

Чайка Микола Володимирович кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, <https://orcid.org/0000-0001-5356-9856>

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ МОЛЕКУЛЯРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У ВИКЛАДАННІ ХІМІЧНИХ ДИСЦИПЛІН У ЗАКЛАДІ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Анотація. У статті досліджено особливості використання цифрових технологій молекулярного моделювання у процесі викладання хімічних дисциплін у закладі вищої освіти. Обґрунтовано актуальність впровадження сучасних цифрових платформ у систему професійної підготовки майбутніх хіміків в умовах цифровізації освіти, розвитку дистанційного та змішаного навчання, а також сучасних безпекових викликів в Україні. Визначено, що використання технологій молекулярного моделювання сприяє підвищенню рівня наочності навчання, розвитку практичних умінь, цифрових компетентностей та пізнавальної активності здобувачів освіти. У роботі проаналізовано можливості програмного забезпечення ChemOffice, ChemDraw, Chem3D, Molview для візуалізації структури молекул, моделювання хімічних процесів, інтерпретації результатів експериментальних досліджень та виконання віртуальних лабораторних робіт. Встановлено, що використання таких цифрових платформ допомагає поєднувати теоретичну та практичну підготовку здобувачів вищої освіти, полегшує вивчення складних тем з органічної хімії, стереохімії, інструментальних методів аналізу та комп'ютерної хімії. Педагогічний експеримент проведено за участі 83 студентів закладу вищої освіти. Порівнювалися результати навчання у двох семестрах: один із використанням традиційних методів навчання та інший із впровадженням технологій цифрового молекулярного моделювання. Для оцінювання ефективності інтеграції цифрових платформ аналізувалися показники успішності, мотивації, зацікавленості дисципліною, активності здобувачів під час занять та рівня самостійності у навчанні. Результати дослідження підтвердили позитивний вплив цифрових технологій на якість навчального процесу. Виявлено підвищення рівня успішності, мотивації та активності здобувачів освіти, а також зростання їх інтересу до вивчення хімічних дисциплін. Встановлено, що цифрові технології молекулярного моделювання забезпечують доступність навчального матеріалу, сприяють

ISSN 2786-6025 Online

розвитку дослідницьких навичок та дозволяють ефективно організувати освітній процес в умовах дистанційного і змішаного навчання.

Ключові слова: молекулярне моделювання, цифрові технології, 3D-модель молекули, ChemOffice, віртуальна лабораторія, професійна підготовка.

Chayka Mykola, Candidate of Chemical Sciences, Associate professor, Department of Chemistry, Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, <https://orcid.org/0000-0001-5356-9856>

THE USE OF DIGITAL MOLECULAR MODELING TECHNOLOGIES IN TEACHING CHEMISTRY SUBJECTS AT HIGHER EDUCATION INSTITUTION

Abstract. This paper investigates the features of using digital molecular modeling technologies in teaching chemical disciplines at higher education institutions. The relevance of introducing modern digital platforms into the professional training system of future chemists amid educational digitalization, the development of distance and blended learning, as well as current security challenges in Ukraine, is substantiated. The findings indicate that the use of molecular modeling technologies contributes to enhancing instructional visualization, developing practical skills, digital competencies, and learners' cognitive activity. The study analyzes the capabilities of ChemOffice, ChemDraw, Chem3D, and Molview software for molecular structure visualization, modeling of chemical processes, interpretation of experimental research results, and conducting virtual laboratory work. The authors demonstrate that the use of such digital platforms helps combine theoretical and practical training of higher education students and facilitates the study of complex topics in organic chemistry, stereochemistry, instrumental methods of analysis, and computational chemistry. A pedagogical experiment was conducted involving 83 university students. The learning outcomes of two semesters were compared: one semester using traditional teaching methods and another with the implementation of digital molecular modeling technologies. To evaluate the effectiveness of integrating digital platforms, indicators of academic performance, motivation, interest in the discipline, student activity during classes, and the level of learning autonomy were analyzed. The research results confirmed the positive impact of digital technologies on the quality of the educational process. An increase in academic performance, motivation, and student activity, as well as greater interest in studying chemical disciplines, was identified. In conclusion, digital molecular modeling technologies ensure the accessibility of educational materials, promote the development of research skills, and allow for the effective organization of the educational process under distance and blended learning modes.

Keywords: molecular modeling, digital technologies, 3D molecular model, ChemOffice, virtual laboratory, professional training.

