ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Редько Ігор Олександрович

УДК 66.096.5

ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНОЇ І ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИ СПАЛЮВАННІ НИЗЬКОСОРТНИХ ПАЛИВ В КИПЛЯЧОМУ ШАРІ ОТОПЛЮЮЧИХ КОТЛІВ

05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Макіївка 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Рухлінський Володимир Васильович, Бєлгородський державний технологічний університет, завідувач кафедри "Енергетика теплотехнології"

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Строй Анатолій Федорович, Полтавський національний технічний університет ім.Ю. Кондратюка завідувач кафедри "Теплогазопостачання та вентиляція"

кандидат технічних наук, доцент Лук'янов Олександр Васильович, Донбаська державна академія будівництва і архітектури, м.Макіївка, доцент кафедри "Теплотехніка, теплогазопостачання та вентиляція".

Провідна установа: Харківська національна академія міського господарства Міністерства освіти і науки України, кафедра "Експлуатація газових і теплових мереж".

Захист відбудеться 27 травня 2004р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.085.01 Донбаської державної академії будівництва і архітектури за адресою: 86123, Донецька обл. м.Макіївка, вул. Державіна, 2, перший учбовий корпус, зала засідань.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Донбаської державної академії будівництва і архітектури (86123, Донецька обл. м.Макіївка, вул.Державіна, 2)

Автореферат розісланий: 26 квітня 2004р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Югов А.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

В наш час, отоплюючі котельні забезпечуються рядовим вугіллям з підвищеним (до 60%) вмістом дрібних фракцій та золи, що не відповідає вимогам шарового спалювання. Через підвищену зольність твердого палива зменшується надійність роботи котлів, трапляється шлакування, погіршується процес горіння в топці, зменшується ККД та теплопродуктивність. Спалювання низькосортного палива пов'язано з викидами в оточуюче середовище шкідливих речовин (оксидів азоту, сірки, пилу).

Використання водовугільних суспензій, які є сумішшю вугілля з водою (вологість W=28...50%, теплота згоряння Q=8...16МДж/кг), може бути використано замість рідкого палива в великих теплогенераторах без їх реконструкції.

В цих умовах для котлів невисокої потужності є технологія спалювання в низькотемпературному киплячому шарі (КШ), розробка, впровадження якої є важливим та актуальним народно-господарчим завданням.

Слід зазначити, що суттєвим резервом ефективності вугільної галузі є виробництво високоякісного палива шляхом глибокого збагачення гірничої маси і підвищення ступеня вилучення горючої маси за рахунок перероблення вторинних ресурсів (перероблення вугільних мулів, шламів, породних відвалів). При цьому рівень якості продукції повинен бути диференційований для кожної марки вугілля і орієнтований на конкретного споживача. За попередніми підрахунками, такий підхід дозволить при використанні вугілля додатково отримати до 20% теплоти.

Вугілля є важливим чинником у забезпеченні енергобезпеки, може бути конкурентно спроможним і стати екологічно прийнятним джерелом енергії за умови застосування сучасних технологій. Тому вугілля розглядається як складова частина стратегії забезпечення стійкого розвитку енергетики в світі.

Попередні дослідження показали економічну доцільність створення на базі Верхньо-дніпровського буровугільного родовища паливно-енергетичного комплексу в складі розрізу потужністю 4,6млн.т на рік і ТЕС потужністю 600МВт та підприємств з утилізації відходів із отриманих будматеріалів та інших продуктів.

Використання потенціалу бурого вугілля дозволило б суттєво покращити паливозабезпечення теплоелектростанцій. Реконструкція блоків великих теплоелектростанцій під спалювання бурого вугілля, а також технології підготовки вугілля - найбільш привабливий шлях забезпечення станцій вітчизняним паливом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до держбюджетних тем НТУ "ХПІ" М 3014: "Розробка нових концептуальних методів і підходів до створення високоефективного та теплоенергетичного устаткування на основі системного аналізу й інтенсифікації теплотехнологій" (№ держреєстрації 0100U001672, 2000-2002рр.), НТУ "ХПІ" М 3015: "Розробка, розвиток і удосконалення теорії і способів імітаційного моделювання і натурно-імітаційних експериментів для створення перспективних енергогенеруючих комплексів" (№ держреєстрації 0103U001505, 2003-2005рр).

Мета роботи

Експериментальне та теоретичне обґрунтування методів підвищення технологічної та екологічної ефективності при спалюванні низькосортного палива в киплячому шарі отоплюю-чих котлів.

Задачі дослідження:

- експериментально дослідити теплообмінні та гідродинамічні процеси в умовах пульсаційної подачі повітря в киплячий шар;
- теоретично та експериментально обґрунтувати режими стійкого спалювання відходів вуглезбагачування та низькореакційного високозольного вугілля в киплячому шарі;
- дослідити механізм формування виносу часток з киплячого шару;
- вивчити вплив режимних параметрів на зменшення викидів оксиду азоту;
- розробити інженерні заходи для зниження шкідливих викидів (пилових частинок, оксиду азоту).

Об'єкт дослідження

Процеси горіння твердого палива в киплячому шарі за спеціальних умов (подача води в шар, ступінчаста подача повітря, пульсаційна подача повітря та інше).

Предмет дослідження

Теплотехнічні і екологічні характеристики процесів спалювання низькосортних палив в отоплюючих котлах.

