

Використання віртуальних лабораторій у викладанні методів моніторингу бродіння

*Бурдінський Іван Володимирович*¹

Опубліковано	Секція	УДК
28.10.2025	Освіта/Педагогіка	378.147:57

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17466130>

Ліцензовано за умовами Creative Commons BY 4.0 International license

Анотація. Цифровізація освіти та впровадження інформаційних технологій зумовлюють потребу у пошуку нових практик підготовки фахівців біотехнологічного профілю. Метою дослідження є аналіз ефективності застосування віртуальних лабораторій у навчанні методів моніторингу процесів бродіння. Для досягнення цієї мети було використано порівняльний аналіз традиційних і цифрових практик лабораторного навчання, зокрема педагогічне моделювання, що дало змогу оцінити переваги віртуальних технологій та визначити оптимальні способи їхньої інтеграції в освітній процес. Показано, що використання віртуальних лабораторій сприяє підвищенню рівня засвоєння теоретичного матеріалу, розвитку практичних умінь і навичок, не потребуючи вартісного лабораторного устаткування. Зазначено, що інтеграція таких технологій в освітній процес сприяє створенню безпечного й гнучкого середовища для формування професійних компетенцій майбутніх фахівців харчових технологій. У висновках підкреслено доцільність впровадження змішаних форм навчання з використанням віртуальних симуляторів для підвищення ефективності засвоєння теоретичних знань та розвитку практичних умінь.

Ключові слова: цифрові освітні технології, симуляційне навчання, педагогічне моделювання, інтерактивне середовище, професійна підготовка, харчові технології, навчальні симулятори.

The use of virtual laboratories in teaching fermentation monitoring methods

Annotation. The rapid digitalization of education and the integration of information technologies into professional training require innovative approaches to teaching practical disciplines. One of the most effective tools in this context is the use of virtual laboratories, which allow the simulation of complex technological processes and the creation of a safe environment for experimentation. The study aims to analyze the effectiveness of implementing virtual laboratories in teaching fermentation monitoring methods and to determine their impact on the formation of professional competencies in food technology students. The research is based

¹ інженер, Краш Фабрикейшн енд Меканікал, ЛЛС, м. Напа, Каліфорнія, 94558, США, , ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8486-111X>

on a comparative analysis of traditional and digital approaches to laboratory learning, as well as pedagogical modeling to evaluate learning outcomes. The study also incorporates observation and qualitative assessment of student engagement and skill development during virtual simulations. The findings demonstrate that the use of virtual laboratories significantly enhances theoretical understanding and practical skills without the need for costly equipment or consumables. Students showed increased motivation, more profound understanding of biochemical processes, and improved ability to interpret fermentation monitoring data. The application of virtual environments ensures safety, flexibility, and repeatability of experiments, which are essential for mastering technological operations. The integration of virtual laboratories into the educational process enhances the effectiveness of professional training in food technology programs. It is concluded that the combination of virtual and traditional laboratory formats creates a blended learning environment that supports the development of both cognitive and practical competence. Further implementation of virtual simulators is recommended to optimize educational outcomes and adapt laboratory instruction to digital transformation trends.

Keywords: digital learning tools, simulation-based education, pedagogical modeling, interactive environment, professional competence, blended learning, virtual simulators, food technology education.

Вступ

Постановка проблеми. Підготовка фахівців харчових технологій вимагає поєднання ґрунтовних теоретичних знань і сформованих практичних навичок роботи з біотехнологічними процесами, зокрема з процесом бродіння. У традиційних умовах навчання лабораторні заняття потребують значних матеріальних ресурсів, дотримання санітарно-технічних вимог і гарантування безпеки студентів, що часто обмежує можливості проведення повноцінних експериментів. Тенденції цифровізації освіти та впровадження інформаційно-комунікаційних технологій сприяють оптимізації освітнього процесу, зокрема шляхом використання віртуальних лабораторій.

Застосування таких технологій дає змогу моделювати процеси бродіння, контролювати параметри середовища, аналізувати результати та формувати аналітичне мислення студентів без ризику втрат матеріалів чи помилок, властивих реальним експериментам. Використання віртуальних лабораторій забезпечує підвищення якості освітнього процесу, активізацію пізнавальної діяльності та формування професійних компетенцій майбутніх фахівців, необхідних для роботи у виробничих умовах.

