



ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ

УДК 004.942:577.15

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.17438792>

Розроблення інтерактивних освітніх платформ для моделювання швидкості виділення CO₂ під час бродіння

Бурдінський Іван Володимирович,

інженер, Краш Фабрикейшн енд Меканікал, ЛЛС, м. Напа, Каліфорнія,
94558, США, <https://orcid.org/0000-0002-8486-111X>

Прийнято: 07.10.2025 | Опубліковано: 25.10.2025

Анотація. У статті розглянуто впровадження інформаційно-комунікаційних технологій у професійну підготовку здобувачів вищої освіти природничого профілю. Особливу увагу приділено створенню інтерактивної освітньої платформи для моделювання швидкості виділення вуглекислого газу (CO₂) під час бродіння як ефективного засобу візуалізації біохімічних явищ. **Метою** дослідження є розроблення, програмна реалізація та педагогічна апробація інтерактивної навчальної платформи, що забезпечує моделювання процесу бродіння в реальному часі з можливістю спостереження за динамікою виділення CO₂ та зміною параметрів середовища. **Методи.** У дослідженні застосовані технології HTML5, JavaScript і Python для побудови симуляційного середовища, інтеграції даних від сенсорів CO₂ та втіленні алгоритмів обчислення швидкості бродіння. Педагогічний аспект дослідження здійснено через аналіз ефективності застосування платформи в освітньому процесі, спостереження за навчальною активністю студентів та оцінювання рівня сформованості відповідних компетентностей.



Результати. Використання інтерактивної освітньої платформи дало змогу забезпечити системне відтворення процесу бродіння, що слугувало кращому розумінню взаємозв'язку між параметрами середовища та швидкістю виділення CO_2 . Упровадження цифрового симуляційного середовища підвищило пізнавальну активність і дослідницьку мотивацію студентів, розширило можливості самостійного аналізу біохімічних явищ і сприяло розвитку аналітичного мислення. Узагальнення результатів педагогічного експерименту підтвердило успішне застосування розробленої платформи у формуванні цифрової компетентності майбутніх фахівців природничого профілю. **Висновки.** У ході дослідження було доведено ефективність створеної інтерактивної освітньої платформи як дидактичного інструменту університетського рівня освіти. Її використання передбачає інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у навчальний процес природничих дисциплін, сприяє розвитку цифрової грамотності та дослідницьких компетентностей студентів. Отримані результати засвідчують перспективність подальшого вдосконалення подібних цифрових інструментів для підтримки дистанційних і змішаних форматів навчання.

Ключові слова: інформаційно-комунікаційні технології, цифрова компетентність, STEM-освіта, віртуальний експеримент, симуляційне навчальне середовище, біохімічні процеси, педагогічна апробація.

Development of interactive educational platforms for modeling the rate of CO_2 emission during fermentation

Ivan Burdinskyi,

Engineer, Crush Fabrication and Mechanical LLC, Napa, CA 94558, USA,

<https://orcid.org/0000-0002-8486-111X>

Abstract. The article examines the implementation of information and communication technologies (ICT) in the professional training of higher education students in natural sciences. Particular attention is paid to the development of an interactive educational platform for modeling the rate of carbon dioxide (CO₂) emission during fermentation as an effective tool for visualizing biochemical processes. **Objective.** The study aims to design, implement, and pedagogically test an interactive learning platform that enables real-time simulation of the fermentation process with the ability to observe CO₂ emission dynamics and changes in environmental parameters. **Methods.** The work utilizes HTML5, JavaScript, and Python technologies to create a simulation environment, integrate CO₂ sensor data, and implement algorithms for calculating fermentation rates. The pedagogical aspect of the study was realized through analysis of platform effectiveness in the educational process, monitoring students' learning activity, and assessing the development of relevant competencies. **Results.** The use of the interactive educational platform provided a systematic reproduction of the fermentation process, facilitating a better understanding of the relationship between environmental parameters and CO₂ emission rate. The digital simulation environment enhanced students' cognitive activity and research motivation, expanded opportunities for independent analysis of biochemical phenomena, and contributed to the development of analytical thinking. Generalization of the results of the pedagogical experiment confirmed the effectiveness of using the developed platform in forming the digital competence of future specialists in the natural sciences. **Conclusions.** The study demonstrated the effectiveness of the developed interactive educational platform as a didactic tool at the university level. Its implementation facilitates the integration of information and communication technologies into the teaching of natural science disciplines, promotes the development of students' digital literacy, and enhances their research competencies. The results obtained indicate the potential for further improvement of similar digital tools to support remote and blended learning formats.