Постановка проблеми. Цифровізація освітнього простору на сьогодні є однією з головних тенденцій розвитку вищої освіти, що обумовлено стрімким рівнем розвитку інформаційно-комунікаційних технологій, поступовим переходом до компетентної моделі навчання а також необхідністю адаптації освітнього процесу до суспільних викликів сьогодення. Особливо актуальним широке впровадження сучасних цифрових технологій стало в умовах пандемії COVID-19 та, відповідно, впровадження дистанційної та змішаної форм навчання, а також під час воєнного стану в Україні, коли завдання щодо забезпечення безперервності та якості освітнього процесу стало одним із пріоритетних для закладів вищої освіти [11].

Під час підготовки майбутніх фахівців природничих дисциплін, зокрема хіміків, важливе значення має формування практичних вмінь та професійних компетентностей, які пов'язані з дослідженням будови і структури речовин, аналізом фізико-хімічних процесів, інтерпретацією одержаних експериментальних даних та використанням сучасних інструментальних методів дослідження. Традиційні методи викладання хімічних освітніх компонент не завжди дозволяють забезпечити високий рівень наочності та інтерактивності, а обмежений, зокрема у зв'язку з дистанційною формою навчання, доступ до лабораторних приладів, обладнання, хімічних реактивів а також відсутність спеціалізованого програмного забезпечення ускладнює організацію повноцінної практичної підготовки здобувачів [2].

У зв'язку з цим особливого значення набуває використання сучасних методів молекулярного моделювання, що візуалізують просторову будову молекул, допомагають досліджувати їхні фізико-хімічні властивості а також дозволяють моделювати перебіг хімічних процесів і навіть проводити віртуальний хімічний експеримент. Сучасне програмне забезпечення, зокрема ChemOffice, ChemDraw, Chem3D, Avogadro, Molview та інші, дають здобувачам широкі можливості для впровадження елементів комп'ютерної хімії у навчальний процес, сприяють формуванню цифрових компетентностей та дослідницьких здібностей майбутніх фахівців [1; 4].

Дослідники стверджують, що використання сучасних технологій 3D-візуалізації, опанування вміннями молекулярного моделювання позитивно впливають на просторове мислення здобувачів, полегшують вивчення складних хімічних понять та сприяють підвищенню мотивації до навчання [8].

Сучасні підходи до викладання хімічних дисциплін дедалі активніше інтегрують новітні можливості комп'ютерної хімії, зокрема цифрової 3D-візуалізації та віртуального хімічного експерименту.

Використання програмного забезпечення з молекулярного моделювання дозволяє поєднувати теорію та практику під час навчання, надає здобувачам можливість досліджувати складні молекулярні структури, аналізувати процеси міжмолекулярної взаємодії та виконувати експеримент навіть під час відсутності доступу до лабораторії [3].

Проте питання щодо педагогічної доцільності, ефективності та методичних особливостей використання сучасних методів молекулярного моделювання під час викладання хімічних дисциплін потребують подальшого вивчення та наукового обґрунтування.

Особливо актуальним є питання дослідження впливу цих новітніх технологій на рівень успішності, мотивації, пізнавальної активності та самостійності студентів закладів вищої освіти в умовах сучасного освітнього середовища [2].

Водночас важливим завданням є визначення оптимальних шляхів інтеграції технології молекулярного моделювання у професійну підготовку майбутніх хіміків відповідно до вимог сучасної STEM-освіти, процесів цифрової трансформації вищої школи та розвитку дослідницьких компетентностей здобувачів вищої освіти [5; 8; 10].

Аналіз останніх досліджень. Проблема цифровізації хімічної освіти та використання сучасних методів молекулярного моделювання для професійної підготовки здобувачів вищої освіти активно досліджується як українськими, так і зарубіжними вченими. У сучасних публікаціях особливу увагу акцентують на інтеграції цифрових технологій, використанні віртуальних лабораторій, платформ 3D-візуалізації, доповненої та віртуальної реальності у процес викладання хімічних дисциплін [11; 2].

У дослідженнях цифрової трансформації хімічної освіти доведено, що новітні інформаційно-комунікаційні технології сприяють підвищенню наочності навчання, забезпечують розвиток дослідницьких здібностей та формування професійного мислення майбутніх фахівців. Зокрема, О. Кочубей розглядає класифікацію цифрових освітніх інструментів та обґрунтовує педагогічні умови їх ефективного використання у підготовці майбутніх учителів хімії [11].

