

©2026

Наталія Стучинська,
Марія Андрійчук




Надійшла до редакції 17 лютого 2026р.
Прийнята до друку 11 травня 2026р.
Опубліковано на сайті 17 червня 2026р.

УДК: 519.876.5:004.94


DOI: [10.24061/3083-5887.j.nmsmme.2026.4.II.1](https://doi.org/10.24061/3083-5887.j.nmsmme.2026.4.II.1)

Математичне моделювання як інструмент формування професійної компетентності майбутніх магістрів біотехнології: дослідження роботи біореактора періодичної дії

Наталія Стучинська

 [0000-0002-5583-899X](https://orcid.org/0000-0002-5583-899X) @: nvstuchynska@gmail.com

Марія Андрійчук

 [0000-0003-0112-3830](https://orcid.org/0000-0003-0112-3830) @: amarid1957@gmail.com

Національний медичний університет ім. О.О.Богомольця, Київ, Україна

Ключові слова:

здобувачі вищої освіти,
компетентнісний підхід,
математичне
моделювання,
біореактор,
періодичний процес,
диференціальні рівняння,
Mathcad,
компетентності,
біотехнології.

Анотація

Біотехнології з року в рік набувають все більшого значення як рушій інноваційного розвитку сучасного технологічного суспільства, охоплюючи все ширші сфери діяльності людини: фармацію, медицину, харчову та хімічну промисловість, відновлення довкілля, екологію.

Істотно зростають вимоги до кадрового забезпечення біотехнологічної галузі, а відтак і до якості процесу підготовки майбутніх біотехнологів. Особливої ваги набуває опанування методів математичного та комп'ютерного моделювання, які дають змогу майбутнім фахівцям проектувати, аналізувати й оптимізувати біотехнологічні процеси відповідно до потреб промисловості та суспільних вимог.

У дослідженні представлено математичний опис процесів, що відбуваються в біореакторі періодичної дії, від оптимізації параметрів якого залежить ефективність біотехнологічного виробництва. Запропонована модель базується на рівняннях Міхаеліса-Ментена та Моно та реалізована в системах Mathcad та Python. Математична модель описує кінетичний модуль біореактора періодичної дії, враховуючи швидкість росту мікробів, споживання субстрату та утворення продукту. Для розв'язування системи диференціальних рівнянь використано оператор Odesolve в Mathcad 15. Отримані результати відтворюють характерну кінетику періодичної ферментації.

Цитування:

Стучинська Н, Андрійчук М. Математичне моделювання як інструмент формування професійної компетентності майбутніх магістрів біотехнології: дослідження роботи біореактора періодичної дії. *Природничі, математичні науки та освіта в медицині* 1(4) 2026 54-62

DOI: [10.24061/3083-5887.j.nmsmme.2026.4.II.1](https://doi.org/10.24061/3083-5887.j.nmsmme.2026.4.II.1)




Розділ 2. Математичні науки в медицині
Section 2. Mathematical sciences in medicine


Розроблена модель може бути застосована в реальних виробничих процесах і водночас має чималий дидактичний потенціал, оскільки дає змогу зрозуміти роль методів математичного та комп'ютерного моделювання в проектуванні біотехнологічних процесів, дослідженні варіантів оптимізації параметрів біореактора, можливостей керування кінетикою росту та швидкістю біохімічних перетворень. Здійснюючи комп'ютерне моделювання біотехнологічних процесів, студенти отримують практичні навички роботи з програмним забезпеченням, навчаються застосовувати сучасні цифрові технології, аналізувати складні біотехнологічні системи, інтерпретувати графічні результати, приймати обґрунтовані рішення та оцінювати ефективність виробництва. Така навчальна модель сприяє формуванню професійної компетентності, передбаченої освітніми програмами підготовки за спеціальністю G21 «Біотехнології та біоінженерія».

