

An augmented reality-based virtual chemistry laboratory to support educational and research activities of 11th grade students

Pavlo P. Nechypurenko¹[0000–0001–5397–6523],
Serhiy O. Semerikov^{1,2,3}[0000–0003–0789–0272], and Olesia Yu. Pokhlietova¹

Kryvyi Rih State Pedagogical University,
54 Gagarin Ave., Kryvyi Rih, 50086, Ukraine
{acinonyxleo, semerikov}@gmail.com, hi-16-pokhlietova@kdpu.edu.ua
<https://kdpu.edu.ua/personal/pnpavlo.html>, <https://kdpu.edu.ua/semerikov>
Kryvyi Rih National University,
11 Vitalii Matusevych Str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine
Institute for Digitalisation of Education of the NAES of Ukraine,
9 M. Berlynskoho Str., Kyiv, 04060, Ukraine

Abstract. The organization of high school students' research and learning activities in chemistry requires a significant amount of experimental work. The performance of experimental work in chemistry at school faces a number of problems, both purely material and organizational, to which the need for distance learning has recently been added. This article describes the state of use of augmented reality technologies in modern chemistry education and the possibilities of using augmented reality technologies to support students' learning and research activities in chemistry. To solve the research tasks, cloud-based augmented reality development tools (A-Frame and AR.js) were used. The developed tool is a virtual chemistry laboratory using augmented reality technologies: individual markers correspond to reagents, and a pairwise combination of markers triggers a video recording of chemical interaction between the corresponding pair of reagents. The article describes the development of augmented reality software to support eleventh graders' learning and research activities in chemistry in the form of an augmented reality-based virtual chemistry laboratory and its implementation in the teaching process.

Keywords: augmented reality · AR.js · A-Frame · markers · virtual chemistry laboratory · chemistry education · high school students

1 Вступ

Згідно із Законом України «Про освіту» [4], профільна середня освіта наукового спрямування, до якої належить навчання у 11-х класах ліцеїв (шкіл), «базується на дослідно-орієнтованому навчанні, спрямований на поглиблене вивчення профільних предметів та набуття компетентностей, необхідних

для подальшої дослідно-експериментальної, конструкторської, винахідницької діяльності». Вона передбачає набуття учнями компетентностей у дослідно-експериментальній, конструкторській, винахідницькій та раціоналізаторській діяльності, що може бути вираженим у їх участі у конференціях, олімпіадах, виставках, конкурсах тощо.

Випускник профільної школи є потенційним абітурієнтом закладів вищої освіти відповідного наукового спрямування, тому головними завданнями профільного навчання є формування в учнів прагнення та можливостей до самореалізації, розвитку навичок до самостійного та усвідомленого пошуку знань, створенні системи необхідних для подальшого професійного розвитку знань та компетентностей.

У афоризмі, авторство якого приписують Конфуцію, говориться: «Скажи мені – я забуду, покажи мені – я запам'ятаю, дай мені самостійно зробити – я зрозумію» [1]. На нашу думку, у цій давній мудрості криється головна перевага навчально-дослідницької діяльності – самостійна побудова навчальної траєкторії. Суб'єктивно нові знання значно міцніше засвоюються у тому випадку, коли є можливість здобути їх самостійно, власними зусиллями.

Під навчально-дослідницькою діяльністю учнів ми, слідом за О. М. Князян, розуміємо «особливий вид їх навчально-пізнавальної діяльності, який має творчий характер, націлений на пошук, вивчення та пояснення фактів і явищ дійсності з метою набуття і систематизації суб'єктивно нових знань про них» Князіан [19].

Таким чином, якісне опанування шкільної програми курсів природничо-математичного циклу, до якого належить і хімія, неможливе без створення умов для здійснення учнями навчально-дослідницької діяльності.

Однією з головних особливостей шкільного курсу хімії є переважання принципу єдності теорії та практики, дослідницького підходу в навчанні та принципу диференціації, що знайшло своє відображення, зокрема, у широкому застосуванні лабораторних дослідів на уроках хімії, учнівського експерименту (у тому числі й домашнього та ужиткового) [25, 26].

Хімічний експеримент займає важливе місце у методиці навчання хімії. Саме хімічний експеримент є однією з головних складових навчально-дослідницької діяльності учнів на уроках хімії та у позаурочний час. У навчальній програмі з хімії для закладів загальної середньої освіти за 10-11 клас чітко визначено зміст ключових компетентностей, якими має оволодіти випускник при вивченні хімії. Серед них можна виокремити вміння обговорювати результати дослідження і робити висновки; використовувати логічне мислення, зокрема, для розв'язування розрахункових і експериментальних задач; «проводити досліди з речовинами з урахуванням їхніх фізичних властивостей; використовувати за призначенням сучасні прилади і матеріали; досліджувати природні об'єкти; організувати самоосвіту з хімії: визначати мету, планувати, добирати необхідні засоби; спостерігати за хімічними перетвореннями в об'єктах та проводити хімічний експеримент» [16].

Отже, вивчення хімії навіть на рівні стандарту вимагає формування в учнів відповідних навичок здійснення дослідницької діяльності.

Зміст навчання хімії у 11-х класах полягає у засвоєнні та поглибленні знань учнів з неорганічної та загальної хімії. Вивчення відповідних тематичних блоків супроводжується виконанням практичних та лабораторних робіт, демонстраційних дослідів тощо.

Зокрема, згідно навчальної програми профільного рівня [10] у 11-му класі планується виконання 15 демонстраційних дослідів, 26 лабораторних дослідів та 19 практичних робіт. Переважно ці види навчально-дослідницької діяльності учнів носять якісний характер – хімічних дослідів кількісного характеру серед них фактично немає.

Такий значний обсяг робіт практичного характеру вимагає великих витрат часу, організаційних та матеріальних ресурсів. Фактично мова йде лише про організовану і контрольовану вчителем навчально-дослідницьку діяльність учнів. У випадку з налагодженням самостійної навчально-дослідницької діяльності описані вище витрати зростають у рази.

Дуже часто навчально-дослідницька діяльність учнів обмежується самими умовами навчання:

- нестача реактивів та обладнання;
- необхідність виконання, у першу чергу, дослідів, що заплановані навчальною програмою;
- нестача часу для виконання позапрограмних дослідів;
- питання техніки безпеки тощо.

Будь-яка з цих умов (або декілька чи всі разом) суттєво обмежують самостійний творчий пошук учнів відповідей на ті питання, які у них виникають під час вивчення тієї чи іншої теми.

Для проведення лабораторних робіт кількісного характеру з хімії у навчальний процес активно залучаються віртуальні хімічні лабораторії. Їх використання надає можливість відтворити значну кількість експериментальних робіт, але для тих випадків, коли необхідно застосовувати спеціальне хімічне обладнання та посуд, робити вимірювання та розрахунки [24]. Для підтримки експериментів якісного характеру, яких у шкільній програмі більше, віртуальних хімічних лабораторій фактично не існує, а тим більше із залученням технологій доповненої реальності.

