

Відгук

офіційного опонента доц. кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», к.т.н. Бутовського Леоніда Сергійовича на дисертаційну роботу Безценного Ігоря Валентиновича **«Основні закономірності процесів спільного спалювання вугілля різного ступеня метаморфізму в факелі»**,

що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Однією з актуальних задач в енергетичному секторі України є розробка і впровадження енергоефективних технологій спалювання палив, що дозволяють заощадити енергоресурси та зменшити їх екологічний тиск на навколишнє середовище.

В Україні на 7 з 14 ТЕС використовуються типи енергетичних котлів, які спроектовані для спалювання антрациту та пісного вугілля. Внаслідок бойових дій на сході України всі шахти, що видобувають антрацит (марки А) і пісне вугілля (марки П), залишились на тимчасово неконтрольованій території, внаслідок чого ці ТЕС опинились у скрутному становищі щодо постачання достатньої кількості вугілля необхідних марок, що обумовлює необхідність закупівлі певної кількості енергетичного вугілля за рубежом.

В той же час в Україні є достатні потужності з видобутку енергетичного вугілля марок ДГ і Г (газової групи), які можуть бути використані для покриття дефіциту енергетичного вугілля на ТЕС. Але вугілля марок ДГ та Г по своїм характеристикам значно відрізняються від вугілля марок А та П і не можуть бути використанні на існуючих енергетичних котлах без відповідної їх реконструкції, що потребує значних коштів та часу. Одним з методів вирішення задачі забезпечення паливом більшості енергетичних котлів ТЕС є використання паливних вугільних сумішей.

Саме вирішенню такої задачі присвячена дисертаційна робота Безценного І.В., метою якої є дослідження особливостей горіння паливних сумішей різного складу та розробка методів їх безпечного та ефективного спалювання в існуючих антрацитових котлоагрегатах.

Враховуючи вищезазначене, можна вважати, що **тема дисертаційної роботи «Основні закономірності процесів спільного спалювання вугілля різного ступеня метаморфізму в факелі»** є актуальною, а отримані в ній результати мають практичне значення.

Дисертаційна робота виконувалась в Інституті вугільних енерготехнологій НАН України в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: «Наукові основи спалювання низькорекційного вугілля в потоці (№ 0107U005834) та «Дослідження спільного спалювання різних видів твердого палива для підвищення ефективності та екологічності роботи котлоагрегатів (№ 0109U006265).

Структура та обсяг роботи в основному відповідають вимогам ДАК України до кандидатських дисертацій. Дисертаційною роботою є рукопис, що складається із вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (106 найменувань). Повний обсяг дисертаційної роботи містить 151 сторінку, до складу яких входить основна частина (146 сторінок, у тому числі 25 рисунків, 22 таблиць) та одного додатку.

У **вступі** зазначено актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами і темами, мету, завдання, об'єкт та предмет досліджень, наукову новизну та апробацію отриманих результатів, публікації за матеріалами дисертаційної роботи, її структура і обсяг.

В першому розділі наведено літературний огляд літературних даних щодо сучасного стану теплової енергетики та паливопостачання на пилувугільні ТЕС. Розглянуто вітчизняний та зарубіжний досвід спалювання паливних сумішей вугілля різних марок. Наведено сучасні уявлення щодо процесу спалювання пиловидного вугілля різних марок та стан досліджень кінетики досліджень різних складових палив.

В кінці розділу 1 сформульовані задачі досліджень.

В другому розділі описані експериментальні установки, які використовувались для вивчення процесів спалювання пиловидних сумішей вугілля різного ступеня метаморфізму. Викладені методичні особливості експериментальних досліджень. Наведено характеристики дослідної установки РСК-1 для вивчення кінетичних характеристик взаємодії коксів вугілля марок А, П та Г та їх сумішей з киснем повітря при температурі ≤ 1000 °С.

Описано експериментальну установку ВПП-100В, яка дає можливість дослідження процесів займання та горіння факелу вугільних сумішей у порівнянні із спалюванням окремих марок вугілля в одному й тому ж реакторі.

Наведено контрольно-вимірювальну апаратуру, яка використовувалась при проведенні досліджень на тому чи іншому етапах роботи.