Mathematical Modeling as a Tool for Developing the Professional Competence of Biotechnology Master's Students: A Case Study of a Batch Bioreactor

Nataliia Stuchynska

 [0000-0002-5583-899X](https://orcid.org/0000-0002-5583-899X) @: nvstuchynska@gmail.com

Mariia Andriichuk

 [0000-0003-0112-3830](https://orcid.org/0000-0003-0112-3830) @: amarid1957@gmail.com

Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

Key words:

students, HEI, competence-based approach, mathematical modeling, bioreactor, batch process, differential equations, Mathcad, competencies, biotechnology

Abstract

Biotechnology is gaining increasing significance each year as a driver of innovative development in modern technological society, extending across a wide range of human activities including pharmacy, medicine, food and chemical industries and environmental sustainability. Consequently, the requirements for qualified personnel in the biotechnology sector are rising, which enhances the demand for high-quality training of biotechnology students. Special emphasis is placed on mastering mathematical and computer modeling methods, which enable students to design, analyze, and optimize biotechnological processes in line with industrial needs and societal demands.

This study presents a mathematical description of the processes occurring in a batch bioreactor, the parameter optimization of which largely determines the efficiency of biotechnological production. The proposed model is based on the Michaelis-Menten and Monod equations, and the differential equations system is solved using the Odesolve operator in Mathcad 15, and the results reproduce characteristic kinetics of batch fermentation. The mathematical model describes the kinetic module of a batch bioreactor, accounting for microbial growth rate, substrate consumption, and product formation.

The developed model can be applied in real production processes and simultaneously possesses significant didactic value. It allows students to understand the role of mathematical and computer modeling in the design of various types of biotechnological processes, explore options for optimizing bioreactor parameters, and control growth kinetics and biochemical transformation rates. The students here acquire practical skills of dealing with the software, learn to apply modern digital technologies, analyze complex biotechnological systems, predict process behavior, interpret graphical results, make informed decisions, and evaluate production efficiency. Such an educational model contributes to the formation of professional competencies defined in the curriculae for specialty G21 Biotechnology and Bioengineering.

Зміст

Вступ	56
Методи досліджень	57
Результати і обговорення	57
Висновки та перспективи подальших досліджень	60
Список використаних джерел	61

Вступ

Система підготовки фахівців для сфери біотехнологій та біоінженерії зазнає невпинних змін, що обумовлені стрімким прогресом сфери біотехнологій та біоінженерії [1,2], цифровізацією [3,4], пришвидшеною інтеграцією системи освіти України у європейський освітній простір. Освітням України сьогодні доводиться долати не лише виклики глобалізаційного характеру, а й виклики та загрози воєнного стану, що зумовлений широкомасштабним вторгненням РФ на територію нашої країни.

Біотехнології (*biotechnologia* від грецької *bios* – життя, *techne* – майстерність і *logos* – навчання) все ширше проникають в різні сфери діяльності сучасної людини – фармацію, медицину, харчову, хімічну промисловість тощо. Наукову основу біотехнологія одержала у середині 19 століття завдяки роботам Луї Пастера, у яких досліджувався зв'язок процесів бродіння з діяльністю мікроорганізмів.

Поштовхом для розвитку мікробіологічного синтезу і становленню промислового виробництва став біосинтез пеніцилінів методами ферментації (40-50-ті роки минулого століття). Так почалась ера антибіотиків. «Теоретичні основи безперервного керованого культивування мікробів, які розробив у 50-х роках Жак Моно (1910-1976 рр.), стали спонукальним мотивом для розробки способів великомасштабного культивування клітин різного походження» [5]. Набула актуальності проблема кон-

струювання спеціального обладнання для вирощування біологічних культур у контрольованих стабільних умовах. Так з'явилися перші біореактори (ферментери).

В Україні в рамках національної стратегії «WINWIN 2030» впроваджена «Галузева стратегія розвитку біотехнологій (BioTech)» (презентована Міністерством цифрової трансформації України 15 грудня 2023 року), яка спрямована на формування сучасної біотехнологічної екосистеми, розвиток біофармацевтики, медичних та промислових біотехнологій, а також інтеграцію науки, освіти й виробництва [6]. На підтримку модернізаційних змін спрямоване розпорядження Кабінету міністрів України від 31 грудня 2024 р. № 1351-року, яке як стратегічну ціль визначає створення сприятливого регуляторного режиму для розвитку біологічних технологій [2].

