

УДК 004.02

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПАЛИВА У ТОПЦІ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Василенко І.А., Куманьов С.О.

Український державний хіміко-технологічний університет

Досліджено стан роботи котельних агрегатів України. Запропоновано ефективні шляхи вирішення проблеми перевитрати природного газу. Розроблено математичну модель розрахунку процесу горіння палива. Детально описано модулі, що входять до комп'ютерної програми. Надано зразки розрахунків процесу при відповідних заданих умовах.

Ключові слова: природний газ, горіння, математична модель, метод Ейлера, кінетика.

Постановка проблеми. В умовах дефіциту природного газу в Україні підвищення ефективності роботи котельних, які займають домінуюче положення серед джерел теплопостачання, є однією з пріоритетних задач. Одним зі шляхів підвищення ефективності використання палива є оптимізація параметрів його спалювання. Для цього необхідно постійно здійснювати контроль якості спалювання палива та забезпечення його оптимального горіння. У наш час для контролю ви-

користовують переважно методи, що ґрунтуються на контролюванні складу димових газів, які мають високу вартість і є інерційними. Разом з цим на старих котельних установках, яких на підприємствах України переважна більшість, ці методи не використовуються зовсім. Звідси і значна перевитрата дорогої імпортової сировини – природного газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літератури, теоретичні та пошукові дослідження дозволяють стверджувати, що існу-

ють більш ефективні і прості методи контролю, які ґрунтуються на використанні фізико-електричних властивостей факела [1–3]. Найбільш перспективним способом перевірки тверджень та пошуку оптимальних параметрів процесу є математичне моделювання.

Оптимальним методом для моделювання топкових процесів спалювання газоподібного палива є метод Ейлера. Загальні рівняння руху повітряної маси записують на основі просторових рівнянь балансу маси, імпульсу, концентрації газових компонентів та енергії для газової суміші. Турбулентні характеристики газу описуються двопараметричною « k - ε » моделлю турбулентності. Передбачається, що подача палива і окиснювача відбувається окремо (дифузійне горіння) і не залежить від часу. Також передбачається, що газове середовище у топці може складатись з хімічно інертних молекул азоту N_2 , двоокису вуглецю CO_2 , пари води H_2O , а також реагуючих O_2 , CO і основних складових природного газу: метан CH_4 , етан C_2H_6 , пропан C_3H_8 і водень H_2 [4, 5].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Широкому впровадженню цих методів перешкоджає недостатнє вивчення умов використання цих процесів, а також конструктивних рішень для промислової реалізації.

Мета статті. Для прогнозування цих процесів та визначення оптимальних умов розміщення датчиків контролю розроблено математичну модель розрахунку процесу горіння палива у топці котельного агрегату.

Виклад основного матеріалу. Комп'ютерна програма «Модель розрахунку процесу горіння палива у топці котельного агрегату» об'єднує у собі п'ять модулів (модуль визначення кінетики турбулентності, модуль визначення граничних умов, модуль визначення процесу перенесення для узагальненої змінної, модуль визначення поля тиску, модуль побудови двовимірного поля розподілення основних параметрів), що призначені для розрахунку процесу горіння палива у топках котельних агрегатів та визначення оптимальних умов розміщення датчиків на котельних установках. Програма розроблена у середовищі Delphi 7, має графічний інтерфейс, виведення результатів здійснюється у вигляді масиву даних та графічних залежностей.

У модулі 1 використовується модель турбулентності Джонса-Лаундера. Вона є найбільш апробованою і широко використовується у інженерних розрахунках моделей турбулентності. Вона ґрунтується на транспортних рівняннях для кінетичної енергії турбулентності і швидкості дисипації, що замикаються рівноважними, наближеними, експериментально перевіреними залежностями.

Рівняння балансу кінетичної енергії турбулентності k :

$$\frac{\partial \rho U_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left[\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right] \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon.$$

Рівняння балансу дисипації ε :

$$\frac{\partial \rho U_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left[\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \cdot G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k},$$

де G_k – швидкість генерації турбулентності; μ_m – коефіцієнт турбулентної в'язкості; δ_{ij} – символи Кронекера ($\delta_{ij} = 1$; $\delta_{ij} = 0$ ($i \neq j$)); σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$, C_μ – емпіричні константи моделі турбу-

лентності: $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $C_{\varepsilon 3} = 1,83$; $C_\mu = 0,09$.

Результати розрахунків виводяться у вигляді таблиці даних.

У модулі 2 визначаються граничні умови на стінках топкового об'єму, на площині (вісі) симетрії, на вхідних і вихідних межах.

