

## ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.18

І.В. Шаповал

### КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗБУРЮЮЧИХ ФАКТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА

#### Вступ

Ефективність процесу спалювання палива як відношення отриманої енергії до кількості підведеної енергії залежить від точності підтримування оптимального співвідношення паливо–повітря. Значення такого співвідношення пов'язане з калорійністю палива. В котлах, в яких використовується суміш газів (коксового, доменного і природного), відбувається стабілізація тиску і забезпечується задана теплота згорання палива, а в котлах, де спалюється тільки природний газ, як правило, не враховується зміна теплоти згорання газу. Але природний газ містить різну кількість домішок ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$  та ін.), яка може змінюватись, змінюючи калорійність газу, і, як наслідок, – змінювати оптимальне співвідношення паливо–повітря [1–3]. Зміна надлишку повітря впливає на ефективність роботи котельних установок [4]. Таким чином, автоматичні системи керування, які не враховують калорійність спалюваного газу, наприклад МИК–25 [5], системи компанії “Етанол” [6] та інші, будуть працювати неефективно. Точність регулювання співвідношення паливо–повітря залежить від точності вимірювання витрат палива і повітря. Для вимірювання витрат повітря і газоподібного палива використовуються датчики об'ємної витрати газів. Зміна температури палива або дуттьового повітря призведе до зміни кількості речовини в одиниці об'єму, що вплине на коефіцієнт надлишку повітря. У праці [7] наведено результати експериментальних досліджень, які підтверджують актуальність врахування зміни температури повітря.

Великого поширення набула система регулювання “Контур” [8], в основу якої покладено спосіб підтримування постійного співвідношення між сигналами від датчиків об'ємної витрати палива і дуттьового повітря [9]. В основу цього способу покладено залежність теплоти згорання паливо–повітряної суміші від співвідношення паливо–повітря. Це співвідношення, при якому названа залежність має максимум,

умовно вважається оптимальним. Система, яка реалізує цей спосіб, підтримує постійним задане співвідношення між об'ємними витратами палива і дуттьового повітря, що за однакових температур палива та дуттьового повітря забезпечує задане молярне співвідношення паливо–повітря.

#### Постановка задачі

Мета статті – оцінити вплив зміни калорійності газу і коливання температури дуттьового повітря відносно температури палива на ефективність процесу спалювання палива та сформулювати вимоги до системи регулювання співвідношення паливо–повітря. Відхилення теплоти згорання природного газу від номінального значення не має перевищувати  $\pm 5\%$  [10]. За номінальне значення теплоти згорання природного газу взято  $Q_{\text{ном}} = 35,6 \text{ МДж/м}^3$  [3]. Для кожної теплоти згорання газу є своє оптимальне значення кількості дуттьового повітря, яке і визначає оптимальне співвідношення паливо–повітря. Теплота згорання природного газу може змінюватись від  $Q_{\text{мін}} = 33,8 \text{ МДж/м}^3$  до  $Q_{\text{макс}} = 37,3 \text{ МДж/м}^3$ . Кількість повітря, необхідного для повного спалювання  $1 \text{ м}^3$  природного газу, буде змінюватись від  $8,74$  до  $9,7 \text{ м}^3$ , тоді як для природного газу з номінальною теплотою згорання потрібно  $9,21 \text{ м}^3$ . Регулятор подачі дуттьового повітря настроюють на певне співвідношення паливо–повітря, значення якого залежить від теплоти згорання газу, який спалювали під час пуско-налагоджувальних робіт.

Таким чином, при подачі газу з теплою згорання, відмінною від тієї, при якій проводилось настроювання регулятора подачі дуттьового повітря, матимемо відхилення реального співвідношення паливо–повітря від оптимального, що призведе до зниження ефективності спалювання природного газу.

#### Вплив зміни температури повітря на співвідношення паливо–повітря

У системі “Контур” регулятор співвідношення паливо–повітря підтримує постійним задане співвідношення між сигналами від датчика об'ємної витрати газу і датчика об'ємної витрати дуттьового повітря [9], яке за умови

сталості зовнішніх умов відповідає однаковому відношенню кількісної витрати речовин. При зміні температури дуттьового повітря відносно температури палива регулятор продовжуватиме підтримувати постійним задане співвідношення об'ємної витрати газів, але співвідношення паливо–повітря в молярному обчисленні зміниться, через що в топку надходитиме надлишок повітря або його не вистачатиме.

Для кількісного оцінювання впливу температури газів на коефіцієнт корисної дії (ККД) роботи котла розглянемо відоме рівняння стану ідеального газу [11]. Відносна зміна кількості речовини при зміні температури від  $T_1$  до  $T_2$  становитиме

$$\frac{v_1 - v_2}{v_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}, \quad (1)$$

де  $v$  – кількість речовини;  $T$  – температура, К.

