



ISSN 2450-6486

<http://ehs.eeipsy.org>DOI: <https://doi.org/10.38014/ehs-ss.2025.4.06>

This publication was made with the funds of a joint Grant of
EEIP (Ukraine - France) and ChF "Education: Future"



Наталія СТУЧИНСЬКА,
Марія АНДРІЙЧУК

Математичне моделювання періодичного біореактора як засіб формування професійної компетентності магістрів біотехнологій

NATALIIA STUCHYNSKA, MARIIA ANDRIICHUK. **Mathematical modeling of a batch bioreactor as a means of forming professional competence of masters of Biotechnology.** *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.*



Received 12.12.2025
Peer-reviewed 12.20.2025
Revised version received 12.24.2025
Accepted 12.27.2025

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.

Keywords: *students, HEI, competence-based approach, mathematical modeling, bioreactor, batch process, differential equations, Mathcad, Python, competencies, biotechnology.*

1. Постановка і актуальність проблеми

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

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 [5]. 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 [4].

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

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, 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.

2. Мета роботи

Здійснити математичний опис процесів, які протікають в періодичному біореакторі, проаналізувати отримані математичні моделі, виконати їх реалізацію в системі Mathcad та Python.

Біотехнології (βιοτεχνολογία від грецької bios – життя, techne – майстерність і logos – навчання) все ширше проникають в різні сфери діяльності сучасної людини – фармацію, медицину, харчову, хімічну промисловість тощо. «З найдавніших часів людина використовувала біотехнологічні процеси при хлібопеченні, приготуванні кисломолочних продуктів, у виноробстві» [6], але наукову основу біотехнологія одержала у середині 19 століття

завдяки роботам Луї Пастера, у яких досліджувався зв'язок процесів шумування з діяльністю мікроорганізмів.

Поштовхом для розвитку мікробіологічного синтезу і становленню промислового виробництва став біосинтез пеніцилінів методами ферментації (40-50-ті роках минулого століття). Так почалась ера антибіотиків. У 60-70-ті роки 20 століття почала бурхливо розвиватись клітинна інженерія» [6]. Вікіпедія. «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» [7]. Набула актуальності проблема конструювання спеціального обладнання для вирощування біологічних культур у контрольованих стабільних умовах. Так з'явилися перші біореактори (ферментери).

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 Invertin wirkung» 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 $\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_S + S}$ стала основною для моделювання росту в біотехнологічних процесах.

3. Виклад основного матеріалу

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 приток і відтік середовища; стабільний стаціонарний режим.

Ми поділяємо думку, що «здобувачам вищої освіти зі спеціальності біотехнології та біоінженерія, важливо розуміти принцип роботи біореакторів, вміти моделювати процеси, які там відбуваються» [5]. Саме тому, ми ставили перед собою максимально наближене до виробничих завдання – здійснити математичний опис процесів, що протікають в періодичному біореакторі, та створити комп'ютерну модель роботи періодичного біореактора.

Для виробництва біоактивних речовин планується запустити *пілотну ферментацію у періодичному біореакторі об'ємом 50 літрів* для отримання цільового метаболіту P , який утворюється мікроорганізмами X під час росту на субстраті S . В результаті калібрування були встановлені такі початкові параметри:

- 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 протягом 40 годин.

Технолог регулює початкові концентрації середовища та визначає кінетичні параметри згідно з попередніми лабораторними випробуваннями.

Спрогнозувати динаміку росту біомаси (X), споживання субстрату(S) та синтезу продукту(p).

Для математичного опису процесів скористаємося відомими рівняннями Міхаеліса–Ментен та Монода. Зростання біомаси

описано рівнянням Монода: $\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S}$, утворення продукту описується кінетикою Міхаеліса-Ментена: $V = \frac{V_{\max} \cdot S}{K_M + S}$

Для моделювання роботи біореактора ми складемо систему диференціальних рівнянь, яка описує ріст мікроорганізмів, споживання субстрату та утворення продукту, 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 або Монода).

$v(S)$ – питома швидкість синтезу продукту.

