

УДК 664.022.6:004.94

*Дмитро Одновол, старший викладач
кафедри вищої математики і фізики,
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного
м. Запоріжжя, Україна*

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ЗАСОБАМИ СКМ МАТЛАВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОСВІТИ ТА ВИРОБНИЦТВА

Анотація. У статті розглянуто можливості математичного моделювання технологічних процесів у харчовій промисловості із застосуванням програмного середовища Matlab. Проаналізовано складність харчових виробництв як об'єктів моделювання, обґрунтовано доцільність використання системного підходу до аналізу та оптимізації технологічних процесів. Наведено порівняння Matlab з іншими середовищами комп'ютерного моделювання та обґрунтовано його переваги у контексті харчової інженерії. Представлено приклади застосування Matlab у наукових дослідженнях і навчальному процесі. Проаналізовано сучасні публікації вітчизняних та зарубіжних авторів, що підтверджує актуальність використання цього інструменту для моделювання, оптимізації й автоматизації харчових технологій.

Ключові слова: математичне моделювання, харчова промисловість, Matlab, технологічні процеси, комп'ютерне моделювання, оптимізація, симуляція.

Abstract. The article explores the use of mathematical modeling in food industry technological processes with the application of the Matlab software environment. It highlights the complexity of food production systems and emphasizes the need for a systematic approach to process analysis and optimization. Matlab is compared with other modeling environments, and its advantages in the context of food engineering are substantiated. Examples of Matlab usage in scientific research and education are presented. A review of recent Ukrainian and international publications confirms the relevance of this tool for modeling, optimizing, and automating food processing technologies.

Keywords: mathematical modeling, food industry, Matlab, technological processes, computer simulation, optimization, simulation.

Технологічні процеси у харчовому виробництві є складноорганізованими системами, які охоплюють послідовні етапи механічної, теплової, хімічної та

біохімічної обробки, а також зберігання й пакування продукції. Щоб гарантувати стабільну якість продукції, зменшити виробничі втрати та підвищити ефективність, доцільно застосовувати системний підхід для управління цими процесами. У цьому контексті математичне моделювання виступає як ключовий інструмент аналізу, прогнозування та оптимізації технологічних операцій, дозволяючи обґрунтовано приймати інженерні та управлінські рішення в умовах складних взаємозв'язків і змінних параметрів середовища виробничого процесу.

Системи комп'ютерної математики (СКМ), зокрема середовище Matlab, є інструментом, що показує ефективність при моделюванні технологічних процесів що відбуваються у виробництві харчових продуктів. У даній роботі досліджуються можливості застосування систем комп'ютерної математики (СКМ) для моделювання технологічних процесів у харчовій промисловості, з особливим акцентом на середовище Matlab. Метою дослідження є обґрунтування доцільності використання Matlab як ефективного інструменту для моделювання, оптимізації та управління технологічними процесами харчових виробництв, а також демонстрація його потенціалу для підвищення якості освіти інженерних кадрів.

На етапі вибору системи комп'ютерної математики (СКМ) для моделювання технологічних процесів харчових виробництв, система Matlab була вибрана завдяки комплексу переваг у порівнянні з масивом поширених СКМ, таких як Python (з бібліотеками NumPy, SciPy, SymPy), Mathematica та Octave.

Matlab вирізняється потужним спеціалізованим інструментарієм (Toolboxes), розробленим для інженерних розрахунків, моделювання та аналізу даних, що є критичним для виробництва харчових продуктів. Зокрема, наявність Toolbox для оптимізації, статистики та моделювання систем значно спрощує розробку та валідацію математичних моделей.

Python, хоча й є безкоштовним та гнучким, потребує додаткових зусиль для налаштування середовища та інтеграції спеціалізованих інструментів. Бібліотеки NumPy, SciPy, SymPy надають значний функціонал для досліджень та моделювання. Але крива навчання для досягнення кращого рівня ефективності

при використанні Matlab може бути більш крутою для інженерів, які не мають навичок з програмування.

СКМ Mathematica, відома своїми символьними обчисленнями, є потужним інструментом, але її вартість може бути обмежуючим фактором для багатьох науковців та студентів. Крім того, її фокус на символьних операціях може бути надмірним для завдань, де переважають числові розрахунки, характерні для моделювання процесів обробки харчових продуктів.

Octave, будучи безкоштовною альтернативою Matlab, має схожий синтаксис, але може мати обмеження у функціональності та підтримці спеціалізованих додатків, які використовуються для моделювання.

