мельниченко Н., Стаднічук О., Кучер Л. Особливості хімічного експерименту в умовах дистанційного навчання. *Теорія та методика навчання хімії*. 2023. № 5.
3. Міністерство освіти і науки України. Рекомендації щодо використання віртуальних лабораторних робіт з фізики та хімії при підготовці студентів. Київ : МОН, 2023. URL: <https://enpurb.edu.ua/server/api/>

core/bitstreams/d5557a81-cbc7-432d-9364-dc511beae14c/content (дата звернення: 12.01.2026).

4. Онічкіна О. В., Камінський О. М., Романишина Л. М. Особливості викладання фізичної хімії в закладах вищої освіти. *Педагогічні науки: реалії та перспективи*. 2021. Вип. 84(1). С. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.31392/NPU-nc.series5.2021.84.1.02>
5. Чернова М. Є. Досвід запровадження новітніх технологій до виконання лабораторних робіт з курсу фізики у технічних ВНЗ. *Теорія та методика навчання фізики, астрономії*. 2025. № 9.
6. Ямборак Р. С. Хімічна експлорація: оптимізація навчання хімії через інтеграцію STEM-підходів. *Збірник наукових праць «Педагогічні науки»*. 2024. Вип. 105. С. 69–74.
7. Ямборак Р. С. Запорука успішного навчання хімії через інструментарій формування оцінювання. *Педагогічні науки*. 2025. Вип. 109. С. 114–120.
8. Guniš J., Klein D., Kireš M. Active Learning in STEM Education with Regard to the Development of Inquiry Skills. *Education Sciences*. 2022. Vol. 12(10). P. 686. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci12100686>
9. Karan E. Discovery-based approach combined with active learning to improve student learning experiences for STEM students. *International Journal of Education and Humanities*. 2024. Vol. 3(4). URL: <https://i-jeh.com/index.php/ijeh/article/view/163> (дата звернення: 12.01.2026).



10. Lagubeau G., Tecpan S., Hernandez C. Active Learning reduces academic risk of students with non-formal reasoning skills. *arXiv preprint*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1909.01235> (дата звернення: 12.01.2026).

11. Ogle D. K-W-L: A Teaching Model That Develops Active Reading of Expository Text. *Journal of Reading*. 1986. Vol. 30(7). P. 644–651. DOI: <https://doi.org/10.2307/40032415>

REFERENCES:

1. Chernova, M. Ye. (2025). Dosvid zaprovadzhennia novitnikh tekhnolohii do vykonannia laboratornykh robit z kursu fizyky u tekhnichnykh VNZ [Experience of introducing the latest technologies for laboratory work in the physics course at technical universities]. *Teoriia ta metodyka navchannia fizyky, astronomii*, 9 [in Ukrainian].

2. Demkova, V. (2023). Laboratorni roboty z fizyky zasobamy khmarnykh tekhnolohii [Laboratory work in physics by means of cloud technologies]. *Teoriia ta metodyka navchannia fizyky, astronomii*, 5 [in Ukrainian].

3. Guniš, J., Klein, D., & Kireš, M. (2022). Active learning in STEM education with regard to the development of inquiry skills. *Education Sciences*, 12(10), 686.

4. Karan, E. (2024). Discovery-based approach combined with active learning to improve student learning experiences for STEM students. *International Journal of Education and Humanities*, 3(4).

5. Lagubeau, G., Tecpan, S., & Hernandez, C. (2019). Active learning reduces academic risk of students with non-formal reasoning skills. *arXiv preprint*.

6. Melnychenko, N., Stadnichuk, O., & Kucher, L. (2023). Osoblyvosti khimichnoho eksperymentu v umovakh dystantsiinoho navchannia [Features of chemical experiment in the conditions of distance learning]. *Teoriia ta metodyka navchannia khimii*, 5 [in Ukrainian].

7. Ministry of Education and Science of Ukraine. (2023). *Rekomendatsii shchodo vykorystannia virtualnykh laboratornykh robit z fizyky ta khimii pry pidhotovtsi studentiv* [Recommendations on the use of virtual laboratory works in physics and chemistry in the preparation of students]. Kyiv: MON [in Ukrainian].

8. Ogle, D. (1986). K-W-L: A teaching model that develops active reading of expository text. *Journal of Reading*, 30(7), 644–651.

9. Onichkina, O. V., Kaminskyi, O. M., & Romanyshyna, L. M. (2021). Osoblyvosti vykladannia fizychnoi khimii v zakladakh vyshchoi osvity [Features of teaching physical chemistry in higher education institutions]. *Pedahohichni nauky: realii ta perspektyvy*, 84(1), 1–5 [in Ukrainian].

10. Yamborak, R. S. (2024). Khimichna eksploratsiia: optymizatsiia navchannia khimii cherez intehratsiiu STEM-pidkhodiv [Chemical exploration: optimization of chemistry learning through the integration of STEM approaches]. *Zbirnyk naukovykh prats "Pedahohichni nauky"*, 105, 69–74 [in Ukrainian].

11. Yamborak, R. S. (2025). Zaporuka uspishnoho navchannia khimii cherez instrumentarii formuvalnoho otsiniuvannia [Guarantee of successful chemistry learning through formative assessment tools]. *Pedahohichni nauky*, 109, 114–120 [in Ukrainian].

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.04.2026