

Розділ VII. Підвищення розуміння молекулярної геометрії учнями старшої школи за допомогою доповненої реальності

Семеріков С.О., Селіванова Т.В., Нечипуренко П.П.,

Старова Т.В., Карнішина Д.А.

Візуалізація відіграє вирішальну роль у навчанні хімії, оскільки вона допомагає учням зрозуміти абстрактні поняття та складні просторові взаємозв'язки [27, 50]. Однак багато учнів мають труднощі з ментальною візуалізацією та маніпулюванням тривимірними структурами, що може перешкоджати їхньому розумінню фундаментальних хімічних принципів [11, 47]. Традиційні методи навчання, такі як ілюстрації в підручниках і фізичні моделі, мають обмеження у передачі динамічних та інтерактивних зображень хімічних явищ [31, 46].

Доповнена реальність (ДР) стала перспективною технологією для вирішення цих проблем, накладаючи віртуальний контент на реальний світ, створюючи захоплюючий та інтерактивний навчальний досвід [4, 25]. У навчанні природничих наук і хімії ДР застосовувалася для візуалізації молекулярних структур, хімічних реакцій та лабораторного обладнання, серед інших тем [10, 38, 53]. Дослідження показують, що ДР може покращити просторові здібності, концептуальне розуміння та мотивацію учнів у навчанні хімії [1, 13, 26].

Незважаючи на зростаючий інтерес до ДР для навчання хімії, існує потреба в більшій кількості емпіричних досліджень, які вивчають дизайн, реалізацію та ефективність навчальних втручань на основі ДР у різних контекстах [19, 52]. Крім того, переваги та обмеження конкретних платформ і інструментів ДР, таких як Vlrpar, все ще потребують додаткового вивчення [29, 36].

Це дослідження має на меті заповнити ці прогалини шляхом розробки та

оцінки навчального модуля на основі ДР для навчання молекулярної геометрії з використанням додатка Fliprag. Зокрема, ми прагнемо відповісти на такі дослідницькі питання:

ДП1: Як використання модуля на основі ДР впливає на розуміння учнями понять молекулярної геометрії порівняно з традиційним навчанням?

ДП2: Яке сприйняття та досвід учнів щодо навчання за допомогою модуля на основі ДР?

ДП3: Які особливості дизайну та навчальні стратегії підтримують ефективне навчання за допомогою модуля на основі ДР?

Теоретичне підґрунтя дослідження

Теорія когнітивного навантаження та множинні репрезентації

Теорія когнітивного навантаження (ТКН) стверджує, що робоча пам'ять людини має обмежений об'єм і що навчальні програми повинні керувати когнітивним навантаженням, щоб полегшити навчання [37, 44]. При вивченні хімії студенти часто стикаються з когнітивними вимогами, пов'язаними з опрацюванням численних зображень, таких як хімічні символи, формули та структури [28, 45]. Доповнена реальність може допомогти зменшити стороннє когнітивне навантаження шляхом інтеграції зображень у послідовний та інтерактивний формат, що дозволяє учням зосередитися на основній інформації [9, 51].

Використання множинних репрезентацій є центральним у навчанні хімії, оскільки учням необхідно розвивати вільне володіння переходом між макроскопічним, субмікроскопічним і символічним рівнями репрезентації [27, 30]. Однак учні, які починають навчатися хімії, часто відчують труднощі з координацією декількох подань (репрезентацій) і встановленням зв'язків між рівнями [3, 31]. Доповнена реальність може підтримати репрезентативну компетентність, надаючи динамічні та пов'язані репрезентації, що роблять явними зв'язки між поняттями [40].

Ситуативне навчання та втілене пізнання

Теорії ситуативного навчання підкреслюють роль контексту, соціальної взаємодії та автентичної діяльності у формуванні знань [8, 32]. Доповнена реальність може створювати ситуативний досвід навчання, вбудовуючи віртуальний контент у реальне середовище, що дозволяє студентам досліджувати хімічні явища в контексті та у співпраці [12,17]. Наприклад, ДР може моделювати лабораторні експерименти, дозволяючи учням маніпулювати змінними та спостерігати за реакціями без ризиків безпеки [16, 26].

Теорії втіленого пізнання припускають, що навчання ґрунтується на сенсомоторному досвіді й що тілесна взаємодія може покращити концептуальне розуміння [23, 49]. Доповнена реальність надає можливості для втіленого навчання, залучаючи учнів до фізичних дій, таких як жести та просторова навігація, для взаємодії з віртуальними об'єктами [33]. У хімії доповнена реальність дає змогу вивчати молекулярні структури та динаміку, підтримуючи просторове мислення та розв'язання проблем [1].

Застосування доповненої реальності у навчанні хімії

Ми використали низку досліджень, що присвячені використанню ДР у навчанні хімії, демонструючи її потенціал для покращення візуалізації, залученості та концептуального розуміння. Наприклад, Цай, Ван і Чан [10] розробили навчальний інструмент на основі ДР для навчання структури та складу речовин, виявивши, що він покращив успішність і ставлення учнів порівняно з традиційним навчанням. Аналогічно, Чень і Лю [13] використовували додаток ДР для підтримки навчання учнів хімічних реакцій, повідомляючи про підвищення мотивації та надбання знань. Vliprag – це платформа ДР, що використовувалася в освітніх контекстах, включаючи хімію. Карнішина та ін. [29] використовували Vliprag для створення контенту ДР для навчання органічної хімії, виявивши, що він підвищив мотивацію учнів і полегшив сприйняття абстрактних понять.

Проте існує потреба в більшій кількості емпіричних досліджень щодо розробки та впровадження ДР у навчанні хімії, зокрема з використанням таких платформ, як Vliprag. Багато існуючих досліджень зосереджені на

короткострокових втручаннях або конкретних темах, залишаючи відкритими питання про довгострокові наслідки та переносимість навчання на основі ДР [19, 25]. Крім того, оптимальні особливості дизайну та навчальні стратегії для ДР у навчанні хімії ще потребують дослідження [1, 26].