Таким чином використання Matlab доцільне через його комплексність, надійність та широке застосування в інженерній спільноті, що забезпечує доступність ресурсів, підтримку та можливість інтеграції з іншим інженерним програмним забезпеченням. Хоча інші СКМ пропонують певні переваги, Matlab забезпечує оптимальний баланс між функціональністю, зручністю використання та підтримкою для ефективного моделювання технологічних процесів харчових виробництв.

Застосування Matlab у комп'ютерному модулюванні процесів що відбуваються в харчовій промисловості відкриває широкі перспективи для підвищення ефективності виробничих процесів та забезпечення стабільних якісних показників продукції. У зв'язку з цим інтеграція Matlab у навчальні програми підготовки інженерів харчової промисловості є важливою складовою формування професійних компетентностей майбутніх фахівців.

Проаналізувавши навчальні видання, що стосуються моделювання технологічних процесів харчових виробництв, можна зробити висновок про наявність в Україні навчально-методичної бази для підготовки інженерів у галузі харчового виробництва, які можуть застосовувати моделювання технологічних процесів харчових виробництв під час виконання службових обов'язків. Роботи Потапова В. О. (2008) [1] та Поперечного А. М., Потапова В. О., Корнійчука В. Г.

(2012) [2] закладають теоретичні основи моделювання технологічних процесів харчових виробництв, розглядають різні методи (експериментальні, аналітичні, емпірико-аналітичні) та їх застосування до дослідження процесів і обладнання в харчовому виробництві. Підручник Поперечного та співавторів підкреслює роль моделювання в науково-дослідній та конструкторській діяльності.

Навчальний посібник Малезика І. Ф. та співавторів (2015) [3] хоч і не фокусується виключно на моделюванні, але надає розуміння основних принципів, закономірностей та технологічного наповнення харчових виробництв, що є необхідною передумовою для подальшого моделювання та оптимізації виробничих процесів в харчовому виробництві.

Короткий аналіз стану впровадження математичного моделювання в навчання фахівців з харчових технологій:

- **Навчальний фокус:** Основний акцент робиться на підготовці студентів, що свідчить про розуміння важливості моделювання для майбутніх фахівців харчової промисловості.
- **Теоретична база:** Наявні навчальні матеріали закладають фундаментальні знання з теорії моделювання та методів аналізу даних.
- **Охоплення:** Розглядаються як загальні принципи моделювання, так і конкретні аспекти процесів та обладнання.
- **Потреба в оновленні:** Найновіша з представлених робіт датується 2019 роком. Зважаючи на швидкий розвиток комп'ютерних технологій та методів моделювання (включаючи чисельні методи, програмні пакети, штучний інтелект), існує потенційна потреба в оновленні навчальних матеріалів для відображення сучасного стану досліджень та інструментів.

Закордонні автори також приділяють багато уваги моделювання технологічних процесів харчових виробництв. Зокрема варто звернути увагу на наступні роботи [4-5]. Монографія [4] присвячена моделюванню трансформаційних процесів у харчовій промисловості, використовуючи як традиційні методи ідентифікації систем, так і моделі на основі експертних знань

та нечітких систем. Книга [5] охоплює основи та застосування інженерних підходів у харчовому виробництві, включаючи моделювання та оптимізацію процесів. Багато матеріалів щодо моделювання в харчовому виробництві публікується в наступних виданнях:

- **Journal of Food Science and Technology** — публікує рецензовані дослідження в галузі науки, технології, пакування та інженерії харчових продуктів.
- **Food and Bioprocess Technology** — охоплює всі аспекти біопроцесної технології харчових продуктів, включаючи моделювання та оптимізацію процесів.
- **Food Science and Technology International** — публікує статті з харчової науки, технології та інженерії, зокрема з моделювання харчових процесів.

Зокрема в роботі [6] обговорюються виклики та підходи до моделювання харчових продуктів і процесів, підкреслюючи важливість точного моделювання для оптимізації виробництва. В роботі [7] проводиться огляд сучасних тенденцій у моделюванні, проектуванні та контролі харчових систем, з акцентом на перспективні підходи до вирішення складних завдань. Дослідження [8] пропонує платформу моделювання для оцінки технологічних, екологічних та економічних аспектів централізованого та децентралізованого виробництва харчових продуктів. Стаття [9] розглядає математичне моделювання та симуляцію процесів сушіння харчових продуктів, включаючи новітні технології, такі як вакуумне сушіння та ультразвукова обробка.

Робота [10] присвячена аналізу підходів до математичного моделювання харчових продуктів і технологічних процесів у харчовій інженерії. Автори обговорюють основні виклики, інтереси та труднощі моделювання, зосереджуючись переважно на тепловій обробці. Розглядаються питання переносу тепла й маси, їх впливу на структуру й хімічний склад продуктів, а також різні

типи моделей (аналітичні, чисельні, емпіричні, гібридні), які застосовують для контролю, оптимізації та проектування процесів.