Такі реалії сьогодення обумовлюють підвищення вимог до кадрового забезпечення біотехнологічної галузі, загострюючи проблему забезпечення якості підготовки майбутніх біотехнологів, розвиток їх предметних, ключових та фахових компетентностей, і спонукають до пошуку нових форм методів та засобів в організації освітнього процесу. Особливої ваги набувають методи математичного та комп'ютерного моделювання, яке давно і ефективно застосовують для опису популяційної динаміки мікроорганізмів, імунних реакцій та механізмів дії лікарських засобів [7].

Розділ 2. Математичні науки в медицині
Section 2. Mathematical sciences in medicine

Мета дослідження - здійснити математичний опис процесів, що відбуваються у періодичному біореакторі, проаналізувати отримані математичні моделі з позицій формування ключових та професійних компетентностей здобувачів освіти у сфері біотехнологій.

Методи досліджень

Для досягнення мети дослідження було застосовано теоретичні та емпіричні методи досліджень, а саме:

- збір та систематизацію наукових робіт щодо опису процесів, які відбуваються в періодичному біореакторі;
- методи математичного та комп'ютерного моделювання з використанням систем Mathcad та Python;
- аналіз ключових та професійних компетентностей здобувачів освіти у сфері біотехнологій та можливостей їх формування засобом комп'ютерного моделювання.

Результати і обговорення

Сучасні біореактори – це складні системи з сенсорами, датчиками контролю рН, температури, з автоматизованим керуванням, яке здійснюється з використанням математичних та комп'ютерних моделей.

Перша математична модель, яка використовується для опису ферментативної кінетики була оприлюднена в журналі *Biochemische Zeitschrift* (видавництво Springer, Berlin) у 1913 році німецько-американським біохіміком Леонором Міхаелісом (англ. Leonor Michaelis) та канадійською біохімікою Мод Леонорою Ментен (англ. Maud Leonora Menten), в їх спільній статті «Die Kinetik der Invertinwirkung» для кінетики інвертази – ферменту, який каталізує гідроліз сахарози.

На сьогодні модель Міхаеліса-Ментен є «однією з основних та найпоширеніших моделей у біохімічних та фармацевтичних дослідженнях. Вона описує залежність швидкості утворення продукту P ферментативних реакцій, $V=dP/dt$, від концентрацій реагентів, зокрема концентрації субстрату S » [8].

З часом математичне моделювання стало невіддільною частиною біотехнологічних процесів. З'являються математичні моделі, які описують ріст популяцій

мікроорганізмів з насиченням – логістична модель (Verhulst та Gompertz). Модель Lotka–Volterra для конкурентних взаємодій, дає математичну основу для опису міжвидових взаємодій в екосистемах.

Модель Monod (1) стала основною для моделювання росту в біотехнологічних процесах.

Сучасне промислове виробництво продуктів біосинтезу є єдиною біотехнологічною системою, що складається з послідовних стадій та операцій. Стадія ферментації є основною стадією в біотехнологічному процесі, оскільки в її ході відбувається взаємодія продуцента із субстратом і утворення цільових продуктів. Ця стадія здійснюється в біохімічному реакторі (ферментері).

За режимом роботи ферментери поділяються на три категорії.

- *Періодичні* (batch) – завантажуються один раз, процес триває без додавання субстрату.
- *Напівперіодичні* (fed-batch) – поживний субстрат додається протягом процесу; найчастіший промисловий варіант.
- *Безперервні* (chemostat, continuous) – постійний притік і відтік середовища; стабільний стаціонарний режим.

Розділ 2. Математичні науки в медицині
 Section 2. Mathematical sciences in medicine

Ми поділяємо позицію, що «здобувачам вищої освіти зі спеціальності біотехнології та біоінженерія, важливо розуміти принцип роботи біореакторів, вміти моделювати процеси, які там відбуваються» [7]. У зв'язку з цим метою даного дослідження є постановка та розв'язання задачі, максимально наближеної до реальних виробничих умов, а саме – здійснення математичного опису процесів у періодичному біореакторі та розроблення відповідної комп'ютерної моделі його функціонування.

Для ілюстрації зазначених підходів і перевірки їх прикладної ефективності розглядається модель реального біотехнологічного процесу. Зокрема, передбачається проведення пілотної ферментації у періодичному біореакторі об'ємом 50 л з метою отримання цільового метаболіту P, який синтезується мікроорганізмами X у процесі їх росту на субстраті S.