Важливим напрямком сучасних досліджень є використання технологій доповненої та віртуальної реальності у хімії. Зокрема, автори [1; 7] встановили, що інтерактивна 3D-візуалізація молекул позитивно впливає на просторове мислення здобувачів, покращує їхнє розуміння механізму реакцій та підвищує інтерес та мотивацію до навчання. Погоджуються з цим твердженням і автори С. Kenneally та В. Bentley, які впровадження технологій augmented reality розглядають як ефективний засіб для зниження навантаження під час вивчення молекулярної геометрії [8].

Дослідження Nguyen Duc та Nguyen Quang підтверджує стрімке зростання кількості публікацій, присвячених використанню augmented reality у хімічній освіті за останні роки. Автори стверджують, що AR-технології дозволяють краще візуалізувати абстрактні хімічні поняття, допомагають краще залучати та мотивувати студентів до навчання і сприяють розвитку просторового мислення [9].

Особлива увага дослідників зосереджена на впровадженні програм молекулярного моделювання та новітніх цифрових симуляторів у процес викладання хімічних дисциплін. У сучасних публікаціях доведено, що використання платформ ChemDraw, Avogadro, MolView, PyMOL та інших новітніх програмних засобів дозволяє суттєво покращити рівень засвоєння складних хімічних термінів та понять, активізувати пізнавальну діяльність здобувачів вищої освіти та забезпечити інтеграцію елементів комп'ютерної хімії у навчальний процес ЗВО [3].

Останні дослідження вивчають проблематику використання віртуальних хімічних лабораторій. E. Hu-Au стверджує, що використання VR-лабораторій у поєднанні з молекулярними симуляціями дозволяє краще зрозуміти абстрактні хімічні поняття та підвищує ефективність навчання [6]. Аналогічні результати отримали і T. N. M. Guruloo та K. Osman, які у своїй роботі доводять перспективу використання VR-лабораторій під час формування практичних навичок а також для створення безпечного освітнього середовища [4].

Особлива увага сучасних дослідників зосередження на впровадженні новітніх цифрових платформ у процес викладання органічної хімії. L. W. Ward із співавторами стверджує, що використання AR-додатків під час виконання лабораторних робіт з органічної хімії дозволяє краще зрозуміти особливості спектральних методів аналізу та сприяє залученості здобувачів до виконання практичних завдань на заняттях [10].

Вчені також акцентують увагу на перспективах використання web-based AR та immersive-технологій в хімії. Зокрема, у роботі «Molecule World» з'ясовано, що web-based augmented reality дозволяє сформувати інтерактивне освітнє середовище, що мотивує студентів до навчання та спрощує вивчення молекулярної будови хімічних сполук [5].

Ґрунтовний аналіз новітніх цифрових технологій з хімії охарактеризовано у дослідженні W.-K. Chiu, де систематизовано результати використання VR, AR, learning analytics, eye-tracking та цифрових лабораторій у хімічній освіті в 2010-2021 роках. Виявлено, що найперспективнішими напрямками є віртуальні лабораторії, 3D-візуалізація молекул та цифрові симулятори хімічних експериментів [2].

Проблематику впровадження цифрових технологій в процес підготовки майбутніх учителів хімії вивчають і українські дослідники. У їх публікаціях

ISSN 2786-6025 Online

особлива увага зосереджена на необхідності розвитку цифрових компетентностей і викладачів і студентів, на використанні платформ а також інтерактивних сервісів для проведення оцінювань та цифрових лабораторій у процесі професійної підготовки майбутніх фахівців [11, 13].

Варто відмітити і дослідження, що пов'язані з використанням технологій штучного інтелекту, цифрових двійників та адаптивного навчання у хімічній освіті. Автори стверджують, що AI-інструменти та інтерактивні цифрові середовища дозволяють персоналізувати процес навчання, розширити можливості дистанційного та змішаного навчання та обумовлюють розвиток дослідницьких компетентностей здобувачів вищої освіти [1].

Проте навіть у такій кількості опублікованих досліджень, питання методики використання цифрових технологій молекулярного моделювання у процесі викладання хімічних дисциплін у закладі вищої освіти залишається недостатньо систематизованими. Потребують дослідження педагогічні умови ефективного впровадження програмних засобів молекулярного моделювання, їх вплив на успішність, мотивацію, розвиток професійних компетентностей та дослідницьких умінь здобувачів вищої освіти, а також особливості впровадження таких технологій у сучасне цифрове освітнє середовище.

