

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА В КОТЛАХ ПОТУЖНІСТЮ ДО 3,5 МВт З ВИКОРИСТАННЯМ α -ЗОНДУ

В.П. БАБАК, чл.-корр. НАН України, д.т.н., проф., **А.О. ЗАПОРОЖЕЦЬ**, аспірант,

О.О. НАЗАРЕНКО, аспірант

(Інститут технічної теплофізики НАН України)

Анотація: Проведено комплексний аналіз теплофізичних та гідродинамічних процесів в робочому просторі котла НІСТУ-5 з використанням пальника типу ГБГМ. Розроблені алгоритм та принципова схема процесу регулювання співвідношення повітряно-паливної суміші для пальника ГБГМ зі зворотним зв'язком по сигналам α -зонду на базі частотно-регульованих електроприводів. Запропонована математична модель повітряно-паливного тракту для котлів малої та середньої потужності та проведено комп'ютерне моделювання розробленої системи для оптимізації процесу спалювання палива. Представлено рішення для підвищення точності визначення коефіцієнта надлишку повітря на базі поточної об'ємної концентрації кисню в повітрі. Наведено результати аналізу сезонної зміни об'ємної концентрації кисню в повітрі на території України. Розроблена комплексна система для оптимізації процесу горіння в котлах потужністю до 3,5 МВт з використанням α -зонду.

Ключові слова: ширококутовий кисневий зонд, повітряно-паливна суміш, коефіцієнт надлишку повітря, котлоагрегат, частотне регулювання, оптимізація процесу горіння

Вступ

Теплоенергетика за рівнем автоматизації займає одне з провідних місць серед інших галузей промисловості. Теплоенергетичні установки характеризуються безперервністю процесів, що в них протікають. При цьому вироблення теплової енергії в будь-який момент часу повинно відповідати заданому навантаженню.

Однією зі сфер, що входить до складу енергетичного комплексу України, є комунальна теплоенергетика. Сучасний технічний стан її об'єктів та недосконалість системи регулювання призводить до значних втрат паливних ресурсів (зокрема природного газу) при генеруванні, транспортуванні та використанні теплової енергії. Саме в цій галузі зосереджено один з найбільш потенціалів енергозбереженні, тому комунальна теплоенергетика потребує комплексних заходів модернізації.

Структура споживання енергоресурсів в секторах економіки країни показує, що біля 40% котельно-пічного палива направляється в сферу теплозабезпечення, і саме в ній знаходиться основний потенціал енергозбереження. Однак, ця важлива сфера ЖКГ знаходиться в незадовільному стані та потребує негайних перетворень. Необхідність цих змін обумовлена значним негативним впливом підприємств теплозабезпечення на навколишнє середовище [1].

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 [2]. Серед них значна кількість котлів

НІСТУ-5 (близько 5000 одиниць), «Універсал», «Мінськ» тощо [3] (рис.1). Зведена характеристика котлоагрегатів, що широко використовуються в сфері комунальної теплоенергетики України представлена в таблиці 1, при цьому заявлений ККД цих котлів не відповідає дійсності.

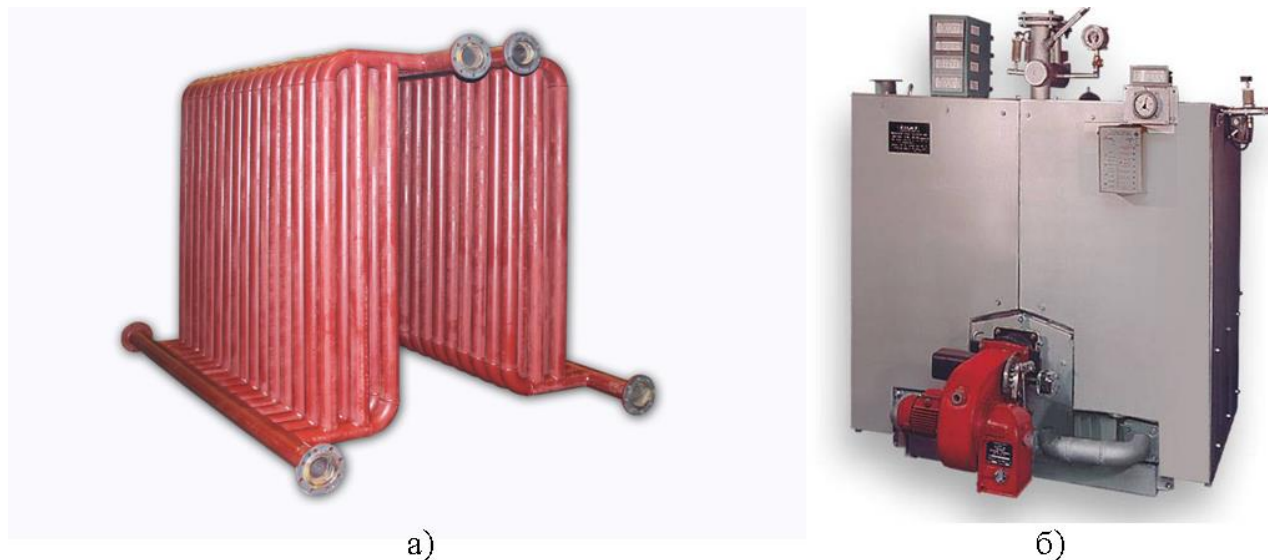


Рис. 1. Найбільш розповсюджені котлоагрегати: а) НІСТУ-5, б) Універсала-5М

Таблиця 1

Характеристика котлоагрегатів малої потужності, що використовуються в комунальній сфері

Тип котла	Номінальна теплопродуктивність, МВт/год	Теоретичні значення ККД, %	
		Природний газ	Рідке паливо
НІСТУ-5	0,35-0,80	90	–
Універсал-6	0,35-0,75	87	–
Віктор-100	0,12	93	93
УСШ-1-14	0,63	–	85
Е-0,1-0,9	0,63	89	85
КПО	0,06-0,35	91	91
Колви-90	0,10	93	92

На даний момент більшість котелень, що використовують ці типи котлів, потребують жорсткої модернізації, оскільки практично не автоматизовані і більшою частиною процесів оператор керує вручну, допускаючи помилки та неточності.

Однією із основних проблем в котлах, що експлуатуються на даний час в Україні, є відсутність регулювання димососів і дуттєвих вентиляторів. Двигуни цих елементів постійно працюють на максимальній потужності, а оператор котельної для регулювання подачі повітря і відсмоктування відхідних газів вручну регулює положення шибера.

Унаслідок використання ручної системи регулювання швидше зношуються двигуни, зростають викиди шкідливих речовин в атмосферу (внаслідок браку повітря) чи зменшується ККД котлоагрегату (із-за надлишку повітря (кисню)). Теоретично оптимальне співвідношення для горіння «повітря/газ» складає близько 17/1, але реально використовують 25/1-30/1, що призводить до великих втрат теплоти із відхідними газами (рис. 2).



Рис. 2. Схема утворення надлишкового повітря в процесі горіння

Таким чином, задача створення автоматичної системи регулювання співвідношення «повітря-паливо» при подачі в топку котла є актуальною задачею. Вимірюючи концентрацію кисню у відхідних газах, і враховуючи теплове навантаження в конкретний момент часу, можна ефективно управляти співвідношенням «повітря-паливо» для здобуття максимального ККД на кожному котлоагрегаті в цілому.

Постановка завдання

Теперішній стан теплоенергетичної галузі вимагає надійних і швидкодіючих систем контролю складу продуктів згорання палива та розробку на їх основі досконалих систем регулювання процесу горіння по всім технологічним, економічним та екологічним параметрам роботи теплоенергетичних агрегатів.

На даний в комунальній теплоенергетиці України вибірково застосовуються ряд систем регулювання процесом горіння [4-6], проте вартість і технологічні складнощі при виготовленні та інсталяції цих систем не дозволяють використовувати їх на широкому класі теплоенергетичних об'єктів

У статті запропоновано новий підхід при розробці автоматичних систем регулювання процесом горіння, що базується на використанні частотно-регульованих електроприводів та α -зонду. Базові конструкційні елементи цього способу захищені патентом України на винахід [7].

Основний зміст

Моделювання робочого простору котла НІСТУ-5

Для проведення комплексного аналізу теплофізичних та гідродинамічних процесів в робочому просторі котла НІСТУ-5 модернізованого шляхом інтеграції пальника типу ГБГМ були проведені попередні вимірювання геометричних розмірів котла, трубного пучка та інших додаткових елементів. Розміри розрахункової області котла (довжина×ширина×висота) склали 2,71 м×1,32 м ×1,80 м. Кінцевий вигляд комп'ютерної моделі котла був отриманий з використанням модифікованого прикладного пакету Phoenics (рис. 3).

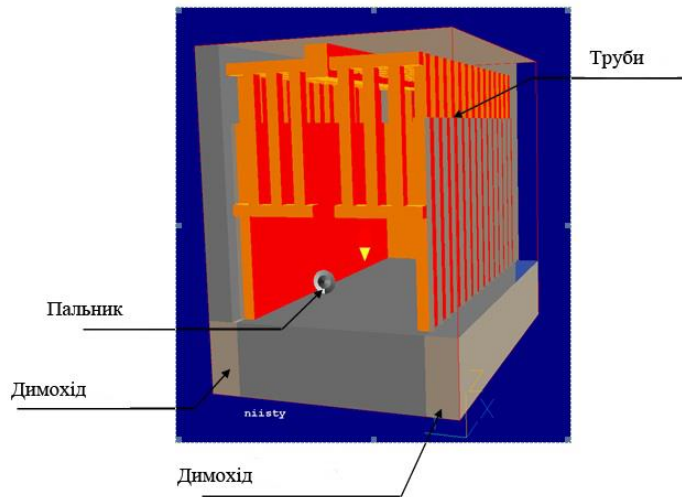
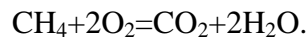


Рис. 3. Модифікована комп'ютерна модель котла НІСТУ-5

При моделюванні термогазодинамічних параметрів котла НІСТУ-5 КНП задавався на рівні 1,05, а параметри потоку на вході котла задавалися на основі даних комп'ютерної моделі пальника ГБГМ.