Таким чином, знаючи відхилення температури дуттьового повітря відносно температури палива, можемо обчислити кількість зайвого повітря при його надлишку або кількість газу, що не згорить при недостатній кількості повітря.

#### Структурна схема системи регулювання співвідношення паливо–повітря і обчислення ККД

Структурну схему системи регулювання співвідношення паливо–повітря системи “Контур” [8] і блок для обчислення зміни ККД

зображено на рис. 1, де РГ і РВ – регулятори подачі газу і повітря в топку котла, кожен з яких реалізує пропорційно–інтегральний закон керування; БККД – блок обчислення технічного ККД, відношення кількості виділеної енергії до кількості підведеної енергії; Н – задавач поточного навантаження; Зд<sub>1</sub> – задавач оптимального співвідношення паливо–повітря; Зд<sub>2</sub> – задавач відхилення поточної температури дуттьового повітря відносно температури палива; Зд<sub>3</sub> – задавач співвідношення паливо–повітря; К<sub>1</sub>–К<sub>6</sub> – перетворювачі рівня сигналів; М<sub>1</sub>, М<sub>2</sub> – монітори, які показують вхідні сигнали.

На перший вхід РГ від Н подається сигнал поточного навантаження, який змінюється від 0 до 1, що відповідає зміні навантаження від 0 до 100 %. На другий вхід РГ надходить сигнал швидкості об'ємної витрати газу. Вихідним сигналом РГ є сигнал поточної об'ємної витрати газу, значення якого також змінюється в межах від 0 до 1, що відповідає зміні швидкості витрати газу від 0 до 100 %.

Сигнал швидкості об'ємної витрати газу надходить на перший вхід РВ. На другий вхід РВ подається сигнал об'ємної витрати повітря. Сигнал від блока Зд<sub>3</sub> надходить на третій вхід РВ і задає вказане співвідношення.

БККД через розрахунок втрат, викликаних відхиленням від оптимального співвідношення паливо–повітря, обчислює технічний ККД.

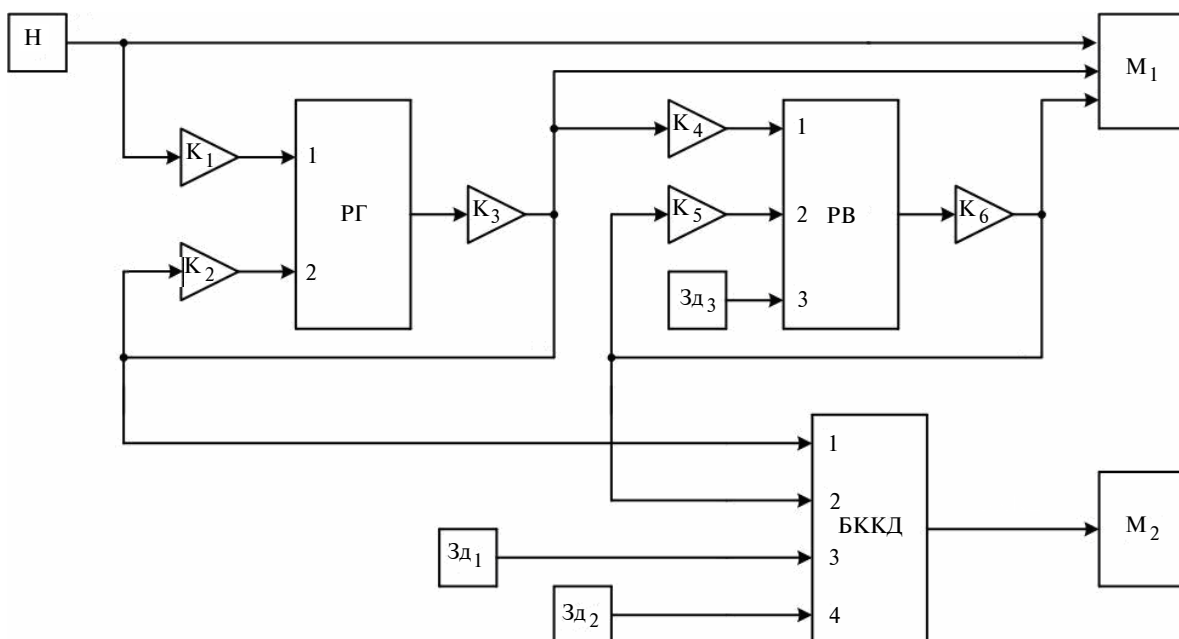


Рис. 1. Структурна схема системи регулювання співвідношення паливо–повітря

Великий вплив на загальний ККД котла має температура відхідних газів. При їх високій температурі загальний ККД котла знижується за умови, що вміст  $\text{CO}_2$  або  $\text{O}_2$  залишається незмінним.