Метою статті є дослідження педагогічних можливостей та ефективності використання цифрових технологій молекулярного моделювання у процесі викладання хімічних дисциплін у закладі вищої освіти, а також аналіз їх впливу на формування професійних компетентностей, мотивації до навчання, пізнавальної активності та успішності здобувачів освіти.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких **завдань**:

- проаналізувати сучасні підходи до використання цифрових технологій у хімічній освіті;
- охарактеризувати можливості програмних засобів молекулярного моделювання у процесі викладання хімічних дисциплін;
- дослідити особливості впровадження програм ChemOffice, ChemDraw, Chem3D та інших цифрових платформ у навчальний процес;
- оцінити вплив цифрових технологій молекулярного моделювання на успішність, мотивацію та самостійність здобувачів освіти;
- визначити переваги та перспективи використання новітніх цифрових платформ у системі професійної підготовки майбутніх хіміків.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано комплекс загальнонаукових і педагогічних методів дослідження. Теоретичні методи застосовувалися для аналізу літератури з проблематики цифровізації освіти, використання методів молекулярного моделювання та інтеграції новітніх цифрових платформ у викладання хімічних дисциплін. Аналіз, систематизація та узагальнення наукових джерел допомогли з'ясувати

сучасний стан досліджуваної проблеми, виокремити основні напрями використання цифрових технологій у хімічній освіті та довести доцільність їх застосування.

Емпіричні методи дослідження включали спостереження, анкетування студентів, аналіз результатів навчання та експеримент. У процесі дослідження проведено порівняння результатів навчальної діяльності студентів у двох послідовних семестрах: із використанням традиційних підходів до навчання та з впровадженням технологій молекулярного моделювання і віртуальних платформ.

У дослідженні брали участь 83 студенти закладу вищої освіти, які вивчали хімічні дисципліни. Під час експерименту використовували програмні засоби ChemOffice, ChemDraw, Chem3D, Molview та інші цифрові платформи для візуалізації структури молекул, моделювання процесів, інтерпретації спектрів молекул та з метою виконання віртуальних лабораторних робіт.

Для встановлення ефективності використання цифрових технологій був проведений аналіз показників успішності студентів, рівня їх мотивації, зацікавленості дисципліною, активності здобувачів під час занять, задоволеності навчанням. Оцінювання здійснювалося за допомогою стандартизованих опитувальників та аналізу результатів поточного й підсумкового контролю.

Обробку результатів експерименту виконували із застосуванням методів математичної статистики. Для аналізу отриманих даних визначено середні значення показників, стандартне відхилення та коефіцієнт варіації, що дозволило встановити динаміку змін та рівень стабільності результатів навчальної діяльності здобувачів вищої освіти.

Виклад основного матеріалу. На сучасному етапі розвитку системи вищої освіти відбувається активна інтеграція цифрових технологій у навчально-виховний процес, що безумовно є особливо актуальним та доцільним під час вивчення дисциплін природничого профілю, адже там визначальну роль відіграють наочність, експериментальна робота здобувачів на заняттях а також формування практичних вмінь та навичок. Впровадження сучасних цифрових технологій у систему підготовки майбутніх хіміків створює можливості для успішного поєднання традиційних методів навчання з інноваційними цифровими методами, які акцентовані на розвиток експериментальних вмінь, критичного мислення та цифрової грамотності здобувачів вищої освіти.

На сьогодні одним з найперспективніших напрямів цифровізації процесу навчання фахівців хімічного профілю є використання технологій молекулярного моделювання. Таке програмне забезпечення дозволяє здобувачам на занятті візуалізувати просторову будову молекули і на основі цього здійснювати аналіз її фізико-хімічних властивостей, вивчати механізм хімічних реакцій та моделювати перебіг хімічних систем при різних умовах. Сучасні

ISSN 2786-6025 Online

цифрові платформи на відміну від традиційних методів навчання забезпечують інтерактивність, дають можливість багаторазового здійснення дослідження та дозволяють адаптувати навчальний процес відповідно до індивідуальних потреб студентів.

Встановлено, що під час викладання хімічних дисциплін особливо ефективним є використання пакету програм ChemOffice, зокрема ChemDraw та Chem3D. Програма ChemDraw використовується для створення двовимірних структурних формул органічних та неорганічних речовин, для запису рівнянь хімічних реакцій, аналізу та прогнозування фізико-хімічних властивостей сполук а також для створення та правильного оформлення наукових документів. Використання програми ChemDraw під час вивчення хімії допомагає здобувачам оволодівати навичками роботи з сучасним цифровим програмним забезпеченням з хімії та оволодівати принципами молекулярного дизайну.