Keywords: *information and communication technologies, digital competence, stem education, virtual experiment, simulation-based learning environment, biochemical processes, pedagogical trial.*

Постановка проблеми. Інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) набувають ключового значення в підготовці здобувачів вищої освіти природничого профілю, зокрема для покращення наочності та ефективності опанування складних біохімічних явищ. Процес бродіння, що супроводжується виділенням CO_2 , є важливим об'єктом вивчення в біохімії та біотехнології, проте традиційні лабораторні методи мають обмеження, пов'язані з тривалістю експерименту, ресурсами та безпекою.

Інтерактивні освітні платформи дають змогу моделювати складні біологічні процеси, зокрема бродіння, у реальному часі, спостерігати динаміку виділення CO_2 та аналізувати вплив різних параметрів середовища на швидкість реакції. Такі платформи передбачають інтеграцію цифрових технологій у навчання, сприяють розвитку аналітичного мислення та дослідницьких умінь студентів, а також підвищують результативність засвоєння теоретичного матеріалу.

Проблематика роботи полягає у визначенні методів створення інтерактивних освітніх платформ, які поєднують моделювання біохімічних процесів з освітніми цілями, а також в оцінюванні їхньої методичної ефективності для формування ключових компетентностей майбутніх фахівців природничих спеціальностей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика розроблення інтерактивних освітніх платформ для моделювання складних біохімічних та біотехнологічних процесів, зокрема швидкості виділення CO_2 під час бродіння, набуває все більшої актуальності в контексті цифровізації природничо-наукової освіти. Дослідники наголошують, що використання інтерактивних систем моделювання сприяє поліпшенню аналітичного



мислення, пізнавальної активності та цифрових компетентностей студентів. Так, Г. В. Різак [1] доводить, що адаптація навчальних програм із біоорганічної хімії з інтеграцією інновацій та дієвих методів викладання підвищує ефективність засвоєння знань студентами хімічних, медичних та біологічних спеціальностей. Л. В. Філіппова [2] підкреслює роль комп'ютерних технологій у вивченні біохімії для формування практичних навичок і цифрової грамотності. Н. М. Маланюк [3] висвітлює результативність новаторських педагогічних технологій у професійній освіті та їхнє значення для розвитку творчої діяльності студентів. О. Гойстер та А. Гудзенко [4] окреслюють практику впровадження сучасних освітніх технологій у навчання хімії в умовах воєнного стану, відзначаючи їх позитивний вплив на мотивацію та залученість студентів. Т. М. Попова, Р. О. Бачинський та Т. В. Поліщук [5] розглядають інноваційні методи навчання біологічної хімії, які покращують аналітичні та практичні компетентності здобувачів освіти. С. Б. Большаніна, Т. В. Диченко та Н. Н. Чайченко [6] аргументують, що застосування платформи МІХ для змішаного навчання загальної хімії забезпечує інтерактивне середовище та вироблення професійних навичок у студентів інженерних спеціальностей. Г. В. Різак [7] наголошує на важливості розрахункових задач у викладанні фармацевтичної хімії для розвитку аналітичного мислення. А. Abelian, М. Dybek, J. Wallach, В. Gaye й А. Adejare [8] та L. M. Caldas, A. T. Matulewicz, R. A. Koenig, X. Wei, M. Hindle і K. L. Donohoe [9] показують, що інтерактивні лабораторні курси ефективно сприяють формуванню навичок розв'язання проблем у студентів хімічних та фармацевтичних спеціальностей. V. Lyubenova, D. Zoteva, M. Ignatova, D. Kristeva та O. Roeva [10] обґрунтовують, що інтерактивні системи моделювання ферментативних процесів поліпшують успішність навчання, розвиваючи практичні навички в здобувачів освіти. N. Stroia та A. Lodin [11] підкреслюють значення математичного моделювання бродильних процесів для реалізації керування швидкістю виділення CO₂, підвищуючи точність

навчальних експериментів. F. Vigato, J. M. Woodley та M. Alvarado-Morales [12] аналізують ефект обмеження CO₂ у безперервній ферментації, демонструючи важливість інтерактивного підходу в навчанні. J. Ritonja, A. Goršek, D. Pečar, T. Petek та B. Polajžer [13] досліджують вплив температурних змін на виділення CO₂ у партійних біореакторах та роль цифрових платформ у моделюванні цих явищ. M. T. Pham, J.-M. Kim та C. H. Kim [14] висвітлюють можливості використання інтелектуальних систем діагностики процесів на основі сигналів акустичного випромінювання для визначення швидкості реакцій у біореакторах. A. Sio-Sever, J. M. Lopez, C. Asensio-Rivera, A. Vizan-Idoipe та G. De Arcas [15] демонструють застосування мікрофонних масивів та моделей штучного інтелекту для покращення оцінювання кінцевих параметрів ферментації.