У якості граничних умов на стінках топкового об'єму використовуються умови першого роду для температури газу, рівність нулю згідно нормалі концентрацій компонентів газу та тертя на стінках топкової камери.

Метод пристінкових функцій використовується для визначення тертя на стінках камери згорання τ_w , значень енергії турбулентності і швидкості її дисипації в пристінній області, що є конвективною складовою теплового потоку q^{conv} . Застосування методу пристінкових функцій дозволяє уникнути необхідності використання великої кількості точок різницевої сітки для описання поведінки характеристик потоку поблизу твердої межі. В даному випадку застосовується метод пристінкових функцій для однофазних течій.

Розраховується безрозмірна відстань y^+ до найближчого пристінкового вузла:

$$y^+ = \frac{\rho k_p^{1/2} C_\mu^{1/4} y_p}{\mu}.$$

де k_p – значення кінетичної енергії турбулентності, розраховане при вирішенні відповідного рівняння перенесення з використанням граничної умови на стінці $k = 0$; y_p – розмірна відстань від найближчого пристінкового вузла до стінки, м.

Розраховується значення безрозмірної швидкості u^+ :

$$\begin{cases} y^+ & \text{при } y^+ \leq 11,63 \\ u^+ = \frac{1}{k} \ln(Ey^+) & \text{при } y^+ > 11,63 \end{cases}$$

де $k = 0,4$ постійна Кармана.

Розраховується напруження на стінці:

$$\tau_w = \frac{\mu_p y^+}{u_p^+ y}.$$

Розраховується значення безрозмірної ентальпії h^+ :

$$h^+ = Pr_t (u^+ + \Pi),$$

де Pr_t – турбулентне число Прандтля; Π – опір ламінарного підшару перенесення енергії.

Розраховується значення конвективного теплового потоку між стінкою і газовим середовищем:

$$q_w = \frac{\rho^{1/2} \tau_w^{1/2} (h_w h_p)}{h^+},$$

де h_w – ентальпія найближчого вузла всередині сітки; h_p – ентальпія найближчого пристінкового вузла.

Значення швидкості дисипації турбулентної кінетичної енергії визначається з співвідношення:

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{(0,4 y_p)}.$$

Якщо течія є симетричною відносно деякої площини, то ця площина симетрії обирається у якості граничної, і на ній задаються умови симетрії (рівність потоків через цю границю і похідних по нормалі до неї). На площині (осі) симетрії традиційно використовується умова $v_n = 0$ для нормальної компоненти швидкості і умова $d\Phi/dn = 0$ – для решти змінних.

Для вхідних меж використовуються відомі однорідні розподілу для всіх характеристик. На вихідних межах ставляться м'які граничні умови, причому положення вихідних меж у цьому випадку має бути досить віддалене від зон можливої рециркуляції потоку.

Результати розрахунків виводяться у вигляді таблиці даних.

У модулі 3 застосовується метод контрольного об'єму, який широко застосовується для вирішення диференціальних рівнянь перенесення.

Він дає повну свободу у виборі різних профілів для інтегрування різних членів диференціального рівняння, т. к. після отримання дискретних аналогів початкові припущення про характер профілю можна не враховувати. Принцип цього методу полягає у наступному:

- весь обсяг розрахункової області розбивається на безліч непересічних кінцевих обсягів за таким критерієм, що кожна вузлова точка дискретизації знаходиться в своєму обсязі;

- диференціальні рівняння інтегруються по кожному кінцевому об'єму;

- для обчислення інтегралів використовують частинні профілі, які описують поведінку функції, що визначається, у проміжку між обраними опорними точками.

В результаті проведених заходів знаходять дискретний аналог диференціального рівняння, що визначається для функції з використанням певної кількості розташованих поруч вузлових точок. Отримані кінцево-різницеві рівняння представляють інтегральне балансове відношення для довільної кількості контрольних об'ємів, а отже і для всієї розрахункової області в цілому.

У загальному випадку для сталого турбулентного руху рівняння перенесення для деякої узагальненої змінної Φ при заданому полі (тобто компонентах швидкості u_j , $j = 1, 2$ густини ρ і коефіцієнті дифузії Γ) буде записане наступним чином:

$$\frac{\partial \rho u_j \Phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S,$$

У цьому рівнянні згідно повторюваним індексам виконується сумування. При $\Phi = 1$, $\Gamma = 0$, $S = 0$ одержуємо рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0.$$

Результати розрахунків виводяться у вигляді таблиці даних.