Програма Chem3D з пакету ChemOffice допомагає швидко та наочно здійснювати трансформацію двовимірного візуального зображення молекул до тривимірного. Здобувачі освіти під час роботи в даній програмі можуть досліджувати просторову будову молекул, аналізувати їх міжатомні зв'язки, визначати кут та довжину зв'язків, здійснювати оцінку енергетичних характеристик речовин та моделювати конформаційні зміни. Використання 3D-моделей молекул під час вивчення хімічних дисциплін суттєво полегшує засвоєння складних тем, зокрема дослідження просторової будови органічних речовин, стереохімії та механізмів перебігу хімічних реакцій.

Під час викладання освітніх компонент «Комп'ютерна хімія», «Хімічна термодинаміка та кінетика», «Хімія з основами біогеохімії» та «Інструментальні методи аналізу» програмне забезпечення та технології молекулярного моделювання використовувалися і на лекційних, і на лабораторних заняттях. Зокрема, здобувачі освіти будували моделі молекул органічних сполук, здійснювали аналіз просторової конфігурації ізомерів, вивчали електронну густину молекул, опановували навички моделювання та дослідження спектрів сполук а також проводили віртуальний хімічний експеримент.

Зручним та доступним елементом цифровізації процесу навчання стало використання платформи Molview. Вебсервіс Molview застосовується для побудови та оптимізації структури молекул, дослідження їх просторової симетрії а також для моделювання хімічних процесів. Завдяки тому що Molview безкоштовний, працює без встановлення програмного забезпечення, має доступний інтерфейс цей ресурс є ефективним інструментом для формування базових навичок комп'ютерного моделювання у студентів, навіть з мобільних телефонів, що особливо актуально сьогодні.

Окрему увагу було приділено використанню сучасних цифрових технологій під час вивчення майбутніми фахівцями хімічного профілю

інструментальних методів аналізу. За допомогою програмного забезпечення SpectraLab та ChemOffice здобувачі здійснювали моделювання інфрачервоних, ультрафіолетових та ЯМР-спектрів, проводили аналіз спектральних характеристик досліджуваних речовин та проводили інтерпретацію результатів. Це дозволило поєднувати опанування складного та об'ємного теоретичного матеріалу з практичною діяльністю та формування у здобувачів вищої освіти цілісного розуміння особливостей сучасних інструментальних методів аналізу.

Використання у навчальному процесі сучасних цифрових ресурсів допомогло підвищити рівень візуалізації навчального матеріалу хімічних дисциплін та сприяло активізації пізнавальної діяльності здобувачів. Такий формат роботи на заняттях роботи забезпечив більш глибоке та усвідомлене засвоєння складних тем з просторової будови молекул, механізмів хімічних реакцій та щодо квантово-хімічних аспектів дослідження речовин. Здобувачі опанували навички моделювання хімічних процесів, навчилися змінювати параметри створених моделей, аналізувати результати та робити висновки на основі експериментальних даних.

Таблиця 1
Динаміка навчально-пізнавальних та мотиваційних показників студентів при використанні технологій цифрового молекулярного моделювання

Показник	I семестр без використання цифрових платформ (n=83)	II семестр із використанням цифрових платформ (n=83)	Покращення (%)	Коефіцієнт варіації (%)
Середній бал успішності (\pm SD)	71,2 \pm 8,1	85,0 \pm 5,8	19,4%	11,5 / 6,7
Рівень мотивації (самооцінка, в межах 1-10)	6,1 \pm 1,3	8,4 \pm 1,0	37,7%	22,8 / 11,5
Рівень зацікавленості дисципліною (в межах 1-10)	5,9 \pm 1,6	8,6 \pm 0,9	45,8%	27,4 / 10,4
Якість навчального процесу (в межах 1-10)	6,4 \pm 1,2	8,8 \pm 0,7	37,5%	18,6 / 9,1
Активність на заняттях (середня кількість відповідей)	3,1 \pm 0,9	5,5 \pm 1,1	77,4%	31,3 / 20,4

Показник	I семестр без використання цифрових платформ (n=83)	II семестр із використанням цифрових платформ (n=83)	Покращення (%)	Коефіцієнт варіації (%)
Рівень задоволеності курсом (в межах 1-10)	6,7 ± 1,2	9,0 ± 0,5	34,3%	19,1 / 6,6
Час, витрачений на самостійну роботу (год/тиждень)	3,3 ± 1,3	5,1 ± 1,1	54,5%	44,1 / 20,7
Рівень самостійності в навчанні (в межах 1-10)	5,8 ± 1,6	8,2 ± 0,8	41,4%	28,7 / 10,7

Для дослідження ефективності використання технологій молекулярного моделювання було проведено дослідження за участі 83 здобувачів вищої освіти Житомирського державного університету імені Івана Франка. Під час експерименту порівнювали результати навчальної діяльності у двох семестрах одного навчального року. Один семестр студенти навчалися із застосуванням традиційних методів навчання, а другий – із використанням сучасних цифрових платформ та методів молекулярного моделювання.