Автори в роботі [11] підкреслюють, що моделювання є ключовим інструментом у харчовій інженерії, оскільки воно дозволяє описувати складні процеси, пов'язані з передачею тепла, маси та імпульсу, які відбуваються під час обробки харчових продуктів. Це особливо важливо для термічних процесів, таких як пастеризація, стерилізація та заморожування, де точне прогнозування температурного розподілу є критичним для забезпечення якості та безпеки продуктів.

Таким чином, моделювання технологічних процесів харчових виробництв є актуальною сферою досліджень як в Україні, де створено навчально-методичну базу для підготовки фахівців, хоча й існує потреба в її оновленні, так і за кордоном, де публікуються численні дослідження в авторитетних наукових виданнях. У сучасній міжнародній науковій літературі переважає використання чисельних методів для моделювання фізико-хімічних процесів у харчових продуктах, зокрема методів скінченних різниць, скінченних елементів та оптимізаційних алгоритмів. Дослідження зосереджені на моделюванні тепло та масообміну, сушіння, пастеризації, ферментації, а також процесів охолодження і заморожування. Зростає застосування багатофізичних моделей, машинного навчання та нейронних мереж у поєднанні з класичними підходами. Крім того, простежується тенденція до створення інтегрованих цифрових платформ для візуалізації та оптимізації технологічних процесів у реальному часі.

Одним з інструментів для якісного моделювання технологічних процесів харчових виробництв є СКМ Matlab. Ось кілька прикладів успішного застосування систем комп'ютерної математики (СКМ) Matlab у харчовій промисловості. В роботі [12] наведено приклади того, що Matlab дозволяє моделювати та симулювати різні технологічні процеси в харчовій промисловості, такі як теплопередача, дифузія вологи та кінетичні процеси. Це допомагає краще розуміти поведінку системи, аналізувати різні сценарії та приймати обґрунтовані

рішення. Стаття [13] досліджує використання різних напівтеоретичних моделей для оцінки якості сушіння недозрілих, зрілих і перезрілих помідорів. Дослідження порівнює такі моделі, як експоненціальне рівняння, модель Пейджа, степеневе рівняння, поліноміальне рівняння 2-го порядку та модель Хендерсона, використовуючи інструмент Curve Fitting Toolbox MATLAB.

Ці приклади демонструють, як Matlab може бути ефективно використаний для моделювання та оптимізації технологічних процесів у харчовій промисловості, що сприяє підвищенню ефективності виробництва та забезпеченню стабільної якості продукції. Для попереднього опрацювання англomовних публікацій, тематичної класифікації джерел та формулювання оглядових висновків застосовувався допоміжний інструмент штучного інтелекту — ChatGPT (GPT-4, OpenAI). Надані рекомендації були проаналізовані, відредаговані та підтверджені автором згідно з вимогами наукової доброчесності.

Основні етапи моделювання технологічних процесів за допомогою системи комп'ютерної математики Matlab включають кілька ключових кроків:

- **Визначення цілей моделювання:** На цьому етапі визначаються основні цілі та завдання моделювання. Це може включати оптимізацію виробничих процесів, зниження витрат, підвищення якості продукції тощо.
- **Збір та аналіз даних:** Збираються всі необхідні дані про технологічні процеси, які будуть моделюватися. Це можуть бути дані про сировину, параметри процесів, умови виробництва тощо. Після збору дані аналізуються для виявлення основних тенденцій та закономірностей.
- **Розробка математичної моделі:** На основі зібраних даних розробляється математична модель технологічного процесу. Це може включати рівняння теплопередачі, кінетичні моделі, моделі дифузії вологи тощо.
- **Валідація моделі:** Розроблена модель перевіряється на відповідність реальним даним. Це включає порівняння результатів моделювання з експериментальними даними та коригування моделі для досягнення більшої точності.

- **Симуляція та аналіз результатів:** Після валідації модель використовується для проведення симуляцій різних сценаріїв. Результати симуляцій аналізуються для виявлення оптимальних умов виробництва та можливих шляхів покращення процесів.
- **Оптимізація процесів:** На основі результатів симуляцій проводиться оптимізація технологічних процесів. Це може включати зміну параметрів процесів, впровадження нових технологій, покращення умов виробництва тощо.
- **Впровадження результатів моделювання:** Останнім етапом є впровадження результатів моделювання у виробничий процес. Це включає адаптацію виробничих ліній, навчання персоналу, моніторинг та контроль нових умов виробництва.