За результатами попереднього калібрування визначено такі початкові параметри процесу:

- максимальна швидкість росту мікроорганізмів: $\mu_{\max} = 0,6 \text{ год}^{-1}$,
- константа насичення за субстратом: $K_s = 0.3 \text{ г/л}$,
- константа деградації біомаси: $k_d = 0.01 \text{ год}^{-1}$,
- початкова концентрація субстрату: $S(0) = 20 \text{ г/л}$,
- початкова концентрація біомаси: $X(0) = 0.1 \text{ г/л}$,
- вихід біомаси зі субстрату: $Y_{xs} = 0.45$,
- максимальна швидкість синтезу продукту: $V_{\max} = 1.5 \text{ г/(л·год)}$,
- константа Міхаеліса для продукту: $K_m = 1 \text{ г/л}$,
- Ферментація проводиться впродовж 40 годин.

Технолог регулює початкові концентрації середовища та визначає кінетичні параметри згідно з попередніми лабораторними випробуваннями. Спрогнозувати динаміку росту біома-

си (X), споживання субстрату (S) та синтезу продукту (p).

Для математичного опису процесів скористаємося відомими рівняннями Міхаеліса–Ментен та Монода. Зростання біомаси описано рівнянням Монода (1), утворення продукту описується кінетикою Міхаеліса-Ментена (2):

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (1)$$

$$V = \frac{V_{\max} \cdot S}{K_m + S} \quad (2)$$

Для моделювання роботи біореактора ми складемо систему диференціальних рівнянь (3), яка описує ріст мікроорганізмів, споживання субстрату та утворення продукту:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = \mu(S)X - k_d X \\ \frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/S}} \mu(S)X - \frac{1}{Y_{P/S}} \nu(S)X \\ \frac{dP}{dt} = \nu(S)X - k_d P \end{cases} \quad (3)$$

де:

X – концентрація біомаси (клітинна маса мікроорганізмів), г/л.

S – концентрація субстрату (поживної речовини), г/л.

P – концентрація продукту метаболізму, г/л.

$\mu(S)$ – питома швидкість росту мікроорганізмів, яка залежить від концентрації субстрату (часто описується рівнянням Міхаеліса–Ментен (2) або Монода (1)).

$\nu(S)$ – питома швидкість синтезу продукту.

$Y_{x/s}$ – вихід біомаси з субстрату (кількість біомаси, утворена з одиниці субстрату $Y_{x/s} = 0,45$).

$Y_{p/s}$ – вихід продукту з субстрату, ($Y_{p/s} = 0,25$).

k_d – константа швидкості відмирання клітин (деградації біомаси).

k_p – константа швидкості деградації або розпаду продукту. Константа k_p під час

Розділ 2. Математичні науки в медицині
 Section 2. Mathematical sciences in medicine

чисельного моделювання була прийнята рівною нулю ($k_p = 0$) і фактично не впливає на динаміку системи.

Проаналізуємо біологічний зміст рівнянь:

$$\frac{dX}{dt} = \mu(S)X - k_d X$$

– біомаса зростає зі швидкістю $\mu(S)X$, але зменшується через відмирання клітин $k_d X$.

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/S}} \mu(S)X - \frac{1}{Y_{P/S}} \nu(S)X$$

– субстрат витрачається на ріст мікроорганізмів та на утворення продукту.

$$\frac{dP}{dt} = \nu(S)X - k_d P$$

– продукт утворюється внаслідок метаболізму $\nu(S)X$ і може руйнуватися $k_d P$.

Продемонструємо створення комп'ютерної моделі за допомогою Mathcad15 (Рис.1).

Математична модель для періодичного біореактора має вигляд системи диференціальних рівнянь. Аналітично розв'язати таку систему важко. Застосовуючи систему комп'ютерної математики Mathcad, ми скористалися вбудованим чисельним блоком Odesolve, який дозволяє швидко отримати точні чисельні рішення для всіх змінних. Mathcad дає можливість змінювати початкові умови, параметри кінетики або тривалість процесу та одразу бачити вплив на динаміку.

Mathcad дозволяє будувати графіки всіх змінних після розв'язання системи диференціальних рівнянь (Рис.2).