Аналіз результатів дослідження показує позитивну динаміку з основних освітніх показників. Зокрема, середній бал успішності здобувачів вищої освіти з хімічних дисциплін зріс із 71,2 до 85,0 балів, що підтверджує зростання ефективності засвоєння матеріалу з фахових дисциплін. При цьому варто відмітити зменшення коефіцієнта варіації результатів, що може бути обумовлено вирівнюванням рівня підготовки студентів та створенням умов для однакового доступу до освітніх ресурсів.

Суттєві позитивні зміни простежувалися і в мотивації студентів до навчання. Рівень мотиваційної сфери здобувачів зріс на 37,7 %, а рівень зацікавленості дисципліною – на 45,8 %. Результати дослідження можуть бути обумовлені високим рівнем інтерактивності цифрових платформ, можливостями проведення самостійних досліджень із створеними моделями та використання елементів 3D-візуалізації та молекулярного моделювання у процесі навчання.

Варто відмітити і позитивну динаміку активності здобувачів під час навчальних занять із фахових дисциплін. Зокрема, середня кількість відповідей здобувачів на заняттях, їх залучення до обговоренні та постановка запитань зросла на 77,4 %, що підтверджує зростання залученості здобувачів до

освітнього процесу. Вважаємо, що визначальним фактором стало оперативне одержання результатів молекулярного моделювання та швидкий зворотній зв'язок під час роботи з сучасними цифровими платформами.

Використання на заняттях методів молекулярного моделювання хімічних сполук сприяло розвитку самостійності здобувачів освіти. Час, який витрачали студенти на самостійну роботу, зріс на 54,5 %, а рівень самостійності в навчанні збільшився на 41,4 %. Це підтверджує формування навичок самоорганізації, свідчить про зростання інтересу студентів до самостійного пошуку інформації та проведення досліджень, що є важливою складовою професійної підготовки сучасних хіміків.

Важливою перевагою сучасних інтерактивних платформ безумовно є можливість організувати навчальний процес в умовах дистанційного та змішаного формату. Використання на заняттях методів молекулярного моделювання сприяло безперервності освітнього процесу навіть в умовах обмеженого або й повністю відсутнього доступу до реактивів, обладнання та спеціалізованих лабораторій. Здобувачі освіти на заняттях могли працювати з цифровими моделями молекул та виконувати завдання незалежно від місця свого перебування, що особливо актуально в умовах сучасних безпекових викликів в Україні.

Отримані результати узгоджуються з попередніми дослідженнями щодо ефективності використання цифрових платформ у процесі викладання дисциплін природничого профілю [12; 13]. Результати дослідження підтверджують, що впровадження технологій молекулярного моделювання у процес викладання хімічних дисциплін у закладі вищої освіти є ефективним засобом підвищення якості освіти, розвитку професійних компетентностей здобувачів вищої освіти та адаптації освітнього процесу до сучасних умов.

Висновки та перспективи досліджень. Результати проведеного дослідження доводять ефективність використання цифрових технологій молекулярного моделювання у викладанні хімічних дисциплін у закладах вищої освіти. Встановлено, що інтеграція програмних засобів ChemOffice, ChemDraw, Chem3D, Molview та інших цифрових платформ у навчальний процес сприяє підвищенню якості професійної підготовки здобувачів освіти, активізації їхньої пізнавальної діяльності та формуванню сучасних цифрових компетентностей.

У процесі виконання дослідження було проаналізовано сучасні підходи до використання цифрових технологій у хімічній освіті та охарактеризовано педагогічні можливості сучасного програмного забезпечення із молекулярного моделювання під час вивчення хімічних дисциплін. Виявлено, що цифрові платформи дозволяють візуалізувати навчальний матеріал на високому рівні, допомагають моделювати структуру та властивості молекул, досліджувати

ISSN 2786-6025 Online

механізми хімічних реакцій, виконувати віртуальний хімічний експеримент та проводити інтерпретацію експериментальних даних. Це сприяє кращому засвоєнню теоретичного матеріалу, розвитку просторового мислення та формуванню дослідницьких навичок здобувачів вищої освіти.