Ці етапи допомагають забезпечити точність та ефективність моделювання технологічних процесів за допомогою СКМ Matlab, що сприяє підвищенню продуктивності та якості харчових виробництв.

Для моделювання технологічних процесів харчових виробництв існує широкий спектр інструментів та програмного забезпечення в СКМ Matlab. Matlab дозволяє створювати точні математичні моделі, проводити симуляції різних сценаріїв та аналізувати результати для прийняття обґрунтованих рішень. Додатковим інструментом, який може бути корисними для моделювання технологічних процесів є **Simulink**: це додаток до Matlab, який дозволяє досліджувати багатокомпонентні системи. Simulink особливо корисний для моделювання динамічних систем та процесів.

Моделювання технологічних процесів за допомогою Matlab може мати значний вплив на оптимізацію виробничих процесів у харчовій промисловості. Ось кілька ключових аспектів цього впливу:

- **Підвищення ефективності:** Matlab дозволяє створювати точні математичні моделі, які допомагають прогнозувати поведінку системи та аналізувати різні сценарії. Це сприяє виявленню оптимальних умов виробництва, що підвищує ефективність процесів та знижує витрати.

- **Зниження витрат:** Використання Matlab для моделювання технологічних процесів дозволяє виявити можливі шляхи зниження витрат, такі як оптимізація використання ресурсів, зменшення втрат продукції та підвищення продуктивності.
- **Покращення якості продукції:** Моделювання за допомогою Matlab допомагає забезпечити стабільну якість продукції шляхом аналізу та оптимізації параметрів виробничих процесів. Це включає контроль температури, вологості, часу обробки та інших важливих факторів.
- **Прискорення процесу прийняття рішень:** Matlab дозволяє швидко проводити симуляції різних сценаріїв та аналізувати результати, що сприяє прискоренню процесу прийняття рішень. Це особливо важливо в умовах швидко змінюваного ринку та високої конкуренції.
- **Інновації та розвиток:** Використання Matlab для моделювання технологічних процесів сприяє впровадженню інновацій та розвитку нових технологій. Це допомагає харчовим виробництвам залишатися конкурентоспроможними та відповідати вимогам сучасного ринку.

Ці аспекти демонструють, як моделювання за допомогою Matlab може значно вплинути на оптимізацію виробничих процесів у харчовій промисловості, сприяючи підвищенню ефективності, зниженню витрат та покращенню якості продукції.

Перспективи розвитку застосування системи комп'ютерної математики (СКМ) Matlab у харчовій промисловості є дуже обнадійливими. З огляду на швидкий розвиток технологій та зростаючі вимоги до якості продукції, використання Matlab для моделювання та оптимізації технологічних процесів стає все більш актуальним. Однією з ключових перспектив є впровадження інноваційних методів моделювання та симуляції, які дозволяють більш точно прогнозувати поведінку системи та аналізувати різні сценарії. Це сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів, зниженню витрат та покращенню якості продукції. Крім того, Matlab пропонує потужні інструменти

для аналізу та візуалізації даних, що допомагає фахівцям харчової промисловості краще розуміти результати моделювання та приймати обґрунтовані рішення. Це особливо важливо в умовах швидко змінюваного ринку та високої конкуренції. Ще однією перспективою є інтеграція Matlab з іншими програмними продуктами та системами, що дозволяє створювати комплексні моделі та проводити більш детальний аналіз технологічних процесів. Це сприяє впровадженню нових технологій та покращенню умов виробництва.

Попри численні переваги, Matlab має і певні обмеження. Зокрема, це висока вартість ліцензії, що ускладнює доступ для студентів та малих організацій, а також менш зручна інтеграція з популярними бібліотеками машинного навчання порівняно з Python. Крім того, Matlab не є open-source середовищем, що обмежує його гнучкість і знижує активність спільноти розробників. У деяких випадках також спостерігається вища ресурсомісткість при роботі з великими обсягами даних.

Інтеграція Matlab у навчальну програму фахівців зі спеціальності «Харчові технології» може відбуватися за двома напрямками. Перший передбачає ознайомлення з можливостями використання Matlab для моделювання під час вивчення дисциплін «Вища математика» та «Фізика», з демонстрацією комп'ютерних фізико-математичних моделей технологічних процесів харчової промисловості. Другий напрямок передбачає застосування Matlab при викладанні спеціалізованих курсів, зокрема «Моделювання харчових технологій», «Комп'ютерне моделювання процесів у харчовій промисловості», «Моделювання технологічних систем харчових виробництв». У межах таких дисциплін студентів можна вчити будувати математичні моделі технологічних процесів, розв'язувати диференціальні рівняння, проводити оптимізацію рецептур чи теплових режимів, а також візуалізувати результати аналізу за допомогою графічних засобів Matlab.