З огляду на це проблема впровадження віртуальних лабораторій у навчання методів моніторингу бродіння є актуальною у контексті підвищення ефективності підготовки фахівців і відповідає завданням модернізації освіти в умовах цифрової трансформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика використання віртуальних лабораторій у викладанні методів моніторингу бродіння набуває все більшої актуальності у контексті цифровізації природничо-наукової освіти. Дослідники наголошують, що застосування інтерактивних лабораторних платформ сприяє підвищенню аналітичного мислення, пізнавальної активності та цифрових компетенцій студентів. Дослідник Н. М. Маланюк [1] висвітлює ефективність інноваційних педагогічних технологій у професійній освіті та їхній вплив на розвиток творчої активності студентів. Автори Т. М. Попова, Р. О. Бачинський та Т. В. Поліщук [2] розглядають інноваційні методи навчання біологічної хімії, що підвищують аналітичні

та практичні компетенції здобувачів освіти. Науковець Г. В. Різак [3] доводить, що використання розрахункових та практичних задач в освітньому процесі сприяє розвитку аналітичного мислення та практичних навичок студентів. Учений А. Абеліан зі співавторами (A. Abelian et al.) [4] визначають ефективність інтерактивних лабораторних курсів у фармацевтичній хімії, що сприяють формуванню навичок розв'язання професійних завдань. Дослідник Л. М. Галдас зі співавторами (L. M. Caldas et al.) [5] окреслюють переваги командного навчання в лабораторних курсах для розвитку навичок проблемного мислення студентів. Науковець М. Т. Пхам зі співавторами (M. T. Pham et al.) [6] розглядають можливості використання інтелектуальних систем діагностики процесів на основі сигналів акустичного випромінювання, що може бути інтегровано у віртуальні лабораторії для контролю технологічних параметрів. Учений А. Сіо-Север зі співавторами (A. Sio-Sever et al.) [7] вивчають застосування мікрофонних масивів та моделей штучного інтелекту для підвищення точності оцінювання лабораторних параметрів. Дослідник В. Любенова зі співавторами (V. Lyubenova et al.) [8] доводять, що інтерактивні системи моделювання ферментаційних процесів підвищують ефективність навчання, формуючи практичні навички та аналітичні компетенції здобувачів освіти. Автори Н. Строя та А. Лодін (N. Stroia & A. Lodin) [9] підкреслюють значення математичного моделювання бродильних процесів у навчальних експериментах, що підвищує точність моніторингу. Науковець С. Кано де лас Герас зі співавторами (S. Caño de las Heras et al.) [10] досліджують переваги та виклики використання віртуальної лабораторії у хімічній та біохімічній інженерії. Вчені Т. Гадібарата та М. Н. Г. Юсох (T. Hadibarata & M. N. H. Jusoh) [11] пропонують стратегії онлайн-навчання з лабораторними та проєктними завданнями для підвищення компетенції студентів. Автори К. Себерг, З. Назарі та М. Солберг (C. Sellberg, Z. Nazari & M. Solberg) [12] проаналізували віртуальні лабораторії у STEM-освіті, підкреслюючи їхню роль у розвитку практичних навичок. Дослідник М. Сейфан зі співавторами (M. Seifan et al.) [13] доводять ефективність віртуального навчання для формування базових лабораторних та некогнітивних навичок студентів. Вчений Н. Джанг зі співавторами (N. Zhang et al.) [14] розглядають дизайн та впровадження віртуальних лабораторій для стійкої освіти у вищих навчальних закладах, наголошуючи на позитивному впливі на якість навчання. Автори С. Б. Большаніна, Т. В. Диченко та Н. Н. Чайченко (S. B. Bolshanina, T. V. Dychenko & N. N. Chaichenko) [15] доводять, що використання платформи MIX для організації змішаного навчання створює інтерактивне середовище та сприяє розвитку професійних компетенцій студентів інженерних спеціальностей.

Таким чином, дані літератури засвідчують, що впровадження віртуальних лабораторій в освітній процес забезпечує ефективне формування практичних навичок, аналітичного мислення та цифрових компетенцій студентів біотехнологічних і технічних спеціальностей. Водночас залишаються нерозв'язаними питання системного впровадження таких платформ, їхньої інтеграції з лабораторними практикумами та оцінювання їхнього довготривалого впливу на академічні результати студентів.

Метою цієї статті є дослідження ефективності використання віртуальних лабораторій у процесі викладання методів моніторингу бродіння та визначення їхнього впливу на формування професійних компетенцій майбутніх фахівців харчових технологій.