Методом кінцевих елементів проводилося моделювання наступних фізико-хімічних процесів: горіння природного газу в кисні повітря, турбулентність в реагуючому середовищі, конвективний та променевий теплообмін. При розрахунках прийнято спрощення процесу окислення пального – рівняння бруто реакції горіння протікає в одному напрямі:



Моделювання газового середовища проводилося в наближенні Ейлера, при цьому головним завданням дослідження стало визначення полів швидкостей та температури. У відповідності з цим математична модель включає в себе наступні рівняння [8-10]:

- нерозривності

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0;$$

- руху

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] + \rho g_i,$$

$$j = 1, 2, 3;$$

- енергії

$$\frac{\partial U_i \rho c_p T}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij} U_i}{\partial x_j} + S,$$

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i};$$

- стану

$$\rho = \frac{p}{R_o T \left[\frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{C_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{C_{CH_4}}{M_{CH_4}} + \frac{C_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{C_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right]}.$$

Тут x_i – декартові координати; U_i – компоненти вектора швидкості; ρ , p , T , c , μ , g – густина, тиск, температура, питома теплоємність, динамічна в'язкість суміші, прискорення вільного падіння; δ_{ij} – символ Кронекера; τ_{ij} – компоненти тензора рейнольдських напружень; S –

число Шмідта; λ – коефіцієнт теплопровідності; C_j – концентрація компонентів; M_j – молекулярна маса компонентів суміші.

Для замикання рівнянь турбулентного руху використовувалась к-ε модель турбулентності, яка добре себе зарекомендувала в задачах з сильною кривизною ліній струму і є справедливою для повністю розвиненої турбулентної течії, тобто для високих чисел Рейнольдса, коли прямий вплив в'язкості на структуру турбулентності нехтовно малий [11-14].

Для опису турбулентних характеристик газу використовувалася двухпараметрична к-ε модель турбулентності Лаундера та Сполдінга:

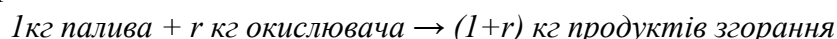
$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right],$$

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = 1,44 \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - 1,92 \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{1,3} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right],$$

$$\mu_t = 0,09 \rho \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

В даних рівняннях k , ε – кінетична енергія турбулентності та швидкість її дисипації; μ_t – турбулентна в'язкість.

Моделювання горіння природного газу здійснювалося за допомогою вбудованої в пакет моделі горіння SCRS, згідно якого горіння природного газу проходить на основі стехіометричної реакції:



Для математичного моделювання протікання хімічної реакції в турбулентному потоці застосовувалася модель Сполдінга (Eddy-Break-Up – EBU), відображена в роботах [14-16]. Згідно даної моделі швидкість хімічної реакції пропорційна інтенсивності турбулентного перемішування:

$$\bar{w}_t = A_{EBU} \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \min \{ \tilde{c}_f, \tilde{c}_{ox} / \nu \},$$

де A_{EBU} – коефіцієнт моделі; ε – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності; k – питома кінетична енергія турбулентності; \tilde{c}_f – масова концентрація пального; \tilde{c}_{ox} – масова концентрація окиснювача; ν – стехіометричний коефіцієнт.

Враховуючи реальний склад природного газу та зміну вологості дуттьового повітря отримані поля швидкостей та температури в робочому просторі котла НІСТУ-5 [17] при різних значеннях потужності пального (100%, 50%, 20%) (рис. 4).

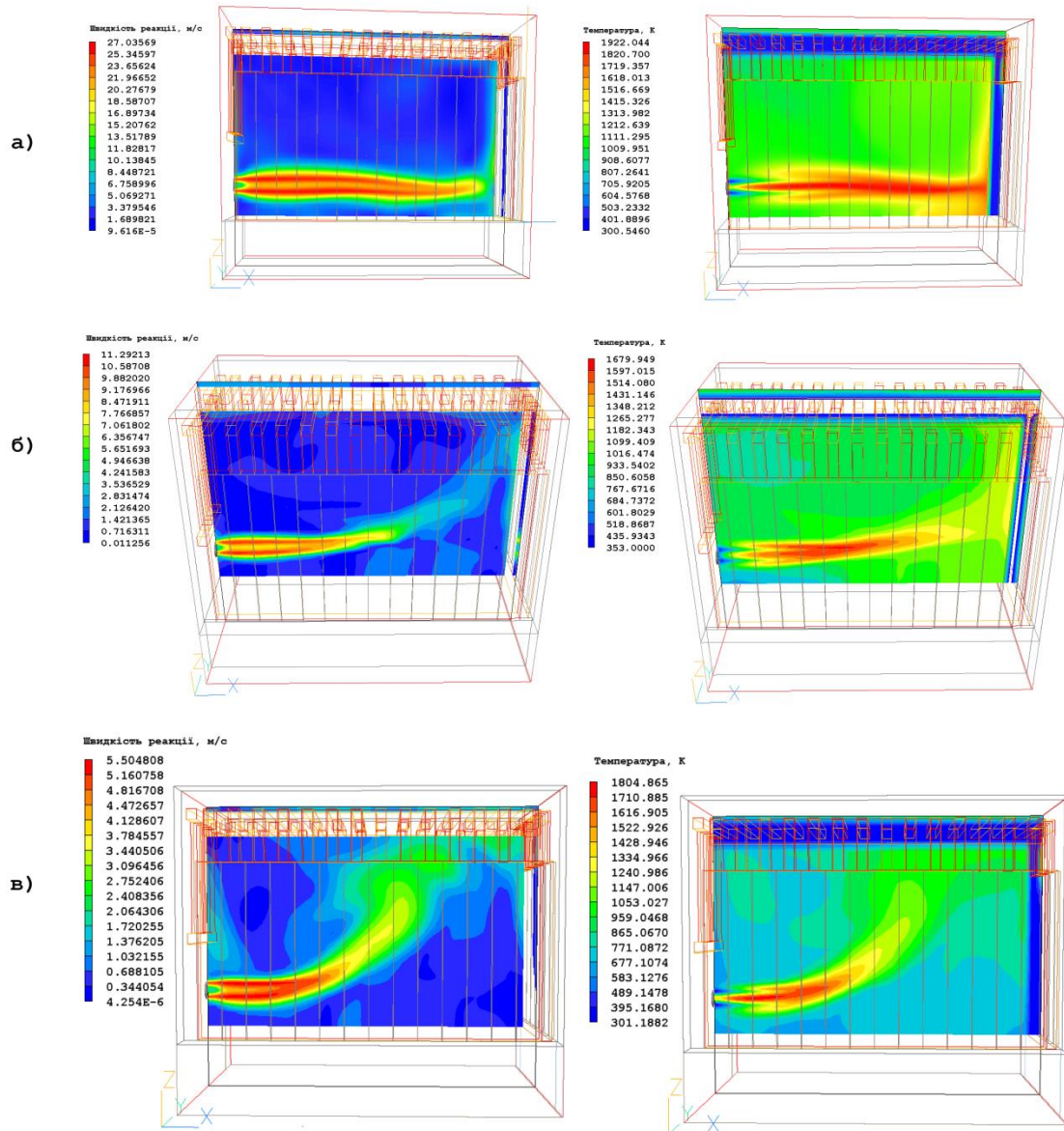


Рис. 4. Розподіл швидкості та температури продуктів згорання уздовж осі пальника у вертикальній площині при різних значеннях його потужності: а) 100%; б) 50%; в) 20%

Наведені результати моделювання робочого простору модернізованого шляхом інтеграції пальника типу ГБГМ котла НІСТУ-5 свідчать про наступне:

- при експлуатації на номінальній потужності задній екран котла потребує додаткового захисту на висоті в 1 метр від поду. Захисний механізм може бути виконаний у вигляді цегляної кладки або шляхом забезпечення пальника крутильним пристроєм, що зменшить довжину факелу та дозволить запобігти удару гарячих газів на задню стінку котла;
- інсталяція α -зонду для забезпечення оптимального спалювання природного газу можлива тільки у тих місцях, температура яких не перевищує 800°C , що відповідає нормальним умовам функціонування зонду [18], тому рекомендованим місцем інсталяції α -зонду є димовий тракт з максимальним технічно можливим наближенням до топки котла (для зменшення додаткових присосів повітря).

Алгоритм та принципова схема регулювання

Дослідження структури втрат енергоресурсів у сфері виробництва, розподілу та споживанні електроенергії дозволяє зробити висновок, що головна частина втрат (близько 90%) припадає на сферу енергоспоживання. Виходячи з того, що більше 60% усієї виробленої енергії споживають електроприводи, доцільно стверджувати, що актуальною задачею залишається енергозбереження при проектуванні, експлуатації та модернізації систем електроприводу.