Температура відхідних газів визначається конструкцією і технічними даними теплової установки і не може змінюватись при настроюванні співвідношення паливо–повітря, а тому при обчисленні технічного ККД враховується лише кількість втраченої енергії, спричиненої надлишком повітря, і енергії, викликаної нестачею дуттьового повітря. Також не враховується теплопровідність елементів теплової установки та положення ядра полум'я.

Можливі три режими горіння: при нестачі повітря, при надлишку повітря та при оптимальній кількості повітря.

У першому випадку енергетичними втратами є частина газу, що не згорів. Технічний ККД обчислюється як відношення корисної енергії до витраченої енергії:

$$\text{ККД} = \frac{X_2 G}{X_1 G} = \frac{\alpha X_1 k_{\text{пер}} k(t)}{X_1 k_{\text{опт}}} = \frac{\alpha k_{\text{пер}} k(t)}{k_{\text{опт}}}, \quad (2)$$

де  $X_1$ ,  $X_2$  – відповідно об'єм підведеного газу і газу, що згорів;  $k(t)$  – коефіцієнт, що враховує зміну кількості дуттьового повітря, викликану зміною температури дуттьового повітря відносно температури палива;  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря, значення якого рекомендовано вибирати від 1,01 до 1,02 [12];  $G$  – калорійність газу;  $k_{\text{пер}}$  – коефіцієнт передачі регулятора РВ;  $k_{\text{опт}}$  – теоретично необхідне співвідношення паливо–повітря для повного спалювання.

У другому випадку втрати розраховуються виходячи з того, що на кожні 15 % надлишку повітря припадає втрата одного відсотка ККД [7]. Надлишкова кількість повітря призводить до невинуватених втрат енергії разом із відхідними газами. При цьому ККД обчислюється за формулою

$$\text{ККД} = \frac{(X_1 - X_3)G}{X_1 G} = \frac{X_1(1 - 1 + e^{-\frac{Y - Y_{\text{опт}}}{15Y}})}{X_1} = e^{-\left(\frac{Y - Y_{\text{опт}}}{15Y}\right)}, \quad (3)$$

$$Y_{\text{опт}} = X_1 k_{\text{опт}} k(t), \quad (4)$$

де  $X_3$  – об'єм газу, що не згорів;  $Y$  – об'єм дуттьового повітря;  $Y_{\text{опт}}$  – теоретично необхідний об'єм дуттьового повітря для повного спалювання.

У третьому випадку умовно вважається, що ККД дорівнює 100 %.

### Кількісна оцінка впливу відхилення коефіцієнта настроювання регулятора від його оптимального значення на ККД

Під час моделювання процесу спалювання палива робимо ряд припущень:

- змішування кисню і газу відбувається до одержання продуктів повного спалювання;
- ступінь дисоціації продуктів спалювання і газу дорівнює нулю (розпад молекул на складові не відбувається);
- характеристики пальника лінійні у всьому робочому діапазоні;
- присоси повітря дорівнюють нулю.

Моделювання процесу спалювання палива проводилося при постійному сигналі навантаження, що відповідає 40 % навантаження котла, тобто технічний ККД обчислювався для сталого режиму. Значення коефіцієнта надлишку повітря при настроюванні РВ було вибрано 1,02.

Результати моделювання розглянутого процесу, а саме значення технічного ККД, наведено в табл. 1. Для кожної теплоти згорання природного газу є своє оптимальне значення коефіцієнта  $k_{\text{опт}}$ . Значення ККД відповідає різним значенням коефіцієнта передачі регулятора РВ.

**Таблиця 1.** Значення технічного ККД залежно від коефіцієнта передачі регулятора РВ та різної теплоти згорання газу

Рівень теплоти згорання природного газу	Значення ККД для різних $k_{\text{пер}}$		
	8,74	9,21	9,7
$Q_{\text{мін}}$	99,8	99,5	99,1
$Q_{\text{ном}}$	96,8	99,8	99,5
$Q_{\text{макс}}$	91,9	96,8	99,0

Технічний ККД, як видно з таблиці, залежить від теплоти згорання газу і  $k_{\text{пер}}$ , в найгіршому випадку технічний ККД спалювання газу зменшується до 91,9 %. Тому такий фак-

тор, як зміна складу газу має істотний вплив на ефективність спалювання палива.