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

$Y_{p/s}$ – вихід продукту з субстрату.

k_d – константа швидкості відмирання клітин (деградації біомаси).

k_p – константа швидкості деградації або розпаду продукту.

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 $k_d X$.

$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{x/s}} \mu(S)X - \frac{1}{Y_{p/s}} v(S)X$ – субстрат витрачається на ріст мікроорганізмів та на утворення продукту.

$\frac{dP}{dt} = v(S)X - k_p P$ – продукт утворюється внаслідок метаболізму

$v(S)X$ і може руйнуватися $k_p P$.

Продемонструємо створення комп'ютерної моделі за допомогою Mathcad15.

Математична модель для періодичного біореактора має вигляд системи диференціальних рівнянь. Аналітично розв'язати таку

$$\begin{aligned}
 &\mu_{\max} := 0.6 \quad K_s := 0.3 \quad K_m := 1 \quad V_{\max} := 1.5 \\
 &Y_{xs} := 0.45 \quad Y_{ps} := 0.25 \quad k_d := 0.01 \quad k_p := 0.0 \\
 &\text{Початкові умови:} \quad \text{Given} \\
 &t_0 := 0 \quad t_f := 46 \quad X_0 := 0.1 \quad P_0 := 0 \quad S_0 := 20 \\
 &\frac{d}{dt} X(t) = \mu_{\max} \cdot \frac{S(t)}{(K_s + S(t))} \cdot X(t) - k_d \cdot X(t) \\
 &\frac{d}{dt} S(t) = -\left(\frac{1}{Y_{xs}}\right) \cdot \mu_{\max} \cdot \frac{S(t)}{(K_s + S(t))} \cdot X(t) - \left(\frac{1}{Y_{ps}}\right) \cdot V_{\max} \cdot \frac{S(t)}{(K_m + S(t))} \cdot X(t) \\
 &\frac{d}{dt} P(t) = V_{\max} \cdot \frac{S(t)}{(K_m + S(t))} \cdot X(t) - k_p \cdot P(t) \\
 &X(t_0) = 0.1 \quad \text{step} := 0.1 \\
 &S(t_0) = 20 \\
 &P(t_0) = 0 \quad t := t_0, \text{step}.. t_f \\
 &\begin{pmatrix} X \\ S \\ P \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} X \\ S \\ P \end{pmatrix}, t, t_f, \frac{1}{\text{step}} \right]
 \end{aligned}$$

Рис. 1. Модель виробництва біоактивних речовин у періодичному біореакторі

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.