Отже, розроблення інтерактивних освітніх платформ для моделювання біохімічних чи ферментативних реакцій є ефективним інструментом розвитку практичних навичок, аналітичного мислення та цифрової компетентності студентів. Водночас залишаються відкритими питання системного впровадження таких платформ у навчальний процес, адаптації їх до різних освітніх контекстів, інтеграції з лабораторними практикумами та оцінювання їхнього довготривалого впливу на академічні результати студентів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Наявні підходи до навчання біохімічних явищ, зокрема бродіння, переважно обмежуються традиційними лабораторними експериментами або статичними демонстраціями, що не дає змоги відтворити динаміку процесу в реальному часі та здійснювати системний аналіз впливу різних параметрів середовища на швидкість виділення CO₂. Хоча окремі дослідження показують ефективність комп'ютерного моделювання та використання симуляційних програм у навчанні природничих дисциплін, більшість платформ не інтегрують інтерактивні елементи для проведення віртуальних дослідів із динамічним контролем параметрів та збором даних у конкретному моменті.



Невирішеними залишаються питання оптимізації дизайну інтерактивних освітніх платформ з урахуванням сучасних педагогічних підходів до організації навчального процесу, розвитку цифрових та дослідницьких компетентностей студентів, а також визначення методів оцінювання їх ефективності в освітній практиці. Існує потреба в систематичному вивченні впливу інтерактивного моделювання бродіння на формування аналітичного мислення, пізнавальної активності та мотивації до навчання.

Дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин через розроблення інтерактивної освітньої платформи, що дає змогу моделювати виділення CO_2 під час бродіння з можливістю динамічного управління умовами експерименту та збору даних, що здатне підвищити успішність навчання, сприяти розвитку дослідницьких компетентностей та запропонувати новий методологічний підхід у викладанні природничих дисциплін.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є розроблення інтерактивної освітньої платформи для моделювання швидкості виділення CO_2 під час бродіння, що забезпечує системне відтворення біохімічних явищ у реальному часі та інтеграцію цифрових технологій у навчальний процес підготовки студентів природничих спеціальностей.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні цифрові рішення для моделювання процесів бродіння та визначити їхній потенціал для використання в освітньому середовищі.
2. Розробити інтерактивну освітню платформу для моделювання динаміки виділення CO_2 під час бродіння з урахуванням основних параметрів процесу.
3. Створити інтерактивну освітню платформу для візуалізації процесу бродіння та оцінити її ефективність у навчанні студентів.



Виклад основного матеріалу дослідження. Інтерактивні освітні платформи є сучасним інструментом навчання, який дає змогу вдало поєднувати теоретичні знання з практичним досвідом через моделювання та симуляцію складних природничих процесів. Вони надають студентам можливість безпосередньо взаємодіяти з навчальним матеріалом, змінювати параметри моделей, спостерігати динаміку явищ у реальному часі та аналізувати отримані дані. Особливо ефективними такі платформи стають під час вивчення біохімічних процесів, які важко демонструвати в традиційних лабораторіях через тривалість експерименту, безпекові обмеження або високі матеріальні витрати.

Одним із ключових біохімічних процесів є бродіння – анаеробне розщеплення органічних сполук мікроорганізмами, що супроводжується виділенням енергії та утворенням продуктів, таких як етиловий спирт, молочна кислота та вуглекислий газ (CO_2). Інтерактивні освітні платформи дають студентам можливість спостерігати за утворенням кінцевих продуктів бродіння, досліджувати його динаміку в реальному часі, аналізувати вплив параметрів середовища (температура, рН, концентрація субстрату, чисельність мікроорганізмів) на швидкість виділення CO_2 та вивчати механізми ферментативної регуляції, що забезпечує поглиблене розуміння біохімічних явищ і сприяє формуванню дослідницьких компетентностей здобувачів вищої освіти природничого профілю [10].