В третьому розділі представлено результати та методику розрахунку питомої швидкості горіння коксового залишку енергетичного вугілля марок АШ, П і Г та їх сумішей АШ+П та АШ+Г в широкому діапазоні температур на основі отриманих в роботі констант. Вказується, що відомі матеріали щодо динаміки та кінетики горіння коксів не розглядають випадків спалювання сумішей коксів вугілля. Тому однією з задач роботи було дослідження особливостей динаміки вигорання вуглецю при горінні сумішей коксів вугілля. Роботи виконувались для ізотермічних умов при температурі в реакторі 550°С, 575°С і 600°С.

Проведені в роботі дослідження кінетичних характеристик реагування коксового залишку вугілля різних видів з киснем повітря показали відсутність взаємовпливу горіння частинок коксового залишку вугілля різного ступеня метаморфізму в ізотермічних умовах та середовищі надлишку кисню, що дає можливість розрахунку швидкості та ступеню вигорання суміші за питомими швидкостями та ступенями вигорання компонентів. В роботі були отримані кінетичні константи швидкості реагування коксових залишків антрациту, пісного та газового вугілля з киснем повітря, які були використані для розрахунку питомої швидкості горіння коксового залишку для середнього розміру частинок 0,05 мм та температури в діапазоні 900 – 2250 °С. Показано, що при рівнях температур,

характерних для пиловидного спалювання з рідким шлаковидаленням (1800 К) , пиловидні частинки газового вугілля горять у зовнішньо дифузійному режимі зі ступеневою залежністю питомої швидкості горіння від температури, а антрациту – у перехідному, де залежність швидкості горіння від температури близька до експоненціальної, тобто значно сильніша.

Автор робить висновок, що збільшення температури факелу в діапазоні температур, характерних для спалювання з рідким шлаковидаленням, значно більше підвищує швидкість горіння антрациту, ніж газового вугілля. Отримані дані дозволили розробити методику розрахунку динаміки вигорання коксового залишку антрациту, газового вугілля та їх суміші у співвідношенні 1:1 в потоці при постійній температурі 1700 °С та постійному початковому коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,2$. Приведені дані щодо зміни об'ємної концентрації кисню в потоці і частки вугілля, що не прореагував, в часі.

В четвертому розділі представлено інженерний метод розрахунку динаміки вигорання сумішей вугілля різного ступеня метаморфізму в неізотермічному потоці та його верифікація за результатами дослідного спалювання антрациту, газового вугілля та їх сумішей в потоковому реакторі ВГП-100В з продуктивністю по вугіллю до 50 кг/год. Виконувались експерименти по визначенню повноти вигорання вугільних сумішей при спалюванні вугілля різного складу. Наведено результати розрахунку ступеню вигорання суміші антрациту та газового вугілля в потоці за часом та по зонах перебування факелу в топці котлоагрегату ТПП-210А. Експериментальні дослідження показали переважаючий вплив підвищення температури потоку від згорання летких речовин більш реакційного вугілля на збільшення питомої швидкості горіння антрацитової складової у порівнянні із зменшенням швидкості горіння через зниження концентрації кисню на початку горіння коксового залишку. Інженерний метод розрахунку динаміки вигорання сумішей вугілля різного ступеню метаморфізму враховує вплив зміни температури та концентрації кисню на швидкість горіння вугілля за часом. Було запропоновано поправочні коефіцієнти γ_{A+G} , які дали можливість поширити методику позонного теплового розрахунку

топки котлоагрегату за Нормативним методом у випадку спалювання сумішей марок вугілля, які суттєво відрізняються за ступенем метаморфізму. Розроблено рекомендації щодо організації паливного режиму при пиловидному спалюванні суміші антрациту з часткою газового вугілля до 30 % з виходом летких речовин суміші до 15 %, що відповідає пісному вугіллю. Із застосуванням цих рекомендацій на котлах ТП-100 та ТПП-210 Зміївської ТЕС було спалено майже 300 тис. т вітчизняного газового вугілля у складі суміші, що збільшило паливну базу ТЕС більше, ніж на 40 %, а також розширило діапазон регулювання навантаження енергоблоків і покращило їх техніко-економічні показники у порівнянні зі спалюванням антрациту.

Усі частини дисертації логічно пов'язані між собою.

Автореферат дисертації відповідає її змісту. Основні положення та висновки, що містяться в дисертації, відображені в авторефераті.