Для досягнення мети дослідження визначено такі завдання:

- проаналізувати науково-методичні практики використання віртуальних лабораторій у закладах вищої освіти;
- схарактеризувати особливості навчання методів моніторингу бродіння у традиційних та віртуальних умовах;

- дослідити педагогічні переваги та потенційні обмеження застосування віртуальних симуляторів в освітньому процесі;
- узагальнити результати впровадження віртуальних лабораторій та оцінити їхній вплив на якість підготовки студентів.

Результати

Віртуальні лабораторії є важливим інструментом у навчанні сучасних технологічних дисциплін, оскільки дають змогу моделювати складні процеси у безпечному та контрольованому середовищі. Вони широко застосовуються для вивчення різних біохімічних, мікробіологічних і технологічних процесів, зокрема процесів бродіння, ферментації та біосинтезу. Використання цифрових симуляцій забезпечує студентам можливість проводити експерименти, відпрацьовувати лабораторні навички й засвоювати теоретичні знання, не стикаючись з обмеженнями, пов'язаними з високою вартістю обладнання, витратними матеріалами або ризиком для безпеки. Крім того, цифрові платформи дають можливість багаторазово повторювати експерименти, змінювати параметри процесу та аналізувати отримані дані у реальному часі, що сприяє глибшому розумінню принципів технологічних процесів.

Процес бродіння у віртуальній лабораторії є динамічною системою, де студент може керувати умовами середовища – температурою, рН, концентрацією субстратів та іншими базовими параметрами. Віртуальні моделі забезпечують не лише спостереження змін у системі, а й активну взаємодію з нею: зміна швидкості введення субстратів, модифікація параметрів ферментативної активності та оцінювання впливу цих змін на інтенсивність і продуктивність бродіння. Така практика дає змогу відтворювати різноманітні сценарії експериментів і прогнозувати результати у реальних умовах, що значно підвищує рівень аналітичного мислення та навичок планування експериментальної роботи у студентів.

Крім технічної взаємодії, віртуальні лабораторії виконують важливу педагогічну функцію. Вони стимулюють розвиток компетенцій, необхідних для професійної діяльності: уміння проводити аналіз даних, робити висновки на основі експериментальних результатів, моделювати технологічні процеси та ухвалювати обґрунтовані рішення. Водночас використання віртуальних платформ сприяє формуванню цифрових навичок, критичного мислення та здатності інтегрувати теоретичні знання з практичними діями, що є особливо актуальним у підготовці фахівців харчових та біотехнологічних напрямів [7].

Науково-методичні практики впровадження віртуальних лабораторій в освітній процес ґрунтуються на принципах інтерактивності, моделювання та візуалізації складних біохімічних і мікробіологічних процесів. У закладах вищої освіти такі практики передбачають поєднання традиційних лабораторних занять з цифровими симуляціями, що забезпечує змішане навчання та створює цілісне уявлення про досліджувані процеси. Віртуальні лабораторії дають можливість студентам самостійно відтворювати хід експерименту, змінювати фізичні та хімічні параметри, оцінювати вплив цих змін на хід процесів і спостерігати результати у режимі реального часу, що сприяє формуванню практичних умінь, дослідницьких навичок та аналітичного мислення.

Методики застосування віртуальних лабораторій передбачають поетапну організацію освітнього процесу. На підготовчому етапі студенти ознайомлюються з теоретичними основами процесів, особливостями досліджуваних систем та інтерфейсом програмного середовища. На експериментальному етапі виконуються цифрові досліди з можливістю регулювання основних параметрів, моделювання різних сценаріїв та спостереження за динамікою процесу. Аналітичний етап передбачає оброблення, систематизацію та інтерпретацію отриманих результатів, формування висновків і

порівняння цифрових даних з теоретичними очікуваннями. Така структура забезпечує системність навчання і формує у студентів цілісне розуміння закономірностей досліджуваних процесів.

Поєднання цих методів у віртуальному середовищі створює контрольовану модель ферментаційного процесу. Студенти навчаються визначати критичні точки процесу, аналізувати похибки вимірювань, прогнозувати результати та розробляти алгоритми оптимізації бродіння для досягнення максимальної ефективності.

Використання віртуальних лабораторій у навчанні методів моніторингу бродіння не лише моделює реальний технологічний процес, а й виконує важливу педагогічну функцію. Інтерактивне середовище формує у студентів низку базових компетенцій:

- уміння планувати експеримент та визначати його мету;
- навички оброблення експериментальних даних і побудови висновків;
- здатність до критичного аналізу результатів;
- вміння працювати з цифровими інструментами та програмними платформами для аналізу процесів.