Ураховуючи складність і динамічність процесу бродіння, сучасні цифрові технології пропонують різноманітні підходи для його моделювання та інтеграції в навчання. Найпоширенішими є комп'ютерні симуляції, інтерактивні моделі та віртуальні лабораторії, які дають змогу відтворювати біохімічні явища в контрольованих умовах, економити ресурси та підвищувати безпеку проведення дослідів. Це надає студентам можливість не лише спостерігати кінцеві результати, а й аналізувати динаміку процесу в реальному часі, порівнювати різні сценарії експериментів та робити науково

обґрунтовані висновки щодо впливу змінних параметрів середовища на швидкість виділення CO₂.

Найбільш відомі інтерактивні платформи реалізовані на базі середовищ MATLAB та Python із використанням спеціалізованих бібліотек для наукових обчислень (SciPy, NumPy, Matplotlib), а також як вебдодатки на HTML5 і JavaScript, що забезпечує кросплатформену доступність та інтерактивність у браузері. Вони допомагають створювати графічні моделі динаміки бродіння, інтерактивні графіки виділення CO₂, анімації поведінки мікроорганізмів та моделювати вплив таких параметрів, як концентрація субстрату, температура, рН середовища і чисельність дріжджів. Крім того, передбачають можливість підключення сенсорних даних із фізичних експериментів, що дає змогу студентам порівнювати модельні та реальні результати, аналізувати точність моделі та підвищувати якість дослідницьких висновків [11].

Попри вказані переваги, більшість наявних рішень мають суттєві обмеження щодо інтерактивності та педагогічної цінності. Студенти часто спостерігають статичні графіки або неповні сценарії моделювання, що не дає змоги повною мірою зрозуміти динаміку процесу та механізми ферментативної регуляції. Також платформи рідко надають можливість гнучкої зміни умов експерименту в реальному часі, одночасного збору та аналізу даних, що знижує ефективність розвитку аналітичного мислення та дослідницьких компетентностей [12].

Для забезпечення високого рівня інтерактивності та наочності було створено математичну модель, яка описує динаміку виділення CO₂ у реальному часі. Основою моделювання стала кінетика Міхаеліса–Ментен, адаптована під умови дріжджового бродіння. Вона дає змогу кількісно оцінити швидкість ферментативної реакції залежно від концентрації субстрату та активності ферментів [13]. Основне рівняння моделі має вигляд:



$$v = (V_{\max} * [S]) / (K_m + [S]),$$

де:

v – швидкість виділення CO_2 ,

$[S]$ – концентрація субстрату (цукру),

$V_{\max}$ – максимальна швидкість ферментативної реакції,

K_m – константа Міхаеліса, що характеризує спорідненість ферменту до субстрату.

Модель враховує також такі фактори, як температура та рН середовища, концентрація дріжджів та початковий вміст цукру. Для моделювання динаміки процесу використано чисельну інтеграцію за допомогою методу Ейлера, що дає змогу покроково обчислювати зміну концентрації субстрату та швидкість виділення CO_2 протягом експерименту.

У табл. 1 наведено значення ключових параметрів середовища та відповідну швидкість виділення CO_2 , отримані під час серії експериментів у межах інтерактивної освітньої платформи. Дані таблиці показують залежність інтенсивності бродіння від концентрації субстрату, температури та рН середовища, що допомагає ідентифікувати закономірності зміни швидкості реакції та оцінити вплив окремих факторів на динаміку процесу.

Таблиця 1

Вплив параметрів середовища на швидкість виділення CO_2 під час бродіння

Експеримент	Концентрація субстрату, г/л	Температура, °C	рН середовища	Швидкість виділення CO_2 , мл/год
1	50	25	4,5	12
2	50	30	4,5	18
3	75	25	4,5	20
4	75	30	4,5	28
5	100	30	5,0	35

Джерело: дані автора

Аналіз представлених даних дає змогу студентам виявляти кількісні та якісні закономірності впливу ключових параметрів середовища, таких як концентрація субстрату, температура та рН, на швидкість виділення CO_2 під



час процесу бродіння. Так, збільшення температури та концентрації субстрату приводить до значного зростання інтенсивності ферментативної реакції, що узгоджується з результатами чисельного моделювання на основі кінетики Міхаеліса–Ментен [13]. Одночасне відстеження цих параметрів у режимі реального часу за допомогою інтерактивної платформи дає змогу студентам оцінювати взаємозв'язки між змінними, порівнювати експериментальні та модельні показники, а також проводити багаторазові дослідження для встановлення закономірностей залежності швидкості бродіння від комплексного впливу факторів середовища. Візуалізація динаміки процесу у вигляді графіків, анімацій та інтерактивних діаграм забезпечує глибше розуміння механізмів ферментативної регуляції, стимулює розвиток аналітичного мислення та формує у студентів дослідницькі навички, необхідні для самостійного планування та здійснення експериментів. Крім того, робота з інтерактивною платформою сприяє підвищенню рівня цифрової компетентності, зокрема здатності працювати з великими обсягами даних, обробляти їх та інтерпретувати в контексті природничих дисциплін.