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

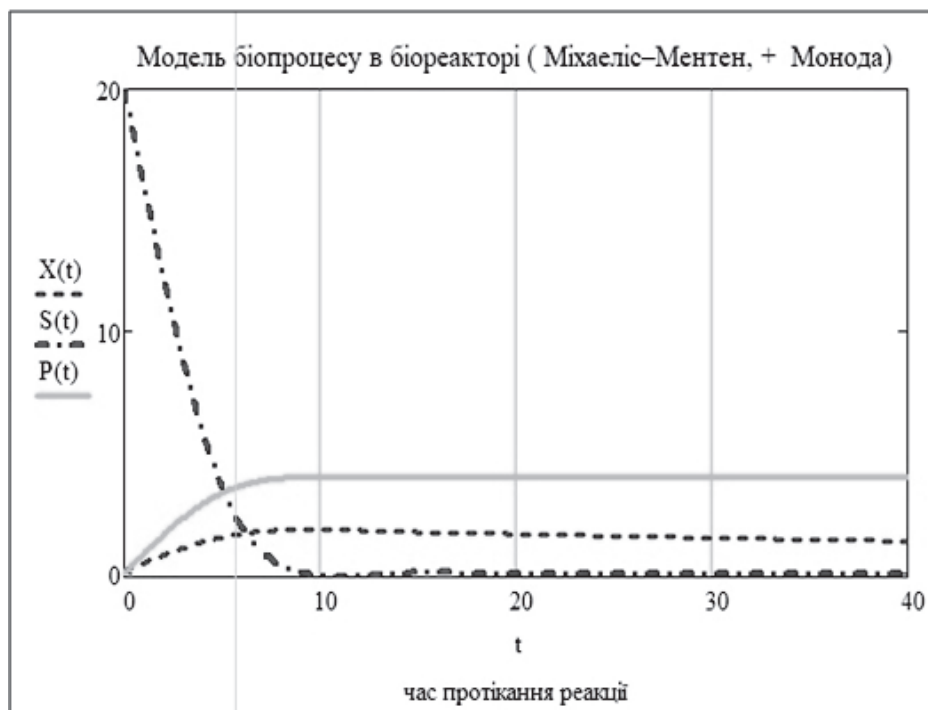


Рис. 2. Графічне відображення моделі виробництва біоактивних речовин у періодичному біореакторі

Субстрат на початку має високу концентрацію, в процесі росту клітин знижується і в стаціонарній фазі має низький рівень. Біомаса спочатку має лаг-фазу, після чого зростання збільшується, надалі наступить стаціонарна фаза. Продукт починає зростати після росту біомаси.

Ми розглянули приклад виробничо орієнтованої задачі, що відтворює типові умови реального біотехнологічного виробництва. Такі завдання мають чималий дидактичний потенціал, формуючи здатність розв'язувати складні задачі та проблеми біотехнологій. Наша думка збігається з позицією авторів [9], які стверджують, що існує значний розрив і значний потенціал у застосуванні методів проектування в підготовці фахівців для біотехнологічної сфери.

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».

В процесі виконання професійно-орієнтованих завдань, студенти опанують застосування математичних моделей до реальних біотехнологічних процесів. Отримують практичні навички в роботі з системами комп'ютерного моделювання (наприклад, Mathcad), розуміння зв'язку між кінетичними параметрами та технологічними режимами біореактора.

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.

4. 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 навчальному 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). Планується 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.

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. 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. Vikipediia. (n.d.). *Biotehnohohiia*. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Біотехнологія>
7. Юлевич, О. В. І., Лутовий, С. І., Каратеева, 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>

Transliteration of 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). Kompiuterne ta matematychni modeliuvannia v biotekhnolohiiakh ta bioinzhenierii: osvithni aspekt. *Medytsyna ta farmatsiia: osvithni dyskursy*, (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 bioinzhenierii. *Vstup do fakhu (navchalnyi posibnyk)*. MNAU.
8. Chalyi, K., Kryvenko, I., & Andriichuk, M. (2024). Kinetychni modeliuvannia biokhimichnykh reaktsii iz zastosuvanniam analitychnoho instrumentarii 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>

Authors

Natalia Vasylivna STUCHYNSKA
*Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Medical and Biological
Physics and Informatics, O.O. Bogomolets National
Medical University,
Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5583-899X>
E-mail: nvstuchynska@gmail.com*

Maria Dmytrivna ANDRIYCHUK
*Lecturer, Department of Medical and Biological
Physics and Informatics,
O.O. Bogomolets National Medical University,
Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0112-3830>
E-mail: amarid1957@gmail.com*

Abstracts

НАТАЛІЯ СТУЧИНСЬКА, МАРІЯ АНДРІЙЧУК. **Математичне моделювання періодичного біореактора як засіб формування професійної компетентності магістрів біотехнологій.** Біотехнології з року в рік набувають все більшого значення як рушій інноваційного розвитку сучасного технологічного суспільства, охоплюючи все ширші сфери діяльності людини: фармацевцію, 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 методами математичного та комп'ютерного моделювання, які дають змогу майбутнім фахівцям проєктувати, аналізувати й оптимізувати біотехнологічні процеси відповідно до потреб промисловості та суспільних вимог.

В роботі здійснено математичний опис процесів, які протікають в періодичному біореакторі, від оптимізації параметрів якого

значною мірою залежить ефективність біотехнологічного виробництва. Розроблена нами модель ґрунтується на рівняннях Міхаеліса-Ментен та Монода, розв'язання системи диференціальних рівнянь виконано за допомогою Odesolve у Mathcad 15. Отримані результати відтворюють типову кінетику періодичної ферментації. Пропонована математична модель описує кінетичний модуль періодичного біореактора, враховує швидкість росту мікроорганізмів, споживання субстрату та утворення продукту.