2 Застосування доповненої реальності у навчанні хімії в школі

Розвиток віртуальної та доповненої реальності розпочався з 1960-х рр. і вважається дуже перспективним, потужним і корисним інструментом, особливо для вирішення освітніх задач. Доповнена реальність визначається як поєднання фізичних та цифрових просторів у семантично пов'язаних контекстах, для яких об'єкти асоціацій розташовані у реальному світі [30]. Доповнена реальність, на відміну від віртуальної, не створює повністю нове віртуальне

середовище, а поєднує віртуальні елементи з реальним світом. До реального світу, у якому перебуває користувач, додаються віртуальні об'єкти, що можуть змінюватись унаслідок його дій.

Програма доповненої реальності відображає об'єкт у реальному фізичному середовищі, використовуючи для цього програму з технологією розпізнавання зображень (маркерів). Об'єкт віртуального світу прив'язується до маркера спеціальним програмним кодом. З маркером можна взаємодіяти та виконувати певні дії: повертати, відривати від поверхні, де він знаходиться, переміщувати його в просторі – і спостерігати за змінами, що відбуваються при цьому з віртуальним об'єктом на екрані комп'ютерного пристрою [11].

Використання технології доповненої реальності у навчанні хімії є не лише даниною моді, не лише засобом привабливості уваги школярів, але і потужним засобом візуалізації складних явищ та понять, якими оперує хімія. І сфера застосування технологій доповненої реальності у навчанні хімії розширюється з кожним роком. Зокрема, наразі вже створена значна кількість навчальних програмних продуктів, які доцільно застосовувати у навчанні хімії в школі:

- *Augmented Chemical Reactions* забезпечує 3D-візуалізацію структури молекул, їх просторової динаміки та взаємодії, можливість утворення молекул з індивідуальних фрагментів [21].
- *Study Marvel - Chemistry AR* – 3D-ілюстрації та моделі в спеціалізованих друкованих навчальних посібниках з хімії. Додаток, розроблений спеціально для роботи у класі з реалістично відтвореними інтерактивними об'єктами в реальному часі для розширеного та практичного навчання [3].
- *AR VR Molecules Editor Free* – для 3D-візуалізації молекул органічних і неорганічних сполук у різних формах (стрижнева, куле-стрижнева моделі тощо) [31].
- *Atomic Structure AR Learning Gear* – динамічна 3D-візуалізація моделей атомів, електронних хмар, наукових експериментів, які призвели до відкриття електронів, структури атома тощо [20].
- *Dáskalos Chemistry* – візуалізація будови атома всіх хімічних елементів з можливістю перегляду додаткових даних [2].
- *HTMoL - AR plugin* – 3D-моделювання молекулярних структур з можливістю використання обчислювальних характеристик молекул і напівавтоматична анімація реакцій шляхом лінійної інтерполяції атома узгоджені між поступовими обчислювальними етапами реакцій [29].
- *Arloon Chemistry*, який має теоретичний та практичний розділи, надає можливість конструювати та вивчати молекули у 3D форматі, містить інформативні блоки, а також тестові завдання та вправи з пройденого матеріалу [5].
- *Elements4D* виробництва DAQRI – користувач може вивчати хімічні елементи таблиці Менделєєва і, взаємодіючи зі спеціальними кубиками, створювати зв'язки між елементами. Залучення до процесу навчання ігрового елемента дозволить з великим інтересом та легкістю освоювати такі складні дисципліни як хімія [15].

- *LiCo.Organic* – мобільний додаток створений як програмний супровід до навчального посібника «Органічні сполуки. Атлас-довідник». Для кращого розуміння будови молекул та властивостей органічних речовин, про які йдеться у підручнику, застосовується їх 3D-візуалізація куле-стрижневих моделей молекул у режимі доповненої реальності [18].
- *QuimicAR - Chemistry AR* – програма створена на базі Vuforia SDK, яка наочно моделює, як створюються хімічні зв'язки [14].
- *Chemistry* виробництва MEL Science – додаток, який реалізує 3D-моделювання та молекулярну анімацію, структури кристалічних ґраток, виявлення речовин за спеціальними маркерами у вигляді інтерактивних уроків. Кожен урок триває від 3 до 7 хвилин, легко вбудовується в хід реального шкільного уроку і допомагає детально візуалізувати тему, що вивчається [22].

Більшість перерахованих програм мають англomовний або російськомовний інтерфейс, і переважно ілюструють будову речовини. Програмних продуктів, які можна було б пристосувати до розгляду інших тем шкільного курсу хімії фактично немає. Лише незначна частина розглянутих вище програмних продуктів реалізована без використання спеціального програмного забезпечення, а на базі хмарних технологій. Враховуючи що деякі програми, можуть займати доволі великі об'єми пам'яті, доцільно використовувати хмарні технології.

Також використання хмарних технологій надає можливість зробити пристрої незалежними від платформи, забезпечити підтримку роботи гаджетів з різними операційними системами. Подібний підхід призводить до уніфікації процесів розробки програмного забезпечення для клієнтських пристроїв, зменшення часу на тестування та доопрацювання програмних продуктів на різних технічних пристроях та під різні операційні системи. Ґрунтуючись на детальному огляді різних web-сервісів створення доповненої реальності [28], ми вирішили використати можливості хмарних сервісів таких як A-Frame та AR.js.

A-Frame був розроблений в команді Mozilla VR у другій половині 2015 року [23]. Команда Mozilla VR стала одною з перших у розробці платформи WebVR та специфікацій для неї, але потрібний був більш простий спосіб для створення контенту. A-Frame був створений для того, щоб дозволити веб-розробникам та дизайнерам створювати 3D та VR-контент з HTML без необхідності знати WebGL [6]. Перевагами у роботі з A-Frame є [28]:

- 3D і VR контент створюється з використанням HTML;
- сумісність з більшістю веб-бібліотек та фреймворків, що нині існують;
- архітектура Entity-Component-System полегшує роботу з успадкуванням складних 3D-об'єктів з компонентами, які можна використовувати багаторазів;
- розширювана екосистема плагінів компонентів об'єктів;
- візуальний інспектор, який може бути викликаний в браузері з будь-якої сцени A-Frame;

- підтримка розробників, які беруть участь у бібліотеці, надається через GitHub, тоді як підтримка розробників, які створюють додатки та веб-сторінки, надається через StackOverflow;
- підтримка в реальному часі здійснюється через Slack.

AR.js – це полегшена бібліотека для AR, створена Жеромом Етьеном і підтримувана Ніколо Капріньолі та командою AR.js. Вона побудована на основі бібліотеки three.js і jsartoolkit і об'єднана з A-Frame. Тут використовуються маркери, щоб камера могла виявляти і відображати AR об'єкт. Цей метод створення доповненої реальності особливо важливим тим, що він повністю базується на Web-технологіях, запускається навіть на доволі застарілих мобільних пристроях, має безкоштовний відкритий вихідний код.

3 Реалізація підтримки навчально-дослідницької діяльності одинадцятикласників з хімії засобами доповненої реальності

Для початку роботи необхідно мати лише AR-сумісний браузер, такий як Firefox або Chrome, та текстовий редактор (типу Sublime). Базові знання HTML, CSS та JavaScript є обов'язковими, а досвід роботи з веб-API та GitHub стануть у пригоді. Головна ідея AR полягає в тому, щоб відобразити комп'ютерну модель у реальному часі та реальному просторі з метою взаємодії між користувачем у реальному просторі та 3D-моделі у віртуальному.