Модель процесу бродіння відображає часову структуру реакції, що охоплює фазу затримки, період активного росту мікроорганізмів, стабілізацію та зниження інтенсивності через виснаження субстрату або накопичення метаболітів. Графічна інтерпретація у вигляді інтерактивних діаграм дає змогу студентам простежувати переходи між етапами, кількісно оцінювати зміну швидкості виділення CO_2 , визначати оптимальні умови перебігу реакції. Візуальне сприйняття цих залежностей сприяє формуванню системного бачення біохімічних явищ і розвитку загальних компетентностей.

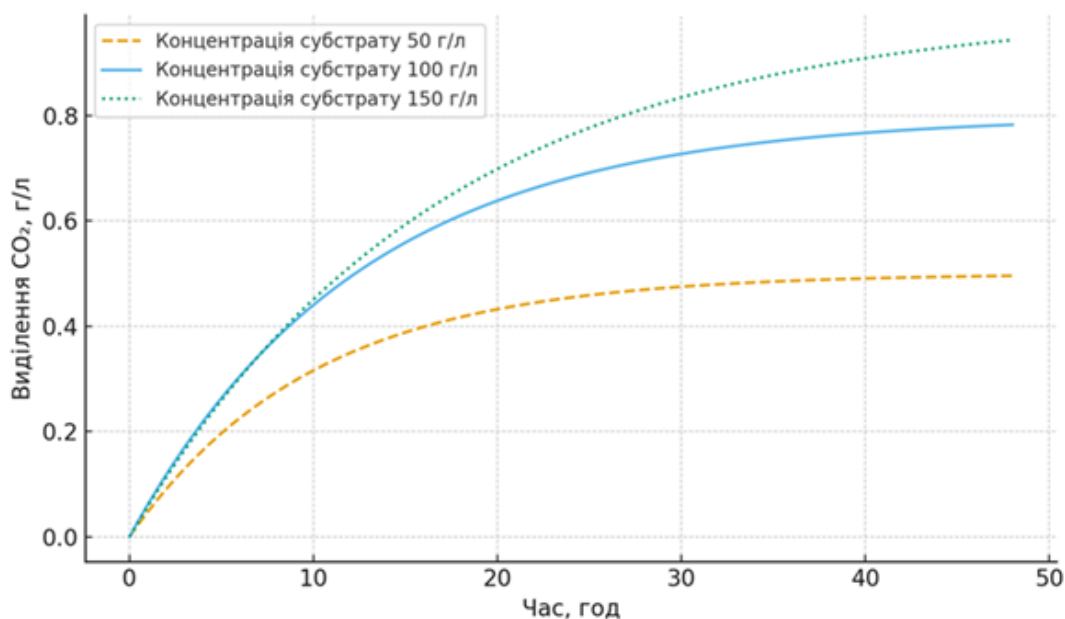
Під час моделювання враховується взаємодія параметрів середовища. Підвищення температури до 30–35 °C та підтримання помірної кислотності (pH 4,5–5,0) зумовлює інтенсивніше виділення CO_2 , що вказує на оптимальну ферментативну активність дріжджів. При концентрації субстрату 100 г/л система наближається до максимальної швидкості реакції, що відповідає

тенденціям, описаним рівнянням Міхаеліса–Ментен [13]. Оскільки експеримент проведено лише до концентрації 100 г/л, подальше її збільшення не досліджувалося, тому фактичне насичення ферментативного комплексу не спостерігалось. Дані табл. 1 відображають швидкість виділення CO_2 у межах здійснених дослідів. Розуміння цього ефекту формує в студентів здатність пояснювати закономірності регуляції метаболічних процесів.

Для глибшого усвідомлення механізмів явища бродіння результати моделювання наведено на рис. 1, який відтворює зміну швидкості виділення CO_2 у часі залежно від концентрації субстрату, що характеризує інтенсивність біохімічної реакції, даючи змогу оцінити вплив концентрації цукру на перебіг процесу та момент досягнення рівноваги системи.