Проаналізувавши комп'ютерну модель та її графічну інтерпретацію можемо спостерігати такі динамічні зміни:

- Субстрат на початку має високу концентрацію, в процесі росту клітин знижується і в стаціонарній фазі має низький рівень.
- Біомаса спочатку має лаг-фазу, а потім зростання збільшується, надалі наступить стаціонарна фаза.

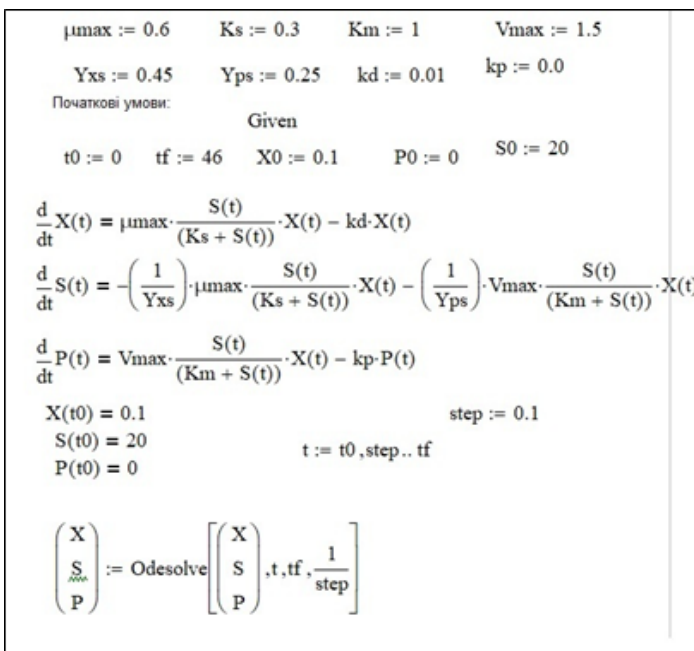


Рис. 1. Модель виробництва біоактивних речовин у періодичному біореакторі.

- Продукт починає зростати після росту біомаси.

Ми розглянули приклад виробничо-орієнтованої задачі, що відтворює типові умови реального біотехнологічного виробництва [12-18]. Такі завдання мають чималий дидактичний потенціал, формуючи здатність розв'язувати складні задачі та проблеми біотехнологій. Наша думка збігається з позицією авторів [9, 10, 19], які стверджують, що існує значний

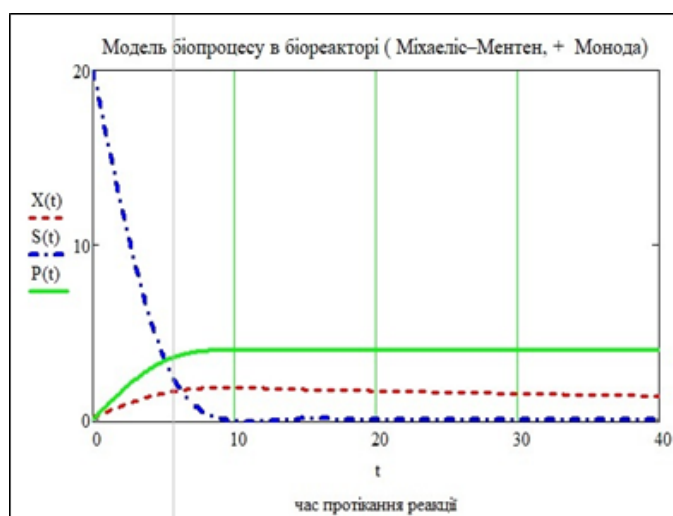


Рис. 2. Графічне відображення моделі виробництва біоактивних речовин у періодичному біореакторі.

Розділ 2. Математичні науки в медицині
Section 2. Mathematical sciences in medicine

розрив і значний потенціал у застосуванні методів проектування в підготовці фахівців для галузі охорони здоров'я і біотехнологічної сфери.

Опанування методами моделювання дає майбутнім фахівцям інструментарій для аналізу й оптимізації біотехнологічних процесів згідно сучасних вимог промисловості та державної стратегії розвитку галузі.