A-Frame дуже схожий на HTML – усі команди описуються тегами, які подібні до тегів HTML, але, на відміну від останніх, інтерпретуються не у веб-браузері на боці клієнта, а є способом доступу до JavaScript, що виконується на боці сервера. Разом із AR.js він є потужним API для AR, що приховує деталі реалізації мовою JavaScript.

Розроблена нами віртуальна лабораторна робота являє собою набір маркерів, до кожного з яких прив'язана певна речовина, і при наведенні на окремі маркери ми можемо побачити її зображення (рис. 1). А от щоб виконати дослід, ми повинні взяти два маркери покласти їх один біля одного, та спостерігати на екрані відеозапис процесу виконання дослід (рис. 2). Для виконання ми пропонуємо перелік обов'язкових експериментів, що може виконати учень, але ми не обмежуємо його фантазію: «хочеш погратися та поєднати не те що сказав вчитель – будь-ласка, експериментуй!».

Однією з гострих методичних проблем при вивченні хімії у 11-х класах, є формування поняття про йонний характер взаємодій у якісних хімічних реакціях: навіть учні, які добре вміють складати повні та скорочені йонні рівняння, можуть не пов'язувати форму скороченого рівняння із сутністю проведення якісної реакції на певний йон. Донести сутність виконання таких якісних реакцій до широкого загалу учнів досить просто – треба виконати реакцію $I^- + Ag^+ = AgI\downarrow$ з різними комбінаціями реактивів ($NH_4I + AgNO_3$; $NaI + AgNO_3$; $KI + AgNO_3$ тощо) – однаковий аналітичний ефект доведе правдивість твердження, що для проведення якісної реакції важливими є

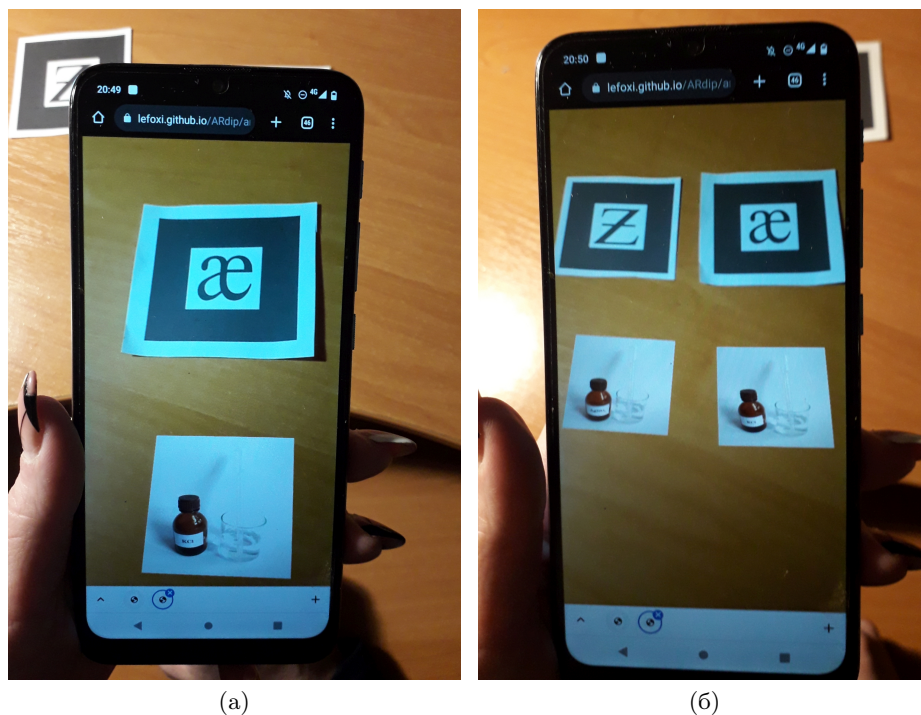


Рис. 1. Відображення реагенту, прив'язаного до маркера (а), та декількох реагентів одночасно (б).

тільки ті йони, що входять до скороченого йонного рівняння. Ще краще дати можливість дітям *самотужки дійти* цього висновку на підставі кількох виконаних варіантів якісної реакції і спостереження відповідного аналітичного ефекту. У будь-якому випадку, часу та реактивів на реалізацію такого підходу немає. Окрім того, виконання подібних лабораторних дослідів обмежується ще й коштовністю та недоступністю окремих реактивів, нестачею посуду та дистанційним форматом навчання, що в останні роки становить половину або більше тривалості навчального року.

Саме тому, свою роботу ми вирішили присвятити вирішенню поставленої вище проблеми і сформувавши комплект реактивів для виконання навчальних досліджень учнів за темою «Якісні реакції хлорид-, бромід- та йодид-йонів» (ця віртуальна хімічна лабораторія може стати у нагоді для виконання демонстраційного дослідів «Витіснення галогенів із розчинів відповідних галогенідів», лабораторної роботи «Якісні реакції на бромід-, йодид-іони» та підготовки до практичної роботи «Розв'язування експериментальних задач за темою «Сполуки галогенів» у 11-х класах з профільним вивченням хімії).

Ключова ідея розробки полягає у підтримці самостійної, творчої, пошукової роботи учнів, оскільки при використанні віртуальної хімічної лабораторії з підтримкою доповненої реальності учень отримує можливість:

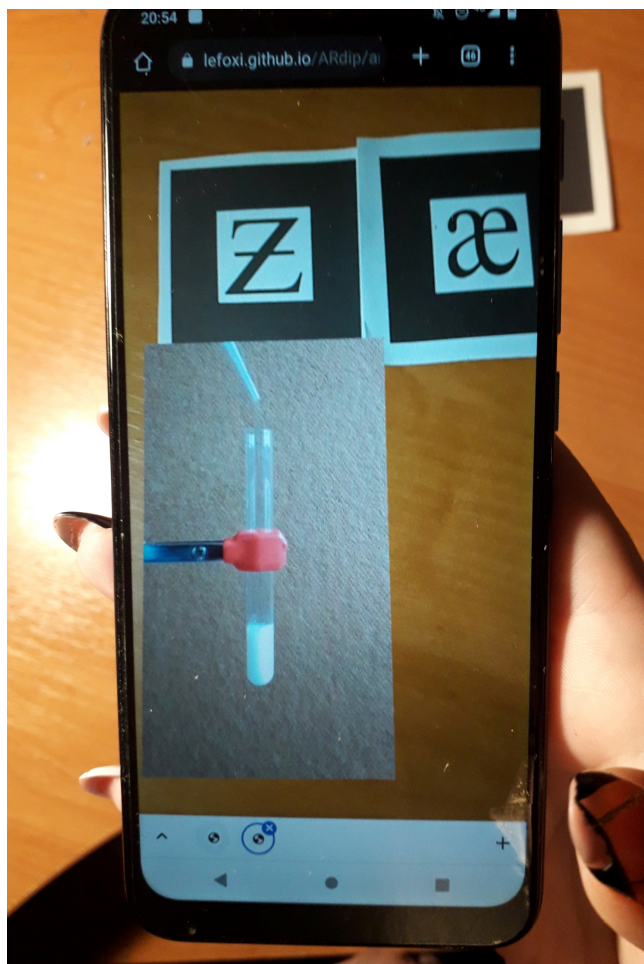


Рис. 2. Демонстрація відеозапису хімічної реакції при поєднанні пари маркерів.

