

УДК 681.51

Стародуб А.О.

Одеський національний політехнічний університет

Бабіч В.Ф.

Одеський національний політехнічний університет

РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

У сучасних умовах витрати на паливо становлять значну частину бюджету теплопостачальних підприємств, особливо в зонах з помірним і холодним кліматом. Тому в умовах зростання цін на енергоносії та загострення екологічних проблем все більш високі вимоги висуваються до систем оптимізації використання енергії органічного палива. У статті представлена математична модель статички процесу горіння газоподібного палива як об'єкта управління. Представлені розрахункові формули та результати розрахунків у середовищі Matlab. Також отримані розрахунки концентрацій складників димових газів установки для згорання газоподібного палива в режимах недостачі і надлишку повітря.

Ключові слова: процес згорання палива, об'єкт управління, оптимізація, модель динаміки, статичні характеристики.

Постановка проблеми. Найбільшими забруднювачами навколишнього середовища шкідливими викидами техногенного характеру в атмосферу є продукти спалювання органічного палива в котлах теплових електростанцій, підприємств промислового виробництва, водогрійних і опалювальних установках житлово-комунального господарства, а також двигунами внутрішнього згорання автотранспорту.

У більшості установок спалювання палива, що використовуються нині, оптимізація режиму горіння забезпечується шляхом підтримки співвідношення тиску палива і повітря відповідно до режимної карти. Такий спосіб є не досить ефективним, оскільки він не дає змогу враховувати зміни температури і вологості повітря, теплотворної здатності і температури газу і низки інших зовнішніх факторів. У зв'язку з цим у разі складання режимних карт допускають наявність значного надлишку повітря, щоб за жодних умов не допустити виникнення хімічного недопалу. У результаті в деяких режимах витрати повітря на горіння палива перевищують оптимальні в 1,5–2 рази, що збільшує витрату електроенергії на дуття і призводить до необхідності нагрівання надлишкового повітря, що подається в топкову камеру, тобто до додаткової витрати палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У спеціалізованій статті [1, с. 174–177] йдеться про перспективу використання мініатюрних датчиків для регулювання в технології спалювання палива. Також, аналізуючи дослідження із вико-

ристання сучасних систем автоматичної оптимізації у більшості установок спалювання палива, що використовуються нині, оптимізація режиму горіння забезпечується шляхом підтримки співвідношення тиску палива і повітря відповідно до режимної карти, але такий спосіб є не досить ефективним.

Постановка завдання. Більшість розроблених систем автоматичної оптимізації співвідношення «паливо–повітря» побудовані із використанням стаціонарних газоаналізаторів і використовують коригуючий сигнал за величиною вмісту кисню в димових газах. На деяких типах котлів ці системи регулювання передбачені проектною документацією в обов'язковому порядку. Однак ці системи, як правило, не працюють у режимі регулювання, а газоаналізатор використовується в моніторинговому режимі, що зумовлено низкою причин:

– концентрація кисню в димових газах залежить не тільки від витрати повітря в топці (дуття), але й від інших умов експлуатації (неконтрольованого підсмоктування повітря, що спотворює показання киснеміра, зміни характеристик пальників, неідентичності характеристик пальників в багатопальникових котлах, зміни теплотворної здатності та виду палива, коливання вологості повітря тощо), що, своєю чергою, знижує ефективність роботи системи з регулювання за величиною вмісту кисню в димових газах;

– обмежене поширення мікропроцесорних контролерів, що мають стійкі та надійні алго-

ритми роботи з газоаналізаторами за значних збурень у широкому діапазоні навантаження установки, оскільки багато з розроблених алгоритмів регулювання не враховують перехідні процеси в топці у разі зміни потужності, а також інерційність електроприводів вентиляторів і димососів.

Вказані причини контрастують з вимогою, щоб у заданій продуктивності установки, тобто в кожній робочій точці і в будь-який момент часу оптимальна ефективність процесу згоряння палива була гарантована, мінімізуючи при цьому забруднюючі речовини, такі як сажа, CO, H_2 , CnHm, а також CO_2 . Виконання цих вимог стає дедалі важчим за дуже змінних граничних умов без відповідного інноваційного контролю горіння.