Рисунок 1

Динаміка виділення CO_2 під час процесу бродіння за різних концентрацій субстрату



Джерело: дані автора

Графічна інтерпретація динаміки виділення вуглекислого газу (CO_2) під час бродіння демонструє зміну інтенсивності процесу при низькій (50 г/л), середній (100 г/л) та високій (150 г/л) концентрації субстрату. Як видно з



графіка, швидкість виділення CO_2 зростає з підвищенням концентрації цукру, що відповідає закономірностям, встановленим за кінетикою Міхаеліса–Ментен. Згодом реакція наближається до насичення, коли вичерпується субстрат та активність ферментів стабілізується.

Інтерактивне моделювання процесу бродіння дає змогу вивчати закономірності зміни швидкості виділення CO_2 залежно від різних параметрів реакційного середовища, формуючи навички самостійного дослідження, критичного аналізу результатів та інтеграції теоретичних знань у практичні експерименти. Варіативні сценарії випробувань забезпечують зміну ключових параметрів та оцінювання їхнього впливу на кінетику бродіння, що сприяє глибшому розумінню динаміки явища та фаз його протікання – затримки, активного росту мікроорганізмів і стабілізації швидкості виділення CO_2 [14].

Контрольовані умови середовища дають змогу відстежувати всі етапи бродіння та підбирати оптимальні параметри реакції, за яких дріжджі демонструють максимальну ферментативну активність. Користувачі можуть прослідковувати, як за середніх концентрацій субстрату процес протікає стабільніше, з меншими коливаннями швидкості реакції, що забезпечує більш передбачуваний результат експерименту. Такі спостереження допомагають визначити межі насичення ферментативної системи та вплив концентрації цукру на кінетику ферментативної реакції. Інтеграція даних цифрової платформи з лабораторними спостереженнями та статистичним аналізом дає можливість порівнювати модельні й експериментальні результати, оцінювати похибки вимірювань і робити науково обґрунтовані висновки, стимулюючи розвиток аналітичного мислення та дослідницьких компетентностей.

Отримані дані підкреслюють значення контролю параметрів середовища під час навчальних експериментів і моделювання біохімічних процесів. Студенти виробляють навички спостереження за динамікою реакцій у реальному часі та оцінювання взаємозв'язків між концентрацією субстрату, активністю ферментів і кінцевим результатом бродіння, що сприяє



формуванню системного мислення та аналітичних компетентностей, необхідних для планування експериментальних досліджень у лабораторних умовах [15].

Ураховуючи результати моделювання, інтерактивну платформу можна використовувати як інструмент для проведення навчальних експериментів із можливістю варіювання концентрації субстрату та інших ключових параметрів середовища. Це дає змогу демонструвати механізми ферментативної регуляції та стимулює активну участь студентів у навчальному процесі, формуючи практичні навички аналізу біохімічних процесів та уміння робити науково обґрунтовані висновки.

Подальший розвиток інтерактивної освітньої платформи для моделювання процесу бродіння зосереджено на поглибленні аналітичного потенціалу системи та підвищенні рівня адаптивності навчального середовища через її вдосконалення та оптимізацію функціональних можливостей. У цифровій освіті ефективність таких інструментів визначається не лише точністю математичних моделей, а й здатністю забезпечувати активну пізнавальну діяльність студентів. Поєднання динамічного моделювання біохімічних реакцій, інтерактивних сценаріїв навчання та автоматизованої обробки результатів створює умови для глибокого розуміння процесів і реалізації принципів дослідницького навчання. Здобувач освіти за такого підходу є не пасивним спостерігачем, а активним експериментатором, який формулює гіпотези, змінює параметри моделі, аналізує дані та робить висновки, що сприяє розвитку критичного мислення, навичок наукового аналізу та вміння застосовувати теоретичні знання в практичних завданнях.

З метою збільшення достовірності результатів у платформу інтегровано модулі збору емпіричних даних. Під'єднання сенсорів дає змогу фіксувати параметри температури, тиску та концентрації CO₂ у реальному часі, що створює можливість співставлення модельних і лабораторних показників.

Завдяки цьому студенти набувають досвіду діяльності з експериментальними даними, опановують основи статистичного аналізу та методи оцінювання похибок. Функція імпорту даних у форматах CSV та Excel забезпечує гнучкість роботи з результатами й полегшує впровадження платформи в навчальні курси з біохімії, мікробіології, екології та технологічних дисциплін.