Найбільш ефективним і економічним способом регулювання продуктивності електроприводу вентиляторів є плавна зміна їх швидкості обертання, яка досягається шляхом застосування частотно-регульованого електроприводу. Зміна частоти їх обертання є задачею, що вирішується за допомогою перетворювачів частоти (рис. 5). Сучасний стан електротехнічного устаткування дозволяє варіацію частоти з похибкою 0,01%.



Рис. 5. Регулятор співвідношення частотний (виробництво ПРОМЕЛ)

Застосування частотно-регульованого електроприводу вентиляторів дозволяє досягти наступних переваг [19]:

- підтримку необхідного співвідношення «повітря-паливо»;
- зменшення електроспоживання в середньому на 30-40%;
- усунення пускових струмів і перевантажень двигуна;
- зменшення механічного зносу устаткування і зниження витрат на його технічне обслуговування та ремонт;
- збільшення терміну служби контактної-комутаційної апаратури і зниження ймовірності виходу з його ладу.

Для вирішення завдання ефективного регулювання режимів роботи вентилятора пальника запропонований алгоритм, що поєднує регулювання продуктивності вентилятора як за допомогою зміни частоти обертання, так і зміною положення заслінки. На рис. 6 наведена блок-схема, що реалізує запропонований спосіб для вентилятора опалювального котла. Наведена конфігурація складається з вентилятора, пов'язаного з частотним перетворювачем; датчика положення заслінки; регулятора, пов'язаного з α -зондом, що вимірює поточну концентрацію надлишку кисню в димових газах; заслінку та задатчик.

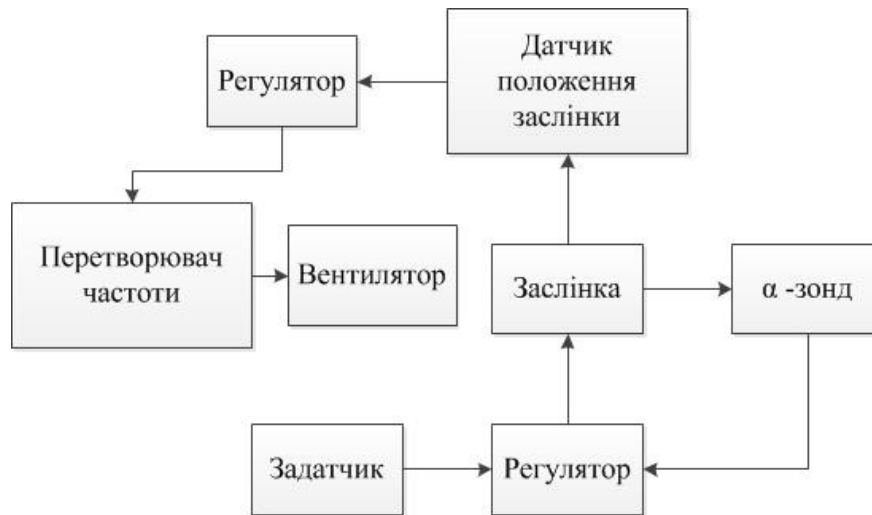


Рис. 6. Блок-схема алгоритму процесу регулювання співвідношення повітряно-паливної суміші за допомогою вентилятора для пального зі зворотним зв'язком по сигналам α -зонду

Робота регулятора з підтриманням співвідношення «повітря-паливо» базується на вимірюванні положення регулюючого органу, обчисленого по запрограмованій залежності у вигляді кусково-лінійної кривої (рис. 7), відповідного оптимального значення частоти обертання електродвигуна вентилятора. Обчислене значення частоти обертання електродвигуна використовується як норма для автоматичної підтримки оптимального режиму горіння.

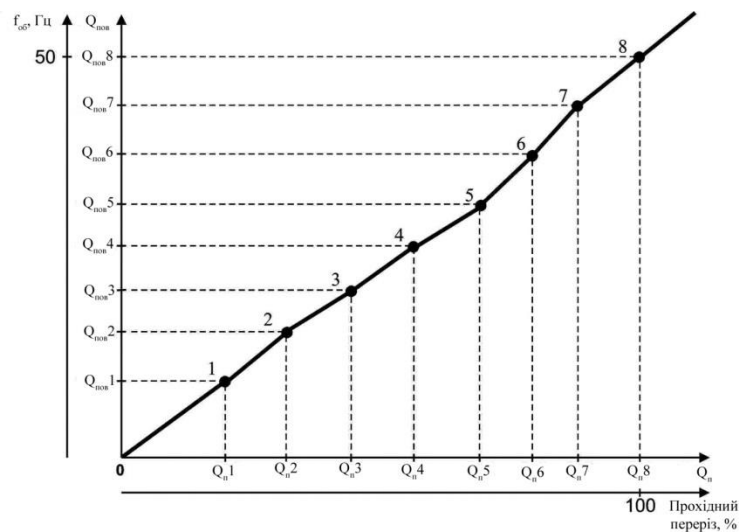


Рис. 7. Графічне зображення залежності витрат палива та повітря

На основі вищерозглянутих технічних особливостей запропоновано спосіб автоматичного регулювання процесу горіння в котлоагрегатах, що базується на застосуванні кисневого зонду та цифрового зондового альфа-індикатора [7]. Спосіб реалізується за допомогою принципової схеми, зображеної на рис. 8.

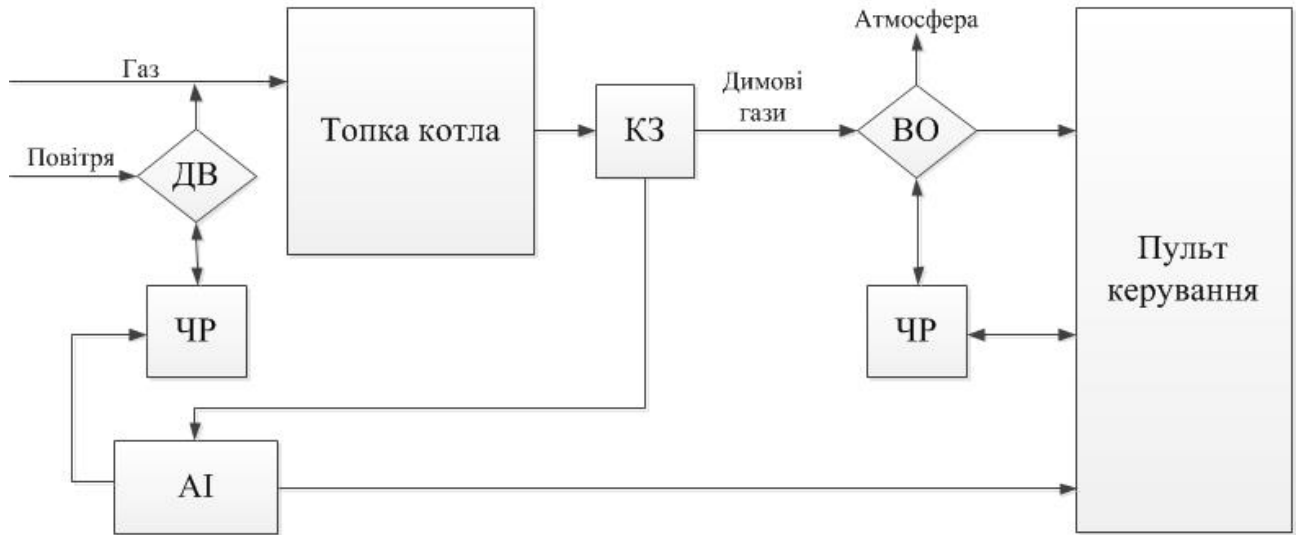


Рис. 8. Принципова схема автоматичного процесу регулювання співвідношення повітряно-паливної суміші для пального зі зворотним зв'язком по сигналам α -зонду (ДВ – дуттєвий вентилятор, ЧР – частотний регулятор, КЗ – кисневий зонд, АІ – альфа-індикатор, ВО – вузол обліку шкідливих речовин)

Основою для створення автоматичної системи регулювання надлишку повітря став широкосмуговий кисневий зонд виробництва фірми Bosch, зовнішній вигляд якого та конструкційні особливості зображені на рис. 9.

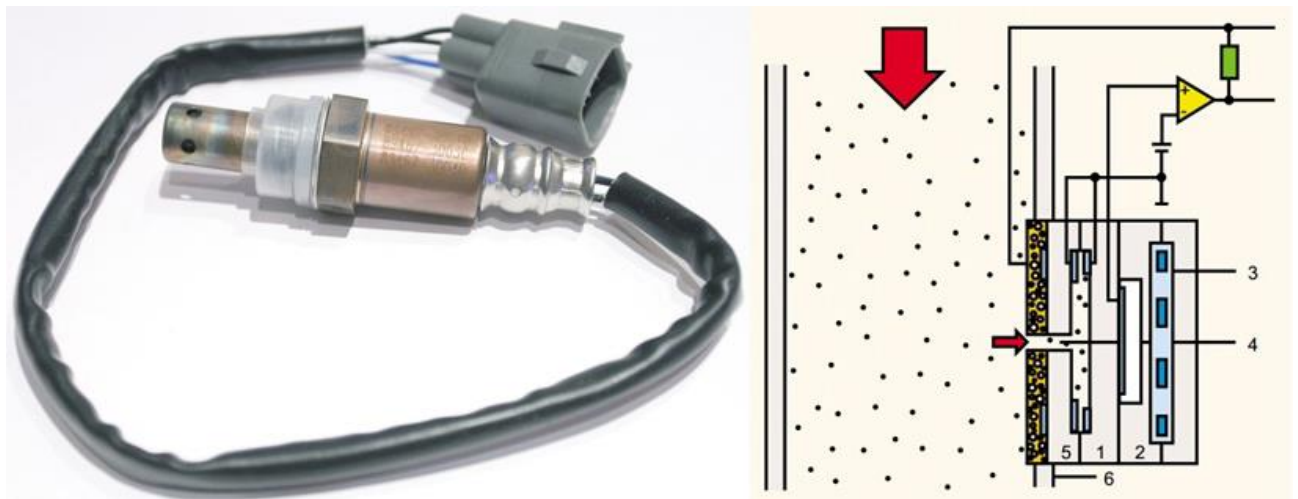


Рис. 9. Широкосмуговий кисневий зонд: *а)* зовнішній вигляд; *б)* схема будови (1 – комірка Нернста, 2 – референтна комірка, 3 – підігрівач, 4 – дифузійна щілина, 5 – насосна комірка, 6 – димовий тракт)

Застосування кисневих зондів такого типу у системах автоматичного регулювання співвідношення «повітря-паливо» для паливників типу ГБГМ дозволить поліпшити якість згорання палива та підвищити ККД котла [20].