Наше дослідження має на меті заповнити ці прогалини шляхом розробки та оцінки модуля ДР на основі Blippar для навчання молекулярної геометрії, включаючи розуміння ідеї когнітивного навантаження, множинних репрезентацій, ситуативного навчання та тілесного пізнання.

Методика дослідження

Розробка додатку ДР

Ми розробили навчальний модуль на основі ДР для навчання молекулярної геометрії з використанням платформи Blippar (детальніше про розробку див. у додатку А в кінці розділу). Модуль складається з серії інтерактивних 3D-моделей і анімацій, які ілюструють просторове розташування атомів у молекулах, відповідно до теорії відштовхування електронних пар валентної оболонки (VSEPR) [22, 24]. Контент був розроблений відповідно до навчальної програми з хімії для середньої школи та цілей навчання, пов'язаних із молекулярною геометрією [6].

Модуль ДР був створений за допомогою веб-інструменту Blippar, BlippBuilder, який дозволяє інтегрувати 3D-моделі, анімацію та інтерактивні елементи [5]. 3D-моделі молекул були згенеровані за допомогою ChemDraw і експортовані у форматі OBJ [41]. Потім моделі були імпортовані в BlippBuilder і доповнені мітками, описами та анімацією для виділення ключових особливостей і понять (рис. 1).

Розробка модуля доповненої реальності ґрунтувалася на принципах теорії когнітивного навантаження, множинних репрезентацій та втіленого пізнання [9, 33, 40]. Для управління когнітивним навантаженням модуль представляє інформацію поступово і надає чіткі інструкції та зворотний зв'язок [34]. Множинні репрезентації, такі як моделі з кульок і паличок та карти

електростатичного потенціалу використовуються для підтримки розуміння молекулярної структури та властивостей [30]. Для заохочення просторового мислення та активного навчання включені втілені взаємодії, такі як обертання та масштабування молекул [2].

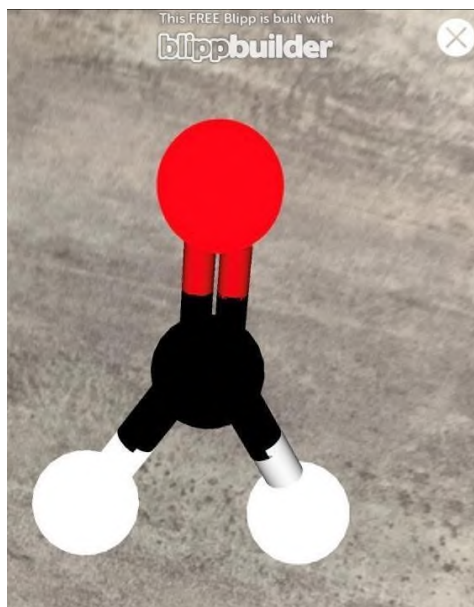


Рис. 1. Екранна копія модуля доповненої реальності з 3D-моделлю молекули

Контекст та учасники дослідження

Дослідження проводилося в середній школі №15 у м. Кривий Ріг, Україна, протягом 2021-2022 навчального року. Хімію як обов'язковий курс вивчають учні 10 класу. Для участі в дослідженні було обрано два класи, в яких викладає один і той самий вчитель хімії. Класи були випадковим чином розподілені на експериментальну групу ($n=25$), яка використовувала модуль ДР, або контрольну групу ($n=24$), яка отримувала традиційне навчання молекулярної геометрії.

У дослідженні взяли участь 49 учнів 10-го класу (26 дівчат і 23 хлопці), середній вік яких становив 15,7 років ($SD=0,6$). Перед дослідженням усі учні пройшли вступні заняття з атомної структури та хімічного зв'язку. Від учнів та їхніх батьків/опікунів було отримано інформовану згоду, а адміністрація школи схвалила проведення дослідження.

Збір та аналіз даних

Для збору й аналізу даних про результати навчання, сприйняття та досвід учнів використовувався підхід змішаних методів [14]. До та після втручання були застосовані такі інструменти:

1. *Тест концепцій молекулярної геометрії* (ТКМГ, додаток Б.1) – 20-елементний тест із множинним вибором, який оцінює розуміння учнями теорії VSEPR, молекулярних форм і полярності [21]. Тест пройшов валідацію групою експертів з хімічної освіти Криворізького державного педагогічного університету та пілотне тестування на схожій вибірці учнів.

2. *Опитування сприйняття учнями ДР* (ОСУДР, додаток Б.2) – 15-елементне опитування за шкалою Лікерта, що вимірює сприйняття учнями корисності, простоти використання, задоволення та наміру використовувати ДР для вивчення хімії [42]. Опитування було адаптовано з існуючих інструментів і показало хорошу надійність (альфа Кронбаха 0,87).

3. *Напівструктуровані інтерв'ю* (додаток Б.3). Була проведена цілеспрямована вибірка з 12 учнів (по 6 з кожної групи) з використанням Zoom для отримання більш глибокого розуміння їхнього навчального досвіду та сприйняття. Інтерв'ю були записані, авто-транскрибовані Zoom з подальшою ручною перевіркою дослідниками та закодовані за допомогою тематичного аналізу (додаток В.2) [7].

Кількісні дані з ТКМГ і ОСУДР аналізувалися за допомогою описової статистики, t-тестів для незалежних вибірок і аналізу коваріації (ANCOVA) для порівняння експериментальної та контрольної груп [20]. Якісні дані з інтерв'ю аналізувалися індуктивно для виявлення нових тем і закономірностей, що потім тріангулювалися з кількісними висновками [35].