- побачити та описати результат виконання дослідів, які з певних причин не міг виконати власноруч;
- здійснювати досліди в межах запропонованого набору реактивів, але за власним бажанням, з створеним у своїй фантазії «сценарієм»;
- повторювати досліди безліч разів у зручний для себе час;
- здійснювати досліди безпечно і без витрат на реактиви та обладнання;
- здійснювати активну діяльність – операції з речовинами власноруч, хоча і у матеріалізованому вигляді (у віртуальному середовищі);
- пробувати різні варіанти поєднання реактивів і за отриманий ефектом *самостійно* висувати припущення, виявляти закономірності, формувати висновки.



Для вчителя така віртуальна хімічна лабораторія (ВХЛ) відкриває можливості залучити учнів до самостійної навчально-дослідницької діяльності, розширити спектр доступних хімічних експериментів, організувати позаурочну та самостійну роботу із обдарованими учнями тощо.

Перед початком роботи ми визначились, що для лабораторного дослідження нам знадобиться 10 реактивів. Кожен з них ми сфотографували, і порохували, якщо ми маємо 10 реактивів, то доцільно припустити, що учень захоче спробувати злити їх всі попарно, відповідно в нас вийде 45 реакцій та стільки ж відзнятих відео. Далі створюємо користувацькі маркери; їх, як і реактивів, теж 10.

Для підготовки маркерів необхідно обрати засіб компіляції зображень та виділення їх опорних точок, що відповідає застосовуваному рушію доповненої реальності. Так, при виборі в якості рушія AR.js таким компілятором буде “AR.js Marker Training” (<https://ar-js-org.github.io/AR.js/three.js/examples/marker-training/examples/generator.html>), що генерує кольорові квадратні маркери роздільною здатністю 16×16 у форматі .patt: 3 кольорові площини (червона, зелена та синя) і 4 орієнтаціях (кути повороту 0°, 90°, 180° та 270°).







Згенеровані маркери пронумеровані від 0 до 9 та співставлені з назвами і зображення реактивів (table 1).

Табл. 1: Таблиця сумісності реактивів, маркерів та зображень.

№	Реактив	Маркер	Зображення
0	Аргентум нітрат AgNO_3	pattern-0.patt 	AgNO3.jpg 







Продовження на наступній сторінці

Табл. 1 – продовження з попередньої сторінки

№	Реактив	Маркер	Зображення
1	Плюмбум(II) нітрат $Pb(NO_3)_2$	pattern-1.patt 	Pb(NO3)2.jpg 
2	Хлоридна кислота HCl	pattern-2.patt 	HCl.jpg 
3	Калій хлорид KCl	pattern-3.patt 	KCl.jpg 







Продовження на наступній сторінці

Табл. 1 – продовження з попередньої сторінки

№	Реактив	Маркер	Зображення
4	Натрій хлорид NaCl	pattern-4.patt 	NaCl.jpg 
5	Амоній хлорид NH ₄ Cl	pattern-5.patt 	NH ₄ Cl.jpg 
6	Калій бромід KBr	pattern-6.patt 	KBr.jpg 

Продовження на наступній сторінці

Табл. 1 – продовження з попередньої сторінки

№	Реактив	Маркер	Зображення
7	Амоній бромід NH_4Br	pattern-7.patt 	$\text{NH}_4\text{Br.jpg}$ 
8	Калій йодид KI	pattern-8.patt 	KI.jpg 
9	Амоній йодид NH_4I	pattern-9.patt 	$\text{NH}_4\text{I.jpg}$ 

Попарне застосування 10 маркерів без урахування порядку комбінування дає такі 45 комбінацій:

0-1, 0-2, 0-3, 0-4, 0-5, 0-6, 0-7, 0-8, 0-9
1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7, 1-8, 1-9
2-3, 2-4, 2-5, 2-6, 2-7, 2-8, 2-9
3-4, 3-5, 3-6, 3-7, 3-8, 3-9
4-5, 4-6, 4-7, 4-8, 4-9
5-6, 5-7, 5-8, 5-9
6-7, 6-8, 6-9
7-8, 7-9
8-9

Для випадків, коли реакція при зливанні реактивів не відбувається (а таких випадків більшість – 29), були записані 7 відеофайлів, які використовувались для відображення цих випадків. Така дія була пов'язана з необхідністю розвантажити обсяг даних відеофайлів, оскільки кожен файл має розмір мінімум 2 МБ і завантаження усіх можливих 45 відео ускладнить роботу програми, особливо при поганій якості Інтернет-з'єднання, а також може додатково витратити ресурси споживача мобільного інтернету.

Створені файли маркерів, зображень та відео були завантажені у репозитарій GitHub за посиланням <https://github.com/Lefoxi/ARdip> до каталогів `markers`, `images` та `video` відповідно. Додатково для зручності використання зображення маркерів були зібрані у файлі `markers.pdf` (<https://github.com/Lefoxi/ARdip/blob/main/markers.pdf>).

Початкова сторінка – файл `index.html` (додаток А), тіло якого містить два гіперпосилання:

- `ar.html` – власне код віртуальної лабораторії (додаток Б);
- `markers.pdf` – файл PDF із зображеннями маркерів для друку

Для реалізації лабораторії було обрано бібліотеку A-Frame для створення віртуальних об'єктів та бібліотеку AR.js для їх зв'язування зі створеними маркерами.

Загальна структура файлу `ar.html`:

```
<html>
  <head>
    <!-- налаштування заголовку вікна -->
    <title>
      Віртуальна хімічна лабораторія у доповненій реальності
    </title>
    <!-- підключення бібліотеки A-Frame -->
    <script
      src="https://aframe.io/releases/1.3.0/aframe.min.js">
    </script>
    <!-- підключення бібліотеки AR.js для роботи з A-Frame -->
    <script src=
```

```
"https://raw.githack.com/AR-js-org/AR.js/master/aframe/build/aframe-ar.js"
  ></script>
  <script>
    <!-- основна програма -->
  </script>
</head>
<body>
<!--Створення сцени A-Frame для роботи у доповненій реальності-->
  <a-scene vr-mode-ui="enabled: false;"
    renderer="logarithmicDepthBuffer: true;" embedded
arjs="trackingMethod:best;sourceType:webcam;debugUIEnabled:false;"
  >
    <!-- Наповнення сцени A-Frame -->
  </a-scene>
</body>
</html>
```

Сцену A-Frame складають 4 блоки:

- 1) `<a-assets>...<a-assets>` – визначення відеотекстур;
- 2) `<a-marker>...</a-marker>` – визначення маркерів та прив'язка до них зображень і відео;
- 3) `<a-entity camera></a-entity>` – розміщення на сцені камери;
- 4) `<a-entity run></a-entity>` – звернення до компоненту `run`, визначеного у основній програмі.