Тому необхідні нові рішення для керованої або оптимізованої експлуатації установок спалювання палива, які також можуть бути використані економічно в системах автоматичного регулювання установок від малої до великої потужності і навіть для регулювання двигунів внутрішнього згоряння. Прикладом прогресивних рішень у цьому напрямі є системи автоматичного регулювання процесу горіння в різноманітних установках для згоряння палива як постійного складу (сертифікованого), так і змінного складу (несертифікованого) з використанням коригуючих сигналів за вмістом компонентів хімічного недопалу H_2 і CO в димових газах [1, с. 175].

Виклад основного матеріалу дослідження.

В сучасних умовах витрати на паливо становлять значну частину бюджету тепlopостачальних підприємств, особливо в зонах з помірним і холодним кліматом. Тому в умовах зростання цін на енергоносії та загострення екологічних проблем все більш високі вимоги пред'являються до систем оптимізації використання енергії органічного палива.

Основними забруднювачами навколишнього середовища є продукти неповного згоряння, такі як сажа, CO, H_2 та незгорілі вуглеводні CnHm. Зменшення викидів забруднюючих речовин можливе перш за все за рахунок розробки систем керування процесом горіння під час експлуатації установок згоряння палива. З цінових та технологічних причин вони майже не використовуються в установках згоряння малої (до 200 кВт) та середньої потужності (до 3 МВт).

У ідеальному стехіометричному горінні ($\alpha = 1$) в установку подають з повітрям стільки кисню, скільки потрібно для повного спалювання палива. У димовому газі відсутній залиш-

ковий кисень, і котел працює з максимальною ефективністю. Нестача повітряного кисню призводить до втрат ефективності через неповне згоряння палива (появі в димових газах H_2 , CnHm, NO) та високих викидів шкідливих речовин, таких як сажа, CO одночасно. Надлишок повітря в топці призводить до зайвих теплових витрат, оскільки не використане для горіння повітря переноситься як баласт і викидається в навколишнє середовище нагрітим до високої температури.

На рисунку 1 показаний типовий профіль статичних характеристик процесу згоряння палива – залежностей концентрацій основних компонентів димових газів на виходу з котла від коефіцієнта надлишку повітря в топці котла $\alpha = 21 / (21 - O_2)$.

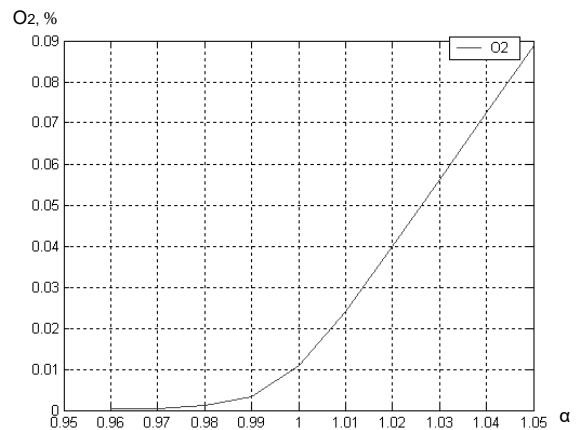


Рис. 1. Типові статичні характеристики процесу згоряння палива в котлі

Таким чином, як видно з рисунку 1, за підтримання оптимального коефіцієнта надлишку повітря в топці коефіцієнт корисної дії установки і температура в топці мають екстремуми. Ці залежності є типовими, що дає змогу складну і неоднозначну задачу екстремального регулювання замінити задачею підтримання на рівні слідів (сотих або тисячних об. процентів) концентрацій продуктів хімічного недопалу H_2 або CO в димових газах. Складність реалізації задачі автоматичної оптимізації процесу спалювання міститься у використанні високочутливих і стабільних датчиків концентрацій водню H_2 та кисню вуглецю у високотемпературних потоках димових газів з високою вологістю.

Детальніше розглянемо алгоритм розрахунку статичних характеристик процесу горіння.

Кількісний склад продуктів згоряння визначається температурою, загальним тиском, під яким перебуває газова суміш, а також ваговими частками хімічних елементів, що входять у сполуки, що становлять продукти згоряння [3, с. 411].