Впровадження СКМ Matlab у підготовку фахівців для харчової промисловості відкриває нові можливості для підвищення якості інженерної освіти. Майбутні інженери отримують інструмент якій дозволяє підвищити

продуктивність роботи фахівця, забезпечити стабільну якість продукції та сприяє впровадженню інновацій в виробництво харчових продуктів.

У найближчий перспективі Matlab зберігатиме актуальність як інструмент для моделювання складних харчових технологічних процесів, особливо завдяки постійному розширенню функціоналу та підтримці інженерно-наукового фахового середовища. Одним із ключових напрямків є розвиток засобів візуалізації даних, що дозволяють швидше інтерпретувати результати моделювання та приймати обґрунтовані рішення в галузі технологій. Окрім цього, зростає значення інтеграції Matlab з сучасними інструментами штучного інтелекту (наприклад, нейронними мережами чи методами машинного навчання), що відкриває нові можливості для передбачення поведінки технологічних систем і оптимізації операційних параметрів. У контексті концепції «розумного виробництва» (smart food production) Matlab дедалі частіше використовується у поєднанні з технологіями Інтернету речей (IoT), що дозволяє створювати цифрові двійники харчових процесів, здійснювати моніторинг у реальному часі та впроваджувати адаптивне управління. Перспективним також є напрям міжнародної кооперації у сфері розробки цифрових платформ та моделей на основі Matlab, що сприяє стандартизації підходів до моделювання й обміну знаннями між науковими установами та промисловими компаніями в різних країнах.

Використання Matlab для моделювання технологічних процесів у харчовій промисловості демонструє значний потенціал як у наукових дослідженнях, так і в навчанні майбутніх фахівців. Поєднання гнучких інструментів моделювання з сучасними методами аналізу дозволяє не лише оптимізувати виробництво, але й сприяти впровадженню науково обґрунтованих новацій.

Список використаних джерел

1. Потапов В. О. Моделювання технологічних процесів харчових виробництв : навч. посібник. Харків : ХДУХТ, 2008. 148 с.

2. Моделирование процессов та обладнання харчових виробництв : підручник / А. М. Поперечний, В. О. Потапов, В. Г. Корнійчук. Київ : Центр учбової літератури, 2012. 312 с.
3. Процеси і апарати харчових виробництв : приклади і задачі : навч. посіб. / І. Ф. Малежик, П. М. Немирович, В. Л. Зав'ялов [та ін.]. Київ : НУХТ, 2015. 386 с.
4. Production Planning, Modeling and Control of Food Industry Processes / eds. M. M. A. Aziz, A. M. A. Rahman, S. M. Sapuan. Cham : Springer, 2019. 250 p.
5. Essentials and Applications of Food Engineering / C. Anandharamakrishnan, S. Padma Ishwarya. Boca Raton : CRC Press, 2019. 453 p.
6. Rao M. A., Rizvi S. S. H. Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering*. 2011. Vol. 103, Is. 3. P. 227–238.
7. Fiszman S., Salvador A. Modelling and analysis of complex food systems. *Trends in Food Science & Technology*. 2011. Vol. 22, Is. 6. P. 308–316.
8. Almena Ruiz A., Fryer P., Bakalis S., Lopez-Quiroga E. Centralized and distributed food manufacture: A modeling platform for technological, environmental and economic assessment at different production scales. *Sustainable Production and Consumption*. 2019. Vol. 19. P. 181–193.
9. Mujumdar A. M., Wu J. Y. Mathematical Modeling Approach and Simulation in Food Drying Process. *Drying Technology*. 2023. Vol. 41, Is. 1. P. 1–15.
10. Trystram G. Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering*. 2012. Vol. 110, Is. 2. P. 269–277.
11. Kumar M., Vatsa S., Madhumita M., Prabhakar P. K. Mathematical modeling of food processing operations: a basic understanding and overview. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. 2021. Vol. 2, No. 2. P. 472–492.
12. Zhong R., Xu X., Wang L. Food supply chain management: systems, implementations, and future research. *Industrial Management & Data Systems*. 2017. Vol. 117, No. 9. P. 2085–2114.
13. Rafiq A., Makroo H. A., Hazarika M. K. MATLAB Toolbox for mathematical modelling of drying kinetics of tomato. *Indian Journal of Ecology*. 2015. Vol. 42, No. 2. P. 444–448.