Блок визначення відеотекстур складають записи виду:

```
<video id="video02" preload="auto" muted
  poster="images/starting.jpg" loop="false" src="video/16.mp4">
</video>
```

- `id` – ідентифікатор відео, що складається з імені `video` та номерів маркерів, що суміщуються. Якщо одне й те саме відео застосовується для декількох комбінацій маркерів, ідентифікатор набуває вигляду `video03-04`. Для випадків, коли реакція не відбувається, передбачені відеотекстури `video00-1 ... video00-7`;
- встановлення `preload` у `auto` визначає необхідність завантаження відео до першого звернення до нього – це збільшує початковий час завантаження програми, проте зменшує час, необхідний для появи відео і убезпечує від зупинок відео через нестабільне мережне з'єднання;
- `muted` – вказує на необхідність вимкнення звуку, якщо звукова доріжка наявна у відео;
- `poster` містить посилання на файл зображення, що з'являється, якщо звернення до відео відбулось до того, як воно повністю завантажилось;
- `src` – посилання на відеофайл.

Блок визначення маркерів складають 9 записів виду:

```
<a-marker type="pattern" url="markers/pattern-0.patt" id="M0"
  registerevents>
  <!-- Визначення зображення -->
  <!-- Визначення відео -->
</a-marker>
```

Кожен маркер визначається номером від 0 до 9 (згідно табл. 1), який входить до складу імені маркера (`pattern-0.patt` – файл опорних точок маркеру 0) та його ідентифікатора `id` (M0 – ідентифікатора маркеру 0). До кожного маркера застосовується компонент `registerevents`, визначений в основній програмі.

Визначення зображення, що накладається на маркер після його виявлення, виконується командою виду:

```
<a-plane src="images/AgN03.jpg" rotation="-90 90 0" id="draw0">
</a-plane>
```

`a-plane` визначає текстуровану площину. Параметр `src` містить посилання на файл текстури – зображення реактиву згідно табл. 1. Через те, що зображення збережено у альбомному розташуванні, а демонструється у портретному, виконується його поворот на кут 90° навколо вісі OY . Поворот на 270° (-90°) навколо вісі OX необхідний через те, що координатний простір A-Frame повернутий на відповідний кут відносно координатного простору камери. `id` – ідентифікатор площини із зображенням, що складається зі слова `draw` та номера маркера.

До кожного маркеру прив'язується від 9 (маркер 0) до 0 (маркер 9) площин із відео згідно визначеної вище схеми комбінацій маркерів:

```
<a-entity material="shader: flat; src: #video00-1"
  geometry="primitive: plane; width: 0.90; height: 1.60;"
  position="0 0 0" scale="1.5 1.5 1.5" rotation="-90 0 0"
  id="drawX01" visible="false">
</a-entity>
```

Співвідношення сторін площини задається її шириною `width` та висотою `height` (вказуються відносно розміру маркера, що приймається за 1). Властивість `src` матеріалу площини містить посилання на раніше визначену та завантажену відеотекстуру. Параметр `position` визначає координати центру площини (0 0 0 – співпадіння з координатами центру маркера), `scale` – півторократне масштабування (1.5 1.5 1.5) відеотекстури порівняно із визначеними шириною та висотою, `rotation` визначає поворот відповідний кут (аналогічно до повороту зображення). Ідентифікатор об'єкту `id` складається зі слова `drawX` та номерів маркерів, що зближуються, впорядкованих за зростанням.

Основна програма складається з 3 блоків:

- 1) визначення змінних:

- `howmuch` – емпірично дібране значення граничної відстані між маркерами, менше за яку вважатимемо, що має розпочатись реакція (за замовчанням 1.4);
 - `isReaction` – прапорець, що вказує на те, що реакція розпочалась: якщо він встановлений, демонструється відповідний відеозапис реакції (початкове значення `false`);
 - `distance` – поточна відстань між парою маркерів, що зближуються (початкове значення `howmuch+1`);
 - `markerVisible` – масив станів видимості маркерів: якщо маркер видимий, значення елемента масиву з відповідним маркеру номером встановлюється у `true` (початкове значення для кожного маркера `false`);
 - `M` – масив для збереження маркерів (визначених у документі HTML об'єктів `a-marker`);
 - `d` – масив для збереження зображень, що накладаються на маркери (визначених у документі HTML об'єктів `a-plane`, ідентифіковані як `drawN`, де `N` – номер маркера);
 - `X` – масив для збереження відео, що накладаються на маркери (визначених у документі HTML об'єктів `a-plane`, ідентифіковані як `drawXAB`, де `A`, `B` – номери маркерів, що зближуються);
 - `p` – масив координат центрів маркерів, значення якого використовуються для вимірювання відстаней;
 - `isVideoPlay` – прапорець, що вказує на те, що відтворюється відеозапис реакції (початкове значення `false`);
- 2) реєстрація компоненту `registerevents`;
- 3) реєстрація компоненту `run`.

Компонент `registerevents` призначений для відстеження двох подій – виявлення (`markerFound`) та втрати (`markerLost`) маркера. Після реєстрації метод `init` компоненту застосовується до усіх маркерів, до яких був доданий компонент `registerevents`, з метою визначення номеру маркера `index` та встановлення при виявленні чи знятті при втраті прапорця його видимості у масиві `markerVisible`. При виявленні маркеру пов'язане із ним зображення `d[index]` робиться видимим, а при втраті – невидимим встановлення у відповідне значення властивості `visible`:

```
AFRAME.registerComponent("registerevents", {
  init: function () {
    let marker = this.el;
    marker.addEventListener('markerFound', function() {
      index = parseInt(marker.id[1])
      markerVisible[ index ] = true;
      d[index] = document.querySelector("#draw"+index);
      if(d[index]!=null)
        d[index].setAttribute("visible", "true");
    });
  }
});
```



```

marker.addEventListener('markerLost', function() {
  index = parseInt(marker.id[1])
  markerVisible[ index ] = false;
  if(d[index]!=null)
    d[index].setAttribute("visible", "false");
});
}
});

```

Компонент `run` не відповідає жодному видимому елементу – він виконує загальне управління сценою, для чого реєструється як одноразово виконуваний метод `init`, так й виконуваний за таймером (бажано для кожного кадру) метод `tick`:

```

AFRAME.registerComponent("run", {
  init: function() {
    // ініціалізація компоненту
  },

  tick: function (time, deltaTime) {
    // метод, що викликається за таймером
  }
});

```

У методі `init` заповнюються визначені раніше масиви: `M` – посиланнями на маркери, `d` – посиланнями на зображення реактивів (відображаються для маркерів, що є видимими), `X` – посиланнями на прив'язане до маркерів відео, та `p` – нульовими координатними векторами:

```

for (let i = 0; i < 10 ; i++) {
  M[i] = document.querySelector("#M"+i);
  d[i] = document.querySelector("#draw"+i);
  p[i] = new THREE.Vector3();
  if (markerVisible [i])
    d[i].setAttribute("visible", "true");
  for (let j = 0; j < 10 ; j++)
    if(i!=j)
      X[i][j] = document.querySelector("#drawX"+i+""+j);
}

```

Метод `tick` постійно відслідковує видимість та взаємне розташування маркерів:

- 1) до масиву `visible` заносимо номери маркерів, що у поточний момент видимі – для цього аналізуємо зміст масиву `markerVisible`, встановлений компонентом `registerevents`:

```

let visible = [] ;