Студенти-біотехнологи, що навчаються на нашій кафедрі, набувають досвід розв'язання комплексних завдань також на прикладі створення комп'ютерної моделі за окремими математичними моделями Міхаеліса-Ментен або Монода. Робота з математичними моделями та програмними засобами (Mathcad, Python) сприяє розвитку загальних компетентностей – здатності до пошуку, оброблення та аналізу інформації. Моделювання процесів у періодичному біореакторі за допомогою систем диференціальних рівнянь та їх комп'ютерної реалізації в Mathcad 15, націлене на формування професійної компетентності здобувачів освіти за спеціальністю G21 «Біотехнології та біоінженерія». Тут однією з ключових компетентностей визначено «...здатність розробляти нові біотехнологічні об'єкти і технології та підвищувати ефективність існуючих технологій на основі експериментальних та/або теоретичних досліджень та/або комп'ютерного моделювання».

У процесі виконання професійно-орієнтованих завдань, студенти опану-

ють застосування математичних моделей до реальних біотехнологічних процесів. Отримають практичні навички в роботі з системами комп'ютерного моделювання (наприклад, Mathcad), розуміння зв'язку між кінетичними параметрами та технологічними режимами біореактора.

Ефективність біотехнологічного виробництва значною мірою залежить від оптимізації параметрів біореактора, керування кінетикою росту та швидкістю біохімічних перетворень. З огляду на складність цих процесів, важливою складовою підготовки сучасних фахівців є формування здатності застосовувати сучасні цифрові технології [20], виконувати аналіз складних біотехнологічних систем, прогнозувати поведінку процесів у біореакторі та приймати обґрунтовані рішення. Відтак, моделювання роботи біореактора виступає як універсальний інструмент розвитку ключових та професійних компетентностей здобувачів освіти у сфері біотехнологій.

Використання практико-орієнтованих завдань (кейсів) у процесі підготовки здобувачів спеціальності «Біотехнології та біоінженерія» сприяє формуванню практичних навичок необхідних для аналізу даних, використання сучасного програмного забезпечення, розв'язання біотехнологічних завдань. Наведені у роботі приклади та методи їх розв'язання демонструють можливості математичного моделювання як інструменту прийняття рішень у реальних виробничих умовах.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У роботі представлено математичний опис процесу функціонування періодичного біореактора. Математична модель представлена системою диференціальних рівнянь, які є базою опису кінетичних процесів виробництва продуктів біосинтезу.

Реалізація математичної моделі за допомогою Mathcad дала можливість наочно інтерпретувати отримані результати.

Наведені приклади біотехнологічних завдань та методи їх вирішення за допомогою математичного та комп'ютерного моделювання, які є інструментом формування та розвитку ключових та професійної компетентності майбутніх фахівців у сфері біотехнологій.

Побудована модель може бути рекомендована для використання у на-

Розділ 2. Математичні науки в медицині
Section 2. Mathematical sciences in medicine

вчальному процесі та сфері виробництва для прогнозування та оптимізації параметрів біотехнологічних процесів.

У подальших дослідженнях планується створювати математичні та комп'ютерні моделі для різних типів біореакторів. Також важливо враховувати додаткові фактори (варіативність субстратів, рН фактори тощо). Плану-

ється використання математичних моделей для прогнозування ефективності. Розробка моделей оптимально управління періодичними та безперервними процесами. З освітньою метою планується розробка практичних завдань для підвищення компетентності у сфері комп'ютерного моделювання.

Конфлікт інтересів

Автори декларують відсутність фінансових або інших конфліктів інтересів, які могли вплинути на результати, інтерпретацію та висновки дослідження.