Водночас віртуальні лабораторії підвищують мотивацію студентів до навчання, оскільки інтерактивні цифрові симуляції демонструють причинно-наслідкові зв'язки між зміною умов середовища та кінцевим результатом досліджуваних процесів. Студенти можуть експериментально перевіряти гіпотези, модифікувати параметри, порівнювати результати та оцінювати ефективність власних рішень у контрольованому середовищі. Крім цього, цифрові платформи дають змогу візуалізувати результати у вигляді графіків, діаграм і динамічних моделей, що сприяє глибшому розумінню процесів і формуванню цифрових компетенцій [8].

Для ефективного впровадження віртуальних лабораторій у систему навчання методів моніторингу бродіння важливо забезпечити чітку структурну організацію освітнього процесу. Послідовність етапів має відображати логіку формування професійних компетенцій – від засвоєння теоретичних знань до їхнього практичного застосування та аналітичного осмислення отриманих результатів. Узагальнену модель етапів використання віртуальних лабораторій в освітньому процесі наведено на рис. 1.

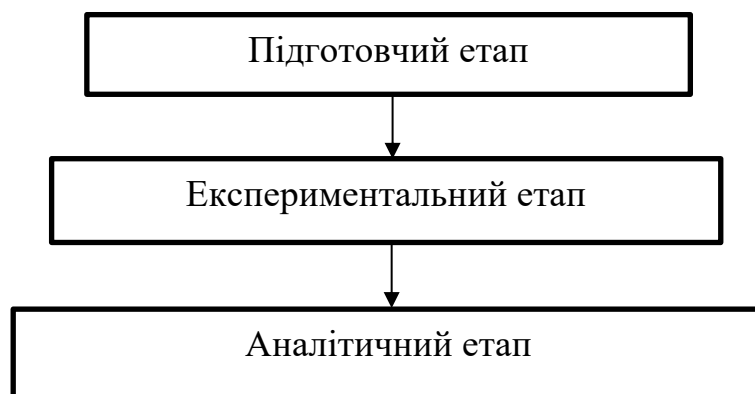


Рис. 1. Етапи впровадження віртуальних лабораторій у навчанні методів моніторингу бродіння

Джерело: розроблено автором

Як показано на рисунку 1, упровадження віртуальних лабораторій здійснюється поетапно, що забезпечує системність, поєднання теоретичного й практичного складників, та поступовий розвиток дослідницьких навичок студентів. Кожен етап має свої цілі, завдання та очікувані результати.

Підготовчий етап. На цьому етапі студенти опановують базові знання про природу процесів бродіння, фізико-хімічні та біохімічні механізми їхнього перебігу, основні

методи контролю та моніторингу. Відбувається ознайомлення з функціоналом віртуальної лабораторії, інтерфейсом, інструментами вимірювання параметрів процесу. Викладач показує можливості цифрового моделювання, пояснює принципи зміни умов експерименту та способи фіксації даних. Метою цього етапу є створення теоретичної та методичної основи для подальших експериментів.

Експериментальний етап. Це основний етап у процесі навчання. Студенти проводять серію віртуальних дослідів, змінюючи основні параметри середовища — температуру, рН, концентрацію субстратів, інтенсивність аерації, кількість біомаси тощо. У режимі реального часу фіксуються зміни у швидкості бродіння, кількості продуктів метаболізму, активності мікроорганізмів. Такі симуляції дають змогу відтворити умови реального виробництва, аналізувати вплив кожного чинника на кінцевий результат і формувати навички керування процесом.

Аналітичний етап. Завершальний етап спрямований на оброблення отриманих результатів, їхню візуалізацію та порівняння з теоретичними моделями. Студенти виконують статистичний аналіз, будують графіки залежностей, визначають оптимальні умови для проведення процесу. Особливу увагу приділяють оцінюванню вірогідності даних, аналізу похибок і формулюванню висновків. Таким чином, аналітичний етап сприяє розвитку критичного мислення, вмінню систематизувати інформацію та робити обґрунтовані наукові висновки.

Отже, така трирівнева структура забезпечує цілісність і логічність освітнього процесу, сприяє підвищенню ефективності засвоєння знань і дає можливість студентам набутти практичного досвіду дослідження процесів бродіння у безпечному цифровому середовищі.

Моніторинг процесів бродіння охоплює комплекс методів, спрямованих на оцінювання фізико-хімічних, біохімічних та мікробіологічних характеристик процесу бродіння (табл. 1). У контексті використання віртуальних лабораторій усі ці методи реалізуються через інтерактивні модулі, цифрові прилади та системи збирання даних, що забезпечують спостереження процесу у режимі реального часу та аналізу результатів з високою точністю [9].