Результати

ДП1: Вплив на розуміння учнями молекулярної геометрії

Перше питання дослідження полягало у вивченні впливу модуля на основі доповненої реальності на розуміння учнями понять молекулярної

геометрії порівняно з традиційним навчанням. У таблиці 1 представлено описову статистику та результати *t*-тесту для незалежних вибірок для балів ТКМГ.

Таблиця 1

Описова статистика та результати *t*-тесту для балів ТКМГ

Група	Передтест		Післятест		Різниця	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Експериментальна (n=25)	8,24	2,91	16,52	2,43	8,28	2,59
Контрольна (n=24)	8,08	3,12	13,67	3,01	5,58	2,73
t-критерій	<i>t</i> (47)=0,18	<i>p</i> =0,86	<i>t</i> (47)=3,46	<i>p</i> <0,01	<i>t</i> (47)=3,38	<i>p</i> <0,01

Результати показують, що хоча і не було суттєвої різниці між групами на передтесті, експериментальна група набрала значно вище, ніж контрольна, на післятесті і за приростом балів. ANCOVA, контролюючи бали передтесту, підтвердив значний вплив втручання ДР на бали післятесту: $F(1,46)=14,27$, $p<0,001$, $\eta^2_p=0,24$ (додаток В.1).

Рисунок 2 ілюструє розподіл балів приросту ТКМГ для кожної групи за допомогою діаграм розмаху. Експериментальна група демонструє вищу медіану та вужчий міжквартильний діапазон порівняно з контрольною групою, що вказує на більш послідовний навчальний приріст.

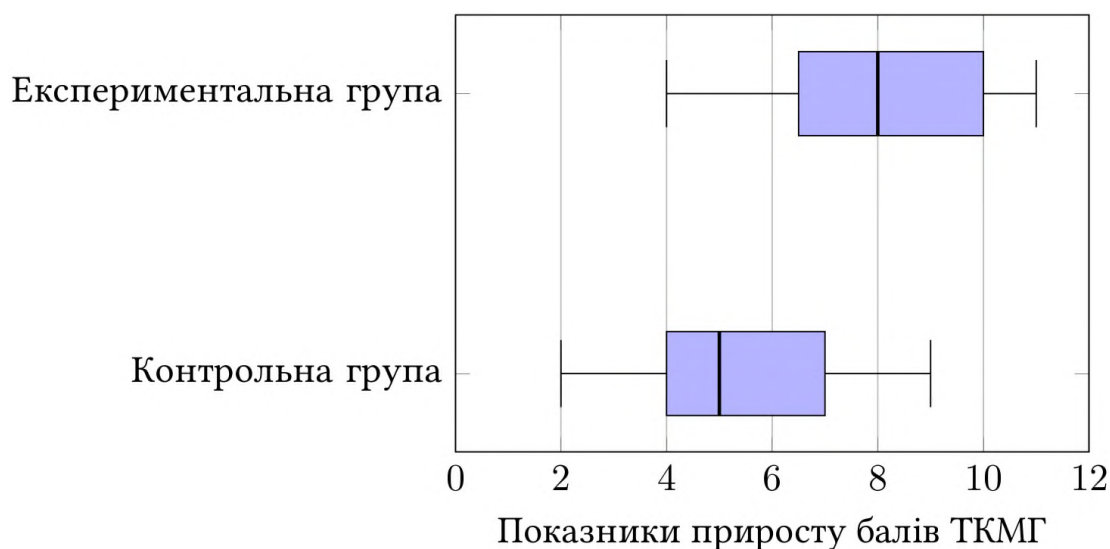


Рис. 2. Діаграма розмаху показників приросту балів ТКМГ для основної та

контрольної груп

Якісні результати інтерв'ю підтверджують кількісні результати. Учні експериментальної групи повідомили про більш глибоке розуміння та запам'ятовування понять молекулярної геометрії, пов'язуючи це з візуалізаціями та взаємодіями, що надавалися модулем ДР. Наприклад:

«Додаток ДР допоміг мені чіткіше побачити 3D-форми молекул. Я міг обертати їх і бачити, як змінюються кути зв'язків з різною кількістю пар електронів. Це полегшило запам'ятовування правил VSEPR.» (Учень E14)

Натомість деякі учні контрольної групи висловились про труднощі з візуалізацією та застосуванням понять, засвоєних традиційними методами:

«Я зрозумів основну ідею VSEPR, але було важко уявити молекулярні форми лише за діаграмами з підручника. Я заплутався, намагаючись передбачити геометрію для більш складних молекул.» (Учень K09)

Ці якісні результати свідчать про те, що модуль доповненої реальності покращив просторове мислення учнів та їхнє концептуальне розуміння молекулярної геометрії, підтверджуючи кількісні результати.

ДП2: Сприйняття та досвід учнів

Друге дослідницьке питання вивчало сприйняття та досвід учнів щодо навчання за допомогою модуля на основі ДР. У таблиці 2 представлено описову статистику для субшкал ОСУДР (додаток Б.2) і загальних балів.

Таблиця 2

Описова статистика для субшкал ОСУДР та загальних балів

Підшкала	Кількість позицій	<i>M</i>	<i>SD</i>
Сприйнята корисності	4	4.12	0.63
Сприйняття простоти використання	3	4.28	0.59
Задоволення	4	4.36	0.61
Намір використовувати	4	4.02	0.71
<i>Разом</i>	15	4.19	0.57

Результати вказують на загалом позитивне сприйняття модуля ДР з

високими оцінками за всіма субшкалами (вище 4 за 5-бальною шкалою). Учні вважали модуль ДР корисним для навчання, простим у використанні та захоплюючим і висловили намір використовувати подібні інструменти в майбутньому.

Дані інтерв'ю дають додаткове розуміння досвіду учнів. Було виокремлено кілька тем, зокрема:

1. *Залученість і мотивація* – учні оцінили інтерактивний і «схожий на гру» характер модуля ДР, що зробило навчання більш захоплюючим і мотивуючим порівняно з традиційними методами.