```

```

for (let i = 0; i < 10 ; i++)
  if (markerVisible[i])
    visible.push(i);

```

- 2) будемо вважати, що для реакції необхідні рівно 2 реактиви, тому випадки, коли видимими є менше двох маркерів (або більше двох), ігноруватимемо – якщо демонструвалось відео, робимо його невидимим та встановлюємо прапорець `isVideoPlay` у `false`:

```

if(visible.length!=2) {
  for (let i = 0; i < 10 ; i++)
    for (let j = 0; j < 10 ; j++)
      if(i!=j && X[i][j]!=null)
        X[i][j].setAttribute("visible", "false");
  isVideoPlay = false;
  return;
}

```

- 3) визначаємо номери двох видимих маркерів – `marker1` та `marker2`:

```

marker1 = visible[0];
marker2 = visible[1];

```

- 4) визначаємо координати маркерів та зберігаємо їх у відповідних елементах координатного масиву `p`:

```

M[marker1].object3D.getWorldPosition(p[marker1]);
M[marker2].object3D.getWorldPosition(p[marker2]);

```

- 5) знаходимо відстань між маркерами:

```

distance = p[marker1].distanceTo( p[marker2] );

```

- 6) у прапорці `isReaction` встановлюємо, чи достатньо близькі маркери для перебігу реакції:

```

isReaction=(distance <= howmuch);

```

- 7) прапорець `isReaction` не вказує, чи йшла реакція до поточного моменту – визначити це можна, проаналізувавши, чи вже програвалось відео: якщо ні, знімаємо з обох маркерів зображення, робимо видимим відповідне відео та розпочинаємо його програвати із самого початку:

```

if(isReaction) {
  if(!isVideoPlay) {
    if(d[marker1]!=null)
      d[marker1].setAttribute("visible", "false");
    if(d[marker2]!=null)
      d[marker2].setAttribute("visible", "false");
    X[marker1][marker2].setAttribute("visible", "true");
  }
}

```

```
        var id="#" + X[marker1][marker2]
            .getAttribute("material").src.getAttribute("id");
        var video=document.querySelector(id);
        video.currentTime=0;
        video.play();
        isVideoPlay = true;
    }
}
```

- 8) якщо маркери віддалились на відстань, що відповідає припиненню реакцію, призупиняємо відео, робимо його невидимим та знову накладаємо зображення реактивів на обидва маркери:

```
else {
    if(d[marker1]!=null)
        d[marker1].setAttribute("visible", "true");
    if(d[marker2]!=null)
        d[marker2].setAttribute("visible", "true");
    X[marker1][marker2].setAttribute("visible", "false");
    var id="#" + X[marker1][marker2]
        .getAttribute("material").src.getAttribute("id");
    var video=document.querySelector(id);
    video.currentTime=0;
    video.pause();
    isVideoPlay = false;
}
```

Ураховуючи, що вихідні тексти програмного забезпечення було розміщені у репозитарії GitHub, його розгортання було виконано на сторінках GitHub (GitHub Pages). Для цього у налаштуваннях репозитарію (Settings – Pages) була обрана головна гілка репозитарію (main) та його кореневий каталог (/), що містить початкову сторінку (файл index.html), та виконано збереження (Save). Після цього виконується процедура розгортання програмного забезпечення (публікація сайту) за посиланням <https://lefoxi.github.io/ARdip/>. Наявність на опублікованому сайті файлу index.html надає можливість автоматично перейти до початкової сторінки після переходу за вказаним вище посиланням.

Для оновлення розгорнутого програмного забезпечення достатньо виконати завантажити змінені файли до репозитарію.

4 Результати

Створена AR-віртуальна хімічна лабораторія «Якісні реакції хлорид-, бромід- та йодид-іонів» була використана як під час проведення уроків хімії у 11-х класах Криворізької гімназії № 21 у II семестрі 2020-21 н.р., та у I семестрі 2021-22 н.р. Оскільки вивчення хімії у цьому класі здійснюється на рівні

стандарту, то на уроках було використано не весь потенціал розробленої програми. Окремі досліди були використані при вивченні теми «Неорганічні речовини та їх властивості» та теми «Хімічні реакції». Більшість експериментів із застосуванням розробленої AR-віртуальної хімічної лабораторії «Якісні реакції хлорид-, бромід- та йодид-йонів» були проведені у позаурочний час – учням надавались інструкції по роботі з програмою, описувалось теоретичне підґрунтя дослідів, які в ній можна виконати, але саме виконання дослідів відбувалось повністю самостійно, у тій кількості та порядку, які самі учні вважали за потрібне. Для роботи з програмою використовувались переважно смартфони: через встановлений браузер відбувався перехід за посиланням <https://lefoxi.github.io/ARdip/>, і запуск відповідної віртуальної лабораторної роботи. Маркери роздавались заздалегідь у друкованому вигляді, а для використання вдома їх комплект можна було завантажити за посиланням <https://lefoxi.github.io/ARdip/markers.pdf>.

Розроблена віртуальна хімічна лабораторія із залученням засобів доповненої реальності має низку недоліків, серед яких найважливішими є неможливість (принаймні поки що, за існуючих варіантів програмного забезпечення) проведення реакцій між трьома чи більшою кількістю реактивів; неможливість спостерігати за перебігом реакції з різних ракурсів та змінювати порядок додавання реактивів тощо; неможливість отримувати інформацію від усіх органів чуття – тільки візуальна інформація, що передається у відео; будь-який набір реактивів для виконання віртуальних дослідів є обмеженим, а поєднувати реактиви із різних наборів неможливо.

По завершенню роботи з програмою було проведено опитування учнів, у результаті якого було з'ясовано, що така форма роботи є привабливою для сучасних одинадцятикласників. Серед переваг створеної AR-віртуальної хімічної лабораторії вони назвали можливість довільно експериментувати із наданим набором віртуальних реактивів та повторювати дії безліч разів. Серед недоліків було названо обмежену кількість реактивів, не завжди високу якість відео та залежність від наявності якісного з'єднання з мережею Інтернет. Більшість респондентів зазначили, що застосування такого засобу навчання покращило розуміння ними окремих тем шкільного курсу хімії.

5 Обговорення

Ключовою стратегією, запропонованою в цій статті та підкріпленою численними дослідженнями, є використання хмарних технологій доповненої реальності (таких як WebAR).

Пандемія COVID-19 вплинула на шкільну освіту і стала глобальною проблемою охорони здоров'я протягом весняного семестру 2020 року. Багато університетів екстренно перейшли з очного навчання на дистанційне, що ускладнює утримання уваги студентів, коли вони намагаються зрозуміти складні ідеї, особливо в органічній хімії. Як результат, П. Прасансон, Дж. Тханяфонгпхат і Ч. Пінтонг створили інтерактивну 3D-гру з доповненою реальністю [27], яка використовується як елемент перевернутого

онлайн-класу. Ця гра може підвищити інтерес старшокласників до ізомерів органічних сполук.