Результати проведеного експерименту підтвердили позитивний вплив цифрових технологій молекулярного моделювання на основні показники навчальної діяльності студентів. Варто відмітити підвищення успішності, мотивації, зацікавленості навчальною дисципліною, активності на заняттях, задоволеності процесом навчання та зростання рівня самостійності здобувачів вищої освіти. Зниження коефіцієнта варіації результатів свідчить про вирівнювання рівня підготовки здобувачів та підвищення доступності навчального матеріалу для студентів із різним рівнем початкової підготовки.

Важливою перевагою таких цифрових платформ є можливість забезпечувати безперервність освітнього процесу в умовах змішаного та дистанційного навчання, обмеженого доступу до хімічних реактивів і лабораторного обладнання та сучасних безпекових викликів в Україні. Використання технологій молекулярного моделювання дозволяє поєднувати теоретичну та практичну підготовку, забезпечуючи формування професійної готовності майбутніх хіміків відповідно до сучасних вимог.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці методик інтеграції технологій штучного інтелекту, віртуальної та доповненої реальності у процес викладання хімічних дисциплін. Перспективним напрямом є також дослідження ефективності використання цифрового молекулярного моделювання у підготовці майбутніх учителів хімії, фармацевтів, хімітехнологів та фахівців суміжних природничих спеціальностей.

Література:

1. Amirbekova E., Shertayeva N., Mironova E. Teaching chemistry in the metaverse: the effectiveness of using virtual and augmented reality for visualization. *Frontiers in Education*. 2023. Vol. 8. P. 1184768.
2. Chiu W.-K. Pedagogy of Emerging Technologies in Chemical Education during the Era of Digitalization and Artificial Intelligence: A Systematic Review. *Education Sciences*. 2021. Vol. 11. P. 709.
3. Elyasova J. The Impact of Molecular Modeling and Simulation Technologies on Students' Conceptual Understanding in Chemistry Education. *Scientific Collection «InterConf+»*. 2025. Vol. 60 (260). P. 49-54.
4. Guruloo T.N.M., Osman K. Integrating Virtual Reality Laboratories in Chemistry Education: A Systematic Literature Review. *International Journal of Education*. 2023. Vol. 15 (4). P. 127-142.
5. Handoyo K.J., Wisnuwardana C.J., Austen A., Permana F. Molecule World: Enhancing chemistry education through web-based augmented reality using Assemblr. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 245. P. 1249-1258.

6. Hu-Au E. Learning Abstract Chemistry Concepts with Virtual Reality: An Experimental Study Using a VR Chemistry Lab and Molecule Simulation. *Electronics*. 2024. Vol. 13. P. 3197.

7. Johnson-Glenberg M.C., Yu C.S.P., Liu F. Et al. Embodied mixed reality with passive haptics in STEM education: randomized control study with chemistry titration. *Frontiers in Virtual Reality*. 2023. Vol. 4. P. 1047833.

8. Kenneally C., Bentley B. A Cognitive Load Approach to Molecular Geometries: Augmented Reality Technology and Visuospatial Abilities in Chemistry. *Education Sciences*. 2024. Vol. 14 (9). P. 1036.

9. Nguyen D., Nguyen Q. Application of Augmented Reality in Chemistry Education: A Systemic Review Based on Bibliometric Analysis from 2002 to 2023. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*. 2024. Vol. 12 (6). P. 1415-1434

10. Ward L.W., Spencer D., Chauhan D., Oliver-Hoyo M. Lessons learned: the use of an augmented reality application in organic chemistry laboratories. *Frontiers in Education*. 2024. Vol. 9. P. 1384129.

11. Кочубей О. В. Цифрові технології в підготовці вчителя хімії: теоретико-методологічний аналіз. *Неперервна професійна освіта: теорія і практика*. 2025. Т. 83, №2. С. 105-113.

