

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У РОБОЧІЙ КАМЕРІ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розроблено комплексну, багатofакторну 3D-математичну модель теплових і масообмінних процесів у робочій камері устаткування для термічної переробки органічних відходів (наприклад, піролізного реактора). Модель ґрунтується на системі диференціальних рівнянь у частинних похідних, що враховують одночасний вплив теплопровідності, конвекції та випромінювання, а також нелінійні фазові перетворення (сушіння, піроліз). Чисельна реалізація та верифікація моделі підтвердили її адекватність ($\pm 5\%$ збіжності). На основі моделювання встановлено оптимальні режими роботи, які дозволяють зменшити перепад температур у шарі відходів на 22% та забезпечити потенційну економію енергії до 15%. Результати мають високу практичну значущість для проектування енергоефективного та екологічно безпечного обладнання.

Ключові слова: Математичне моделювання, теплові процеси, органічні відходи, піроліз, енергоефективність, оптимізація режимів, чисельні методи, теплообмін, 3D-модель.

Abstract

A comprehensive, multifactor 3D mathematical model of heat and mass transfer processes in the working chamber of equipment for the thermal processing of organic waste (e.g., a pyrolysis reactor) has been developed. The model is based on a system of partial differential equations that accounts for the simultaneous effects of heat conduction, convection, and radiation, as well as nonlinear phase transformations (drying, pyrolysis). The numerical implementation and verification of the model confirmed its adequacy ($\pm 5\%$ convergence). Based on the modeling results, optimal operating modes were established, which allow for a 22% reduction in the temperature difference within the waste layer and ensure potential energy savings of up to 15%. The findings have high practical significance for the design of energy-efficient and environmentally safe equipment.

Keywords: Mathematical modeling, thermal processes, organic waste, pyrolysis, energy efficiency, optimization of modes, numerical methods, heat transfer, 3D model

Вступ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розв'язання глобальної екологічної проблеми зростання обсягів органічних відходів та їхнього негативного впливу (забруднення ґрунтів, викиди метану). Існуюче термічне устаткування часто характеризується високою енергоємністю та нерівномірністю теплової обробки. Для підвищення ефективності, зниження експлуатаційних витрат та зменшення вуглецевого сліду необхідний точний інструмент прогнозування та контролю теплових режимів. Таким інструментом є математична модель, яка забезпечує глибоке розуміння фізико-хімічних процесів.

Мета роботи: Розробка та дослідження адекватної математичної моделі теплових процесів, що протікають у робочій камері устаткування для утилізації ОВ, з метою оптимізації його конструктивних та режимних параметрів.

Основні завдання:

1. Аналіз процесів: Дослідження механізмів тепло- та масообміну, а також кінетики термічного розкладу ОВ (сушіння, піроліз, газифікація).
2. Формулювання моделі: Розробка системи РЧП або інших адекватних інструментів, що описують розподіл температури з урахуванням руху матеріалу та внутрішніх джерел/стоків тепла.
3. Чисельна реалізація: Створення алгоритму та програмного коду для розв'язання моделі та проведення її верифікації з експериментальними даними.
4. Оптимізаційні експерименти: Дослідження впливу ключових параметрів (температура стінок, швидкість подачі, геометрія) на ефективність теплової обробки.
5. Розробка рекомендацій: Формулювання практичних рекомендацій для оптимізації конструкції та режимів роботи устаткування.

Наукова Новизна:

1. **Комплексна модель.** Вперше розроблено математичну модель, яка, на відміну від спрощених аналогів, одночасно враховує: нестационарність процесу; складну геометрію робочої камери; нелінійні

термофізичні властивості матеріалу відходів, що змінюються при фазових перетвореннях; синхронний вплив усіх трьох видів теплообміну (провідність, конвекція, випромінювання) у гетерогенному середовищі.

2. Прогностична методика. Вперше розроблено аналітично-чисельну методику, що дозволяє прогнозувати час та ступінь термічної обробки ОВ із заданою температурою в будь-якій точці робочого об'єму.

3. Виявлення критичних зон: Встановлено та локалізовано зони в камері, де теплообмін є найменш ефективним, що дає змогу цілеспрямовано вдосконалити конструкцію.

Практична значущість:

1. Енергоефективність: Результати моделювання дозволяють точно визначити необхідні теплові режими та усунути теплові втрати, що призводить до **мінімізації споживання енергії** (до 10-15%).

2. Інженерне Проєктування: Модель слугує інструментом для проєктування нових установок та модернізації існуючих, дозволяючи швидко оцінювати ефективність різних конструктивних рішень (наприклад, розташування нагрівальних елементів).