У модулі 4 розглядається рівняння кількості руху. При заданому полі тиску рішення цієї системи можна одержати за допомогою дискретного аналога рівняння для узагальненої змінної Φ . При використанні шахової сітки дискретні аналоги рівнянь кількості руху дещо відрізняються від дискретних аналогів рівнянь для інших Φ , які розраховуються у вузлах основної сітки. Проте ця відмінність відноситься до несуттєвих деталей. Вона пов'язана з використанням для апроксимації рівнянь кількості руху контрольних обсягів на змішаних шахових сітках.

У зв'язку з цим для розрахунку коефіцієнта дифузії та масової витрати на гранях контрольного об'єму потрібна відповідна інтерполяція. Результуючий дискретний аналог можна записати у вигляді:

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (p_p - p_E) A_e;$$

$$a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b + (p_p - p_N) A_n.$$

Індекс nb відноситься до сусідніх вузлових точок обраного сіткового шаблону. Рівняння кількості руху можна вирішити тільки в тому випадку, якщо поле тиску задано або яким-небудь чином знайдено. Якщо при вирішенні використовувати невірне поле тиску, знайдене поле швидкості не буде задовольняти рівнянню нерозривності.

Послідовність операцій при розрахунку цим способом наступна:

1. Завдання поля тиску p^* .
2. Розв'язання рівнянь руху для отримання $u^* v^*$, w^* .
3. Розв'язання рівняння для p' .
4. Розрахунок p шляхом додавання p' до p^* .
5. Уточнення компоненту швидкості за допомогою формул для поправки швидкості.
6. Розв'язання дискретних аналогів для інших Φ (таких як температура, концентрації і турбулентні характеристики), якщо вони впливають на поле течії через фізичні властивості рідини і т.д. (якщо якийсь певне Φ не впливає на полі течії, краще розрахувати його після отримання збіжності рішення для поля течії).

7. Подання скоригованого тиску p як нового p^* , повернення до пункту 2 і повторення всієї процедури до тих пір, поки не буде отримано збіжне розв'язання.

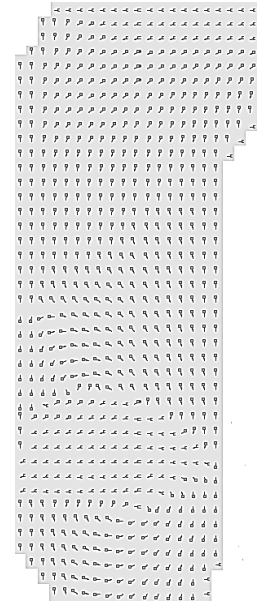


Рис. 1. Напрямок аеродинамічних потоків у тонці

Для розв'язання сіткових рівнянь для компонент вектора швидкості газу використовується метод релаксації. Значення інших скалярних невідомих завдання визначали за допомогою методу Гаусса-Зейделя. Він є найпростішим з усіх ітераційних методів. В якому значення змінної розраховуються шляхом звернення у певному порядку до кожної вузлової точки. У пам'яті обчислювальної машини тримається тільки один масив значень T . По мірі звернення до чергової вузлової точки відповідне значення T в пам'яті ЕОМ (початкове наближення або значення T з попередньої ітерації) замінюється на нове. Якщо дискретний аналог записаний у вигляді:

$$a_p T_p = \sum a_{nb} T_{nb} + b,$$

де індекс nb позначає середню точку, тоді нове T_p у вузловій точці, що розглядається, розраховується відповідно:

$$T_p = (\sum a_{nb} T_{nb}^* + b) / a_p,$$

де T_{nb}^* є сусіднім значенням, яке знаходиться в пам'яті ЕВМ. Для сусідніх точок, до яких вже звертались протягом поточної ітерації, T_{nb}^* є новим розрахованим значенням. Для інших точок T_{nb}^* – значення з попередньої ітерації.

Коли всі вузлові точки розглянуті подібним чином, одна ітерація може вважатися закінченою. Результати розрахунків виводяться у вигляді таблиці даних.