Наступний етап удосконалення інтерактивної освітньої платформи передбачає інтеграцію елементів машинного навчання для поліпшення аналітичних можливостей системи та адаптивності навчального середовища. Алгоритми кластерного аналізу допомагають виявляти подібності між експериментами, а регресійні моделі дають змогу прогнозувати швидкість виділення CO₂ за змінених умов середовища. Це підвищує гнучкість системи, сприяє індивідуалізації навчального процесу та формуванню адаптивних траєкторій навчання.

Значну увагу приділено візуалізації результатів моделювання. Побудова багатовимірних графіків, теплових карт і тривимірних моделей дає змогу відобразити взаємозв'язок між параметрами середовища та швидкістю реакції. Тривимірна поверхня, що демонструє залежність швидкості виділення CO₂ від температури й концентрації субстрату, допомагає визначити оптимальну зону активності ферментів і зрозуміти характер нелінійних залежностей. Така форма подання даних розвиває просторове мислення та здатність до інтерпретації складних динамічних систем.

Педагогічна ефективність розробленої платформи підтверджується кількісними показниками. Аналіз навчальних результатів свідчить про підвищення рівня засвоєння теоретичних знань і зростання активності студентів під час практичних занять. Поєднання моделювання, візуалізації та аналізу даних забезпечує глибше розуміння сутності біохімічних процесів і сприяє формуванню компетентностей, необхідних для дослідницької діяльності [13]. Крім того, студенти демонструють кращу мотивацію до



навчання, що доведено збільшенням кількості самостійних експериментів у цифровому середовищі.

Водночас інтерактивна платформа передбачає реалізацію міждисциплінарного підходу в освіті. Під час роботи з моделлю студенти використовують знання з біології, хімії, математики, фізики та інформатики. Це стимулює формування цілісного наукового світогляду, уміння бачити взаємозв'язки між явищами й застосовувати результати одного напрямку науки для пояснення процесів в іншому. Така інтеграція знань відповідає концепції STEM-освіти, орієнтованої на практичне використання наукових і технічних рішень у реальних умовах.

Гнучкість системи забезпечує можливість її впровадження у вищих навчальних закладах, середній школі, під час підготовки до предметних олімпіад і курсів підвищення кваліфікації педагогів. Вебінтерфейс платформи дає змогу організовувати навчальний процес у дистанційному або змішаному форматі, що актуально для сучасних освітніх середовищ.

Проведені дослідження підтверджують, що інтерактивне моделювання є дієвим засобом поліпшення ефективності навчання в природничій освіті. Поєднання математичних моделей, чисельних методів, елементів машинного навчання й педагогічних стратегій створює цілісну систему, здатну забезпечити високий рівень пізнавальної активності студентів [15]. Перспективи подальшого розвитку полягають у вдосконаленні алгоритмів моделювання, розширенні бази даних експериментальних параметрів, побудові інтегрованого середовища для аналізу складних біохімічних процесів та автоматизованого оцінювання навчальних результатів.

Отже, інтерактивна освітня платформа є інструментом цифрової трансформації навчального процесу, який поєднує наукову достовірність, технологічну гнучкість і дидактичну ефективність. Вона формує компетентності нового покоління: аналітичне мислення, цифрову грамотність, дослідницьку ініціативу й уміння працювати з великими обсягами даних. Усе

це забезпечує її стратегічне значення для модернізації природничої освіти та розвитку інноваційних підходів у науковій підготовці студентів.

Висновки. Комплексний аналіз використання інтерактивної освітньої платформи для моделювання процесу бродіння показує, що системне впровадження цифрових інструментів в освітнє середовище дає змогу поєднувати теоретичні знання з практичними вміннями, формуючи у студентів дослідницькі компетентності, критичне мислення та навички роботи з великими обсягами інформації. За допомогою вказаної платформи можна проводити чисельні експерименти, аналізувати динаміку виділення CO_2 , порівнювати модельні та лабораторні дані, що сприяє глибшому розумінню механізмів ферментативної регуляції.

Інтерактивні сценарії експериментів та візуалізація результатів у вигляді графіків та анімацій розвивають системний підхід до навчання, аналітичні здібності та здатність до планування власних досліджень. Взаємодія з платформою стимулює самостійну діяльність студентів, формує критичне мислення й відповідальність за підсумки дослідів, одночасно підвищуючи цифрову компетентність та навички роботи із сучасними технологіями моделювання.

