

УДК 621.43.056

ЦИФРОВИЙ АЛЬФА-ІНДИКАТОР КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНО-ПАЛИВНОЇ СУМІШІ НА БАЗІ ЦИРКОНІЄВОГО КИСНЕВОГО ЗОНДА

Бабак В.П., член-кореспондент НАН України, Назаренко О.О., Запорожець А.О.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, 03680, Україна

Розглянуто розроблену експериментальну модель зондового альфа-індикатора для контролю стехіометричного співвідношення повітряно-паливної суміші в котлоагрегатах. Показані можливості застосування зондового альфа-індикатора для зворотного зв'язку в системі частотного регулювання вентилятора подачі повітря на газовий паливник при оптимізації процесу горіння в котлах малої потужності (до 3,5 МВт).

Рассмотрена разработанная экспериментальная модель зондового альфа-индикатора для контроля стехиометрического соотношения воздушно-топливной смеси в котлоагрегатах. Показаны возможности применения зондового альфа-индикатора для обратной связи в системе частотного регулирования вентилятора подачи воздуха на газовую горелку при оптимизации процесса горения в котлах малой мощности (до 3,5 МВт).

In this paper the experimental model of probe alpha indicator for monitoring the stoichiometric ratio of the air-fuel mixture in utility boilers are considered. The possibilities of probe alpha-indicator application for feedback system in the optimization of the combustion process in boilers of low power (below 3.5 MW) are showed.

Бібл. 5, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: альфа зонд, датчик кисню, оптимізація процесу горіння, котельне обладнання.

[CO] – об'ємна концентрація чадного газу у димових газах;

[CO₂] – об'ємна концентрація вуглекислого газу у димових газах;

[HC] – об'ємна концентрація вуглеводнів у димових газах;

[O₂] – об'ємна концентрація кисню у димових газах;

H_{CV} – поправочний коефіцієнт для водню;

KI – коефіцієнт перетворення одиниць виміру;

M – співвідношення мас «повітря-паливо»;

O_{CV} – поправочний коефіцієнт для кисню;

$U_{вих}$ – вихідна напруга кисневого зонда;

α – коефіцієнт надлишку повітря;

ДВ – дуттєвий вентилятор;

ДР – датчик розрідження;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

C – значення стехіометричного співвідношення;

ШР – шкідливі речовини.

Постановка проблеми

Залежність України від імпорту енергетичних ресурсів, зокрема природного газу, використання застарілого теплоенергетичного обладнання та жорсткі екологічні вимоги щодо поліпшення стану навколишнього середовища, шляхом зменшення шкідливих викидів промисловими та комунальними об'єктами, вимагає створення нових методів моніторингу технічного стану елементів обладнання з метою модернізації устаткування, продовження ресурсу, розробки нових енергоощадних технологій, застосування яких забезпечує підвищення ефективності спалювання палива в теплоенергетичних установках та сприяє поліпшенню екологічного стану

довкілля. За даними Мінрегіонбуду та ЖКГ в Україні налічується більше 6000 одиниць котельних установок теплопродуктивністю 1 Гкал/год з ККД близько 70 %, що потребують заміни та модернізації, 40 % котлів експлуатуються з ККД менше 82 %, близько 11 тисяч котлів потужністю від 100 кВт до 1 МВт знаходяться в експлуатації більше 20 років, термін експлуатації 57 % котелень перевищує 20 років.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Підвищення рівня раціональності та ефективності згорання палива є важливою проблемою, рішення якої призведе до значної економії (~10 %) паливних речовин за рахунок знижен-

ня втрат теплоти та паливних матеріалів з їх хімічним недопалом.

Встановлення оптимального режиму згорання палива (зокрема, газу) в топках котлоагрегатів може проводитися за рахунок достовірних та оперативних даних про склад продуктів повного та неповного згорання [1, 2], а також надлишкового кисню в димових газах [3].

Автоматизація контролю за якістю згорання палива на сьогоднішній день є однією з актуальних задач. В [4] розглянуто можливості створення цифрового зонду для контролю співвідношення «газ-повітря» в котлоагрегатах в режимі реального часу. Аналіз існуючих зондів, використання яких можливе для автоматизації контролю за якістю згорання палива, приведено в роботах [3-5]. При цьому, суттєва перевага надається використанню кисневих зондів на основі ZrO_2 (діоксиду цирконію).