Моделювання регулювання процесу регулювання

Для проведення моделювання регулювання процесу горіння в котлах зі зворотним зв'язком необхідно створити адекватну математичну модель повітряно-паливного тракту [21] на основі фізичних законів, за якими здійснюються технологічні процеси (рис. 10).

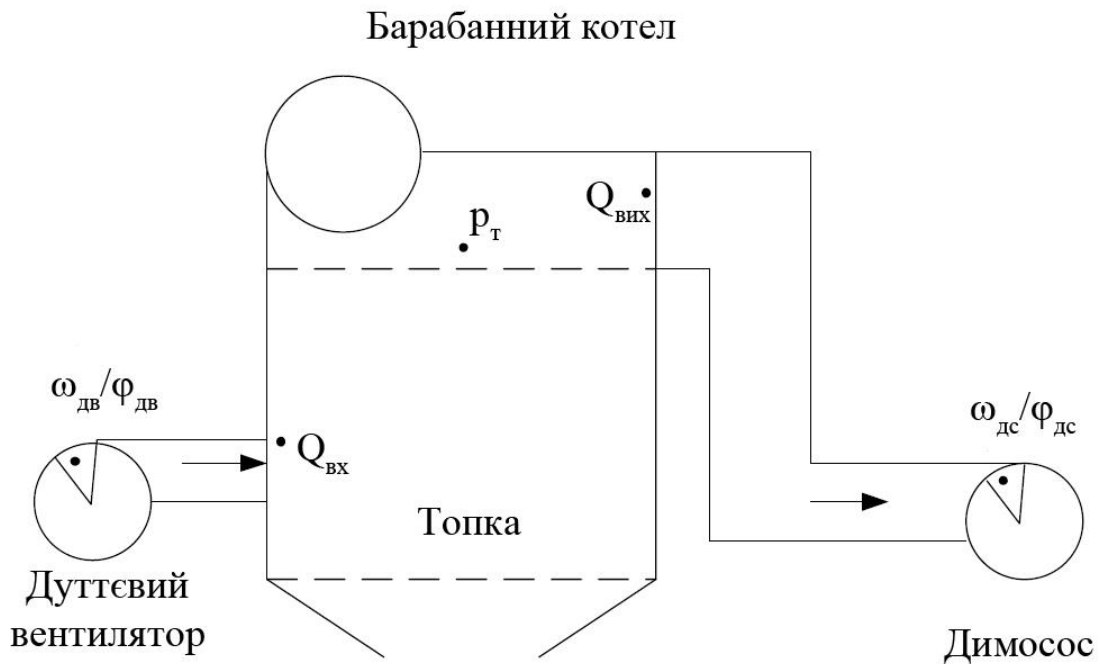


Рис. 10. Схема повітряно-паливному тракту котла

На схемі представлені головні параметри, що необхідні для моделювання повітряно-паливного тракту:

- вхідні параметри (управляючі величини):
 - швидкість обертання дуттєвого вентилятора – $\omega_{дв}$, об/хв.; кут розкриття направляючого апарата дуттєвого вентилятора – $\phi_{дв}$, %;
 - швидкість обертання димососу – $\omega_{дс}$, об/хв.; кут розкриття направляючого апарата димососа – $\phi_{дс}$, %;
- вихідні параметри (регулюючі величини):
 - витрати загального повітря – $Q_{вх}$, м³/с;
 - витрати димових газів – $Q_{вих}$, м³/с;
 - розрідження в топці – p_t , Па.

Фізичні рівняння, що характеризують процеси у повітряно-паливному тракту:

- закон збереження маси

$$\frac{dm}{dt} = Q_{вх} - Q_{вих}; \quad (1)$$

- стану

$$pV = \frac{m}{\mu} RT. \quad (2)$$

де p – тиск в топці, V – об'єм топки, m – маса газу в топці, μ – молярна маса газу для O_2 , R – універсальна газова стала.

Із рівняння (2) отримаємо вираз, що зв'язує масу та тиск в нашому випадку:

$$m = k_{cm} p. \quad (3)$$

Підставивши співвідношення (3) в закон збереження маси (1), отримаємо формулу для зміни тиску:

$$k_{cm} \frac{dp}{dt} = Q_{ex} - Q_{вих}. \quad (4)$$

Змінна розрідження в топці враховується в системі рівнянь за допомогою балансу тисків. Баланс тисків у вигляді диференціальних рівнянь для паливного та повітряного трактів:

$$\begin{cases} \frac{l_{нов}}{S_{нов}} \frac{dQ_{ex}}{dt} = p_{дв} - p_m - p_{оп.нов}, \\ \frac{l_{нал}}{S_{нал}} \frac{dQ_{вих}}{dt} = p_{дс} + p_m - p_{оп.нал}, \end{cases} \quad (5)$$

де $l_{нов}$ – довжина повітряного тракту; $S_{нов}$ – площа поперечного перерізу повітряного тракту; $l_{нал}$ – довжина паливного тракту; $S_{нал}$ – площа поперечного перерізу паливного тракту; $p_{дв}$ – тиск, що нагнітається дуттєвим вентилятором; $p_{оп.нов}$ – аеродинамічний опір повітряного тракту; $p_{дс}$ – тиск, що нагнітається димососом; $p_{оп.нал}$ – аеродинамічний опір паливного тракту.

Також необхідно врахувати рівняння гідродинаміки, що встановлюють взаємозв'язок між витратами та зміною тисків на опорі. Врахувавши те, що потоки повітря та палива ламінарні, запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} p_{оп.нов} = \xi_{нов} Q_{ex}, \\ p_{оп.нал} = \xi_{нал} Q_{вих}. \end{cases} \quad (6)$$

Підставивши (6) в (5), отримаємо

$$\begin{cases} \frac{l_{нов}}{S_{нов}} \frac{dQ_{ex}}{dt} = p_{дв} - p_m - \xi_{нов} Q_{ex}, \\ \frac{l_{нал}}{S_{нал}} \frac{dQ_{вих}}{dt} = p_{дс} + p_m - \xi_{нал} Q_{вих}. \end{cases}$$

Рівняння дуттєвого вентилятора та димососа запишемо так, що тиск в них лінійно залежить від швидкості обертання вентилятора:

$$\begin{cases} p_{дв} = k_{дв} \omega_{дв}, \\ p_{дс} = k_{дс} \omega_{дс}. \end{cases}$$

Після перетворення отримані диференціальні рівняння об'єднаємо в систему, що характеризує повітряно-паливний тракт як об'єкт регулювання:

$$\begin{cases} \dot{Q}_{ex} = \frac{S_{нов}}{l_{нов}} (-\xi_{нов} Q_{ex} + k_{дв} \omega_{дв} - p_m), \\ \dot{Q}_{вих} = \frac{S_{нал}}{l_{нал}} (-\xi_{нал} Q_{вих} + k_{дс} \omega_{дс} + p_m), \\ \dot{p}_m = \frac{1}{k_{cm}} (Q_{ex} - Q_{вих}). \end{cases}$$

Для оцінювання ефективності запропонованого способу автоматичного регулювання співвідношення повітряно-паливної суміші була розроблена модель процесу горіння з екстремальним регулятором (рис. 11) за допомогою програмного пакету Simulink. Модель включає інерційний об'єкт другого порядку з екстремальною характеристикою (рис. 12) та екстремальним регулятором, який реалізує алгоритм рекурентного обчислення коефіцієнта

передачі та пошуку нуля коефіцієнта k_{cm} . Дрейф екстремальної характеристики змодельовано за допомогою гармонічного низько-частотного впливу та високочастотних завад [22].

