

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОЇ МАТЕМАТИКИ ПІД ЧАС ПІДГОТОВКИ МАГІСТРІВ ТА АСПРАНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА»

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Обґрунтовано методичні підходи до впровадження систем комп'ютерної математики та середовищ моделювання (MATLAB, Python) в освітній процес підготовки фахівців спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища». На прикладі дослідження процесу теплообміну в реакторі циркуляційного піролізу твердих відходів продемонстровано ефективність інтеграції розрахунково-моделювального компонента. Показано, що використання математичних програм дозволяє аспірантам і магістрам проводити оптимізацію складних термохімічних процесів (визначення режимів за температур 500–550 °С, коефіцієнтів рециркуляції 0,4–0,6) та верифікувати теоретичні моделі з мінімальною похибкою. Окреслено структуру навчального модуля та його значення для формування цифрових і дослідницьких компетентностей майбутніх екологічних інженерів.

Ключові слова: системи комп'ютерної математики, MATLAB, Python, моделювання, циркуляційний піроліз, технології захисту навколишнього середовища, вища освіта.

Abstract

Methodological approaches to the introduction of computer mathematics systems and modeling environments (MATLAB, Python) into the educational process of training specialists in specialty 183 "Environmental Protection Technologies" are substantiated. On the example of research of heat exchange process in the reactor of circulating pyrolysis of solid waste the efficiency of integration of calculation-modeling component is demonstrated. It is shown that the use of mathematical software allows PhD and Master students to optimize complex thermochemical processes (determination of regimes at temperatures 500–550 °C, recirculation coefficients 0.4–0.6) and verify theoretical models with minimal error. The structure of the educational module and its significance for the formation of digital and research competencies of future environmental engineers are outlined.

Keywords: computer mathematics systems, MATLAB, Python, modeling, circulating pyrolysis, environmental protection technologies, higher education.

Вступ

Сучасна підготовка фахівців у галузі технологій захисту навколишнього середовища [1,2] вимагає від випускників не лише знання фундаментальних хімічних та екологічних закономірностей, а й володіння інструментами комп'ютерного моделювання. Складні міждисциплінарні екологічні інженерні завдання – такі як утилізація відходів методом циркуляційного піролізу – включають процеси тепломасообміну та хімічної кінетики, які неможливо детально дослідити без застосування систем комп'ютерної математики (СКМ). Метою роботи є науково-методичне обґрунтування впровадження програмних комплексів (MATLAB, Python) у процес навчання інженерів-екологів для підвищення ефективності розрахунків та моделювання природоохоронних технологій.

Результати дослідження

Математичне моделювання як інструмент досліджень та дидактики. У ході науково-дослідної роботи [3-6] за напрямом термічної деструкції відходів було розроблено математичну модель теплообміну в реакторі циркуляційного піролізу для псевдогомогенного середовища (похибка розрахунків не перевищує 2,6 %). Комп'ютерна реалізація цієї моделі в середовищах MATLAB та Python дозволила встановити кількісні залежності виходу цільових продуктів (рідкої фракції — до 52

%) від технологічних параметрів та визначити оптимальні режими процесу (температура 500–550 °С, тривалість 30–45 хв, коефіцієнт рециркуляції 0,4–0,6).

Цей науковий контент слугує базою для формування розрахунково-моделювального блоку навчальних дисциплін. Використання СКМ у навчальному процесі дозволяє студентам:

- самостійно варіювати вхідні параметри моделі й візуалізувати температурні поля в реакторі;
- оцінювати конструктивні зміни апарата (наприклад, реактора з оребреними поверхнями) без значних фінансових витрат на натурний експеримент;
- відпрацьовувати алгоритми оптимізації та чисельного інтегрування диференціальних рівнянь.

Для моделювання процесу теплообміну в реакторі циркуляційного піролізу в середовищі MATLAB чудово підійде класичне диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є для нестационарного процесу в циліндричних координатах (оскільки реактор має циліндричну форму).

Для псевдогомогенного середовища всередині реактора, з урахуванням внутрішніх джерел тепла, наприклад, ендотермічного ефекту реакції деструкції відходів, рівняння має такий вигляд:

$$\rho \cdot c_p \cdot (\partial T / \partial t) = \lambda \cdot [(\partial^2 T / \partial r^2) + (1/r) \cdot (\partial T / \partial r)] + q_v$$

де: T – температура в певній точці реактора, °С; t – час процесу, с; r – радіус (відстань від центральної осі реактора), м; ρ – ефективна густина псевдогомогенного середовища, кг/м³; c_p – питома теплоємність, Дж/(кг·°С); λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°С); q_v – об'ємна густина внутрішніх джерел або стоків тепла (інтенсивність поглинання тепла під час піролізу), Вт/м³.