Таблиця 1

Характеристика основних методів моніторингу процесів бродіння у віртуальних лабораторіях

Методи	Основні показники контролю	Освітня мета використання	Переваги реалізації у віртуальному середовищі	Приклади застосування
Фізико-хімічні	Температура, рН, щільність, оптична щільність	Ознайомлення з базовими параметрами контролю процесу	Миттєвий зворотний зв'язок, можливість змінювати умови експерименту	Вивчення впливу температури та рН на швидкість бродіння
Біохімічні	Концентрація цукрів, етанолу, органічних кислот	Формування розуміння механізмів метаболізму	Автоматичний розрахунок концентрацій і побудова графіків	Дослідження кінетики споживання глюкози
Мікробіологічні	Кількість клітин,	Опанування закономірностей	Візуалізація росту культур,	Аналіз впливу середовища

Методи	Основні показники контролю	Освітня мета використання	Переваги реалізації у віртуальному середовищі	Приклади застосування
	життєздатність, фази росту	росту мікроорганізмів	моделювання контамінацій	на активність дріжджів
Цифрово-аналітичні	Інтегральні параметри, графіки, коефіцієнти ефективності	Розвиток аналітичного мислення, цифрових навичок	Повна автоматизація збирання й оброблення даних	Порівняння результатів експерименті в у різних умовах

Джерело: розроблено автором на основі [10]

Отже, віртуальні лабораторії забезпечують реалізацію повного комплексу методів контролю й оцінювання перебігу бродіння. Фізико-хімічні методи забезпечують вимірювання параметрів середовища, що безпосередньо впливають на перебіг ферментаційних процесів. До таких параметрів належать температура, рН середовища, щільність та оптична щільність (OD). Температурні показники сприяють оцінюванню активності ферментів і швидкості метаболічних реакцій, а цифрові симуляції дають змогу студентам визначати оптимальні температурні діапазони реакції. Контроль рН є значущим, оскільки зміни кислотності середовища впливають на інтенсивність бродіння. Оптична щільність використовується для оцінювання концентрації біомаси, а щільність середовища – як показник завершеності процесу та перетворення цукрів на етанол і CO₂.

Біохімічні методи передбачають аналіз складу середовища та продуктів реакції. Віртуальні лабораторії забезпечують визначення концентрації цукрів, утворення етанолу, рівня побічних продуктів (органічні кислоти та леткі сполуки). Студенти можуть спостерігати динаміку споживання субстратів і формування кінцевих продуктів, зокрема оцінювати ферментативну активність і вплив зовнішніх чинників або інгібіторів на інтенсивність реакцій.

Біологічні методи спрямовані на оцінювання стану і життєздатності мікроорганізмів. Віртуальні моделі росту культур відтворюють збільшення популяції у лаг-, лог- та стаціонарній фазах, даючи змогу студентам досліджувати вплив умов середовища на виживаність клітин. Водночас симуляції сприяють моделюванню можливої контамінації реакційного середовища сторонніми мікроорганізмами та її наслідків для продуктивності бродіння, формуючи навички аналізу життєздатності та прогнозування поведінки культур.

Цифрово-аналітичні методи інтегрують усі попередні практики та забезпечують комплексний аналіз процесів. Сенсорні панелі контролю відображають базові параметри в реальному часі: температуру, рН, концентрацію субстратів і продуктів, оптичну щільність та вміст етанолу. Візуалізаційні модулі дають змогу будувати графіки залежностей, діаграми та динамічні моделі, а алгоритми оброблення даних автоматично розраховують швидкість реакцій, конверсію субстрату та ефективність бродіння. Аналітичні інструменти сприяють порівнянню результатів експериментів, оцінюванню похибок і формулюванню обґрунтованих висновків, що є надважливим для розвитку аналітичного мислення та професійних компетенцій.

Навчання методів моніторингу процесів у традиційних умовах передбачає виконання студентами експериментів безпосередньо з живими культурами мікроорганізмів та хімічними реагентами. Це забезпечує реальний досвід роботи з лабораторним обладнанням, вимірювальними приладами та реагентами, формує навички точного проведення експериментів, дотримання технологічних процедур і

правил безпеки. Проте такі заняття мають обмеження: високі витрати матеріалів, ризик помилок, обмежену кількість доступних лабораторій, необхідність у дотриманні санітарно-гігієнічних норм та обмежений час для проведення експериментів [10, с. 876].