«Використання додатку ДР зробило вивчення хімії більш веселим і цікавим. Це не здавалося навчанням, а скоріше дослідженням і відкриттям.» (Учень E03)

2. *Автономність і самостійне навчання* – модуль ДР дозволив учням маніпулювати молекулами у власному темпі, що сприяло розвитку почуття автономії та підтримці індивідуальних навчальних потреб.

«Мені сподобалося мати змогу контролювати темп і повертатися для повторення понять за потреби. З додатком ДР я міг приділити більше часу тим частинам, які здавалися мені складними.» (Учень E21)

3. *Спільне навчання* – хоча він розроблений для індивідуального використання, модуль ДР спонукав учнів обговорювати та порівнювати своє розуміння з однолітками, сприяючи спільному навчанню.

«Ми з другом часто показували один одному молекули, які створили в додатку ДР, і говорили про форми та кути. Це допомогло нам вчитися один від одного.» (Учень E08)

Однак деякі учні також повідомляли про початкові технічні труднощі або дезорієнтацію при використанні модуля ДР:

«Мені знадобився деякий час, щоб звикнути до інтерфейсу та елементів керування ДР. Іноді відстеження було неплавним або моделі зависали.» (Уч. E16)

Ці результати підкреслюють потенціал ДР для підвищення залученості та автономії учнів, а також визначають сфери для покращення користувацького досвіду та технічної реалізації.

ДПЗ: Особливості дизайну та навчальні стратегії

Третє дослідницьке питання досліджувало особливості дизайну та навчальні стратегії, які підтримували ефективне навчання за допомогою модуля на основі ДР. Аналіз інтерв'ю виявив кілька ключових висновків:

1. *Підказки та зворотний зв'язок* – модуль надавав допомогу у вигляді підказок і зворотного зв'язку, які спрямовували взаємодію учнів і підсилювали ключові поняття. Учні, які частіше використовували ці функції, як правило, показували кращі результати в ТКМГ.

«Підказки в додатку ДР допомагали мені, коли я застрягав. Вони не видавали відповідь, а вказували мені правильний напрямок.» (Учень E11)

2. *Множинні репрезентації* – використання множинних репрезентацій, таких як моделі кульок і паличок і карти електронної щільності, підтримувало розуміння учнів, представляючи інформацію різними способами. Учні часто перемикалися між представленнями, щоб прояснити своє мислення.

«Як на мене, карти електронної щільності корисні для бачення форми молекули. Модель кульок і паличок чіткіше показувала кути зв'язків. Використання обох допомогло мені краще зрозуміти матеріал.» (Учень E23)

3. *Контекстуальні приклади* – модуль містив приклади та застосування молекулярної геометрії в реальному світі, наприклад, у розробці ліків і матеріалознавстві. Учні знайшли ці приклади мотивуючими і такими, що відповідають їхнім інтересам.

«Мені сподобалося дізнаватися про те, як молекулярна форма впливає на властивості ліків і нових матеріалів. Це зробило поняття більш значущими та застосовними.» (Учень E07)

Ці висновки свідчать про те, що ефективний дизайн ДР для навчання хімії має включати підказки та зворотний зв'язок, множинні репрезентації й контекст-релевантні приклади. Моделі використання та відгуки учнів можуть стати основою для майбутніх версій та впровадження модуля ДР.

Обговорення. Результати цього дослідження демонструють потенціал ДР, зокрема з використанням платформи *Blippar*, для покращення розуміння та залученості учнів до вивчення молекулярної геометрії. Позитивний вплив на концептуальні знання та просторове мислення узгоджується з попередніми дослідженнями ДР у навчанні хімії [10, 13, 25]. Модуль ДР надав учням інтерактивні 3D-візуалізації та множинні представлення, які підтримували їхню здатність ментально маніпулювати та міркувати про молекулярні структури. Це узгоджується з принципами просторового пізнання та репрезентативної компетентності в навчанні хімії [18, 30, 50].

Дизайн модуля ДР, заснований на теорії когнітивного навантаження та принципах мультимедійного навчання [34, 44], ймовірно, сприяв його ефективності. Використання підказок, зворотного зв'язку та сегментації матеріалу допомогло керувати внутрішнім когнітивним навантаженням, тоді як інтеграція 3D-моделей та інформації зменшила зайве навантаження. Контекст-релевантні приклади та реальні застосування могли сприяти доречному навантаженню, збільшуючи мотивацію та залученість учнів [37]. Ці висновки свідчать про те, що ретельне проектування, засноване на теоріях навчання, має вирішальне значення для реалізації переваг ДР у навчанні хімії.

Позитивне сприйняття та досвід учнів з модулем ДР, про що свідчать дані опитування та інтерв'ю, підкреслюють мотиваційні та афективні переваги цієї технології. Високі оцінки задоволення, простоти використання та наміру застосовувати ДР узгоджуються з попередніми дослідженнями ставлення учнів до ДР у навчанні природничих наук [1, 16, 26]. Теми залученості, автономності та співпраці, які виникли з інтерв'ю, співзвучні з перевагами ДР, визначеними в літературі, такими як підвищена мотивація, самостійне навчання та соціальна взаємодія [12, 17, 39]. Ці висновки підкреслюють потенціал ДР для створення більш інтерактивних та орієнтованих на учнів середовищ навчання хімії.

Однак дослідження також виявило деякі обмеження та проблеми використання *Blippar* для ДР у навчанні хімії. Деякі учні повідомляли про технічні труднощі або початкову дезорієнтацію з інтерфейсом ДР, що могло

перешкоджати їхньому навчальному досвіду. Це відображає занепокоєння, висловлені в попередніх дослідженнях щодо зручності використання та технічної надійності додатків ДР в освіті [16, 25, 51]. Хоча Blippar пропонує доступну та зручну платформу для створення контенту ДР, він може не мати всіх функцій або стабільності, необхідних для безперебійної освітньої реалізації. Освітняни та дослідники мають ретельно враховувати технічні вимоги та обмеження інструментів ДР при розробці та використанні на уроках хімії.