Формулювання цілі статті

Метою даної роботи є викладення результатів розробки експериментального зразка цифрового альфа-індикатора співвідношення «газ-повітря», його технічних характеристик, а також обґрунтування доцільності використання розробленого устаткування для систем оптимізації процесу горіння в котлах потужністю до 3,5 МВт.

Принцип дії

Для нормальної роботи котельної установки необхідно дотримуватися певного співвідно-

шення між об'ємами повітря та палива, що надходять до пальника котла. Оптимальне співвідношення «повітря-паливо» при згоранні характеризується величиною надлишку кисню в димових газах або, так званім, коефіцієнтом α (рис. 1).

При $\alpha = 1$ робота пальника є наближеною до оптимального режиму. Зміна складу поданого палива призводить до варіації вмісту відпрацьованих газів. На рис. 1 показана залежність концентрації забруднюючих домішок газових викидів від масового співвідношення «повітря-паливо».

Значення коефіцієнта надлишку повітря визначається не тільки вмістом кисню у відпрацьованих газах, але і наявністю інших речовин (CO , CO_2 , NO_x , HC). Крім цього, потрібно враховувати параметри палива, що використовується. Для розрахунку параметра α можна застосувати рівняння Бретшнайдера [3]:

$$\alpha = \frac{\{[CO_2] + [CO/2] + [O_2] + [(H_{CV}/4 \times 3,5/(3,5 + [CO]/[CO_2])) - O_{CV}/2 \times ([CO_2] + [CO])]\}}{\{(1 + H_{CV}/4 - O_{CV}/2) \times ([CO_2] + [CO] + K1 \times [HC])\}}. (1)$$

Наявність залишкового повітря в димових газах котельної установки можна контролювати за рахунок кисневого зонда. При цьому, для відображення результатів контролю необхідне застосування цифрового альфа-індикатора.

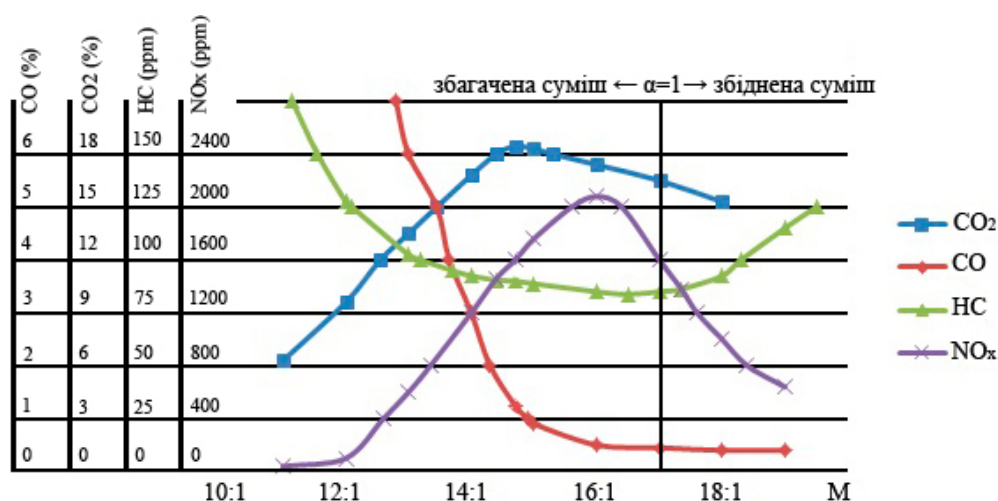


Рис. 1. Залежність зміни вмісту шкідливих речовин у димових газах котла від складу повітряно-паливної суміші.

Корекція параметрів суміші, що надходить до топки котельної установки, реалізується шляхом зменшення або збільшення кількості дуттового повітря. Збагачення суміші призводить до збільшення вмісту CO і HC у димових газах, збільшення витрат палива та неефективної роботи котельної установки, а збіднення – до збільшення вмісту HC та NO_x (при $\alpha > 1$ спостерігається зниження рівнів викидів NO_x внаслідок зниження температури робочого процесу).