Інтеграція віртуальних лабораторій дає змогу частково усунути ці обмеження, забезпечуючи можливість багаторазового повторення дослідів, проведення експериментів у різних умовах та оцінювання альтернативних сценаріїв без ризику для безпеки, пошкодження обладнання або втрати матеріалів. Крім того, цифрові платформи створюють умови для системного поєднання теоретичних знань і практичних дій, що значно підвищує ефективність формування професійних компетенцій студентів і сприяє розвитку аналітичного мислення, здатності моделювати процеси та формулювати обґрунтовані висновки.

Крім того, використання віртуальних лабораторій зменшує психологічний тиск, який виникає при роботі з реальними культурами та реактивами, забезпечує зосередження студентів на розвитку аналітичного мислення та дослідницьких умінь. Цифрові навчальні інструменти створюють освітнє середовище, де помилки сприймаються як частина процесу засвоєння знань і як можливість вдосконалення професійних навичок, а не як чинник ризику.

Для детальнішого порівняння ефективності традиційних і віртуальних лабораторних занять доцільно виокремити основні параметри освітнього процесу, що впливають на формування професійних компетенцій студентів. У таблиці 2 узагальнено основні відмінності між цими практиками, показано переваги та обмеження кожного з методів у навчанні методів моніторингу бродіння.

Таблиця 2

Порівняння традиційних і віртуальних лабораторних занять у навчанні методів моніторингу бродіння

Параметр	Традиційні лабораторії	Віртуальні лабораторії
Безпека	Потребує дотримання санітарних та технічних норм; ризик помилок та травм	Повністю безпечно середовище; немає ризику для студентів
Можливість повторення експериментів	Обмежена через час, ресурси та витратні матеріали	Необмежена
Розвиток практичних навичок	Формує вміння працювати з реальним обладнанням і реагентами	Формує навички планування експериментів, аналізу даних, моделювання процесів
Вартість	Високі витрати на обладнання, матеріали та реагенти	Мінімальні витрати після придбання або розроблення програмного забезпечення

Джерело: розроблено автором

Порівняльний аналіз характеристик традиційних і віртуальних лабораторних занять підтверджує, що найефективнішим є комбіноване використання обох практик. Традиційні заняття забезпечують безпосередній досвід роботи з обладнанням і реагентами, формуючи практичну компетенцію, точність виконання процедур та дотримання технологічних стандартів. Крім того, віртуальні симуляції дають змогу моделювати широкий спектр умов, оперативно обробляти великі обсяги даних, багаторазово повторювати досліди та аналізувати результати, що сприяє розвитку аналітичного мислення, дослідницьких умінь і цифрових компетенцій студентів.

Змішаний формат навчання, де поєднуються лабораторні дослідження з віртуальним моделюванням забезпечує здобувачам освіти порівняння сценаріїв та оцінювання ефективності різних практик. Водночас віртуальне моделювання екстремальних або нетипових умов, що складно реалізувати у реальній лабораторії, стимулює творче розв'язання завдань та підвищує глибину засвоєння теоретичного матеріалу.

Отже, комбінована практика створює навчальне середовище, у якому студенти інтегрують теоретичні знання з практичною діяльністю, оцінюють наслідки змін параметрів процесу, планують експерименти та формують висновки на основі отриманих даних. Це сприяє формуванню повного циклу професійних компетенцій: від практичних навичок роботи з обладнанням до здатності моделювати технологічні процеси, критично оцінювати результати та ухвалювати обґрунтовані рішення. Одночасно інтерактивність цифрових симуляцій підвищує мотивацію студентів, стимулює самостійну діяльність і забезпечує глибше засвоєння навчального матеріалу, що особливо важливо для підготовки висококваліфікованих фахівців у сфері харчових технологій та біотехнологій.

Крім того, використання віртуальних лабораторій дає змогу персоналізувати навчання, адаптуючи освітній процес до індивідуальних потреб студентів, забезпечуючи різні рівні складності та сценарії експериментів, що сприяє підвищенню ефективності засвоєння матеріалу [11, с. 19–20].

Зокрема, віртуальні симулятори забезпечують розвиток цифрових компетенцій, умінь роботи з програмним забезпеченням та навичок моделювання процесів, що є значущим у підготовці фахівців біотехнологічного профілю.