Список використаних джерел

1. Stuchynska, N. V., Belous, I. V., & Mykytenko, P. V. (2021). Use of modern cloud services in radiological diagnostics training. *Wiadomości Lekarskie*, 78(3). Retrieved from <https://www.scopus.com/record/display>
2. Iurii, K., Reva, T., Stuchynska, N., Pavlo, M., Inna, K., & Chkhalo, O. (2022). Digital competence as a necessary component of the professional competence of pharmaceutical industry employees. *Archives of Pharmacy Practice*, 13(1), 82–87. <https://doi.org/10.51847/8OrtVmWGRO>
3. Xiao, S., Yang, J., He, J., Qu, L., & Chen, S. (2023). Launching advanced biotechnology to elevate biotechnology research across disciplines, from biomedicine to agriculture. *Advanced Biotechnology*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.1007/s44307-023-00001-9>
4. Про схвалення Стратегії цифрового розвитку інноваційної діяльності України на період до 2030 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1351-2024-%D1%80#Text>
5. Стучинська, Н. В., Микитенко, П. В., & Андрійчук, М. Д. (2025). Комп'ютерне та математичне моделювання в біотехнологіях та біоінженерії: освітній аспект. *Медицина та фармація: освітні дискурси*, (3), 77–83. <https://doi.org/10.32782/eddiscourses/2025-3-11>
6. Wikipedia. (n.d.). *Біотехнологія*. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Біотехнологія>
7. Юлевич, О. В. І., Луговий, С. І., Каратєєва, О. І., & Баркар, Є. В. (2022). Біотехнології та біоінженерія. Вступ до фаху (навчальний посібник). МНАУ.
8. Чалий К., Кривенко І. Андрійчук М. Кінетичне моделювання біохімічних реакцій із застосуванням аналітичного інструментарію Mathcad. *Медична наука України*. 2024. No 20 (2). С. 68–78.
9. González-Cortés, J. J., Cantero, D., & Ramírez, M. (2025). Project-Based Learning in Bioprocess Engineering: MATLAB Software as a Tool for Industrial-Scale Bioreactor Design. *Computer Applications in Engineering Education*, 33(1). <https://doi.org/10.1002/cae.22811>
10. Kuchyn, I. L., Vlasenko, O. M., Melnyk, V. S., Stuchynska, N. V., Kucherenko, I. I., & Mykytenko, P. V. (2022). Simulation training and virtual patients as a component of classroom training of future doctors under COVID-19 conditions. *Wiadomości Lekarskie*, 75(5 Pt 1), 1118–1123. <https://doi.org/10.36740/WLek202205112>
11. Стучинська, Н. В., Андрійчук, М. Д., & Микитенко, П. В. (2025). Оптимізація виробничих та логістичних задач у фармації засобами математичного та комп'ютерного моделювання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, (1(8)). [https://doi.org/10.20998/2222-0631.2025.01\(8\).14](https://doi.org/10.20998/2222-0631.2025.01(8).14)
12. Білецький, В. С., & Скаун, Л. М. (2019). *Основи біотехнології*. НТУ «ХПІ».
13. Соловійов, В. І., & Дуброва, Т. О. (2020). Комп'ютерне моделювання біотехнологічних процесів. КНЕУ.
14. Козлов, В. М. (2018). *Біоінженерія: Навчальний посібник*. ЛНУ.
15. Гриценко, В. П. (2021). *Біотехнологія: Сучасні методи*. Либідь.
16. Nielsen, J., Villadsen, J., & Liden, G. (2017). *Bioreaction engineering principles* (3rd ed.). Springer.
17. Shuler, M. L., & Kargi, F. (2017). *Bioprocess engineering: Basic concepts* (3rd ed.). Prentice Hall.
18. Saha, B. C., & Hayashi, K. (Eds.). (2019). *Lignocellulose biodegradation*. American Chemical Society.
19. Стучинська Н., Новікова І. Проектування сучасного освітнього середовища на засадах особистісно орієнтованого та компетентнісного підходів. *Наукові записки*. Серія: Проблеми методики фі-

Розділ 2. Математичні науки в медицині
Section 2. Mathematical sciences in medicine

зико-математичної і технологічної освіти. Випуск 10(2). С. 142–148.

20. N. V. Mospan, V. O. Ognevyuk, and S. S. Sysoieva, "Emergency higher education digital transformation:

Ukraine's response to the COVID-19 pandemic", ITLT, vol. 89, no. 3, pp. 90–104, Jun. 2022, doi: 10.33407/itlt.v89i3.4827.