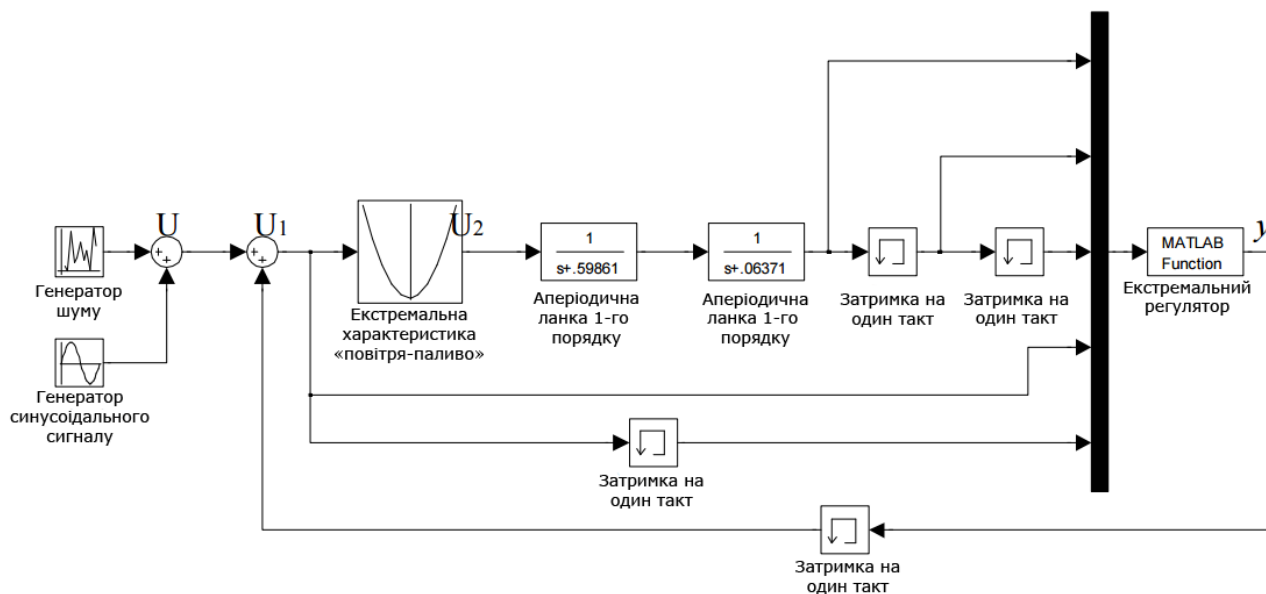


Рис. 11. Структурна схема системи регулювання процесу горіння з екстремальним регулятором в середовищі Multisim

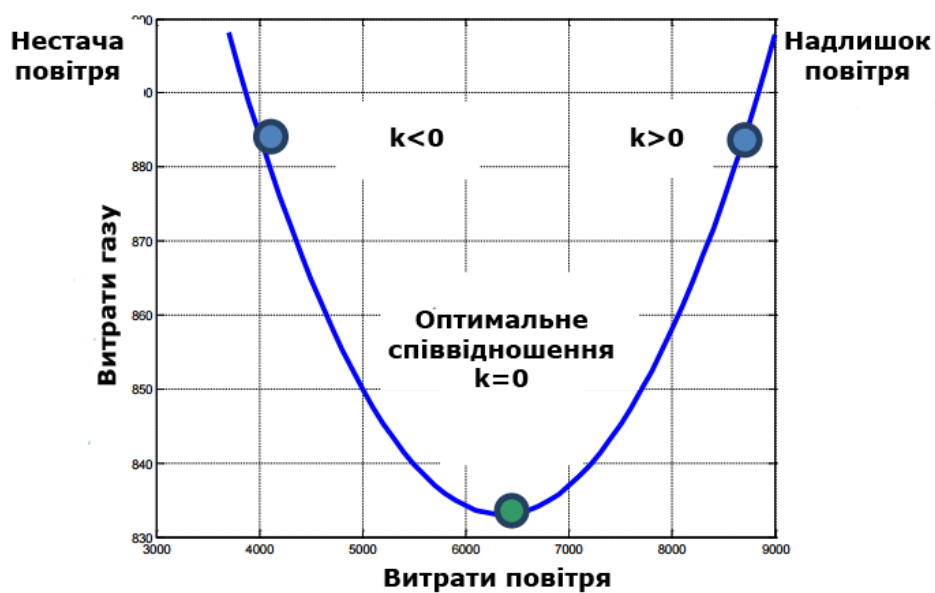


Рис. 12. Екстремальна характеристика «повітря-паливо»

Аналіз отриманих даних (рис. 13) дозволяє встановити, що екстремальний регулятор, який працює в умовах завад, практично повністю виключає дрейф екстремуму, викликаного впливом гармонічного сигналу.

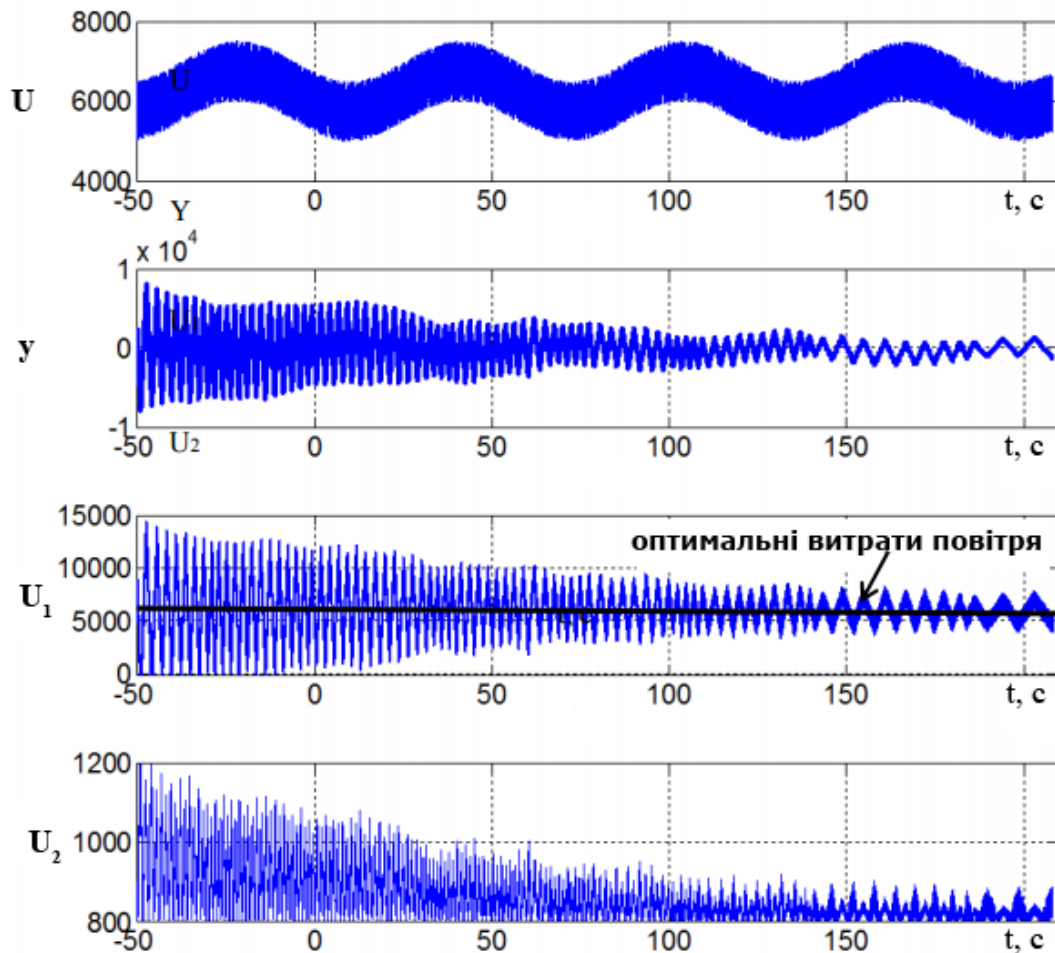


Рис. 13. Результати комп'ютерного моделювання (U – дрейф екстремальної характеристики, y – компенсуючий сигнал екстремального регулятора, U_1 – похибка регулювання, U_2 – вихідний сигнал з екстремального регулятора)

Наведена система регулювання процесом горіння може бути розроблена на базі існуючих програмно-апаратних комплексів, тобто існуючі типи контролерів можна використовувати на базі їхнього програмного забезпечення (ПО), або створювати нове ПО, яке буде містити необхідні алгоритми екстремального регулювання.

Метод підвищення точності визначення КНП

На практиці (в газоаналізуючих пристроях) для визначення КНП використовують так звану «кисневу» формулу, яка при повному згоранні приймає вигляд [23]:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2},$$

де 21 – «традиційна» об'ємна концентрація кисню в повітрі, %; O_2 – об'ємна концентрація кисню в продуктах горіння, %.

Таким чином, при розрахунку КНП рівень об'ємної концентрації кисню в повітрі детермінують на рівні 21%. Однак багаторічні кліматофізичні дослідження дозволяють спростувати стабільність концентрації кисню не тільки в гірських місцевостях, але і на рівнинах.

На сьогоднішній день в наукових колах вважається загальноприйнятним положення про те, що в умовах рівнинного клімату кількість кисню в атмосферному повітрі або зовсім не

змінюється, залишаючись строго постійною як за об'ємом (20,95%), так і за масою (23,15%) (табл. 2), або змінюється на нехтовно малу величину.

Таблиця 2

Склад повітря

Компонент	Позначення	Об'ємна концентрація, %	Масова концентрація, %
Азот	N ₂	78,084	75,50
Кисень	O ₂	20,948	23,15
Аргон	Ar	0,934	1,29
Вуглекислий газ	CO ₂	31,4×10 ⁻³	4,6×10 ⁻²
Неон	Ne	18,18×10 ⁻⁴	1,4×10 ⁻³
Метан	CH ₄	2×10 ⁻⁴	8,4×10 ⁻⁵
Гелій	He	5,24×10 ⁻⁴	7,3×10 ⁻⁵
Криптон	Kr	1,14×10 ⁻⁴	3×10 ⁻³
Водень	H ₂	5×10 ⁻⁵	8×10 ⁻⁵
Ксенон	Xe	8,7×10 ⁻⁶	4×10 ⁻⁵

Згідно з законом Дальтона, склад і процентне співвідношення газів, що входять в повітря, строго постійні, як за об'ємом, так і за масою.