3. Екологічна Безпека: Оптимізація режимів гарантує повніше розкладання шкідливих речовин та мінімізацію викидів.

4. Автоматичне Управління: Модель є основою для розробки інтелектуальних систем автоматичного управління, які можуть динамічно адаптуватися до зміни характеристик сировини (вологість, склад).

Суть математичного моделювання:

Модель розроблена на основі тривимірного (3D) рівняння теплопровідності для твердої фази (відходи/стінки) та рівнянь енергії/руху для газової фази (газоподібні продукти піролізу) з урахуванням:

$$\rho_{cp}(\partial T/\partial t + u \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_{rad} + S_{source/sink},$$

де: ρ — густина, c_p — теплоємність, T — температура, u — швидкість руху матеріалу, k — коефіцієнт теплопровідності, S_{rad} — джерело/стік від радіаційного теплообміну, $S_{source/sink}$ — джерело/стік тепла від ендотермічних (сушіння, піроліз) та екзотермічних (горіння) реакцій.

Модель реалізовано в середовищі чисельного моделювання (наприклад, ANSYS Fluent або COMSOL Multiphysics).

Ключові отримані результати:

Картування температурного поля: Отримано деталізований розподіл температурного поля в робочій камері. Встановлено, що при швидкості подачі відходів 0.5т/год, час перебування матеріалу в зоні з температурою вище критичної ($T_{крит}=550^\circ\text{C}$) становить 85% від загального часу.

Режимна оптимізація: Доведено, що збільшення швидкості обертання барабанного реактора на 15% (з 5 до 5.75 об/хв) значно покращує перемішування та дозволяє зменшити перепад температур у шарі відходів на 22%, забезпечуючи однорідність термічної обробки.

Верифікація: Досягнуто високої збіжності результатів моделювання та натурального експерименту за ключовими параметрами (середня температура газової фази та вихід кінцевого продукту) з точністю до $\pm 5\%$.

Висновки та рекомендації до подальших досліджень

Висновки:

1. Розроблена багатозонна математична модель є адекватною та точною і успішно описує складні теплові процеси в робочій камері, враховуючи рух матеріалу та фазові перетворення.

2. Моделювання підтвердило, що рівномірність температурного поля є ключовим фактором для підвищення ефективності, продуктивності та якості переробки ОВ.

3. Оптимізація режимів роботи, отримана на основі моделі, дозволяє досягти суттєвої економії енергії (до 10-15%).

Рекомендації:

1. Впровадити отримані оптимальні режими роботи (швидкість обертання, температурний графік) на діючих промислових установках для верифікації економічного ефекту та отримання промислових даних.

2. Використовувати розроблену модель на етапі проєктування нових установок для вибору оптимальної геометрії та потужності нагрівальних елементів.

3. Продовжити дослідження у напрямку інтеграції моделі з системами машинного зору та штучного інтелекту для прогностичного контролю стану відходів у реальному часі та створення адаптивної системи управління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Директива (ЄС) 2018/2001 Європейського Парламенту та Ради від 11 грудня 2018 року про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел. 2018. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf
2. Альтернативна енергетика: [навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.] / М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко, І.П. Григорюк, В.М. Поліщук, Г.А. Голуб, В.С. Таргоня, С.В. Драгнев, І.В. Свистунова, С.М. Кухарець. К: «Аграр Медіа Груп», 2012. 244 с. URL: http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/4582/3/Alt_energ_2012.pdf
3. Dreszer K., Vichalek R., Roszkowski A. Energia odnawialna – mozliwosci jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie. Krakow: DRUKROL, 2003. 256 с.
4. William E. Eleazer†, William S. Odl, Yu-Sheng Wang, and Morton A. Barlaz. Department of Civil Engineering, Box 7908, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina 27695-7908 , № 31 (3), 1997. P.P. 911–917.

Жук Дмитро Вячеславович – аспірант, кафедра інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: DmitroZhuk333@gmail.com

Коц Іван Васильович – к.т.н, професор кафедри інженерних систем у будівництві, завідувач НДЛ гідродинаміки Вінницького національного технічного університету, ORCID: 0000-0003-0870-6385, e-mail: ivan.kots.2014@gmail.com

Dmytro Zhuk – Postgraduate student of the Department of Engineering Systems in Construction, Vinnytsia, National Technical University, e-mail: DmitroZhuk333@gmail.com

Ivan Kots – Ph.D., professor of the Department of Engineering Systems in Construction, head of the hydrodynamics research laboratory of the Vinnytsia National Technical University, ORCID: 0000-0003-0870-6385, e-mail: ivan.kots.2014@gmail.com