References

1. Stuchynska, N. V., Belous, I. V., & Mykytenko, P. V. (2021). Use of modern cloud services in radiological diagnostics training. *Wiadomości Lekarskie*, 78(3). Retrieved from <https://www.scopus.com/record/display>
2. Iurii, K., Reva, T., Stuchynska, N., Pavlo, M., Inna, K., & Chkhalo, O. (2022). Digital competence as a necessary component of the professional competence of pharmaceutical industry employees. *Archives of Pharmacy Practice*, 13(1), 82–87. <https://doi.org/10.51847/8OrtVmWGRO>
3. Xiao, S., Yang, J., He, J., Qu, L., & Chen, S. (2023). Launching advanced biotechnology to elevate biotechnology research across disciplines, from biomedicine to agriculture. *Advanced Biotechnology*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.1007/s44307-023-00001-9>
4. Pro skhvalennia Stratehii tsyfrovoho rozvytku innovatsiinoi diialnosti Ukrainy na period do 2030 roku. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1351-2024-%D1%80#Text>
5. Stuchynska, N. V., Mykytenko, P. V., & Andriichuk, M. D. (2025). Komputerne ta matematyчне modeliuвання v biotekhnolohiiakh ta bioinzhenerii: osvittii aspekt. *Medytsyna ta farmatsiia: osvittii diskursy*, (3), 77–83. <https://doi.org/10.32782/eddiscourses/2025-3-11>
6. Vikipediia. (n.d.). Biotekhnolohiia. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Біотехнологія>
7. Yulevych, O. V. I., Luhovyi, S. I., Karatieieva, O. I., & Barkar, Ye. V. (2022). Biotekhnolohii ta bioinzheneriia. *Vstup do fakhu (navchalnyi posibnyk)*. MNAU.
8. Chalyi, K., Kryvenko, I., & Andriichuk, M. (2024). Kinetyчне modeliuвання biokhimichnykh reaktsii iz zastosuvanniam analitychnoho instrumentariiu Mathcad. *Medychna nauka Ukrainy*, 20(2), 68–78.
9. González-Cortés, J. J., Cantero, D., & Ramírez, M. (2025). Project-Based Learning in Bioprocess Engineering: MATLAB Software as a Tool for Industrial-Scale Bioreactor Design. *Computer Applications in Engineering Education*, 33(1). <https://doi.org/10.1002/cae.22811>
10. Kuchyn, I. L., Vlasenko, O. M., Melnyk, V. S., Stuchynska, N. V., Kucherenko, I. I., & Mykytenko, P. V. (2022). Simulation training and virtual patients as a component of classroom training of future doctors under COVID-19 conditions. *Wiadomości Lekarskie*, 75(5 Pt 1), 1118–1123. <https://doi.org/10.36740/WLek202205112>
11. Stuchynska, N. V., Andriichuk, M. D., & Mykytenko, P. V. (2025). Optymizatsiia vyrobnychkh ta lohistychnykh zadach u farmatsii zasobamy matematychnoho ta kompiuternoho modeliuвання. *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu "KhPI". Serii: Matematyчне modeliuвання v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, (1(8)). [https://doi.org/10.20998/2222-0631.2025.01\(8\).14](https://doi.org/10.20998/2222-0631.2025.01(8).14)
12. Biletskyi, V. S., & Skakun, L. M. (2019). *Osnovy biotekhnolohii*. NTU "KhPI".
13. Soloviov, V. I., & Dubrova, T. O. (2020). *Kompiuterne modeliuвання biotekhnolohichnykh protsesiv*. KNEU.
14. Kozlov, V. M. (2018). *Bioinzheneriia: Navchalnyi posibnyk*. LNU.
15. Hrytsenko, V. P. (2021). *Biotekhnolohiia: Suchasni metody*. Lybid.
16. Nielsen, J., Villadsen, J., & Liden, G. (2017). *Bioreaction engineering principles* (3rd ed.). Springer.
17. Shuler, M. L., & Kargi, F. (2017). *Bioprocess engineering: Basic concepts* (3rd ed.). Prentice Hall.
18. Saha, B. C., & Hayashi, K. (Eds.). (2019). *Lignocellulose biodegradation*. American Chemical Society.
19. Stuchynska N., Novikova I. *Proektuvannia suchasnoho osvittnoho seredovyshcha na zasadakh osobystisno oriientovanoho ta kompetentnisnoho pidkhodiv. Naukovi zapysky. Serii: Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnolohichnoi osvity. Vypusk 10(2). S. 142–148*
20. N. V. Mospan, V. O. Ognevyuk, and S. S. Sysoieva, "Emergency higher education digital transformation: Ukraine's response to the COVID-19 pandemic", ITLT, vol. 89, no. 3, pp. 90–104, Jun. 2022, doi: 10.33407/itlt.v89i3.4827.