12. Чайка М. В. Формування умінь комп'ютерного моделювання та молекулярного дизайну за допомогою пакету програм ChemOffice в ході вивчення хімічних дисциплін. *Scientific and pedagogical internship «Introduction of European approaches and new methods of training future specialists in biology, ecology, geography, geology and chemistry» : Internship proceedings, September 6 – October 17, 2021. Wloclawek, 2021. С. 67-70.*

13. Чайка М. В., Чайка Ю. Ю., Яценко О. І., Камінський О. М. Використання цифрових платформ у викладанні дисциплін хіміко-біологічного профілю в умовах цифровізації освіти. *Global Trends in the Development of Information Technology and Science : Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference, June 25–27, 2025. Stockholm, 2025. P. 160-165.*

References

1. Amirbekova, E., Shertayeva, N., & Mironova, E. (2023). Teaching chemistry in the metaverse: the effectiveness of using virtual and augmented reality for visualization. *Frontiers in Education*, Vol. 8, p. 1184768 [in English].

2. Chiu, W.-K. (2021). Pedagogy of Emerging Technologies in Chemical Education during the Era of Digitalization and Artificial Intelligence: A Systematic Review. *Education Sciences*, Vol. 11, p. 709 [in English].

3. Elyasova, J. (2025). The Impact of Molecular Modeling and Simulation Technologies on Students' Conceptual Understanding in Chemistry Education. *Scientific Collection «InterConf+»*, Vol. 60(260), pp. 49-54 [in English].

4. Guruloo, T. N. M., & Osman, K. (2023). Integrating Virtual Reality Laboratories in Chemistry Education: A Systematic Literature Review. *International Journal of Education*, Vol. 15(4), pp. 127-142 [in English].

5. Handoyo, K. J., Wisnuwardana, C. J., Austen, A., & Permana, F. (2024). Molecule World: Enhancing chemistry education through web-based augmented reality using Assemblr. *Procedia Computer Science*, Vol. 245, pp. 1249-1258 [in English].

6. Hu-Au, E. (2024). Learning Abstract Chemistry Concepts with Virtual Reality: An Experimental Study Using a VR Chemistry Lab and Molecule Simulation. *Electronics*, Vol. 13, p. 3197 [in English].

ISSN 2786-6025 Online

7. Johnson-Glenberg, M. C., Yu, C. S. P., Liu, F., et al. (2023). Embodied mixed reality with passive haptics in STEM education: randomized control study with chemistry titration. *Frontiers in Virtual Reality*, Vol. 4, p. 1047833 [in English].

8. Kenneally, C., & Bentley, B. (2024). A Cognitive Load Approach to Molecular Geometries: Augmented Reality Technology and Visuospatial Abilities in Chemistry. *Education Sciences*, Vol. 14(9), p. 1036 [in English].

9. Nguyen, D., & Nguyen, Q. (2024). Application of Augmented Reality in Chemistry Education: A Systemic Review Based on Bibliometric Analysis from 2002 to 2023. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, Vol. 12(6), pp. 1415-1434 [in English].

10. Ward, L. W., Spencer, D., Chauhan, D., & Oliver-Hoyo, M. (2024). Lessons learned: the use of an augmented reality application in organic chemistry laboratories. *Frontiers in Education*, Vol. 9, p. 1384129 [in English].

11. Kochubei, O. V. (2025). Tsyfrovii tekhnologii v pidhotovtsi vchytelia khimii: teoretyko-metodolohichniy analiz [Digital technologies in chemistry teacher training: theoretical and methodological analysis]. *Neperervna profesiina osvita: teoriia i praktyka – Continuing Professional Education: Theory and Practice*, Vol. 83, No 2, pp. 105-113 [in Ukrainian].

12. Chaika, M. V. (2021). Formuvannia umin komp'uternoho modeliuvannia ta molekuliarnoho dyzainu za dopomohoiu paketu proham ChemOffice v khodi vyvchennia khimichnykh dystsypulin [Developing skills in computer modeling and molecular design using the ChemOffice software package during the study of chemical disciplines]. *Scientific and pedagogical internship «Introduction of European approaches and new methods of training future specialists in biology, ecology, geography, geology and chemistry»: Internship proceedings, September 6 – October 17, 2021*. Wloclawek, pp. 67-70 [in Ukrainian].

13. Chaika, M. V., Chaika, Yu. Yu., Yatsenko, O. I., & Kaminskyi, O. M. (2025). Vykorystannia tsyfrovyykh platform u vykladanni dystsypulin khimiko-biolohichnoho profilu v umovakh tsyfrovizatsii osvity [The use of digital platforms in teaching chemical and biological disciplines under the conditions of educational digitalization]. *Global Trends in the Development of Information Technology and Science: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference, June 25–27, 2025*. Stockholm, pp. 160-165 [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 05.05.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026