Отримані дані також свідчать про те, що ДР не слід розглядати як самостійне рішення, а скоріше як додатковий інструмент, який інтегрується з іншими навчальними стратегіями та ресурсами. Модуль ДР у цьому дослідженні використовувався разом із традиційними заняттями, читанням підручників і груповими дискусіями, що, ймовірно, сприяло його ефективності. Це узгоджується з ідеєю ДР як «мосту» між фізичними та віртуальними навчальними середовищами, а не заміною одного з них [12, 51]. Майбутні дослідження мають вивчити, як ДР можна оптимально поєднати з іншими педагогічними підходами та технологіями для підтримки навчання хімії.

Що стосується наслідків для теорії, результати цього дослідження підтримують застосування теорій просторового пізнання, мультимедійного навчання та репрезентативної компетентності до розробки та оцінки використання ДР у хімії. Дослідження також висвітлює необхідність подальшого теоретичного розвитку для пояснення унікальних переваг і обмежень ДР як технології навчання, таких як її здатність об'єднувати фізичні та віртуальні контексти та підтримувати втілені взаємодії [33, 39].

З наукової точки зору, це дослідження демонструє цінність використання змішаних методів і численних джерел даних для вивчення ефектів і механізмів застосування ДР у навчанні хімії. Поєднання кількісних показників (концептуальних тестів та опитувань) і якісних даних (інтерв'ю та спостережень) забезпечило більш повне та детальне розуміння результатів навчання, сприйняття та досвіду учнів. Майбутні дослідження мають спиратися на цей підхід для вивчення довгострокових впливів, ефектів переносу та

індивідуальних відмінностей у навчанні з використанням ДР [25, 39].

Що стосується практичних наслідків, це дослідження пропонує кілька рекомендацій для освітян і дизайнерів навчання, зацікавлених у використанні ДР, зокрема з Fliprар, для навчання хімії:

1. Виконуйте розробку контенту та діяльності ДР на основі теорій навчання та дослідницьких принципів, таких як теорія когнітивного навантаження, мультимедійне навчання та просторове пізнання.

2. Використовуйте ДР для створення інтерактивних 3D-візуалізацій, множинних репрезентацій і контекст-релевантних прикладів, які підтримують концептуальне розуміння та просторове мислення учнів.

3. Інтегруйте стратегії скафолдингу, зворотного зв'язку та сегментації для управління когнітивним навантаженням і спрямування взаємодії учнів з контентом ДР.

4. Поєднуйте ДР з іншими навчальними стратегіями та ресурсами, такими як лекції, дискусії та практичні заняття, щоб створити цілісний і збалансований навчальний досвід.

5. Надавайте технічну підтримку та консультації для учнів і вчителів, щоб забезпечити безперебійне та ефективне використання інструментів ДР у класі.

6. Постійно оцінюйте та вдосконалюйте використання ДР на основі відгуків учнів, результатів навчання та моделей використання, щоб оптимізувати їхню освітню цінність.

Висновки. У цьому дослідженні вивчалась ефективність навчального модуля на основі доповненої реальності, розробленого з використанням Fliprар для навчання молекулярної геометрії учням старших класів з хімії. Отримані результати демонструють, що використання ДР суттєво покращило концептуальне розуміння та просторове мислення учнів порівняно з традиційним навчанням. Учні повідомили про позитивне сприйняття та досвід роботи з модулем ДР, підкресливши його переваги для залученості, автономності та спільного навчання. Визначені особливості дизайну та

навчальні стратегії, які підтримували ефективне навчання за допомогою ДР, включаючи скафолдинг, множинні репрезентації та контекст-релевантні приклади.

Дослідження робить внесок у теоретичні та емпіричні основи ДР у навчанні хімії, надаючи докази когнітивних і афективних переваг цієї технології та розуміння принципів дизайну та педагогічних підходів, які оптимізують її ефективність. Отримані результати підтримують застосування теорії когнітивного навантаження, мультимедійного навчання та просторового пізнання для розробки та оцінки застосувань ДР у цій галузі.

Однак дослідження також виявило деякі обмеження та проблеми, такі як технічні труднощі та необхідність інтеграції з іншими навчальними стратегіями. Розмір вибірки та тривалість втручання були обмеженими, а довгострокові наслідки та ефекти перенесення навчання з ДР не оцінювалися. Майбутні дослідження мають усунути ці обмеження шляхом проведення масштабних лонгітюдних досліджень, які вивчають збереження та застосування знань, отриманих через ДР у навчанні хімії.

Інші напрямки для подальшої роботи включають дослідження індивідуальних відмінностей у навчанні з ДР, таких як попередні знання, просторові здібності та стилі навчання, для персоналізації та адаптації досвіду ДР. Потенціал ДР для підтримки спільного та дослідницького навчання в хімії також потребує подальшого вивчення, а також інтеграція ДР з іншими технологіями, такими як штучний інтелект.

ДОДАТОК А.

Деталі розробки модуля ДР

Модуль ДР був розроблений з використанням платформи Vliprag, яка дозволяє створювати та розгортати інтерактивний контент ДР. Процес розробки включав такі кроки:

1. *Дизайн контенту.* Цілі навчання та ключові поняття, пов'язані з молекулярною геометрією, були визначені на основі навчальної програми з

хімії для старшої школи [6]. Для окреслення структури та потоку контенту ДР були створені розкадровки та сценарії.

2. *3D-модельовання*. Молекулярні структури були створені за допомогою ChemDraw і експортовані у файли FBX/OBJ. Потім 3D-моделі були імпортовані в Blender для редагування та оптимізації, включаючи додавання кольорів, текстур і анімації.