Співвідношення газів повітря вважається одним і тим же в будь-якому районі земної кулі, майже не змінюючись ні від висоти, ні від широти місцевості. У горах на великій висоті, на екваторі і в районі полюсів, так само як і на рівнині, частку кисню в повітрі детермінують на одному рівні.

Таким чином, процентний вміст кисню в атмосферному повітрі як відносна величина, свідчить лише про сталість газового складу і співвідношення газів в повітрі, і не може бути використаний в якості кількісного параметра кисню. Можна припустити, що за сталістю процентного співвідношення газів повітря завуальовані значні коливання абсолютних величин газів повітря, в тому числі і кисню, оскільки абсолютно ясно, що «частка» одного відсотка кисню в суміші газів буде різною при різних фізичних станах повітря (вологого або сухого, щільного або розрядженого, холодного або теплого).

На підставі цих тверджень і проведених експериментів була запропонована нова кількісна величина параметра кисню – парціальна густина кисню [24]. Її суть в тому, що при добовій (сезонній) динаміці коливання основних метеорологічних характеристик (температури, абсолютної вологості повітря, абсолютного атмосферного тиску), обумовлених динамікою атмосферних процесів, відбувається перерозподіл у часі та просторі парціальної густини кисню в повітрі, що проявляється в добовій (сезонній) періодичності в погодних аномаліях. Таким чином, можна з упевненістю стверджувати про те, що концентрація кисню (в тому числі і об'ємна) не є постійною величиною і може значно коливатися не тільки на протязі всього календарного року, але і доби, впливаючи тим самим на поточне значення такої величини як КНП.

Згідно основних газових законів та рівнянням стану Клайперона-Менделєєва, аналітичне значення парціальної густини кисню (E , г/м³) прямо пропорційно атмосферному тиску (P , гПа) за винятком парціального тиску водяної пари (e , гПа) та обернено пропорційна температурі повітря (T , К):

$$E = 23,15 \cdot 10^3 \cdot \frac{P - e}{R \cdot T},$$

де R – питома газова стала для сухого повітря.

Розрахунок парціального тиску водяної пари проводиться за формулою:

$$e = \varphi \cdot p_{\text{нас}} ,$$

де φ – вологість повітря, $p_{\text{нас}}$ – величина, значення якої розраховується згідно рекомендації Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation [25]:

$$p_{\text{нас}}(P, T') = f(P) \cdot r(T') ,$$

$$f(P) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} \cdot P - 0,074 \cdot P^{-1} ,$$

$$r(T') = 6,112 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot T'}{243,2 + T'}} ,$$

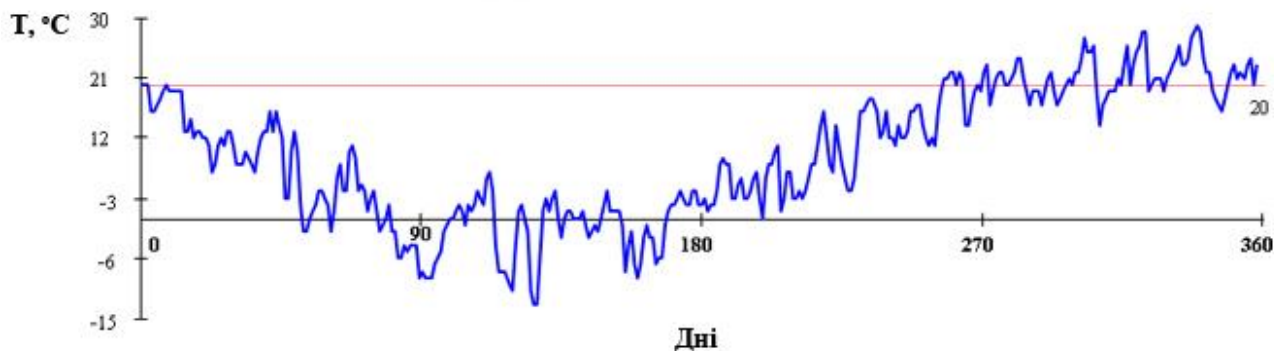
де T' – температура повітря в градусах Цельсія, °C.

Перехід до об'ємної концентрації кисню в повітрі відбувається за таким співвідношенням:

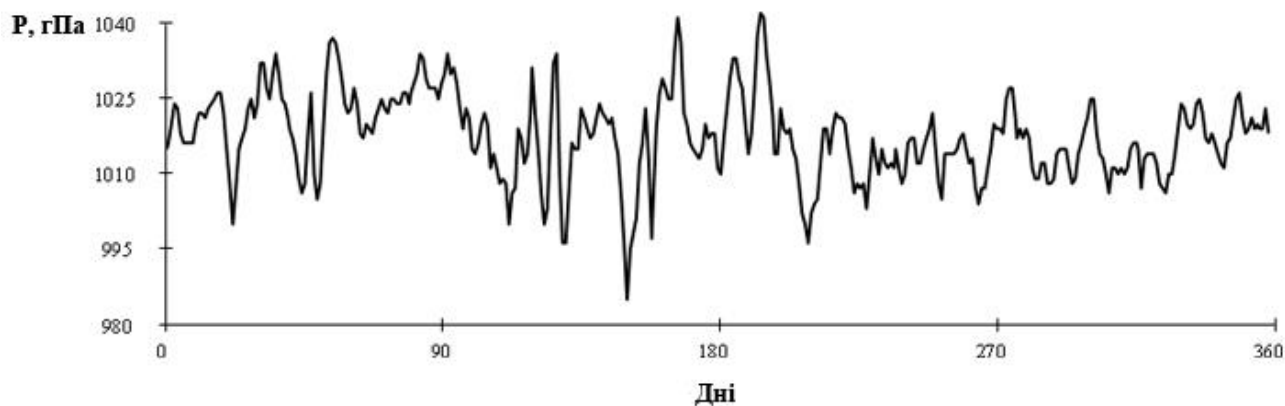
$$[O_2] = \frac{6,236 \cdot E \cdot T}{P' \cdot M_{O_2}} ,$$

де $[O_2]$ – об'ємна концентрація кисню в повітрі, P' – атмосферний тиск в мм.рт.ст., M_{O_2} – молярна маса кисню [26].

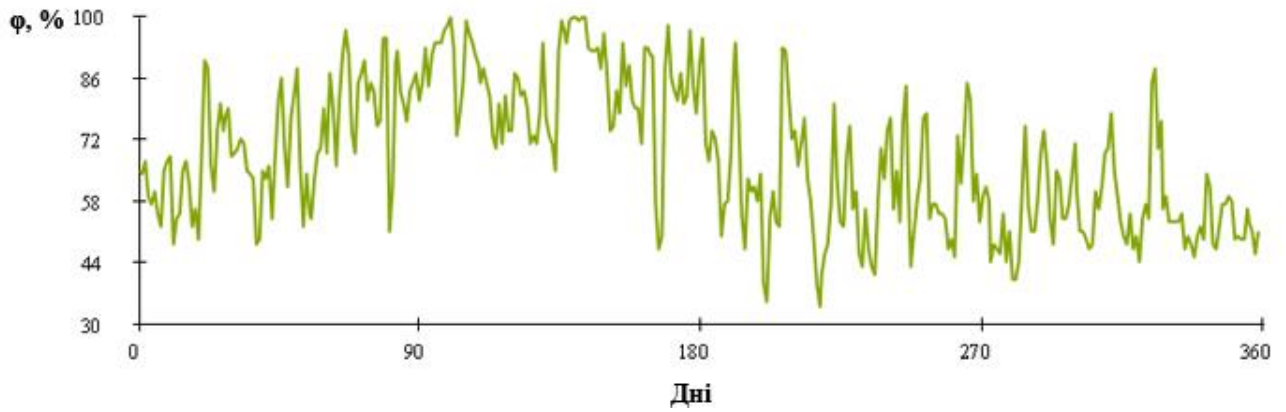
В рамках проведеного дослідження проаналізовані зміни головних метеорологічних параметрів (температури, тиску, вологості) на протязі одного року (вересень 2014 р. – серпень 2015 р.) в м. Києві (за даними метеорологічного порталу www.wunderground.com в точці аеропорту «Жуляни», код ICAO: UKKK) (рис. 12) та отримана сезонна зміна об'ємної концентрації кисню в повітрі на даній території (рис. 13).