Ступінь дисоціації газу швидко зростає зі збільшенням температури й залежить від тиску. Зі зниженням загального тиску в продуктах згоряння вуглеводного палива збільшується відносний вміст продуктів неповного згоряння й взагалі всіх продуктів, утворення яких супроводжується витратою тепла й збільшенням хімічної енергії, тобто ступінь дисоціації продуктів згоряння збільшується.

Розрахунок сполуки продуктів згоряння з урахуванням дисоціації починається зі складання таких рівнянь [3, с. 411]:

– рівнянь констант рівноваги тих реакцій, які враховуються в розрахунку;

– рівнянь балансу елементів, що входять у горючу суміш;

– рівняння повного тиску продуктів згоряння.

У горінні вуглеводнів у повітрі або кисні утворюються продукти згоряння, що містять тільки чотири елементи: вуглець, водень, кисень і азот. Тому стосовно цієї системи елементів приводиться методика розрахунку сполуки продуктів згоряння.

Рівняння реакцій дисоціації записуються у такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} CO_2 &\leftrightarrow CO + \frac{1}{2} \cdot O_2 \\ K_1 &= \frac{p_{CO} p_{O_2}^{0.5}}{p_{CO_2}} = f_1(T) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} H_2O &\leftrightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2 \\ K_2 &= \frac{p_H p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} = f_2(T) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} CO_2 + H_2 &\leftrightarrow CO + H_2O \\ K_3 &= \frac{p_{CO} p_{H_2O}}{p_{CO_2} \cdot p_{H_2}} = f_3(T) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} N_2 + O_2 &\leftrightarrow 2NO \\ K_4 &= \frac{p_{NO}^2}{p_{N_2} p_{O_2}} = f_4(T) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} H_2 &\leftrightarrow 2H \\ K_5 &= \frac{p_H^2}{p_{H_2}} = f_5(T) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} O_2 &\leftrightarrow 2O \\ K_6 &= \frac{p_O^2}{p_{O_2}} = f_6(T) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} N_2 &\leftrightarrow 2N \\ K_7 &= \frac{p_N^2}{p_{N_2}} = f_7(T) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

де K_i – константи рівноваги, що залежать тільки від температури й типу хімічної реакції.

Із використанням залежностей (1) – (7) та теплофізичних властивостей вуглецеводневого палива і їх продуктів згоряння [4, с. 288] були розроблені алгоритм і програма для середовища Matlab 6.5, розраховані статичні характеристики процесу згоряння газоподібного палива для широкого діапазону зміни коефіцієнта надлишку повітря.

Отримавши результати розрахунку статичних характеристик, на рисунках 2–8 показана залежність складу продуктів згоряння, що характеризують економічність процесу згоряння, від коефіцієнта надлишку повітря, а також токсичність продуктів згоряння, відповідно, що розраховані для природного газу стандартного складу в об. процентах [4, с. 288]: $CH_4 = 92,8 \%$; $C_2H_6 = 3,9 \%$; $C_3H_8 = 1\%$; $C_4H_{10} = 0,4\%$; $C_5H_{12} = 0,3 \%$; $N_2 = 1,5 \%$; $CO_2 = 0,1\%$ і складу повітря: $N_2 = 79\%$, $O_2 = 21\%$.

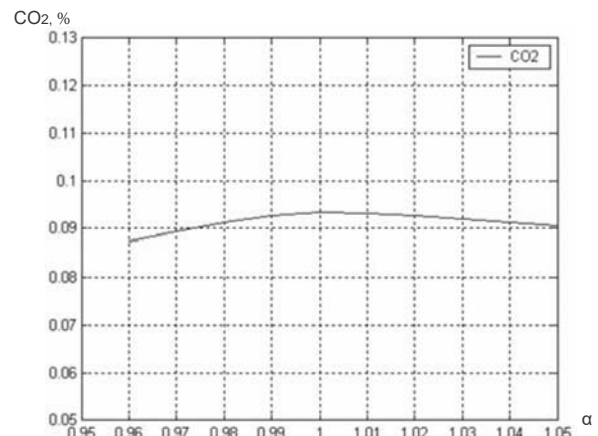


Рис. 2. Залежність вмісту кисню в продуктах згоряння від коефіцієнта надлишку повітря