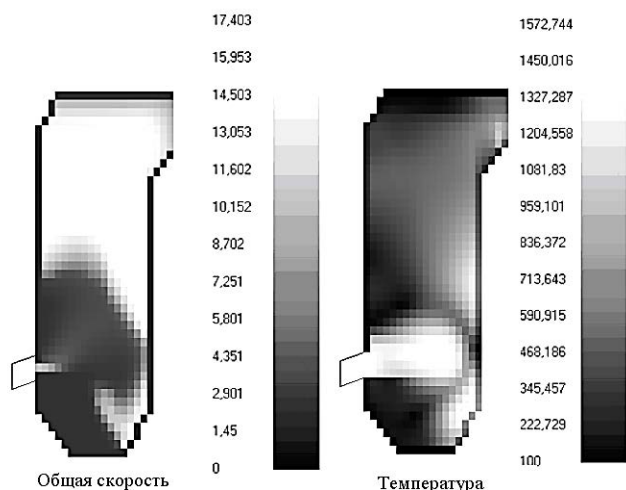


Рис. 2. Розраховані поля швидкості і температури

У модулі 5 (на основі проведених розрахунків) ми одержуємо двомірні поля розподілення основних параметрів (результат у вигляді графічних залежностей рис. 1–3).

На рис. 1 схема аеродинаміки у топці котельного агрегату показує зони надходження газоповітряної суміші у топку, зони виходу димових газів і зони рециркуляції.

На рис. 2 показані поля розподілення швидкостей і температур по об'єму топки. Порівняння розрахованих концентрацій продуктів горіння зі стехіометричними даними дає високу подібність результатів з похибкою не більше 1,5%. Дана модель перевірена на адекватність шляхом

порівняння розрахованих параметрів димових газів на виході з топки з реальними значеннями режимних карт для типового котла ПТВМ-30М для температури і складу димових газів.

На рис. 3 наведена залежність зміни ступеня окислення горючих компонентів в топці. На підставі проведеного розрахунку можна виділити основні температурні зони, які дадуть змогу з максимальною ефективністю використовувати іонізаційні датчики.

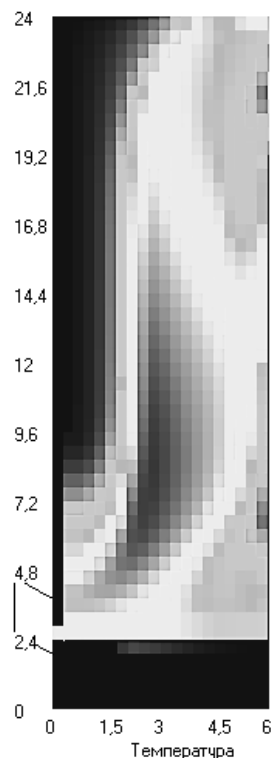


Рис. 3. Розраховане поле інтенсивності реакції окиснення палива

Висновки. Таким чином розроблена математична модель дозволяє одержати розрахунки процесу горіння палива у топці котельного агрегату, виділити основні температурні зони і максимально ефективно використовувати іонізаційні датчики. У наслідок чого буде здійснюватись ефективний контроль витрати палива та значно зменшиться його перевитрата.

Список літератури:

1. Корытин А. М. Автоматизация типовых технологических процессов и установок / А. М. Корытин, Н. К. Петров, С. Н. Радионов. – М.: Энергоатомиздат. 1988. – 432 с.
2. Рид Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
3. Агафонов В. П. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике / В. П. Агафонов, В. К. Вертушкин, А. А. Гладков. – М.: Машиностроение, 1972. – 342 с.
4. Устименко Б. П. Численное моделирование аэродинамики и горения в топочных и технологических устройствах / Б. П. Устименко, К. Б. Джакупов, В. О. Кроль. – Алма-Ата: Наука, 1986. – 221 с.
5. Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О. М. Белоцерковский. – М.: Физматлит, 1994. – 448 с.

Василенко И.А., Куманев С.А.

Украинский государственный химико-технологический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ТОПКЕ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Аннотация

Исследовано состояние котельных агрегатов Украины. Предложено эффективные пути решения проблемы перерасхода природного газа. Разработана математическая модель расчета процесса горения топлива. Подробно описаны модули, которые входят в компьютерную программу. Показано образцы расчетов процесса при соответствующих заданных условиях.

Ключевые слова: природный газ, горение, математическая модель, метод Эйлера, кинетика.

Vasylenko I.A., Kumanev S.A.

Ukrainian State University of Chemical Technology

MATHEMATICAL MODEL OF THE FUEL COMBUSTION PROCESS CALCULATION IN THE FURNACE OF BOILER UNIT

Summary

Investigated the condition of the boiler units of Ukraine. It is proposed effective solutions to the problem of overconsumption of natural gas. It's given the mathematical model of the fuel combustion process calculation. It's comprehensively described modules included in the computer program. Shows sample calculations of the process under appropriate specified conditions.

Keywords: natural gas, combustion, mathematical model, Euler method, kinetics.