### Вплив коливань температур палива і дуттьового повітря на ефективність спалювання палива

Однакова зміна температур дуттьового повітря та палива призведе до однакових змін кількості витрачуваного палива та дуттьового повітря, а співвідношення паливо–повітря практично не зміниться. Зміна цього співвідношення відбуватиметься при зміні температури дуттьового повітря відносно температури палива. Під час моделювання розглядався випадок, коли температура палива залишалась однаковою, а змінювалась тільки температура дуттьового повітря. Зміна технічного ККД обчислювалась за формулами (1)–(4). Результати розрахунку впливу зміни температури дуттьового повітря відносно температури палива на технічний ККД наведено в табл. 2. При розрахунках вважалося, що навантаження є постійним і дорівнює 50% від його максимального значення.

Таблиця 2. Кількісна оцінка впливу зміни температури на технічний ККД

Температура повітря $T$ , °C	Відхилення температури $dT$ , °C	ККД
-20	-30	97,8
-10	-20	98,7
0	-10	99,3
10	0	99,7
20	10	96,6
30	20	93,3

И.В. Шаповал

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Рассмотрены вопросы повышения эффективности сжигания топлива в энергетических установках и влияния возмущающих факторов на процесс управления соотношением топливо–воздух в процессе горения. Сделана количественная оценка влияния изменения состава природного газа и изменения температуры вдуваемого воздуха на эффективность сжигания топлива.

Як показують результати обчислень, вплив температури на співвідношення паливо–повітря є істотним.

Зміна складу палива та кількісного співвідношення різних видів палива практично не впливають на вміст кисню у відхідних газах (при  $\alpha = \text{const}$ ) [12]. Таким чином, якість регулювання співвідношення паливо–повітря може істотно підвищитись введенням у систему керування блока, що контролює відсотковий вміст кисню в продуктах згорання. Для того щоб зберегти  $\alpha$  близьким до одиниці (1,01–1,02), вміст кисню в продуктах згорання необхідно вимірювати з похибкою, що не перевищує  $\pm 0,01\%$  [12]. Вказані високі вимоги щодо точності вимірювання вмісту кисню істотно обмежує використання вимірювача кисню в автоматичних системах регулювання співвідношення повітря–паливо.

### Висновки

Зміна складу газу, а також коливання температури палива і дуттьового повітря істотно впливає на якість процесу спалювання палива. Вимірювач кисню дає змогу зменшити вплив коливань температури вхідних газів, але використання стаціонарного вимірювача кисню у відхідних газах обмежене через жорсткі вимоги щодо точності вимірювання. Для зменшення впливу зміни калорійності газу на ефективність керування процесом спалювання палива необхідно контролювати калорійність палива, температуру палива та дуттьового повітря. У подальшому будуть розглядатись питання ефективності роботи систем спалювання палива, які мінімізують відхилення роботи системи від оптимального режиму.

I.V. Shapoval

THE QUANTITATIVE ESTIMATION OF THE PERTURBATION INFLUENCE ON THE FUEL BURNING EFFICIENCY

This study considers the problems of the fuel burning efficiency increase in power generating systems and the influence of disturbing factors on fuel-air ratio regulation in the burning process. Emphasized here is the quantitative estimation of an impact of natural gas composition modification and temperature change of air blowing on the fuel combustion efficiency.

1. Митор В.В., Дубовский И.Е., Рубин М.М. Тепловой расчет котельных агрегатов. – Л.: Недра, 1973. – 188 с.
2. Пилипенко А.Т., Починок В.Я., Серета И.П., Шевченко Ф.Д. Справочник по элементарной химии. – К.: Наук. думка, 1980. – 440 с.
3. Фокин В.М. Теплогенераторы котельных. – М.: Машиностроение, 2005. – 110 с.
4. Дубанин В.Ю., Воскових В.И. Влияние коэффициента избытка воздуха и нагрузки котельных установок на их экономичность при сжигании различных видов топлива // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2002. – № 2. – С. 123–127.
5. Офіційна Web-сторінка ООО “МИКРОЛ”, <http://www.microl.com.ua/ecogas.htm>
6. Офіційна Web-сторінка ООО “Этанол”, <http://www.etalon-biysk.ru>
7. *Energy Efficiency Handbook / Alliance to Save Energy, Council of Industrial Boiler Operators, U.S. DOE Office of Industrial Technologies, 1998. – <http://www.eleKab.ru/obzor-5-5.htm>*
8. Клюева А.С. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 106 с.
9. Офіційна Web-сторінка ООО “Диаформ”, <http://www.difpribor.ru>
10. Родивилина Т.Ю., Иванов В.М. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция: Учеб. пособ. – Барнаул, 1997. – Ч. IV. – 105 с.
11. Джанколи Д. Физика. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
12. Тремболя В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 680 с.

Рекомендована Радою  
НАЦ критичних технологій  
навігаційного приладобудування  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
22 жовтня 2007 року