3. *Дизайн UI/UX*. Користувацький інтерфейс і дизайн взаємодії були створені за допомогою Sketch та Adobe XD. Компонування, значки та елементи навігації були розроблені таким чином, щоб бути інтуїтивно зрозумілими та зручними для користувача, дотримуючись принципів і рекомендацій дизайну ДР [43, 48].

4. *Розробка ДР*. 3D-моделі, елементи інтерфейсу користувача та інтерактивність були інтегровані за допомогою інструменту Blippar Studio. Маркери ДР були згенеровані та пов'язані з відповідним контентом. Досвід ДР був протестований і вдосконалений за допомогою ітеративного прототипування та відгуків користувачів.

5. *Розгортання та тестування*. Модуль ДР був опублікований у додатку Blippar (коди 1989195, 1989195, 1989281, 1989295, 1989240, 1989311, 2019779, 2019781, 1989261, 1989361, 2019792, 2019798, 1989373, 1989320, 2019794, 2019800, 1989378, 2019796, 2019805, 2019803) і протестований на різних пристроях для забезпечення сумісності та продуктивності. Тестування проводилося на вибірці учнів старших класів, щоб зібрати відгуки та внести остаточні вдосконалення перед дослідженням.

ДОДАТОК Б.

Інструменти збору даних

Б.1. Тест концепцій молекулярної геометрії (ТКМГ)

ТКМГ – це тест із 20 завдань з вибором однієї правильної відповіді, який оцінює розуміння учнями концепцій молекулярної геометрії, зокрема теорії VSEPR, молекулярних форм, кутів зв'язку та полярності. Тест було розроблено

групою експертів з хімічної освіти та перевірено шляхом пілотного тестування та аналізу завдань. Коефіцієнт надійності MGCT (альфа Кронбаха) становить 0,85. Приклади завдань:

Яка молекулярна геометрія BeCl_2 ?

1. Лінійна
2. Зігнута
3. Тригональна планарна
4. Тетраедрична

Яка з наступних молекул має дипольний момент?

1. CO_2
2. CCl_4
3. NH_3
4. BCl_3

Б.2. Опитування сприйняття учнями ДР (ОСУДР)

ОСУДР – це 15-елементне опитування за шкалою Лікерта, яке вимірює сприйняття учнями модуля ДР з точки зору його корисності, простоти використання, задоволення та наміру використовувати. Опитування було адаптоване з моделі сприйняття технологій Девіса [15] і має коефіцієнт надійності (альфа Кронбаха) 0,92.

Приклади пунктів (оцінюються за шкалою від 1 - категорично не згоден до 5 - повністю згоден):

Додаток ДР допоміг мені краще зрозуміти молекулярну геометрію.

Додатком ДР було легко користуватися та орієнтуватися.

Мені сподобалося вчитися за допомогою додатка ДР.

Я хотів би використовувати додатки ДР для вивчення хімії в майбутньому.

Б.3. Протокол інтерв'ю

Напівструктуровані інтерв'ю проводилися з підмножиною учнів з кожної групи, щоб зібрати якісні відомості про їхній навчальний досвід і сприйняття. Інтерв'ю тривали приблизно 20-30 хвилин, записувалися у Zoom (лише звуковий ряд), автотранскрибувалися та розшифровувались для аналізу. Приклади запитань:

Як додаток ДР/традиційне навчання допомогло вам зрозуміти молекулярну геометрію?

Що вам сподобалося або не сподобалося в навчанні за допомогою додатка ДР/традиційного підходу?

Як додаток ДР/традиційне навчання вплинуло на ваш інтерес і залученість до вивчення хімії?

З якими проблемами або труднощами ви зіткнулися під час використання додатка ДР/навчання традиційним методом?

Як ви думаєте, як можна використовувати ДР для покращення навчання хімії в майбутньому?

ДОДАТОК В.

Додаткові дані та аналіз

В.1. Результати ANCOVA

Коваріаційний аналіз (ANCOVA) був проведений для порівняння балів післятесту в основній і контрольній групах, контролюючи результати передтесту як коваріату. Припущення про нормальність, однорідність дисперсій і однорідність нахилів регресії були дотримані. Результати ANCOVA представлені у таблиці 3.

Таблиця 3

Результати ANCOVA щодо впливу ДР на бали післятесту

Джерело	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Передтест	112.84	1	112.84	16.73	<0.001
Група	96.31	1	96.31	14.27	<0.001
Помилка	310.56	46	6.75		
Разом	15271.00	49			

Результати ANCOVA підтверджують, що експериментальна група ДР мала значно вищі бали післятесту, ніж контрольна група, після контролю балів передтесту: $F(1,46)=14,27$, $p<0,001$, частковий $\eta^2=0,24$. Це вказує на те, що застосування ДР мало значний вплив на результати навчання учнів, незважаючи на будь-які початкові відмінності в попередніх знаннях.

В.2. Тематичний аналіз даних інтерв'ю

Транскрипти інтерв'ю аналізувалися за допомогою тематичного аналізу, дотримуючись шестифазного процесу, описаного Braun і Clarke [7]. Аналіз включав ознайомлення з даними, генерування початкових кодів, пошук тем,

перегляд тем, визначення та іменування тем, а також підготовку звіту. Основні теми, які з'явилися в результаті аналізу, представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

Основні теми та підтеми з аналізу інтерв'ю

Теми	Підтеми
Візуалізація та розуміння	Просторове мислення Множинні репрезентації Молекулярна структура та властивості
Залучення та мотивація	Інтерактивність та дослідження Актуальність у реальному світі Гейміфікація та змагання
Юзабіліті та технічні питання	Простота використання та навігація Технічні збої та помилки Сумісність і продуктивність пристроїв
Інтеграція у навчання	Комбіноване навчання Керівництво та підтримка вчителя Спільне та соціальне навчання

Тематичний аналіз надає глибоке та детальне розуміння досвіду та сприйняття учнями навчання з ДР, доповнюючи кількісні результати.