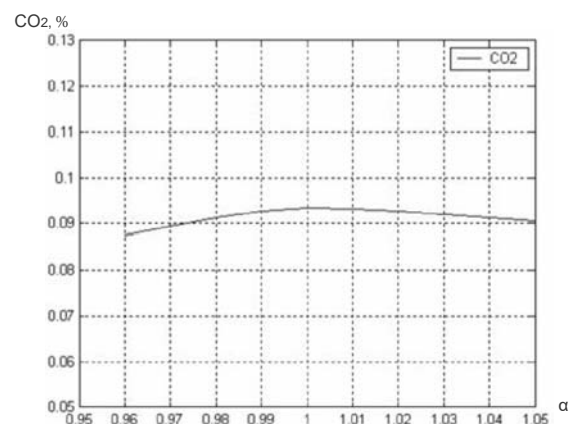


Рис. 3. Залежність вмісту діоксиду вуглецю в продуктах згоряння від коефіцієнта надлишку повітря

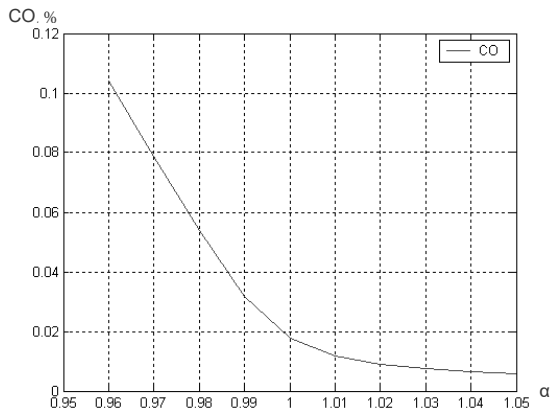


Рис. 4. Залежність вмісту оксиду вуглецю в продуктах згоряння від коефіцієнта надлишку повітря

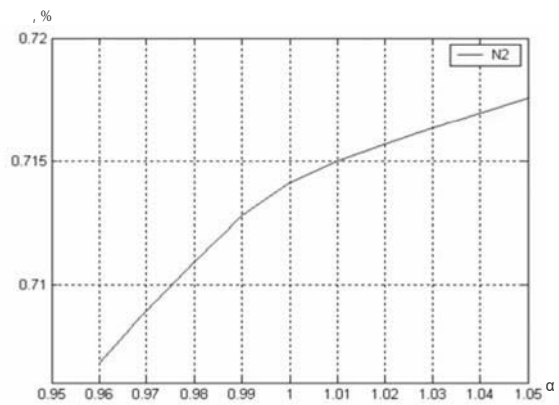


Рис. 7. Залежність вмісту азоту в продуктах згоряння від коефіцієнта надлишку повітря

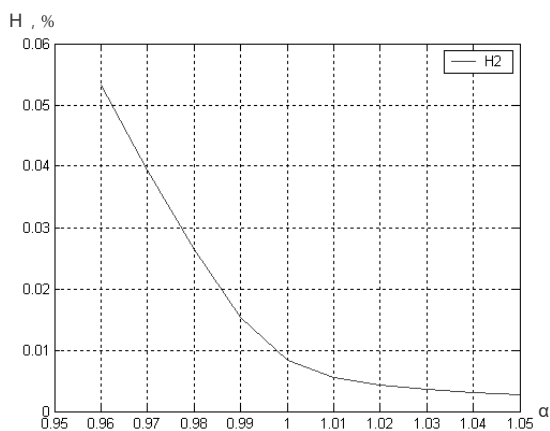


Рис. 5. Залежність вмісту водню в продуктах згоряння від коефіцієнта надлишку повітря

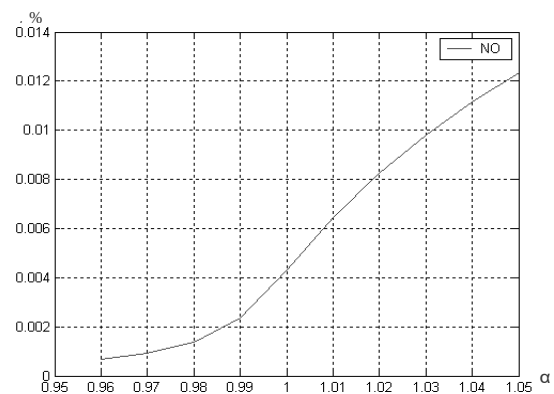


Рис. 8. Залежність вмісту NO в продуктах згоряння від коефіцієнта надлишку повітря