Основні матеріали дисертації повно викладені в 20 наукових роботах, в тому числі 1 стаття у журналі, що входить до науко-метричної бази Scopus, 5 статей в спеціалізованих наукових журналах України, 5 статей у вітчизняних науково-технічних періодичних виданнях, 3 статті в закордонних спеціалізованих наукових журналах, 6 тез доповідей в збірках праць міжнародних науково-технічних конференцій.

Достовірність одержаних у дисертаційній роботі результатів, **обґрунтованість** наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечуються:

- глибоким аналізом сучасного стану закордонних та вітчизняних наукових досягнень в області, що досліджується;
- коректністю застосованих методів експерименту і обробки даних;
- відповідністю розрахункових та експериментальних даних на лабораторних та пілотних установках;
- ефективним спалюванням сумішей вугілля марок А та Г у котлоагрегатах ТП-100 і ТПП-210 Зміївської ТЕС, які було організовано з урахуванням рекомендацій автора роботи.

Наукова новизна одержаних результатів.

В роботі вирішена науково-технічна задача вивчення особливостей процесів спалювання сумішей антрациту з пісним та газовим вугіллям та розробки рекомендацій щодо ефективного використання таких сумішей у котлоагрегатах для розширення паливної бази антрацитових ТЕС.

Новизна наукових результатів, отриманих автором, полягає в наступному:

1. Встановлено межі квазістаціонарних ділянок вигорання і визначено кінетичні характеристики взаємодії коксу з киснем повітря і внутрішньо-кінетичній та внутрішньо-дифузійній областях реагування для коксових залишків вугільного пилу марок А, П, Г та сумішей пилу марок А і П звичайних для ТЕС розмелу і зольності в ізотермічних умовах в діапазоні температур 380-630 °С.

2. Встановлено відсутність квазістаціонарних ділянок вигорання вуглецю для сумішей коксових залишків вугільного пилу марок А і Г.

3. Вперше показано, що криві вигорання сумішей є середньозваженими кривих вигорання незалежно реагуючих компонентів, а питома швидкість горіння суміші в умовах надлишку кисню при кожній температурі відповідає середньозваженій питомій швидкості горіння компонентів.

4. Доведено, що при температурах, характерних для спалювання пиловидного палива з рідким шлаковидаленням, горіння частинок коксового залишку газового вугілля відбувається у зовнішньо дифузійній області реагування зі степеневою залежністю питомої швидкості горіння від температури, а антрациту – в перехідній, де залежність питомої швидкості горіння від температури близька до експоненціальної.

5. Вперше розрахунково показано і експериментально підтверджено випробуваннями на котлоагрегатах Зміївської ТЕС для випадку пиловидного спалювання суміші антрациту з газовим вугіллям переважаючий, за умови надлишку кисню, вплив збільшення температури в зоні займання факелу після згорання летких речовин газового вугілля на зростання швидкості вигорання частинок антрациту над гальмуючим впливом зменшення концентрації кисню.

Практичне значення роботи

Результати досліджень, які приведені у дисертаційній роботі мають наступне практичне значення:

1. На підставі результатів кінетичних досліджень розроблено метод розрахунку динаміки вигорання пиловидних сумішей вугілля різного ступеня метаморфізму в потоці, в якому реалізовано покрокове обчислення ступенів вигорання компонентів і теплового балансу потоку з визначенням убутку кисню та збільшення температури і використанням їх як початкових умов для наступного кроку. Достовірність методу підтверджено відповідністю розрахункових даних результатам експериментальних досліджень на технологічній установці продуктивністю до 50 кг/год вугілля.

2. Для різних співвідношень типів вугілля у пиловидній суміші антрациту та газового вугілля вперше розраховано ступінь вигорання суміші в потоці за часом та по зонах перебування факелу в топці котлоагрегату ТПП-210А і одержано значення коефіцієнтів залежності ступеня вигорання сумішей антрациту з газовим вугіллям від вмісту газового вугілля в суміші. Це суттєво доповнює довідкові дані Нормативного методу теплового розрахунку котлоагрегатів і дає змогу його використання для перевірочних позонних теплових розрахунків топки у разі пиловидного спалювання сумішей вугілля різного ступеню метаморфізму.