Загалом варто враховувати потенційні обмеження використання віртуальних симуляторів. Повна заміна практичних навичок роботи з реальним обладнанням не завжди доцільна у контексті технологічних дисциплін. Крім того, педагогічна ефективність навчання значною мірою залежить від якості програмного забезпечення, цифрової підготовки студентів і викладачів, зокрема від наявності відповідної комп'ютерної інфраструктури. Обмежена інтерактивність або недостатній контроль деяких симуляторів може знижувати навчальний ефект, тому оптимальним є поєднання цифрових інструментів з традиційними методами проведення лабораторних занять [12, с. 66].

Для детальнішого аналізу ефективності навчання доцільно узагальнити базові організаційно-методичні аспекти освітнього процесу у традиційних та віртуальних лабораторіях, зокрема структуру занять, темп навчання, розвиток критичного мислення та рівень індивідуалізації навчання (табл. 3).

Таблиця 3

**Порівняльні характеристики організаційно-методичних аспектів
традиційної та віртуальної лабораторій**

Параметр освітнього процесу	Традиційна лабораторія	Віртуальна лабораторія
Структура занять	Жорстко регламентовані експерименти за розкладом	Гнучке моделювання з можливістю самостійного вибору умов та сценаріїв
Темп навчання	Залежить від часу підготовки та проведення експерименту	Індивідуальний, можливість пришвидшення або повторення процедур

Параметр освітнього процесу	Традиційна лабораторія	Віртуальна лабораторія
Розвиток критичного мислення	Помірний – студент оцінює результат після завершення експерименту	Високий – можливість досліджувати різні сценарії та причинно-наслідкові зв'язки
Персоналізація навчання	Обмежена – усі студенти виконують однакові завдання одночасно	Висока – адаптація рівня складності та сценаріїв відповідно до потреб студента

Джерело: зроблено автором на основі [13, с. 31-34]

Таким чином, використання віртуальних лабораторій значно розширює можливості студентів у процесі навчання. Гнучка структура занять і індивідуальний темп навчання дають можливість здобувачам освіти самостійно планувати експерименти, повторювати процедури та реалізовувати різні сценарії процесу бродіння. Інтерактивне середовище віртуальної лабораторії забезпечує створення різнорівневих завдань і сценаріїв з поступовим ускладненням, що сприяє адаптації навчання до індивідуальних можливостей студентів, стимулює їхню самостійну роботу та розвиток аналітичних і дослідницьких компетенцій [15, с. 143]. Високий рівень розвитку критичного мислення у віртуальному середовищі прискорює аналіз причинно-наслідкових зв'язків між зміною умов середовища та кінцевими результатами експериментів, що сприяє глибшому розумінню процесів. У поєднанні з традиційними лабораторними заняттями цифрові симуляції створюють комплексне освітнє середовище, що підтримує активну участь студентів, формує аналітичні та дослідницькі навички та забезпечує ефективніше засвоєння теоретичного матеріалу.

Проте традиційні лабораторні заняття залишаються необхідними для формування практичних умінь роботи з реальним обладнанням і технологічними процедурами, розвитку точності виконання експериментів та дотримання виробничих стандартів.

Для підвищення ефективності використання віртуальних лабораторій необхідно забезпечити відповідну комп'ютерну інфраструктуру, підготовку викладачів та регулярне оновлення програмного забезпечення. Оцінювання навчальних результатів повинно враховувати розвиток практичних навичок, аналітичного мислення та здатність інтегрувати теоретичні знання з практичною діяльністю для формування цілісної професійної компетенції.

Висновки

У процесі дослідження було оцінено ефективність використання віртуальних лабораторій у навчанні методів моніторингу бродіння. Отримані результати показали, що цифрові симуляції значно розширюють можливості студентів у плануванні та проведенні експериментів, обробленні та аналізі даних, сприяють розвитку критичного мислення та аналітичних навичок. Віртуальні лабораторії забезпечують високий рівень інтерактивності навчання, дають змогу адаптувати процес до індивідуальних потреб студентів і створюють безпечне середовище для експериментальної діяльності.

Традиційні лабораторні заняття залишаються важливими для формування практичних компетенцій, точності виконання експериментів та дотримання технологічних процедур. Поєднання обох практик у змішаному навчанні забезпечує цілісне формування професійних компетенцій, інтегруючи теоретичні знання з практичними навичками, стимулюючи самостійність і мотивацію студентів.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні адаптивних віртуальних лабораторій, що пропонують різні рівні складності та низку сценаріїв експериментів відповідно до рівня підготовки студентів. Крім того, доцільно вивчати

ефективність змішаного навчання, що поєднує традиційні лабораторні заняття та цифрові симуляції у різних дисциплінах з метою визначення його впливу на формування практичних, аналітичних та цифрових компетенцій. Додатковою перспективою є інтеграція цифрових симуляцій з сучасними методами оцінювання навчальних результатів, що сприятиме об'єктивнішому оцінюванню здатності студентів застосовувати теоретичні знання на практиці та підвищенню якості підготовки висококваліфікованих фахівців у сфері харчових технологій і біотехнологій.