а)

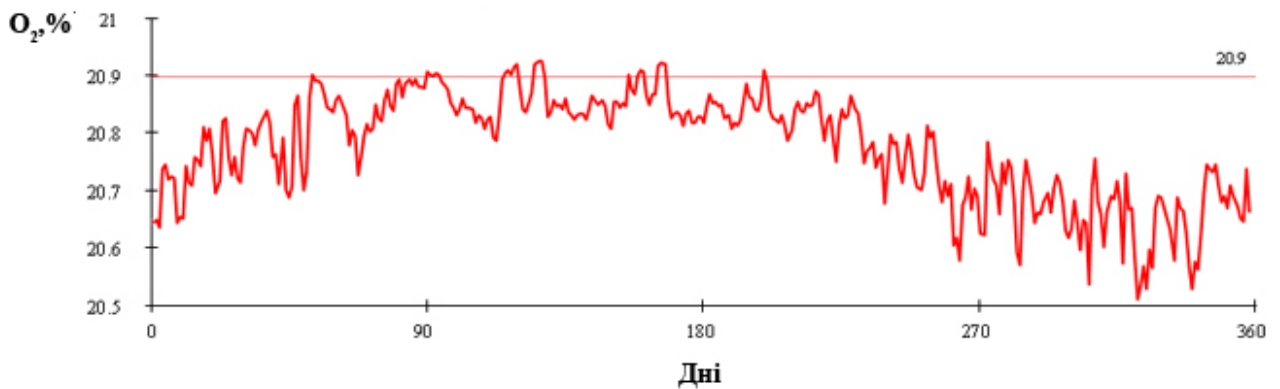


б)

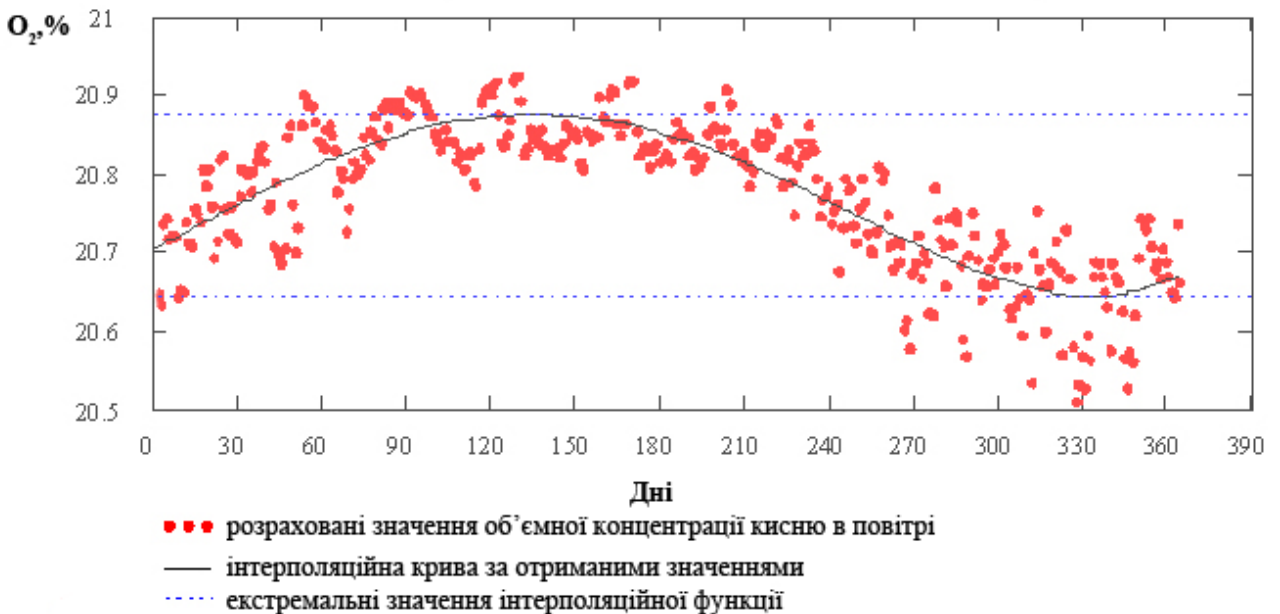


в)

Рис. 12. Сезонна зміна основних метеорологічних параметрів в м. Києві станом на період вересень 2014р. – серпень 2015р.: а) температури; б) тиску; в) вологості



а)



б)

Рис. 13. Розрахункова зміна концентрації кисню в повітрі на території м. Києва в період з вересня 2014р. по серпень 2015р.: а) точкова залежність; б) інтерполяційна функція

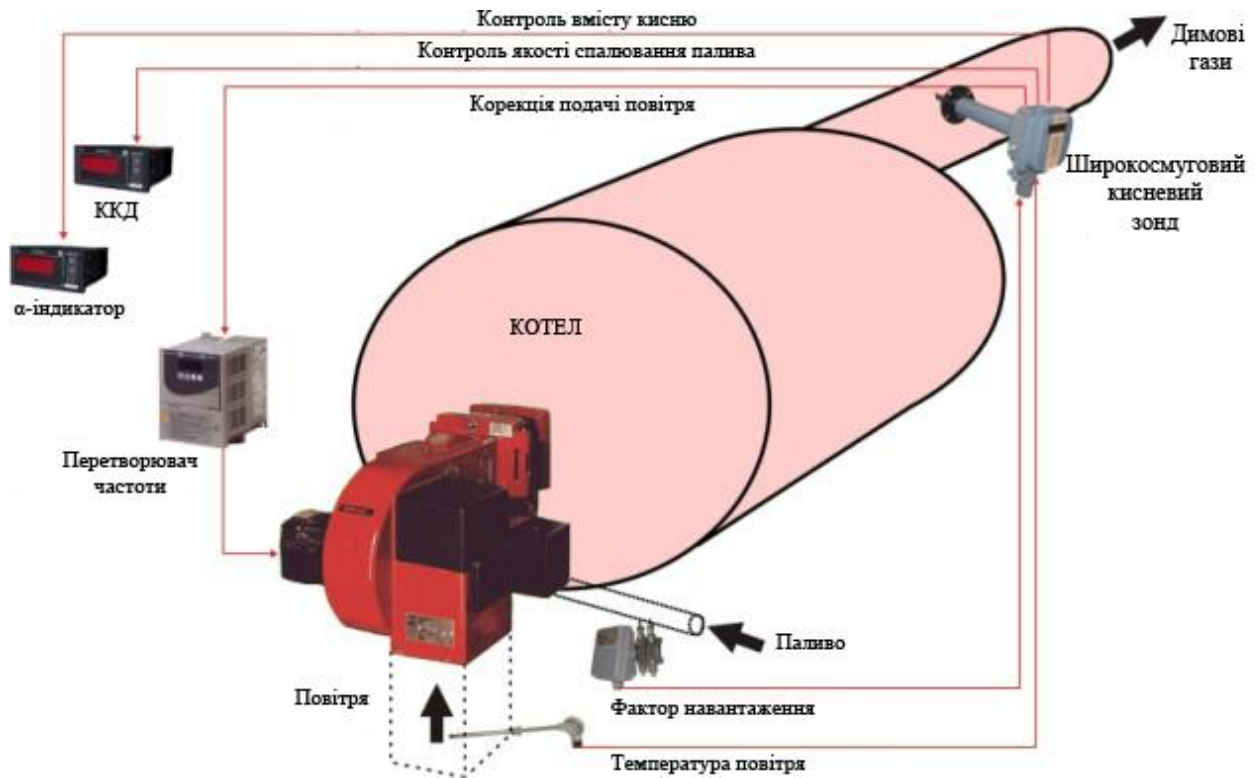


Рис. 14. Схема системи автоматичного регулювання процесом горіння з економічним спалюванням палива

В основу пристрою поставлена задача вдосконалення існуючих систем контролю якості згорання палива в котлоагрегатах [28] шляхом безперервного вимірювання концентрації кисню в димових газах за допомогою ширококутового кисневого зонду, що контролює процес горіння газоподібного та рідкого палив різного якісного та кількісного складу. Індикація рівня КНП в димових газах відбувається за допомогою альфа-індикатора для швидкого та постійного моніторингу режиму роботи камери згорання та підключення контролера формуючого сигналу до електромережі для постійної та безперебійної роботи системи контролю (рис. 15).

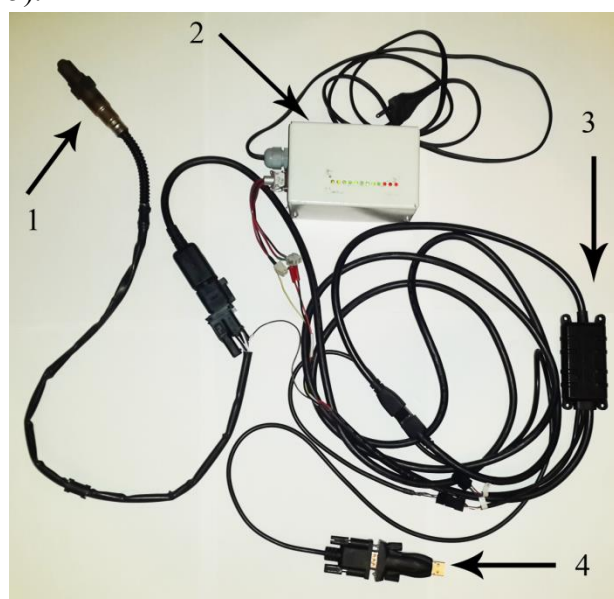


Рис. 15. Вузол контролю за станом процесу горіння (1 – ширококутовий кисневий зонд, 2 – альфа-індикатор, 3 – контролер, 4 – USB-інтерфейс)

Застосування широкосмугового кисневого зонду має ряд переваг перед традиційними газоаналізаторами: відсутність системи відбору та підготовки проби, швидке вимірювання концентрації залишкового кисню (0,1-0,2 с), безперебійна робота, довгий термін експлуатації, легка інсталяція на різні види теплових агрегатів.

Використання різнорівневої системи світлодіодів (альфа-індикатора) дає змогу визначити рівень КНП в димових газах та режим роботи котлоагрегату (зелені світлодіоди – $\alpha < 1$, повітряно-паливна суміш збагачена, жовті світлодіоди – $\alpha \approx 1$, повітряно-паливна суміш стехіометрична, червоні світлодіоди – $\alpha > 1$, повітряно-паливна суміш збідніла), та оперативно вносити зміни в режим роботи котлоагрегату шляхом регулювання кількості поступаючого палива та/або повітря для забезпечення максимальної ефективності роботи котельної установки. Наявність контролера дозволяє змінювати необхідний рівень стехіометричного співвідношення «повітря-паливо» та використовувати систему якості згорання палива на установках, що працюють на різних видах рідкого та газоподібного палив [29].