Список використаних джерел

1. Abdinejad M., Talaie B., Qorbani H.S., Dalili S. Student Perceptions Using Augmented Reality and 3D Visualization Technologies in Chemistry Education. *Journal of Science Education and Technology*. 2021. Vol. 30, no. 1. P. 87-96. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09880-2>
2. Abrahamson D. Building educational activities for understanding: An elaboration on the embodied-design framework and its epistemic grounds. *International Journal of Child-Computer Interaction*. 2014. Vol. 2, no. 1. P. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2014.07.002>
3. Ainsworth S. DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*. 2006. Vol. 16, no. 3. P. 183-198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>
4. Azuma R. T. A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1997. Vol. 6, no. 4. P. 355-385. DOI: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
5. Blippar Group Limited. Create & Build AR | Blippbuilder Free 3D Augmented Reality Tool - Blippar. 2024. URL: <https://www.blippar.com/build-ar>

6. Bobkova O. S., Bukhtiiarov V. K., Valiuk V. F., Velychko L. P., Dubovyk O. A., Pavlenko V. O., Puhach S. V. Chemistry. 10-11 grades. Profile level: Curriculum for institutions of general secondary education. 2017. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/ximiya-10-11-profilnij-riven.docx>
7. Braun V., Clarke V. Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*. 2006. Vol. 3, no. 2. P. 77-101. DOI: <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
8. Brown J. S., Collins A., Duguid P. Situated Cognition and the Culture of Learning. *Educational Researcher*. 1989. Vol. 18, no. 1. P. 32-42. DOI: <https://doi.org/10.3102/0013189X018001032>
9. Bujak K. R., Radu I., Catrambone R., MacIntyre B., Zheng R., Golubski G. A psychological perspective on augmented reality in the mathematics classroom. *Computers & Education*. 2013. Vol. 68. P. 536-544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.02.017>
10. Cai S., Wang X., Chiang F. K. A case study of Augmented Reality simulation system application in a chemistry course. *Computers in Human Behavior*. 2014. Vol. 37. P. 31-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.04.018>
11. Cavin C. S., Cavin E. D., Lagowski J. J. The effect of computer-assisted instruction on the attitudes of college students toward computers and chemistry. *Journal of Research in Science Teaching*. 1981. Vol. 18, no. 4. P. 329-333. DOI: <https://doi.org/10.1002/tea.3660180407>
12. Chen P., Liu X., Cheng W., Huang R. A review of using Augmented Reality in Education from 2011 to 2016. *Innovations in Smart Learning*. Singapore: Springer Singapore, 2017. P. 13-18. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2419-1_2
13. Chen S. Y., Liu S. Y. Using augmented reality to experiment with elements in a chemistry course. *Computers in Human Behavior*. 2020. Vol. 111. P. 106418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106418>
14. Creswell J. W., Plano Clark V. L. *Designing and Conducting Mixed Methods Research*. 3rd ed. SAGE Publications, 2017.
15. Davis F. D. Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*. 1989. Vol. 13, no. 3. P. 319-340. DOI: <https://doi.org/10.2307/249008>
16. Domínguez Alfaro J. L., Gantois S., Blattgerste J., De Croon R., Verbert K., Pfeiffer T., Van Puyvelde P. Mobile Augmented Reality Laboratory for Learning Acid-Base Titration. *Journal of Chemical Education*. 2022. Vol. 99, no. 2. P. 531-537. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00894>
17. Dunleavy M., Dede C., Mitchell R. Affordances and Limitations of Immersive Participatory Augmented Reality Simulations for Teaching and Learning. *Journal of Science Education and Technology*. 2009. Vol. 18, no. 1. P. 7-22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9119-1>
18. Ebner M., Holzinger A. Successful implementation of user-centered game based learning in higher education: An example from civil engineering. *Computers & Education*. 2007.

- Vol. 49, no. 3. P. 873-890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2005.11.026>
19. Faridi E., Ghaderian A., Honarasa F., Shafie A. Next generation of chemistry and biochemistry conference posters: Animation, augmented reality, visitor statistics, and visitors' attention. *Biochemistry and Molecular Biology Education*. 2021. Vol. 49, no. 4. P. 619-624. DOI: <https://doi.org/10.1002/bmb.21520>
 20. Field A. *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. 5th ed. SAGE Publications, 2017. URL: <http://repo.darmajaya.ac.id/5678/>
 21. García Franco A., Taber K. S. Secondary Students' Thinking about Familiar Phenomena: Learners' explanations from a curriculum context where 'particles' is a key idea for organising teaching and learning. *International Journal of Science Education*. 2009. Vol. 31, no. 14. P. 1917-1952. DOI: <https://doi.org/10.1080/09500690802307730>
 22. Gillespie R. J. The VSEPR model revisited. *Chemical Society Reviews*. 1992. Vol. 21. P. 59-69. DOI: <https://doi.org/10.1039/CS9922100059>
 23. Glenberg A. M. Embodiment as a unifying perspective for psychology. *WIREs Cognitive Science*. 2010. Vol. 1, no. 4. P. 586-596. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcs.55>
 24. Housecroft C. E., Sharpe A. G. *Inorganic Chemistry*. 2nd ed. Pearson, 2005.
 25. Ibáñez M. B., Delgado-Kloos C. Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Computers & Education*. 2018. Vol. 123. P. 109-123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.002>
 26. Irwansyah F. S., Yusuf Y. M., Farida I., Ramdhani M. A. Augmented Reality (AR) Technology on The Android Operating System in Chemistry Learning. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 288, no. 1. P. 012068. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/288/1/012068>
 27. Johnstone A. H. Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*. 1991. Vol. 7, no. 2. P. 75-83. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>
 28. Johnstone A. H. Teaching of chemistry - logical or psychological? *Chemistry Education Research and Practice*. 2000. Vol. 1, no. 1. P. 9-15. DOI: <https://doi.org/10.1039/A9RP90001B>
 29. Karnishyna D. A., Selivanova T. V., Nechypurenko P. P., Starova T. V., Stoliarenko V. G. The use of augmented reality in chemistry lessons in the study of "Oxygen-containing organic compounds" using the mobile application Blippar. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2288, no. 1. P. 012018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2288/1/012018>
 30. Kozma R. The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding. *Learning and Instruction*. 2003. Vol. 13, no. 2. P. 205-226. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(02\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00021-X)
 31. Kozma R. B. The Use of Multiple Representations and the Social Construction of Understanding in Chemistry. *Innovations in Science and Mathematics Education: Advanced Designs for Technologies of Learning*. Mahwah, NJ: Erlbaum, 2000. P. 11-46. URL: <https://www.academia.edu/42103279>
 32. Lave J., Wenger E. *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815355>