Експериментальна модель

Використання регулювання співвідношення «повітря-паливо» з автоматичним настроюванням частоти обертання вентилятора, залежно від подачі природного газу дозволить забезпечити малотоксичне спалювання природного газу з незначним викидом оксидів азоту. Основою для створення експериментального зразка цифрового зондового альфа-індикатора став цирконієвий кисневий зонд виробництва фірми Bosch (рис. 2).

Кисневі зонди широко використовуються в автомобілебудуванні у зв'язку з постійно зростаючими вимогами до токсичності димових газів, і часто встановлюються разом з каталітичними конвертерами. Один кисневий зонд встановлюється у випускному колекторі безпосередньо перед каталізатором. Застосування другого зонда безпосередньо після конвертору у вихлопній системі дозволяє максимально підвищити систему регулювання надлишку повітря і забезпечити повне та малотоксичне згорання природного газу.

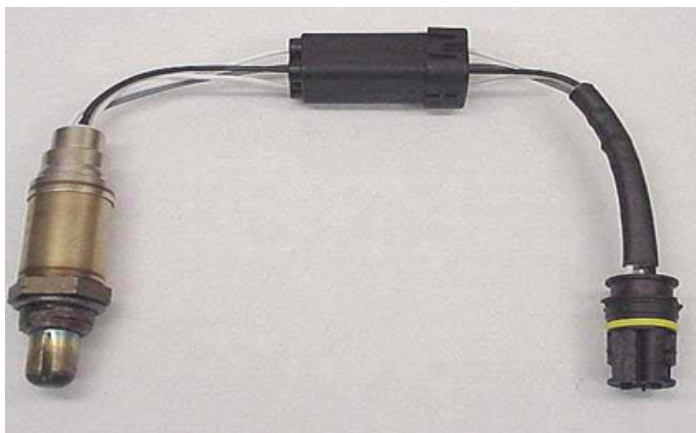


Рис. 2. Цирконієвий кисневий зонд фірми Bosch.

Оптимальні показники забезпечуються шляхом дотримання стехіометричного співвідношення повітря/паливо. Відхилення від оптимального співвідношення суміші призводить до варіації вмісту токсичних газів. Надлишок палива призводить до утворення вуглеводню (HC) і оксиду вуглецю (CO). Надлишок повітря викликає зростання рівня оксиду азоту (NO_x). Кисневий зонд розрізняє відхилення відношення повітря/паливо від ідеального і за допомогою цифрового індикатора фіксує кількість надлишку кисню в вихідних газах.

Застосування кисневих зондів такого типу у системах електронного регулювання співвідношення «повітря-паливо» для пальників типу ГБГМ дозволить поліпшити якість згорання палива.

Побудова зонда. Кисневий зонд (рис. 3) є гальванічним осередком (коміркою Нернста) з твердим електролітом.

Як базисна речовина використовується газонепроникна кераміка з діоксиду цирконію (ZrO_2), стабілізованого оксидом ітрію (YO). Один датчик зонда розміщується безпосередньо у топці котла, інший – сполучений з атмосферним повітрям.

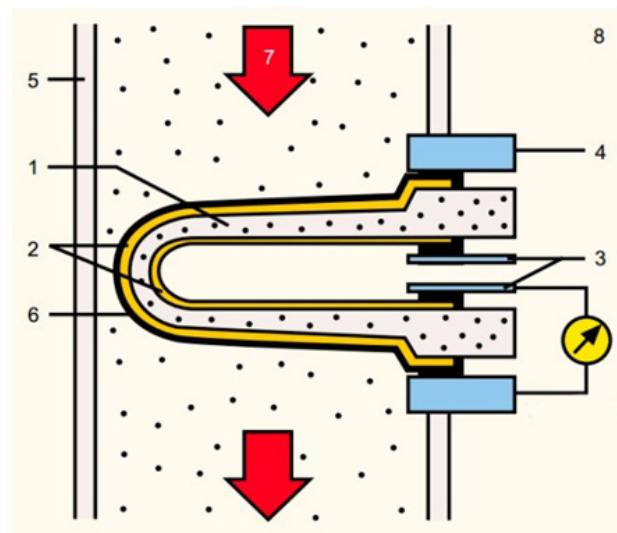


Рис. 3. Схема підключення кисневого зонда (1 – керамічне покриття, 2 – електроди, 3 – контакти, 4 – контакти корпусу, 5 – стінка труби, 6 – керамічна підтримуюча оболонка (пориста), 7 – димові гази, 8 – атмосферне повітря).