Для 3D-візуалізації борівських атомних моделей хімічних елементів періодичної системи Менделєєва, органічних та неорганічних хімічних молекул, Л. Ф. Австрія-Мело, Х. Куельяр-Кастільо, А. А. Ернандес, К. Монтіель, Д. А. Фабіла-Бустос і М. Ернандес-Чавес протестували наступні інструменти: 1) Unity3D у поєднанні з EasyAR SDK, 2) HTML 5, CSS та комплект розробки програмного забезпечення Google ARCore, 3) Spark AR Studio та 4) Adobe Aero з Glitch та HTML 5 [9]. З огляду на потенціал використання імерсивного досвіду з WebXR, другий варіант видається найбільш перспективним.

У 2020 році Ф. Кортез Родрігес, М. Даль Пераро та Л. А. Абріата [13] запустили *moleculARweb* (<https://molecularweb.epfl.ch>) – веб-сайт, який пропонує інтерактивний контент для хімічної освіти за допомогою веб-доповненої реальності, що працює на смартфонах Abriata [7]. Щоб дозволити користувачам створювати власні матеріали, автори [13] створили веб-інтерфейс, за допомогою якого можна створювати онлайн-доповнену реальність за кілька кроків із елементів Банку даних білків (Protein Data Bank), AlphaFold чи користувацьких завантажених структур, або з віртуальних об'єктів/сцен, експортованих з програми Visual Molecular Dynamics, без будь-яких знань з програмування. Веб-інструмент також повертає сеанси WebXR для перегляду та роботи з моделями на WebXR-сумісних пристроях, включаючи смартфони, планшети, а також імерсивні VR-гарнітури з WebXR-сумісними браузерами. Virtual modeling kit 2.0 дозволяє використовувати пару маркерів одночасно [12], як і в наших розробках. MoleculARweb розроблено з використанням компонентів A-Frame, AR.js та ModelViewer (аналогічне використання Sketchfab пропонують М. М. Арістов, Дж. В. Мур і Дж. Ф. Беррі [8]).

Як підкреслюють А. Фомбона-Паскуаль, Х. Фомбона і Р. Вісенте, “зростаючий зв'язок технології доповненої реальності з веб-платформами і науковими мережами повинен перетворитися на нові можливості для стратегій викладання і навчання” [17].

6 Висновки

Навчально-дослідницька діяльність учнів є невід'ємною складовою процесу навчання – сучасні концепції освіти відводять навчально-дослідницькій діяльності учнів провідну роль у процесі навчання, а роль вчителя полягає у організації та стимулюванні навчально-дослідницької діяльності учнів. Навчально-дослідницька діяльність учнів з хімії має низку особливостей, пов'язаних з активним використанням хімічного експерименту як засобу навчання. Активне здобування знань учнем призводить до найбільш ефективного та міцного їх засвоєння, а тому використання хімічного експерименту є обов'язковою умовою для навчання хімії.

Реалізація експериментальної роботи з хімії у 11-х класах, як провідної форми навчально-дослідницької діяльності, пов'язана із низкою ускладнень, що обумовлені недостатнім матеріальним забезпеченням кабінетів хімії, підвищеним рівнем небезпеки, браком часу на виконання та необхідністю здійснювати експериментальні дослідження у дистанційному форматі через складну епідеміологічну ситуацію у світі у останні два роки.

Певну частину навчально-дослідницької діяльності можна реалізувати, застосовуючи сучасні засоби ІКТ – віртуальні хімічні лабораторії, засоби доповненої реальності тощо. Сучасні технології доповненої реальності реалізуються на доволі простому і доступному обладнанні, яким є смартфони тощо, при чому існує можливість демонструвати ефекти доповненої реальності безпосередньо в браузері, без потреби у завантаженні та встановленні спеціальних додатків. Це суттєво розширює як аудиторію користувачів доповненої реальності, так і до певної міри спрощує розробку та поширення самих програмних засобів із використанням доповненої реальності.

Найбільш доцільними для розробки програмних засобів доповненої реальності для браузерів на сьогодні є A-Frame та AR.js – ці API, фактично, унікальні засоби швидкого прототипування, і значна частина програми з їх використанням – це HTML подібний код, який використовує JavaScript на сервері. A-Frame використовується для створення сцен, об'єктів, анімації та інших 3D-елементів у веб-браузері. AR.js надає можливість відслідковувати маркер і надає можливість сцені, сконструйованій за допомогою A-Frame, відобразитися прямо на маркері.

Головними перевагами розробленої AR-віртуальної хімічної лабораторії є можливість безпечно у будь-який зручний для учнів час виконати низку хімічних експериментів, у такій кількості та послідовності, яку визначають самі користувачі. Учні, таким чином, активно беруть участь у роботі з реактивами та посудом, щоправда у віртуальному середовищі, проте висновки, які вони роблять за результатами численних експериментів є цілком реальними, самостійно отриманими.

До недоліків розробленої AR-віртуальної хімічної лабораторії належать обмежений набір можливих дослідів, недостатня якість відтворення перебігу експериментів та неможливість отримати навички роботи з реальним хімічним посудом та реактивами.

Перехід від доповненої реальності в Інтернеті, або WebAR, до імерсивного досвіду, або WebXR, є ключовим напрямом подальших досліджень. Це дає можливість інтегрувати 360-градусні 3D-відео наукових експериментів з моделями хімічних лабораторій високої чіткості і найсучаснішими методами управління, такими як віртуальна рукавичка.

References

- [1] Quote by Confucius: “Tell me and I will forget, show me and I may re...” (2012), URL <https://www.goodreads.com/quotes/661227-tell-me-and-i-will-forget-show-me-and-i>

- [2] Dáskalos - Prefrontal Cortex (2015), URL <https://prefrontalcortex.de/en/projects/daskalos/>
- [3] StudyMarvel - Chemistry AR (2016), URL <https://apkpure.com/studymarvel-chemistry-ar/com.StudyMarvelAR.ImmersiveChemistryAR>
- [4] Law of Ukraine “On Education”. Bulletin of the Verkhovna Rada (38-39) (2017), URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19?lang=en#Text>, article 380
- [5] Arloon Chemistry (2019), URL <http://www.arloon.com/apps/arloon-chemistry/>
- [6] A-Frame – Make WebVR (2023), URL <https://aframe.io/>
- [7] Abriata, L.A.: Building blocks for commodity augmented reality-based molecular visualization and modeling in web browsers. *PeerJ Computer Science* **2020**(2) (2020), <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.260>
- [8] Aristov, M.M., Moore, J.W., Berry, J.F.: Library of 3D Visual Teaching Tools for the Chemistry Classroom Accessible via Sketchfab and Viewable in Augmented Reality. *Journal of Chemical Education* **98**(9), 3032–3037 (2021), <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00460>
- [9] Austria-Melo, L.F., Cuellar-Castillo, J., Hernández, A.A., Montiel, C., Fabila-Bustos, D.A., Hernández-Chávez, M.: Comparison of development and characteristics of several educational tools in augmented reality for visualization of 3D models difficult to understand. Chemistry application case. In: 2022 IEEE Mexican International Conference on Computer Science (ENC), pp. 1–7 (2022), <https://doi.org/10.1109/ENC56672.2022.9882948>
- [10] 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: The 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>
- [11] Caudell, T.P., Mizell, D.W.: Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In: Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences, vol. ii, pp. 659–669 (1992), <https://doi.org/10.1109/HICSS.1992.183317>
- [12] Cortes Rodriguez, F., Krapp, L.F., Dal Peraro, M., Abriata, L.A.: Visualization, Interactive Handling and Simulation of Molecules in Commodity Augmented Reality in Web Browsers Using molecularARweb’s Virtual Modeling Kits. *CHIMIA* **76**(1-2), 145 (Feb 2022), <https://doi.org/10.2533/chimia.2022.145>, URL https://chimia.ch/chimia/article/view/2022_145
- [13] Cortés Rodríguez, F., Dal Peraro, M., Abriata, L.A.: Online tools to easily build virtual molecular models for display in augmented and virtual reality on the web. *Journal of Molecular Graphics and Modelling* **114**, 108164 (2022), ISSN 1093-3263, <https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2022.108164>
- [14] CreativiTIC: QuimicAR - ChemistryAR (2014), URL <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.CreativiTIC.AugmentedClass&hl=en&gl=US>
- [15] DAQRI: Elements 4D (2014), URL <http://web.archive.org/web/20150910095438/http://elements4d.daqri.com/>