Наведемо шаблон коду для студентів для програмної реалізація в середовищі MATLAB. Для розв'язання крайової задачі для диференціального рівняння в частинних похідних використовується стандартна функція `pdepe`:

```
function pyrolysis_reactor_pde
R = 0.2; % Радіус реактора, м
t_max = 2700; % Максимальний час (45 хв), с
x = linspace(0, R, 21);
t = linspace(0, t_max, 50);
m = 1; % Циліндрична геометрія

sol = pdepe(m, @pdefun, @pdeic, @pdebc, x, t);
T = sol(:,:,1);
surf(x, t, T);
title('Температурне поле в реакторі циркуляційного піролізу');
xlabel('Радіус r, м'); ylabel('Час t, с'); zlabel('Температура T, ^\circC');
colorbar;
end

function [c, f, s] = pdefun(x, t, u, DuDx)
rho = 800; cp = 1500; lambda = 0.15; qv = -5000;
c = rho * cp;
f = lambda * DuDx;

s = qv;
end

function u0 = pdeic(x)
u0 = 20; % Початкова температура, ^\circC
end

function [pl, ql, pr, qr] = pdebc(xl, ul, xr, ur, t)
pl = 0; ql = 1; % Симетрія на осі (r = 0)
pr = ur - 550; qr = 0; % Стала температура стінки (r = R)
end
```

Методичні аспекти викладання СКМ у ЗВО. Пропонується наскрізне впровадження розрахунково-моделювальних завдань на основі систем MATLAB та Python у профільні дисципліни

спеціальності 183, зокрема : «Термічні методи переробки відходів» , «Моделювання процесів захисту довкілля» та «Екологічна безпека».

Рекомендована структура розрахунково-моделювального модуля в межах цих курсів передбачає кілька послідовних етапів [7]:

1. *Теоретично-алгоритмічний*: аналіз фізико-хімічної суті процесу та побудова системи рівнянь.
2. *Програмно-реалізаційний*: написання скриптів у MATLAB або Python, налаштування чисельних методів розв'язання.
3. *Дослідницький (інтерактивний симулятор)*: проведення обчислювального експерименту, пошук екстремумів функцій (наприклад, максимального виходу цільової фракції).
4. *Проектно-рефлексивний*: використання отриманих масивів даних для курсового проектування та захисту екологічних рішень за допомогою кейс-методів.

Такий підхід забезпечує розвиток у студентів та аспірантів найважливіших фахових компетентностей: здатність проводити складні технологічні розрахунки, навички роботи з сучасним спеціалізованим ПЗ та вміння прогнозувати екологічну й енергетичну ефективність проєктованих об'єктів.

Висновки

1. Інтеграція систем комп'ютерної математики (MATLAB, Python) у підготовку фахівців спеціальності 183 дозволяє трансформувати складні теоретичні моделі масо- та теплообміну в наочні й доступні для інженерного аналізу інструменти.

2. Використання комп'ютерного моделювання на прикладі технології циркуляційного піролізу демонструє студентам прямий зв'язок між математичним апаратом та вирішенням практичних екологічних проблем циркулярної економіки.

3. Перспективи розвитку напряму полягають у розробці відкритих електронних освітніх ресурсів у вигляді інтерактивних симуляторів та розширенні міждисциплінарних зв'язків із європейськими освітніми програмами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбатюк Р., Волкова Н., Кобилянська І. Технологічна культура як важливий складник професійної компетентності майбутніх педагогів природничих дисциплін, *Педагогіка безпеки*, вип. 10, вип. 2, с. 133–139, Лис 2025.

2. Kobylianskyi, O., Kobylianskyi, Y., Dembitska, S., Kobylianska, I., Pinaieva, O. (. Training of Specialists in the Sphere of Renewable Energy in the Conditions of Blended Learning for the Needs of the Regional Economy. In: Auer, M.E., Rüttemann, T. (eds) Futureproofing Engineering Education for Global Responsibility. ICL 2024. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2025, vol 1280. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-83523-0_1

3. Маркіна Л. М., Іващенко Т. Г., Власенко О. В., Ковтунов О. В. Моделювання реактора експериментального стенду процесу циркуляційного піролізу. *Екологічні науки*. 2025. № 58. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.41>.

4. Маркіна Л. М., Іващенко Т. Г., Власенко О. В. Моделювання процесів теплообміну в охолоджувальній системі реактора циркуляційного піролізу. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2025. № 7. С. 92-104. DOI: <https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-12>.

5. Машков О. А., Маркіна Л. М., Присяжний В. І., Власенко О. В. та ін. Інноваційний підхід до систематизації форм представлення наукових результатів фундаментальних та прикладних досліджень у галузі захисту навколишнього середовища. *Екологічні науки*. 2024. № 2(53). С. 29-34. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.4>.

6. Маркіна Л. М., Власенко О. В., Ковтунов О. В. Управління процесами впливу на клімат технологій перетворення відходів на енергію на прикладі термічної деструкції. *Екологічні науки*. 2024. № 3(54). С. 105-112. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.16>.

7. Пригула А. В., Кобилянська І. М. Підготовка кваліфікованих фахівців за допомогою сучасних методів навчання/ Матеріали ЛІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 20-22 березня 2024 р. Режим доступу:

[<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/41980/20874.pdf?sequence=3&isAllowed=y>]

Власенко Олег Васильович – аспірант групи 183-24а, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: olegvvv@gmail.com.

Петрук Роман Васильович – д.т.н., професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: prroma07@gmail.com

Vlasenko Oleg Vasylovych – postgraduate student of group 183-24a, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: olegvvv@gmail.com.

Petruk Roman Vasylovych – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: prroma07@gmail.com