На зовнішню і внутрішню сторони кераміки наносяться газопроникні електроди з тонкого шару платини [5]. Платиновий електрод на зовнішній стороні відіграє роль мініатюрного каталізатора, що підтримує в прилеглому шарі вихідних газів проходження хімічних реакцій; цей шар знаходиться в стані стехіометричної рівноваги. Сторона чутливої кераміки, направленої до вихідних газів, покрита шаром пористої шпінелевої кераміки (шпінель – мінералогічна назва тетраоксиду діалюмінія-магнія). Металева трубка з щілинами зберігає кераміку від ударів і надмірних теплових навантажень. Внутрішня порожнина з'єднується з атмосферою і служить як опорна сторона. Робота зонда базується на принципі комірки Нернста (гальванічної комірки). Керамічний матеріал пропускає іони кисню при температурі 350 °С і вище. Різниця в кількості кисню з різних сторін чутливої зони зонда призводить до утворення електричного потенціалу

між двома поверхнями (внутрішньої і зовнішньої). Величина напруги показує на скільки відрізняється кількість кисню між цими площинами.

В залежності від кількості дуттєвого повітря $U_{\text{вих}} = 0,8 \dots 1,0$ В для «багатої» суміші і $U_{\text{вих}} = 0,05 \dots 0,1$ В для «бідної» суміші. Зона між надлишком і дефіцитом повітря відповідає стехіометричному співвідношенню ($U_{\text{вих}} = 0,45 \dots 0,5$ В, рис. 4).

Розробка пристрою. Альфа-індикатор зондовий (рис. 5) є системою, що складається із блоку світлодіодної індикації та вимірювального (кисневого) зонда. Блок індикації одержує сигнал від кисневого зонда, розташованого у вимірювальному зонді, та продукує результат вимірювання коефіцієнту надлишку повітря α на лінійці світлодіодів [3].

В таблиці наведено основні технічні характеристики розробленого зондового альфа-індикатора.

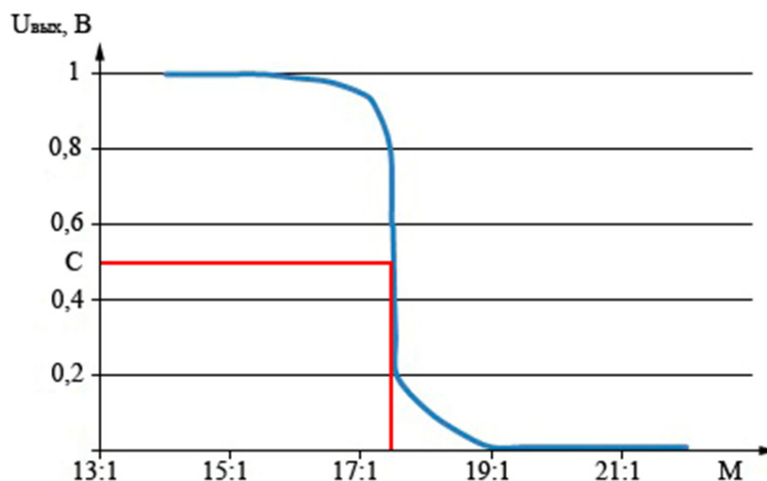


Рис. 4. Залежність напруги на виході кисневого зонда від співвідношення складу повітряно-паливної суміші.



Рис. 5. Цифровий зондовий альфа-індикатор.

Таблиця

Вихідний сигнал вимірювального зонда, В	+0,1...+1,0
Відгук (затримка за часом індикації) для 50 % ступінчатого збурювання, сек	0,1...0,3
Початковий час підготовки до вимірів, сек	≤ 120,0
Діапазон вимірювань параметра α	0,68...1,32
Відносна похибка, %	3
Індикація результатів вимірювань	світлодіодна
Довжина кабелю сполучення, м	≤ 5
Температура навколишнього середовища при відносній вологості до 80%:	
блоку індикації, °С	5...50
коробки вимірювального зонда, °С	5...70
Умови в точці вимірювань:	
температура середовища, °С	50...250
швидкість потоку, м/с	≤ 15
тиск, Па	≤ ± 500
Маса, кг:	
блоку індикації	≤ 0,2
вимірювального зонда	≤ 1,0
Габаритні розміри, мм:	
блоку індикації	110 × 65 × 40
вимірювального зонда	150 × 150 × 500
в т.ч. довжина заглибної частини вимірювального зонда	50...500