3. На підставі позонних теплових розрахунків топки котла ТПП-210А показано, що у разі пиловидного спалювання суміші антрациту з газовим вугіллям з часткою газового вугілля до 30 % і виходом летких речовин суміші до 15 %, що відповідає характеристикам пісного вугілля при $\alpha > 1,0$ в основних пальниках можливо забезпечити стале займання та горіння суміші зі ступенем вигорання більшим, ніж при спалюванні антрациту, та із забезпеченням температурних умов сталого рідкого шлаковидалення в діапазоні навантажень від номінального до 65 %, що розширює діапазон регулювання навантажень для спалювання без підсвічування порівняно з антрацитом (100 – 70 %).

4. Розроблено рекомендації щодо організації паливного режиму при пиловидному спалюванні суміші антрациту з газовим вугіллям з виходом летких

речовин суміші до 15 %, що відповідає пісному вугіллю, на котлоагрегатах ТЕС, що мають проектним паливом антрацит і пісне вугілля. Із застосуванням цих рекомендацій на котлах ТП-100 та ТПП-210А Зміївської ТЕС у 2016 р. було використано майже 300 тис. т вітчизняного газоподібного вугілля у складі суміші, що збільшило паливну базу ТЕС більше, ніж на 40 %, розширило діапазон регулювання навантаження енергоблоків та покращило їх техніко-економічні показники порівняно зі спалюванням АШ.

Особистий внесок здобувача полягає в:

- участі у постановці задач досліджень;
- проведенні та обробленні результатів кінетичних досліджень;
- участі в проведенні технологічних досліджень зі спалювання сумішей в потоці та в обробці їх результатів;
- розрахунку швидкостей вигорання пиловидного вугілля та сумішей;
- розробленні методу та виконанні розрахунків динаміки вигорання пиловидних сумішей вугілля різного ступеню метаморфізму в потоці;
- виконанні позонних теплових розрахунків топки котла ТПП-210А4
- участі у проведенні випробувань котлоагрегатів ТЕС.

Зауваження до роботи.

1. Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів не повний. Наприклад, не розшифровані такі аббревіатура, як ГКД (стор. 44), ККД (стор.46) і т.д.

2. В роботі не приділяється увага викидам NO_x та SO_2 при спалюванні вугільних сумішей.

3. Дослідження кінетичних характеристик горіння коксового залишку вугілля трьох марок проводилось з частинками розміром 0,09-0,2 мм, але вибір саме такого розміру не обґрунтовано.

4. У пункті 3.2 залежність питомої швидкості горіння коксів вугілля марок АШ, П та Г від температури наведена до максимальної температури 2250 °С, яка неможлива в топці котлоагрегату.

5. Інженерний метод розрахунку динаміки вигорання сумішей вугілля різного ступеню метаморфізму в неізотермічному потоці спрощений та не враховує радіаційного теплообміну.

6. В роботі нумеруються всі формули, але в тексті на деякі з них немає посилань.

7. Дані щодо значення питомої швидкості вигорання марки АШ, що наведені на рис. 3.1 та 3.2 не співпадають.

8. Потрібне, мабуть, більш детальне пояснення розходження результатів розрахунку швидкості горіння, наприклад, щодо зміни об'ємної концентрації кисню в потоці за часом, що наведені на рис. 3.7 та рис. 4.1.

9. В роботі недостатньо приділено уваги впливу витрати природного газу на підсвітку факелу при спалюванні суміші АШ+Г.

Наведені зауваження не носять принципового характеру і відносяться скоріше до доповнення викладених результатів, вони не знижують в цілому цінності дисертаційної роботи, яка в межах поставлених задач являє собою закінчене дослідження з достовірним практичним значенням.

Висновок: Загальний рівень дисертаційної роботи Безценного І.В. «Основні закономірності процесів спільного спалювання вугілля різного ступеня метаморфізму в факелі», свідчить про високу кваліфікацію автора, значний обсяг розрахункових та експериментальних досліджень, володіння сучасними методами їх проведення, вміння аналізувати отримані дані та доводити їх обробку до рівня формул для практичного вживання при розрахунках процесів горіння сумішей пиловугільних палив в топках енергетичних котлів. Робота є завершеною працею, в якій одержані нові обґрунтовані результати, що допомагають вирішити задачу ефективного спалювання вугільних сумішей різного складу в топках енергетичних котлів.

Враховуючи актуальність теми, ступінь обґрунтованості, достовірність, новизну та практичну значимість результатів вважаю, що робота, яка рецензується, відповідає вимогам ДАК України до дисертаційних робіт, а її автор, Безценний Ігор Валентинович, заслуговує присудження йому вченого ступеню

