

УДК 519.713

К.т.н., доцент Олефір О. С., магістрант Ткаченко П. Г.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»**

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИГОРЯННЯ ПАЛИВНИХ ЧАСТОК В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Abstract

*Oleksandr S. Olefir, assoc. prof.; Pavlo Tkachenko, student
Mathematical modelling of burning out of fuel particles in power plants*

In the article the simplified mathematical model of heating of a separate fuel particle is presented. The deduced model is numerically solved by Gere's method with the help of Mathcad 14. The got decision answers the set problem and does not conflict with physics of process.

Вступ

Одним з основних джерел енергії в Україні є тверде паливо. При використанні цього енергоресурсу постають такі проблеми: оптимальність використання палива, технологічні питання спалювання палива, зменшення шкідливих викидів виробництва в атмосферу. Для часткового подолання цих проблем використовують математичне моделювання процесів, що проходять в енергетичних установках [1].

Існує багато моделей, але вони не придатні для створення ефективних програмних засобів їх реалізації. В даній статті пропонується спрощена, призначена для програмної реалізації математична модель вигорання окремої паливної частки в енергетичній установці.

Постановка задачі

Приймемо наступну фізичну модель процесу: реагування протікає на поверхні частки палива сферичної форми; конвекційний переніс теплоти із системи відсутній, радіаційний теплообмін моделюється взаємодією реагуючої суміші з опромінювачем; теплообмін частки з газовим середовищем відбувається шляхом конвекції і радіаційного теплообміну. В процес вступають частки, що складаються лише із горючої суміші [2].

Приймається, що на процес має вплив лише одна гетерогенна реакція окислення вуглецю до CO :



Метою роботи є створення спрощеної прикладної математичної моделі вигорання окремої паливної частки в енергетичній установці.

Математичне моделювання вигорання паливних часток в енергетичних установках

Існуючі моделі вигорання частки твердого палива в енергетичній установці представляють собою нелінійні неоднорідні системи диференціальних рівнянь. До того ж, такі системи – жорсткі.

Для розв'язку майбутньої моделі скористаємось методом Гіра, який призначений для розв'язку саме таких систем. У випадку одного рівняння цей метод також працює і дає гарні результати.

Розглянемо математичну модель нагріву частки без урахування її вигорання. Вважатимемо, що на процес впливає лише реакція (1).

В роботі [3] наведено ґрунтовний аналіз дифузійно-кінетичної теорії горіння палива. Випишемо залежності, необхідні для моделювання:

1) Залежність кінетичної константи швидкості реакції від T :

$$k = ze^{-E/RT_c} \quad (2)$$

де T_c — абсолютна температура частки, К; R — газова постійна, Дж/моль*К. Величину E називають енергією активації, Дж/моль, величину z — предекспоненціальним множником, м/с.

2) Визначення коефіцієнту масовіддачі β :

$$\beta = \frac{NuD}{d_c} \quad (3)$$

де Nu – критерій Нуссельта, D – коефіцієнт дифузії, м²/с, d_c – діаметр, м.

Значення бінарного коефіцієнту молекулярної дифузії визначимо як:

$$D_{12} = D_{012} \cdot \left(\frac{T_c}{T_0}\right)^n \cdot \frac{P_0}{P} \quad (4)$$

де D_{012} – коефіцієнт дифузії при $P_0=101,3$ кПа, $T_0=273$ К, м²/с; P – тиск, кПа. Зазвичай приймають $n=1,75$. D_{012} – коефіцієнти взаємної дифузії

В роботі [4] наведені теоретичні викладки по основам теплообміну. Випишемо результуючі залежності, які необхідні для моделювання:

1) Конвекційний теплообмін. Для описання конвекційної тепловіддачі користуються формулою:

$$q_{cm} = \alpha(T_c - T_g), \quad (5)$$

де q_{cm} – густина теплового потоку на поверхні, Вт/м²; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_g – температура газового середовища, К.

Коефіцієнт тепловіддачі визначимо за наступним співвідношенням:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d_c} \quad (6)$$

де λ — коефіцієнт теплопровідності середовища.

2) Радіаційний теплообмін. Для описання впливу радіаційного теплообміну використаємо наступне співвідношення:

$$q = \varepsilon_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (7)$$

де ε — степінь чорноти коксової частки, приймається рівною 0.8; c_0 — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла: $c_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,67$ Вт/(м²*К⁴); T_1 та $T_2 = 1773$ К — температура частки та опромінювача, К.