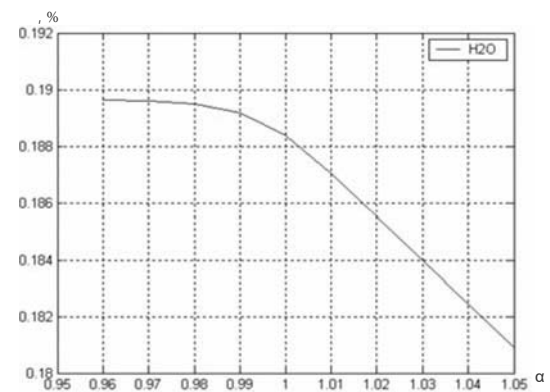


Рис. 6. Залежність вмісту водяних парів у продуктах згоряння від коефіцієнта надлишку повітря

Висновки. У цій роботі були виконані розрахунки складу димових газів та побудовані кількісні залежності цих величин від коефіцієнта надлишку повітря (рисунки 2–8).

З рисунків видно, що вміст оксиду вуглецю CO і водню H₂ зменшується практично до нуля зі збільшенням коефіцієнта надлишку повітря, а вміст NO та кисню O₂ зростає. Вміст же діоксиду вуглецю CO₂ практично не залежить від зміни надлишку повітря.

Результати розрахунків дають змогу визначити коефіцієнти передачі моделі динаміки процесу спалювання палива у разі моделювання замкненої системи регулювання співвідношення «паливо–повітря» з різними коригуючими сигналами як «у малому», так і «у великому», що дає змогу вибрати найбільш інформативний коригуючий сигнал.

Список літератури:

1. Völkel M., Hammer F. COe-Regelung mit Miniatur-Sensor eröffnet neue Perspektiven in der Verbrennungstechnik, Fachbeitrag, Gaswärme International (54). 2005. Nr. 3. S. 174-177.
2. Бабич В.Ф. Управление процессом термического обезвреживания промышленных сточных вод в вихревом аппарате для безотходного производства: автореф. дисс. канд. техн. наук. Одесса, 1986. 25 с.
3. Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. Москва: «Наука», 1966. 411 с.
4. Дубовкин Н.Ф. Справочник по теплофизическим свойствам углеводородных топлив и их продуктов сгорания. Москва, Ленинград: «Госэнергоиздат», 1962. 288 с.

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ГАЗОПОДОБНОГО ТОПЛИВА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

В современных условиях затраты на топливо составляют значительную часть бюджета тепло-снабжающих предприятий, особенно в зонах с умеренным и холодным климатом. Поэтому в условиях роста цен на энергоносители и обострения экологических проблем все более высокие требования предъявляются к системам оптимизации использования энергии органического топлива. В статье представлена математическая модель статики процесса горения газообразного топлива как объекта управления. Представлены расчетные формулы и результаты расчетов в среде Matlab. Также получены расчёты концентраций составляющих дымовых газов установки для сгорания газообразного топлива в режимах нехватки и избытка воздуха.

Ключевые слова: процесс сгорания топлива, объект управления, оптимизация, модель динамики, статические характеристики.

CALCULATION OF STATIC CHARACTERISTICS OF THE COMBUSTION OF GAS FUELS AS A CONTROL OBJECT

In modern conditions fuel costs constitute a significant part of the budget of heat supply enterprises, especially in temperate and cold climates. Therefore, in the conditions of rising energy prices and exacerbation of environmental problems, ever increasing demands are made on systems for optimizing the use of energy from organic fuels. The mathematical model of the statics of the combustion process of gaseous fuel as a control object is presented in the article. Presented calculation formulas and results of calculations in the Matlab environment. Calculations have also been made of the concentrations of the constituent flue gases for the combustion of gaseous fuels under conditions of shortage and excess air.

Key words: process of combustion of fuel, object of control, optimization, model of dynamics, static characteristics.