- [16] Dubovyk, O.A., Bobkova, O.S., Voronenko, T.I., Hlazunov, M.M., Ivakha, T.S., Rohozhnikova, O.V.: Chemistry. 10-11 grades. Level of standard: The 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-riven-standartu.docx>
- [17] Fombona-Pascual, A., Fombona, J., Vicente, R.: Augmented Reality, a Review of a Way to Represent and Manipulate 3D Chemical Structures. *Journal of Chemical Information and Modeling* **62**(8), 1863–1872 (2022), <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.1c01255>
- [18] HO “Maisternia osvitnikh innovatsii LiCo⁴⁺”: LiCo.Organic (2020), URL <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.LiCo.Organic>
- [19] Kniazian, M.A.: The school-research activity of students as a means of professional important knowledge actualization (on the basis of the study of foreign languages). The dissertation for the candidate degree of pedagogical sciences, in speciality 13.00.01 - theory and history of pedagogics, Odessa (1998), URL <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/aref/20081124024996>
- [20] Larngear Technology: Atomic Structure AR Learning Gear (2012), URL <http://web.archive.org/web/20220123211058/http://larngeartech.com/products/atomic-structure-ar-learning-gear/>
- [21] Maier, P., Klinker, G.: Augmented Chemical Reactions: An Augmented Reality Tool to support Chemistry Teaching. In: 2013 2nd Experiment@ International Conference (exp.at'13), pp. 164–165 (2013), URL <http://campar.in.tum.de/pub/maierp2013expat/maierp2013expat.pdf>
- [22] MEL Science: Chemistry (2023), URL <https://melscience.com/US-en/chemistry/>
- [23] Mozilla Mixed Reality: Introducing A-Frame: Building Blocks for WebVR (2015), URL <https://blog.mozvr.com/introducing-aframe/>
- [24] Nechypurenko, P., Evangelist, O., Selivanova, T., Modlo, Y.O.: Virtual Chemical Laboratories as a Tools of Supporting the Learning Research Activity of Students in Chemistry While Studying the Topic “Solutions”. In: Sokolov, O., Zholtkevych, G., Yakovyna, V., Tarasich, Y., Kharchenko, V., Kobets, V., Burov, O., Semerikov, S., Kravtsov, H. (eds.) Proceedings of the 16th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Volume II: Workshops, Kharkiv, Ukraine, October 06-10, 2020, CEUR Workshop Proceedings, vol. 2732, pp. 984–995, CEUR-WS.org (2020), URL <http://ceur-ws.org/Vol-2732/20200984.pdf>
- [25] Nechypurenko, P., Semerikov, S., Selivanova, T., Shenayeva, T.: How can the principles of learning be used to select the best ICT tools for computer-based chemistry instruction in high school? *Educational Dimension* **59**, 188–241 (2022), <https://doi.org/10.31812/educdim.4738>, URL <https://journal.kdpu.edu.ua/ped/article/view/4738>
- [26] Nechypurenko, P.P., Semerikov, S.O., Tomilina, L.I.: Theoretical and methodical foundations of using ICT as a tools of forming the senior pupils’ research competencies in the chemistry profile learning, Theory and

- methods of e-learning, vol. IX. Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih (2018), URL https://books.google.nl/books?id=_ntIDwAAQBAJ
- [27] Prasanson, P., Thanyaphongphat, J., Pinthong, C.: ISO-CHEM: Development of an Interactive 3D Game on the Web in Augmented Reality to Enhance Students' Learning of Isomers of Organic Chemistry. In: Rodrigo, M.M.T., Iyer, S., Mitrovic, A., Cheng, H.N.H., Kohan-Vacs, D., Matuk, C., Palalas, A., Rajenran, R., Seta, K., Wang, J. (eds.) 29th International Conference on Computers in Education Conference, ICCE 2021 - Proceedings, vol. 2, p. 207 – 212, Asia-Pacific Society for Computers in Education (2021), URL <https://icce2021.apsce.net/proceedings/volume2/>
- [28] Shepiliev, D.S., Modlo, Y.O., Yechkalo, Y.V., Tkachuk, V.V., Mintii, M.M., Mintii, I.S., Markova, O.M., Selivanova, T.V., Drashko, O.M., Kalinichenko, O.O., Vakaliuk, T.A., Osadchyi, V.V., Semerikov, S.O.: WebAR development tools: An overview. In: Kiv, A.E., Semerikov, S.O., Soloviev, V.N., Striuk, A.M. (eds.) Proceedings of the 3rd Workshop for Young Scientists in Computer Science & Software Engineering (CS&SE@SW 2020), Kryvyi Rih, Ukraine, November 27, 2020, CEUR Workshop Proceedings, vol. 2832, pp. 84–93, CEUR-WS.org (2021), URL <https://ceur-ws.org/Vol-2832/paper12.pdf>
- [29] Sliwinski, E.P., Kabeshov, M.A., Ley, S.V.: HTMoL - AR plugin (2019), URL <https://github.com/es605/HTMoLAR>
- [30] Syrovatskyi, O.V., Semerikov, S.O., Modlo, Y.O., Yechkalo, Y.V., Zelinska, S.O.: Augmented reality software design for educational purposes. In: Kiv, A.E., Semerikov, S.O., Soloviev, V.N., Striuk, A.M. (eds.) Proceedings of the 1st Student Workshop on Computer Science & Software Engineering, Kryvyi Rih, Ukraine, November 30, 2018, CEUR Workshop Proceedings, vol. 2292, pp. 193–225, CEUR-WS.org (2018), URL <http://ceur-ws.org/Vol-2292/paper20.pdf>
- [31] Virtual Space LLC: AR VR Molecules Editor Free (2019), URL https://play.google.com/store/apps/details?id=com.vspaces.molb_free&hl=en&gl=US

A Стартова сторінка віртуальної хімічної лабораторії на основі доповненої реальності – [index.html](#)

<https://github.com/Lefoxi/ARdip/blob/main/index.html>

Б Віртуальна хімічна лабораторія на основі доповненої реальності – [ar.html](#)

<https://github.com/Lefoxi/ARdip/blob/main/ar.html>