Враховуючи теоретичні викладки та формули (2)-(7), наведені вище, можна записати наступне комплексне рівняння нагріву паливної частки в енергетичній установці (беручи до уваги лише реакцію (1)):

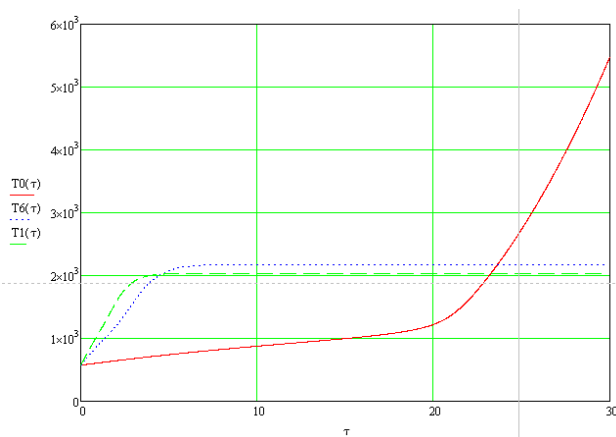
$$\rho_c \frac{1}{3} R c_c \frac{dT_c}{dt} = Q_2 CR \frac{k_0 e^{\frac{-E}{RT_c}} \frac{NuD}{d_c}}{k_0 e^{\frac{-E}{RT_c}} + \frac{NuD}{d_c}} - \frac{Nu\lambda}{d_c} (T_c - T_g) - \varepsilon_0 \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \quad (8)$$

де CR — концентрація кисню у поверхні частки при нормальних умовах, кг/м³; ρ_c - густина паливної частки, кг/м³; c_c — теплоємність частки, Дж/кг*К. Всі інші позначення наведені вище.

Рівняння (8) і буде математичною моделлю нагріву паливної частки. Схожа математична модель наведена у роботі [2].

Математична модель (8) була розв'язана засобами Mathcad 14. Початкові умови: початкова температура часточки $T_0 = 573$ К; початковий діаметр частки $d_0 = 4$ мм; часовий проміжок розгляду розв'язку — [0;30] с. Крок методу — 0.01.

Результат моделювання представимо в графічній формі (рис 1):



На графіку: крива T_0 — відображає процес без урахування радіаційного теплообміну, крива T_6 — з урахуванням 60% радіаційного теплообміну, крива T_1 — з повним урахуванням частки радіаційного теплообміну. T_0 , T_6 , T_1 — температури, К. τ — час, с.

Рис 1. Залежність температури частки палива, К, від часу, с

Аналізуючи отримані результати, можна зробити наступні висновки:

1. Якщо не враховувати радіаційний теплообмін, то частка прогрівається повільніше, але температура необмежено зростає, що не відповідає реальному процесу.

2. При врахуванні радіаційного теплообміну прогрів палива відбувається набагато швидше. При цьому на 4-5 с. протікання процесу відбувається перехід до стаціонарного режиму; температура частки більше не змінюється і приймає значення, яке відповідає реальним вимірюванням.

3. При зменшенні розміру частки прогрів відбувається швидше, при збільшенні – повільніше, що повністю відповідає фізиці процесу.

4. При збільшенні температури газового середовища чи опромінювача швидкість прогріву палива збільшується і навпаки. Те ж саме відбувається при збільшенні початкової температури часточки.

Висновки

В даній роботі запропонована і досліджена математична модель горіння паливних часток в енергетичних установках. На прикладі моделювання нагріву паливної частки пройдені усі етапи від постановки задачі до аналізу отриманих результатів.

Отримана прикладна модель, наведені початкові умови та параметри, необхідні для моделювання. Результат моделювання відповідає поставленій задачі, він дає змогу відслідковувати процес на будь-якому етапі його протікання і при будь-яких умовах. Модель можна використовувати для вдосконалення технологічного процесу спалювання твердого палива. Виведена модель є основою для подальших досліджень у цій сфері. Модель можна ускладнювати, враховуючи інші реакції або інші способи передачі тепла; за рахунок формування рівнянь вигорання паливної часточки, нагріву газового середовища тощо.

Література

1. *В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др.* Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. 1986. – 312 с.: ил.
2. *Хзмалян Д. М., Каган Я. А.* Теория горения и топочные устройства. М.: Энергия, 1976
3. *Франк-Каменецкий Д. А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. 2-е изд. М.: Наука, 1967
4. *Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с с ил.