Обмеження дослідження пов'язані з різним рівнем технічного оснащення та цифрових компетентностей студентів і викладачів, а також зі специфікою інтеграції сенсорних даних і математичних моделей в освітній процес. Це створює потребу в подальшому вдосконаленні платформи, розширенні бази параметрів моделювання та оптимізації інтерактивних інструментів для забезпечення більш точного та глибокого аналізу біохімічних явищ. Подальші роботи з поліпшення платформи мають зосереджуватися на підвищенні її адаптивності, інтеграції елементів машинного навчання для прогнозування результатів експериментів та розробленні методичних підходів для ефективного використання цифрових моделей у навчанні природничих дисциплін.

Список використаних джерел

1. Різак Г. В. Адаптація навчальних програм з біоорганічної хімії для студентів хімічних, медичних і біологічних спеціальностей до сучасних вимог: інтеграція інновацій та активних методів викладання. *Інноваційна педагогіка. Теорія і методика професійної освіти*. 2024. Т. 2, Вип. 69. С. 129–134. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-6085/2024/69.2.27>.
2. Філіппова Л. В. Комп'ютерні технології під час вивчення біохімії. *Актуальні питання гуманітарних наук*. 2021. Т. 2, № 46. С. 179–184. DOI: <https://doi.org/10.24919/2308-4863/46-2-29>.
3. Маланюк Н. М. Інноваційні педагогічні технології в професійній освіті. *Педагогіка формування творчої особистості у вищій і загальноосвітній школах*. 2020. Т. 3, № 70. С. 113–118. DOI: <https://doi.org/10.32840/1992-5786.2020.70-3.21>.
4. Гойстер О., Гудзенко А. З досвіду впровадження сучасних освітніх технологій навчання хімії здобувачів медичної освіти в умовах воєнного стану. *Ukrainian Educational Journal*. 2023. № 4. С. 195–206. DOI: <https://doi.org/10.32405/2411-1317-2022-4-195-206>.
5. Попова Т. М., Бачинський Р. О., Поліщук Т. В. Інноваційні методи навчання при вивченні біологічної хімії. *Медична та клінічна хімія*. 2020. Т. 22, № 2. С. 100–104. DOI: <https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2020.v.i2.11367>.
6. Большаніна С. Б., Диченко Т. В., Чайченко Н. Н. Застосування платформи міх для організації змішаного навчання загальної хімії здобувачів інженерних спеціальностей. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2020. Т. 75, № 1. С. 138–152. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v75i1.2577>.
7. Різак Г. В. Використання розрахункових задач у викладанні фармацевтичної хімії. *Неперервна професійна освіта: теорія і практика*. 2023. Т. 74, № 1. С. 68–75. DOI: <https://doi.org/10.28925/1609-8595.2023.1.6>.

8. Abelian A., Dybek M., Wallach J., Gaye B., Adejare A. Pharmaceutical chemistry. The science and practice of pharmacy / ed. A. Adejare. Cambridge, Massachusetts: Academic Press. 2021. P. 105–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-820007-0.00006-4>.
9. Caldas L. M., Matulewicz A. T., Koenig R. A., Wei X., Hindle M., Donohoe K. L. Team teaching with pharmacy practice and pharmaceuticals faculty in a nonsterile compounding laboratory course to increase student problem-solving skills. *Currents in Pharmacy Teaching and Learning*. 2020. Vol. 12, № 3. P. 320–325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cptl.2019.12.017>.
10. Lyubenova V., Zoteva D., Ignatova M., Kristeva D., Roeva O. A system designed for modelling, monitoring, and control of fermentation processes, powered by metaheuristic algorithms. *Processes*. 2025. Vol. 13, № 6. 1632. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13061632>.
11. Stroia N., Lodin A. Modeling of must fermentation processes for enabling CO₂ rate-based control. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, № 10. 1653. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13101653>.
12. Vigato F., Woodley J. M., Alvarado-Morales M. Modeling the effect of CO₂ limitation in continuous fermentation for biosuccinic acid production. *Journal of CO₂ Utilization*. 2024. Vol. 79. 102651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102651>.
13. Ritonja J., Goršek A., Pečar D., Petek T., Polajžer B. Dynamic modeling of the impact of temperature changes on CO₂ production during milk fermentation in batch bioreactors. *Foods*. 2021. Vol. 10, № 8. 1809. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10081809>.
14. Pham M. T., Kim J.-M., Kim C. H. Intelligent fault diagnosis method using acoustic emission signals for bearings under complex working conditions. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 20. 7068. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10207068>.



15. Sio-Sever A., Lopez J. M., Asensio-Rivera C., Vizan-Idoipe A., de Arcas G. Improved estimation of end-milling parameters from acoustic emission signals using a microphone array assisted by AI modelling. *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 10. 3807. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22103807>.