33. Lindgren R., Johnson-Glenberg M. Emboldened by Embodiment: Six Precepts for Research on Embodied Learning and Mixed Reality. *Educational Researcher*. 2013. Vol. 42, no. 8. P. 445-452. DOI: <https://doi.org/10.3102/0013189X13511661>
34. Mayer R. E. *Multimedia Learning*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781316941355>
35. Miles M. B., Huberman A. M., Saldaña J. *Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook*. 3rd ed. SAGE Publications, 2014. URL: <https://www.metodos.work/wp-content/uploads/2024/01/Qualitative-Data-Analysis.pdf>
36. Nechypurenko P. P., Semerikov S. O., Pokhliestova O. Y. An augmented reality-based virtual chemistry laboratory to support educational and research activities of 11th grade students. *Educational Dimension*. 2023. Vol. 8. P. 240-264. DOI: <https://doi.org/10.31812/educdim.4446>
37. Paas F., van Gog T., Sweller J. Cognitive Load Theory: New Conceptualizations, Specifications, and Integrated Research Perspectives. *Educational Psychology Review*. 2010. Vol. 22, no. 2. P. 115-121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9133-8>
38. Pence H. E. Smartphones, Smart Objects, and Augmented Reality. *The Reference Librarian*. 2010. Vol. 52, no. 1-2. P. 136-145. DOI: <https://doi.org/10.1080/02763877.2011.528281>
39. Radu I. Augmented reality in education: a meta-review and cross-media analysis. *Personal and Ubiquitous Computing*. 2014. Vol. 18, no. 6. P. 1533-1543. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00779-013-0747-y>
40. Rau M. A. Enhancing undergraduate chemistry learning by helping students make connections among multiple graphical representations. *Chemistry Education Research and Practice*. 2015. Vol. 16. P. 654-669. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5RP00065C>
41. Revvity Signals Software. ChemDraw. 2024. URL: <https://revvitysignals.com/products/research/chemdraw>
42. Schutera S., Schnierle M., Wu M., Pertzelt T., Seybold J., Bauer P., Teutscher D., Raedle M., Heß-Mohr N., Röck S., Krause M. J. On the Potential of Augmented Reality for Mathematics Teaching with the Application cleARmaths. *Education sciences*. 2021. Vol. 11, no. 8. P. 368. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci11080368>
43. Semerikov S. O., Vakaliuk T. A., Mintii I. S., Hamaniuk V. A., Soloviev V. N., Bondarenko O. V., Nechypurenko P. P., Shokaliuk S. V., Moiseienko N. V., Shepiliev D. S. Immersive E-Learning Resources: Design Methods. *Digital Humanities Workshop*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022. P. 37-47. DOI: <https://doi.org/10.1145/3526242.3526264>
44. Sweller J. Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*. 1994. Vol. 4, no. 4. P. 295-312. DOI: [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5)
45. Taber K. S. Towards a Curricular Model of the Nature of Science. *Science & Education*. 2008. Vol. 17, no. 2. P. 179-218. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11191-006-9056-4>
46. Tasker R. Research into practice: Visualising the molecular world for a deep understanding of chemistry. *Teaching science*. 2014. Vol. 60, no. 2. P. 16-27.
47. Ferk V., Vrtacnik M., Blejec A., Gril A. Students' understanding of molecular structure

- representations. *International Journal of Science Education*. 2003. Vol. 25, no. 10. P. 1227-1245. DOI: <https://doi.org/10.1080/0950069022000038231>
48. Vlasenko K. V., Lovianova I. V., Volkov S. V., Sitak I. V., Chumak O. O., Krasnoshchok A. V., Bohdanova N. G., Semerikov S. O. UI/UX design of educational on-line courses. *CTE Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 9. P. 184-199. DOI: <https://doi.org/10.55056/cte.114>
 49. Wilson M. Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*. 2002. Vol. 9, no. 4. P. 625-636. DOI: <https://doi.org/10.3758/BF03196322>
 50. Wu H. K., Krajcik J. S., Soloway E. Promoting understanding of chemical representations: Students' use of a visualization tool in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*. 2001. Vol. 38, no. 7. P. 821-842. DOI: <https://doi.org/10.1002/tea.1033>
 51. Wu H. K., Lee S. W. Y., Chang H. Y., Liang J. C. Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*. 2013. Vol. 62. P. 41-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>
 52. Zhai X., Jackson D. F. A pedagogical framework for mobile learning in science education. *International Encyclopedia of Education*. 4th ed. Oxford: Elsevier, 2023. P. 215-223. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818630-5.13037-4>
 53. Zhang J., Li G., Huang Q., Feng Q., Luo H. Augmented Reality in K-12 Education: A Systematic Review and Meta-Analysis of the Literature from 2000 to 2020. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 15. P. 9725. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159725>