Головні переваги та відмінні риси розробленого цифрового зондового альфа-індикатора:

1. Швидке і точне зондове вимірювання концентрації залишкового кисню в димових газах.
2. Відсутність систем відбору і підготовки проби.
3. Простота заміни деталей зонда без його демонтажу.
4. Динамічна індикація відображення концентрації залишкового кисню та малий час відгуку.
5. Стабільна робота і довгий термін експлуатації, зручність в експлуатації і обслуговуванні.
6. Гнучкість в інсталяції на різні типи теплових агрегатів.
7. Значний рівень енергозбереження (зменшення концентрації залишкового кисню в димових газах на 1 % приводить до економії палива на 0,8 %).

Розробка структури автоматичної системи управління тягодуттєвими механізмами котельної установки

Основним недоліком існуючих систем управління тягодуттєвими машинами є те, що про-

диться тільки вимірювання розрідження в топці котла і не враховуються показники газів, що відходять. Це може приводити до неповного згорання палива і зростання викидів шкідливих речовин в атмосферу. Розрідження не є найточнішим показником, по якому можна орієнтуватися при управлінні тягодуттєвою системою котла.

Очевидно, що для досягнення максимальної ефективності роботи котлоагрегата і зменшення паливних витрат необхідно знати склад і температуру газів, що відходять. Відомо багато способів вимірювання вмісту O_2 і CO_2 в топкових газах. Традиційний метод заснований на використанні апаратури, в якій поглинання двоокису вуглецю або кисню з проби топкових газів досягається за допомогою спеціальних хімічних розчинів. Зміни об'єму проби служать індикацією складу топкових газів.

Досконаліші методи вимірювань базуються на використанні газоаналізаторів. Ці пристрої відрізняються більшою точністю і можуть бути

використані в системах автоматизації. По отриманих результатах аналізу розрахунковим шляхом або по таблицях і діаграмах можуть бути отримані шукані параметри режиму горіння.

Однак найбільш точним і ефективним способом отримання результатів є застосування сучасних електронних газоаналізаторів, що в режимі реального часу можуть з високою точністю фіксувати всі необхідні значення параметрів процесу і оперативно вносити зміни в режим роботи котельної установки для досягнення максимальної ефективності. Надзвичайно важливим нововведенням в економічному плані є оснащення двигунів дуттєвих вентиляторів і димососів частотними регуляторами.

Проте більш точним і ефективним способом отримання результатів є використання апаратури з датчиками, що формують електричний сигнал, пропорційний вмісту кисню в топковому газі, тобто розробленого в ІТТФ НАН України цифрового зондового альфа-індикатора, що дозволяє в режимі реального часу, з високою точністю оперативно вносити зміни в режим роботи пального котлоагрегата для досягнення максимальної ефективності спалювання газу. Важливим нововведенням при цьому є оснащення двигунів вентиляторів дуття і димососів частотними регуляторами.

На сьогоднішній день в більшості котелень ситуація така, що в опалювальний сезон двигуни працюють весь час на повну потужність, а оператор котельної вручну, за допомогою шибєрів, регулює подачу повітря. Якщо врахувати, що в найхолодніший період опалювального сезону вистачило б 75...80 % потужностей, а у більшу частину часу взагалі 40...50 %, то відразу стає очевидною економія електроенергії майже в 2 рази, при використанні автоматичних регуляторів.

Вузлом обліку тепла є комплекс приладів для забезпечення вимірювання маси і енергії теплоносія. Вузли обліку теплової енергії розділяються на технічні і комерційні. Вузол комерційного обліку теплової енергії забезпечує контроль і реєстрацію параметрів теплової енергії. Комерційний вузол обліку тепла і теплової енергії необхідний прямому споживачеві теплової енергії для проведення розрахунків з нею на підставі показань лічильників і витратомірів теплової енергії.