Список використаних джерел

1. Маланюк, Н. М. (2020). Інноваційні педагогічні технології в професійній освіті. *Педагогіка формування творчої особистості у вищій і загальноосвітній школах*, 70(3), 113–118. <https://doi.org/10.32840/1992-5786.2020.70-3.21>
2. Попова, Т. М., Бачинський, Р. О., & Поліщук, Т. В. (2020). Інноваційні методи навчання при вивченні біологічної хімії. *Медична та клінічна хімія*, 22(2), 100–104. <https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2020.v.i2.11367>.
3. Різак, Г. В. (2023). Використання розрахункових задач у викладанні фармацевтичної хімії. *Неперервна професійна освіта: теорія і практика*, 1(74), 68–75. <https://doi.org/10.28925/1609-8595.2023.1.6>.
4. Abelian, A., Dybek, M., Wallach, J., Gaye, B., & Adejare, A. (2020). Pharmaceutical chemistry. In A. Adejare (Ed.), *Remington: The science and practice of pharmacy* (pp. 105–128). Cambridge, MA: Academic Press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-820007-0.00006-4>.
5. Caldas, L. M., Matulewicz, A. T., Koenig, R. A., Wei, X., Hindle, M., & Donohoe, K. L. (2020). 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*, 12(3), 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.cptl.2019.12.017>.
6. Pham, M. T., Kim, J.-M., & Kim, C. H. (2020). Intelligent fault diagnosis method using acoustic emission signals for bearings under complex working conditions. *Applied Sciences*, 10(20). <https://doi.org/10.3390/app10207068>.
7. Sio-Sever, A., Lopez, J. M., Asensio-Rivera, C., Vizan-Isoipe, A., & de Arcas, G. (2022). Improved estimation of end-milling parameters from acoustic emission signals using a microphone array assisted by AI modelling. *Sensors*, 22(10). <https://doi.org/10.3390/s22103807>
8. Lyubenova, V., Zoteva, D., Ignatova, M., Kristeva, D., & Roeva, O. (2025). A system designed for modelling, monitoring, and control of fermentation processes, powered by metaheuristic algorithms. *Processes*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/pr13061632>.
9. Stroia, N., & Lodin, A. (2025). Modeling of must fermentation processes for enabling CO₂ rate-based control. *Mathematics*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/math13101653>.
10. Caño de las Heras, S., Kensington-Miller, B., Young, B., González, V., Krühne, U., Mansouri, S. S., & Baroutian, S. (2021). Benefits and challenges of a virtual laboratory in chemical and biochemical engineering: Students' experiences in fermentation. *Journal of Chemical Education*, 98(3), 866–875. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01227>.
11. Hadibarata, T., & Jusoh, M. N. H. (2023). Strategies for online-education model for project and laboratory-based assessment in environmental monitoring and analysis course. *Acta Pedagogica Asiana*, 2(1), 14–25. <https://doi.org/10.53623/apga.v2i1.168>.
12. Sellberg, C., Nazari, Z., & Solberg, M. (2024). Virtual laboratories in STEM higher education: A scoping review. *Nordic Journal of Systematic Reviews in Education*, 2(1), 58–75. <https://doi.org/10.23865/njsre.v2.5766>.
13. Seifan, M., Shah, U. V., Chen, W., Inguva, P., Chadha, D., & Brechtelsbauer, C. (2020). Use of virtual learning to increase key laboratory skills and essential non-cognitive

characteristics. *Education for Chemical Engineers*, 31, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2020.03.003>.

14. Zhang, N., Liu, Y., & Liu, Y. (2024). Design and implementation of virtual laboratories for higher education sustainability: A case study of Nankai University. *Frontiers in Education*, 8. <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1322263>.

15. Bolshanina, S. B., Dychenko, T. V., & Chaichenko, N. N. (2020). The use of MIX platform for organizing blended learning in teaching general chemistry to students of engineering specialties. *Information Technologies and Learning Tools*, 75(1), 138–152. <https://doi.org/10.33407/itlt.v75i1.2577>.