Технічні характеристики вузла контролю за процесом горіння повітряно-паливної суміші наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Головні характеристик вузла контролю за процесом горіння

Вихідний сигнал вимірювального зонда, В	+0,1...+5,0
Відгук (затримка за часом індикації) для 50% ступінчатого збурювання, сек	0,1...0,3
Початковий час підготовки до вимірів, сек	$\leq 30,0$
Діапазон вимірювань параметра α	0,5...1,5
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	$\leq \pm 500$

Висновки

На основі проведеного комп'ютерного моделювання встановлено, що розміщення α -зонду в котлах НІСТУ-5 можливе на початкових відрізках димового тракту, що обґрунтовано температурними режимами в топці котла та технічними характеристиками α -зонду.

Розроблено алгоритм, принципову схему регулювання та програмне забезпечення, що базуються на використанні частотно-регульованих електроприводів та α -зонду. На відповідний спосіб автоматичного регулювання процесу горіння в котлоагрегатах отримано патент України на винахід.

Проведено моделювання регулювання процесу горіння в котлоагрегатах на базі запропонованої математичної моделі повітряно-паливного тракту котла. Отримані результати свідчать про стабільність та ефективність розробленої системи.

Запропоновано метод підвищення точності визначення КНП, що базується на вимірюванні поточної концентрації кисню в повітрі. Технічна реалізація такого припущення дозволить підвищити точність визначення КНП до 10% при стандартних умовах роботи котла.

В результаті проведених досліджень створено експериментальний зразок системи контролю та регулювання процесом горіння в котлах малої та середньої потужності, що базується на використанні α -зонду, забезпечує стабільну підтримку O_2 та CO_2 у вихідних газах та максимально можливий ККД у всьому діапазоні навантажень котлоагрегату, незалежно від стану котла, температури, якості палива та інших факторів.

Застосування енергозберігаючої системи регулювання процесу горіння дозволяє:

- оптимізувати режим згорання палива із врахуванням фактичних умов, режимів роботи котлоагрегату та характеристика палива;
- знизити енергоспоживання вентиляторів дуття та димососів до 50%;
- знизити питомі витрати палива мінімум на 10%;
- зменшити рівень викидів оксидів азоту до 40%;
- підвищити ККД котлоагрегату мінімум на 5%;
- реалізувати безперервну енергозберігаючу роботу котлоагрегату;
- виключити вплив людського фактору на управління процесом горіння;
- якісно спростити роботу обслуговуючого персоналу;
- багаторазово збільшити термін служби тягодуттєвих механізмів за рахунок зниження частоти обертання двигунів і плавного пуску;
- виключити споживання реактивної потужності з мережі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долінський А.А., Басок Б.І. Цільові орієнтири проекту Національної стратегії теплозабезпечення населених пунктів України. Частина 1. Вихідні умови розробки стратегії, основні пріоритети, інноваційний розвиток сфери теплозабезпечення / А.А. Долінський, Б.І. Басок // Промислова теплотехніка. – 2014. – Т. 36, №2. – С. 54-69.
2. Бабак В.П. Оптимізація процесів горіння в котлах в залежності від якості природного газу з використанням α -зондів / В.П. Бабак, О.О. Назаренко // Проблеми промислової теплотехніки. Матеріали VIII Міжнародної конференції (8-11 жовтня 2013г., г. Київ). – К., 2013. – С. 43.
3. Долінський А.А. Енергозбереження та екологічні проблеми енергетики / А.А. Долінський // Вісник НАН України. – 2006. – №2. – С. 24-32.
4. Барский В.А. Адаптивна система управління тягодуттєвими механізмами котельних агрегатів ЭКО-3 / В.А. Барский, А.Е. Фришман, А.Ю. Лысенко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Т.19, №3. – С. 199-201.
5. Радчук О.С. Регулювання процесу горіння з використанням додаткових інформаційних сигналів / О.С. Радчук, О.Й. Штіфзон // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Ефективні інструменти сучасної науки – 2015» (27 квітня – 5 травня 2015р., м. Прага). – Видавничий дім «Освіта та наука» (м. Прага), 2015. – С. 55-61.
6. Ковриго Ю.М. Адаптивна система регулювання витрати палива / Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, І.А. Поліщук // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи. – 2007. – Т.19, №1. – С. 136-140.
7. Пат. 107644, Україна, МПК F23N1/02. Спосіб автоматичного регулювання процесу горіння в котлоагрегатах / Бабак В.П., Назаренко О.О., Запорожець А.О.; заявник та

- патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 09.04.2014; опубл. 26.01.2015, Бюл. №2
8. Бубенчиков А.М. Численный анализ аэродинамики и горения турбулентной пылеугольной горелочной струи / А.М. Бубенчиков, А.В. Старченко // Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 33, № 1. – С. 51–59.
 9. Гиль А.В. Численное исследование сжигания резервного топлива в топке котла БКЗ-210-140 / А.В. Гиль, А.С. Заворин, Д.В. Лебедь, А.В. Старченко // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т.325, №4. – С. 65-75.
 10. Куманев С.А. Результаты расчета кинетической модели горения природного газа методами математического моделирования / С.А. Куманев, М.П. Сухой, С.В. Швачич // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – №1. – С. 143-145.
 11. Бубенчиков А.М. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах / А.М. Бубенчиков, А.В. Старченко. – Томск: Изд-во Томского ун-та. – 1998. – 236 с.
 12. D.V. Mathematical models of turbulent flames: a review / D.V. Spalding // Combustion Science and Technology. – 1976. – V. 13, № 1–6. – P. 3–22.
 13. Yaxin Su. Simulation of High Temperature Air Combustion with modified Edd-Brea-Up combustion model / Yaxin Su, Cuiwu Chen, Along Su // Energy Procedia. – 2012. – V. 14. – P. 127–132.
 14. Шумихин А.А. Численное моделирование турбулентного диффузионного пламени на основе метода крупных вихрей / А.А. Шумихин, А.И. Карпов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т.5, №2. – С. 199-207.
 15. Abolfazl Irannejad. Large eddy simulation of turbulent spray breakup and evaporation / Abolfazl Irannejad, Farhad Jaberri // International Journal of Multiphase Flow. – 2014. – V. 61. – P. 108–128.
 16. Кобзарь С.Г. Апробация упрощенной модели расчета горения и форматирования оксидов азота при сжигании жидкого топлива / С.Г. Кобзарь, Халатов А.А. // Промислова теплотехніка. – 2006. – Т. 28, №3. – С. 62-69.
 17. Дослідження теплофізичних і гідродинамічних процесів у робочому просторі котла та визначення можливих місць розміщення α -зонду: звіт НДР (проміж.) / Інститут технічної теплофізики НАН України (ІТТФ НАН України); кер. Бабак В.П.; виконав. О.О. Назаренко, А.О. Запорожець. – К., 2013. – 40 с. – № ДР 0113U001889. – Інв. №
 18. Лещенко В.П. Кислородные датчики / В.П. Лещенко. – М.: Легион-Автодата, 2003. – 112 с.
 19. Воликов А.Н. Повышение эффективности сжигания топлива в котлоагрегатах / А.Н. Воликов, О.Н. Новиков, А.Н. Окадьев // Энергоназор-информ. – 2010. – №1. – С. 54-57.
 20. Розроблення алгоритму, принципової схеми та програмного забезпечення процесу регулювання співвідношення повітряно-паливної суміші для пальника зі зворотним зв'язком по сигналам α -зонду / Інститут технічної теплофізики НАН України (ІТТФ НАН України); кер. Бабак В.П.; виконав. О.О. Назаренко, А.О. Запорожець. – К., 2014. – 65 с.
 21. А.А. Пономарев. Модель газовоздушного тракта теплоэнергетического котла как объекта регулирования / А.А. Пономарев // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – №3. – С. 19-28.

22. Ревунов Д.С. Система управления горением топлива в котельной установке / Д.С. Ревунов, А.Д. Семенов // Труды МНТК «Перспективные информационные технологии». – Т.2. С. 313-317.
23. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация: учеб. для нач. проф. Образования / Б.А. Соколов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 432 с.
24. Методика расчета количества кислорода в атмосферном воздухе на основе метеорологических параметров с целью прогнозирования метеопатических эффектов атмосферы [Текст]: (метод. рекомендации) / Гл. упр. лечеб.-профилактич. помощи; сост. В. Ф. Овчарова. – М.: МЗ СССР. – 1983. – 13 с.
25. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation / World Meteorological Organization, 2008. – №8.– 119 p.
26. Запорожець А.О. Підвищення точності вимірювання коефіцієнта надлишку повітря в котлоагрегатах із застосуванням газоаналізаторів електрохімічного типу / В.П. Бабак, А.О. Запорожець, О.О. Редько // Промислова теплотехніка. – 2015. – №1. – С. 82-96.
27. Запорожець А.А. Влияние метеорологических параметров на оптимизацию процесса горения /А.А. Запорожець, В.П. Бабак, А.А. Редько // «Дни неразрушающего контроля – 2015»: сборник тезисов (15-19 июня 2015 г., г. Созополь). – Созополь. – 2015. – С. 361-364.
28. Запорожець А.О. Система якості горіння повітряно-паливної суміші в котлоагрегатах малої та середньої потужності / В.П. Бабак, А.О. Запорожець // Методи та прилади контролю якості. – 2014. – №2(33). – С. 106-114.
29. Бабак В.П. Цифровий альфа-індикатор контролю повітряно-паливної суміші на базі цирконієвого кисневого зонду / В.П. Бабак, О.О. Назаренко, А.О. Запорожець // Промислова теплотехніка. – 2014. – №2. – С. 70-73.