При цьому обов'язковим є узгодження встановлення вузла обліку теплової енергії в теплопостачальній організації. Проте, якщо тепла енергія споживається не лише прямим споживачем від теплопостачальної організації, а і наступним споживачем, тобто третьою стороною, то для їх взаємин (прямого споживача і третьої сторони) використовується вузол технічного обліку теплової енергії. Даний вузол обліку вже не обов'язково погоджувати з теплопостачальною організацією, оскільки вона не втручається у відносини прямого споживача і третьої сторони.

Вузли обліку води – це прилади і пристрої, об'єднані в систему, призначену для вимірювання і реєстрації витрат води. Комерційний вузол обліку води призначений для ведення обліку водоспоживання і водовідведення, на підставі якого формуються взаєморозрахунки за фактично використані об'єми водоспоживання і водовідведення. Також вузол обліку рідин і води дає можливість аналізувати власні втрати, для вживання заходів їх зменшення, та автоматично регулювати водний баланс.

Структурна схема підключення устаткування автоматизованої системи управління тягодуттєвими механізмами, що розроблена в ІТТФ НАН України, зображена на рис. 6.

Висновки

На даний момент більшість котелень гостро потребують модернізації, оскільки практично не автоматизовані, і більшістю процесів людина керує самостійно, допускаючи помилки.

Однією з основних проблем у котельнях є та обставина, що не регулюються потужності димососів і вентиляторів дуття. Двигуни весь час працюють на максимальній потужності, а оператор котельної для регулювання подачі повітря і відсмоктування відхідних газів вручну відкриває або закриває шибєр.

Унаслідок такої системи управління швидше зношуються двигуни, збільшуються шкідливі викиди в атмосферу (із-за браку повітря) чи втрачається ККД (із-за надлишку повітря). Ідеальне співвідношення для горіння газ/повітря – 1/17,2, але реально використовують і 1/10...1/8, а через ручне налаштування може збиватися до 1/5, що призводить до великих втрат палива і до

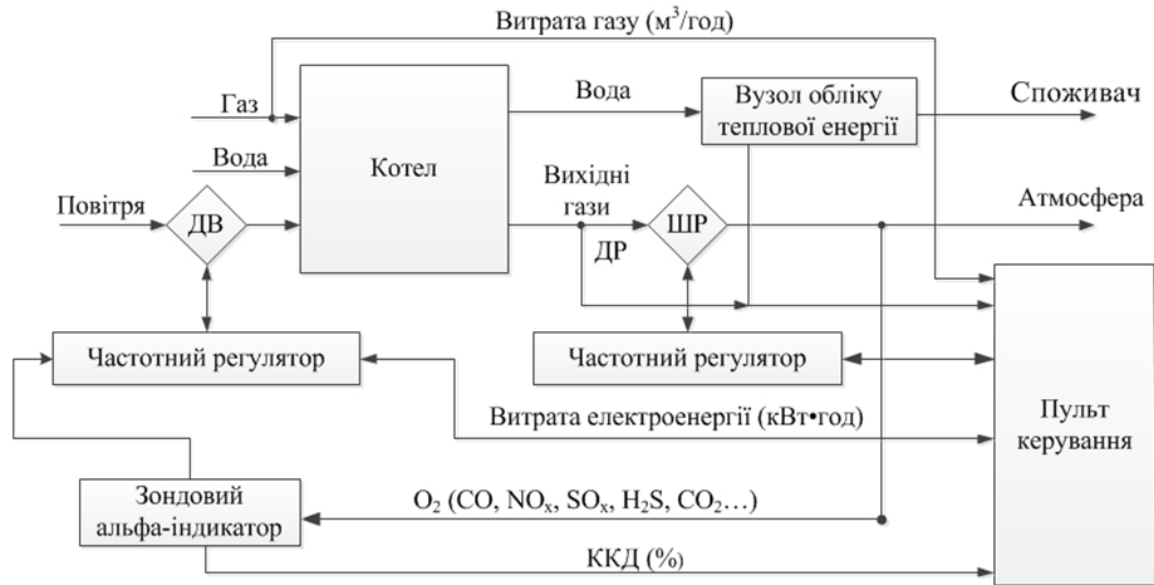


Рис. 6. Структурна схема АСУ ТДМ.

підвищення вмісту шкідливих газів у викидах.