Розроблена модель може бути використана в реальних процесах виробництва, водночас має чималий дидактичний потенціал, оскільки дає змогу продемонструвати здобувачам вищої освіти роль методів математичного та комп'ютерного моделювання у розробленні біотехнологічних процесів різного виду, можливості оптимізації параметрів біореактора, керування кінетикою росту та швидкістю біохімічних перетворень. Майбутні фахівці набувають практичних навичок роботи з програмним забезпеченням, навчаються застосовувати сучасні цифрові технології, виконувати аналіз складних біотехнологічних систем, прогнозувати поведінку процесів, інтерпретувати графіки, приймати обґрунтовані рішення та робити висновки про ефективність виробничого процесу. Така навчальна модель сприяє формуванню професійної компетентності, передбаченої освітніми програмами підготовки за спеціальністю G21 «Біотехнології та біоінженерія».

Ключові слова: здобувачі вищої освіти, компетентнісний підхід, математичне моделювання, біореактор, періодичний процес, диференціальні рівняння, Mathcad, Python, біотехнології.

NATALIIA STUCHYNSKA, MARIIA ANDRIICHUK.
Matematyczne modelowanie bioreaktora okresowego jako narzędzie kształtowania kompetencji zawodowych magistrów biotechnologii. Biotechnologia z roku na rok zyskuje coraz większe znaczenie jako czynnik napędzający rozwój innowacyjny współczesnego społeczeństwa technologicznego, obejmując coraz szersze obszary działalności człowieka, takie jak farmacja, medycyna, przemysł spożywczy i chemiczny, ochrona środowiska oraz ekologia.

Równocześnie wzrastają wymagania wobec zasobów kadrowych sektora biotechnologicznego, a tym samym wobec jakości procesu kształcenia przyszłych biotechnologów. Szczęólnego znaczenia nabiera opanowanie

metod modelowania matematycznego i komputerowego, które umożliwiają przyszłym specjalistom projektowanie, analizę i optymalizację procesów biotechnologicznych zgodnie z potrzebami przemysłu oraz wymogami społecznymi.

W pracy dokonano matematycznego opisu procesów zachodzących w bioreaktorze okresowym, optymalizacja parametrów ma istotny wpływ na efektywność produkcji biotechnologicznej. Opracowany model opiera się na równaniach Michaëlis-Mentena oraz Monoda, a rozwiązanie układu równań różniczkowych przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzia Odesolve w programie Mathcad 15. Uzyskane wyniki odzwierciedlają typową kinetykę fermentacji okresowej. Proponowany model matematyczny opisuje moduł kinetyczny bioreaktora okresowego, uwzględniając szybkość wzrostu mikroorganizmów, zużycie substratu oraz powstawanie produktu.

Opracowany model może być wykorzystany w rzeczywistych procesach produkcyjnych, a jednocześnie posiada istotny potencjał dydaktyczny, ponieważ umożliwia ukazanie studentom roli metod modelowania matematycznego i komputerowego w projektowaniu różnorodnych procesów biotechnologicznych, możliwości optymalizacji parametrów bioreaktora, sterowania kinetyką wzrostu oraz tempem przemian biochemicznych. Przyszli specjaliści nabywają praktyczne umiejętności pracy z oprogramowaniem, uczą się wykorzystywania nowoczesnych technologii cyfrowych, przeprowadzania analizy złożonych systemów biotechnologicznych, prognozowania przebiegu procesów, interpretowania wykresów, podejmowania uzasadnionych decyzji oraz formułowania wniosków dotyczących efektywności procesu produkcyjnego.. Taki model dydaktyczny sprzyja kształtowaniu kompetencji zawodowych przewidzianych w programach kształcenia na kierunku G21 „Biotechnologia i bioinżynieria”.

Słowa kluczowe: studenci szkół wyższych, podejście kompetencyjne, modelowanie matematyczne, bioreaktor, proces okresowy, równania różniczkowe, Mathcad, Python, biotechnologia.