Проаналізовано залежність вмісту шкідливих речовин в димових газах котельної установки від складу повітряно-паливної суміші; показано наслідки варіації α -параметру при роботі котельної установки. Розглянуто експериментальний зразок цифрового регулятора повітряно-паливної суміші на основі цирконієвого α -зонда; показано переваги запропонованої системи при застосуванні в оптимізації процесів горіння для котлів малої потужності (до 3,5 МВт).

Створення автоматичної системи регулювання подачі палива і повітря в топку котла зі зворотним зв'язком з використанням зондового альфа-індикатора істотно знизить витрати і шкідливі викиди в атмосферу. Вимірюючи кількість кисню в газах, що відходять, і враховуючи теплове навантаження в конкретний момент часу, можна ефективно управляти подачею палива і повітря для підтримання максимального ККД.

ЛІТЕРАТУРА

1. Патент № 2247900 Россія, МПК F23N1/02. Способ автоматического регулирования режима

горения в топке котла / Киселев М.В., Штрамбранд Б.А. (Россия) – № 1332104; заявл. 18.03.2003; опубл. 10.03.2005. – 4 с.

2. Patent № 203117804 China, IPC G05D11/13. Automatic oxygen-adding control device for once-through boiler / Z. Zhiping, T. Xueying, T. Chaohui (China) – № 201320128130; fil. 20.03.2013; publ. 7.08.2013. – 6 p.

3. Дослідження теплофізичних і гідродинамічних процесів у робочому просторі котла та визначення можливих місць розміщення α -зонду. Розробка обладнання для підвищення ефективності спалювання палива в котлах потужністю до 3,5 МВт в залежності від якості природного газу з використанням α -зонду: звіт про НДР. ІТТФ НАН України // Бабак В.П., Назаренко О.О., Запорожець А.О. – Київ: 2013. – 40 с. – № ДР 0113U001889. – Інв. № 0713U005518.

4. Лещенко В.П. Кислородные датчики / В.П. Лещенко. – М.: Легион-Автодата, 2003. – С. 4 – 12.

5. Bosch technische Berichte. – Vol. 6, №4. – 1979. – P. 177 – 186.

DIGITAL ALPHA INDICATOR OF AIR-FUEL RATIO CONTROL BASED ON ZIRCONIUM OXYGEN PROBE**Babak V.P., Nazarenko O.O., Zaporozhets A.O.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Science of Ukraine, Zhelyabova str., 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

Key words: alpha probe, oxygen sensor, optimization of combustion process, heating equipment.

The process of fossil fuels burning in boilers of small capacity ($\leq 3,5$ MW) are considered in article. The scientific significance of the work consists in research the method of residual oxygen measurement in the combustion products for further using in feedback control systems (based on α -probe). The results of scientific and experimental research are used in the theory of stationary alpha indicator creation. References 5, table 1, figures 6.

1. *Patent № 2247900 Russia*, IPC F23N1/02. A method of automatic control mode of combustion in the boiler furnace / Kiselev M.V., Shtrambrand B.A. (Russia) – № 1332104; fil. 18.03.2003; publ. 10.03.2005. – 4 p. (Rus)

2. *Patent № 203117804 China*, IPC G05D11/13. Automatic oxygen-adding control device for once-through boiler / Z. Zhiping, T. Xueying, T. Chaohui (China) – № 201320128130; fil. 20.03.2013; publ. 7.08.2013. – 6 p.

3. *Investigation of thermal and hydrodynamic processes in the working space of the boiler and determine the possible locations for α -probe. Development of equipment to improve the efficiency of fuel combustion in boilers with capacity below to 3.5 MW with using α -probe depending on the quality of natural gas: Report on res. / IETP NAS of Ukraine; lead. Babak V.P.; perf.: Babak V.P., Nazarenko O.O., Zaporozhets A.O. – Kiev: 2013. – 40 p. – № SR 0113U001889. – Inv. № 0713U005518. (Ukr.)*

4. *Leshhenko V.P.* Oxygen sensors / V.P. Leshhenko. – M.: Legion Avtodata, 2003. – P. 4 – 12. (Rus.)

5. *Bosch technische Berichte*. – Vol. 6, №.4. – 1979. – P. 177-186.

Получено 05.02.2014
Received 05.02.2014