Наукова новизна отриманих результатів

- експериментально і теоретично обґрунтовані границі стійкого спалювання водовугільних суспензій донецького вугілля в киплячому шарі отоплюючих котлів;
- експериментально доведено вплив фракційного складу та його змін на рівень механічного недопалу, вказано, що укрупнення виносу зменшує недопал до нормативного;
- визначено рівень викидів оксиду азоту для різних технологічних і екологічних заходів.

Практичне значення отриманих результатів

- Розроблено рекомендації з режимів спалювання низькосортних твердих палив і водовугільних суспензій в низькотемпературному киплячому шарі; вказано границі стійкого

горіння відходів вуглезбагачування вологістю 30-55% в киплячому шарі; показано можливість зниження викидів шкідливих речовин оксидів азоту, сірки, пилових частинок; експериментально доведено раціональність використання спеціальних екологічних заходів (ступінчаста подача повітря, пульсаційна подача повітря, подача води в шар).

Апробація результатів дисертації

Основні результати роботи доповідались на міжнародних науково-технічних конференціях:

- VIII Всеукраїнська наукова конференція "Охорона оточуючого середовища та раціональне використання природних ресурсів" (Донецьк, 1998р.); Перша обласна конференція молодих вчених (Харків, 2003р.); Наукові конференції НТУ "ХПІ" та ХДТУБА (Харків, 1995-2003р.); Міжнародна науково-практична конференція "Екологія: освіта, наука, промисловість, здоров'я" (Бєлгород, 2004р.).

Особистий вклад здобувача

Результати, які відображені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. Автором розроблені методики експериментального дослідження процесів спалювання низькосортних палив в киплячому шарі в лабораторних умовах та промислових установках. Запропоновані та досліджені технічні заходи по зменшенню викидів шкідливих речовин. Розроблені рекомендації по їх реалізації.

Опубліковані роботи

За темою дисертаційної роботи надруковано вісім наукових робіт у фахових виданнях.

Структура та об'єм дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, заключення, списку літератури.

Загальний обсяг роботи складає 116 сторінок, 98 малюнків, 21 таблицю, список використаних джерел з 151 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтована актуальність теми: сформульована мета та задачі досліджень, викладені наукова новизна та практична цінність отриманих результатів; приведені дані про апробацію роботи та публікацію результатів дисертації.

В першому розділі представлено огляд літературних даних, сформульована мета та поставлені задачі дослідження.

В усіх промислово-розвинутих країнах велике значення приділяється увазі зпалювання низькосортного твердого палива. При цьому висуваються жорсткі вимоги до зменшення рівня забруднення оточуючого середовища через роботу енергетичних установок. Одним з найбільш перспективних напрямків є спалювання твердого палива в низькотемпературному киплячому шарі.

Основна маса видобутого в Україні вугілля характеризується високою зольністю та вмістом сірки. Виходячи з цього збільшити паливну базу ТЕС, ТЕЦ опалювальних котлів

можливо за рахунок використання низькокалорійних відходів вуглезбагачування та бурого високоволого вугілля.

В наш час в відстійниках та шлаконакоплювачах збагачувальних фабрик накопичено більше 130млн.т відходів вуглезбагачення. З них до 15 млн.т представлено шламами з зольністю на суху масу A_d<45%; до 60 млн.т- мулошламами з A_d≈45-60%, решта A_d≈60-75%. В Львівсько-Волинському басейні знаходиться 9млн.т мулошламів, решта в Донбасі. Вологість на робочу масу W^p дорівнює 20-30% вміст сірки на суху масу S_{dt}=1,2-2,6%. Сухих відходів збагачування в відвалах шахт та збагачувальних фабрик накопичено біля 3млрд.т.

Більше 5млрд.т бурого вугілля залягає в Дніпропетровському басейні, з них розробляється (Олександрійский район) 100млн.т. Мала глибина залягання дає можливість відкритого добування та забезпечення низької собівартості. Але це вугілля відрізняється вологістю до 56% при A_d=15-30% та високим вмістом сірки S_{dt}=4,0-4,5%. Спалювання низькосортного вугілля можливо в топках з киплячим шаром, але ця проблема вивчена недостатньо.

В другому розділі розглянуті методики та схеми експериментальних установок.

Експерименти по визначенню ефективності спалювання низькосортних палив проводились на експериментальній установці, яка мала наступний вигляд: трубчата камера спалювання висотою 1200мм та діаметром 200мм. Повітря необхідне для горіння подавалося через повітророзподільну решітку ковпачкового типу. На установці передбачено подачу палива в шар та в надшаровий простір. Для видалення винесених з шару частинок, димові гази спрямовуються в циклон діаметром 300 та висотою 920мм. Передбачена можливість візуального нагляду за процесами горіння через кварцове скло. Зріджуване повітря подавалось на газорозподільну решітку вентилятором ВВД-5. На повітропроводі встановлено електромагнітний клапан, який регулює пульсаційні повітряні потоки. Замірювання температури відбувалось за допомогою термопар (ТХК, ТХА).

Аналіз продуктів спалювання здійснювався газоаналізатором ГХП-3М. Коефіцієнт надлишку повітря рахувався за азотною формулою.

В ході експерименту відбиралися проби виносу золи з циклону, а також проби матеріалу шару. Для отримання фракційного складу палива проводився ситовий аналіз проб. Для визначення концентрації горючих в пробах проводилось пофракційне випалювання горючих по стандартній методиці.

Втрати через механічний недопал обчислювалися за формулою:

$$q_4^{ун} = \frac{M \times C^Г \times Q^Г}{B_T \times Q_i^r \times \Delta\tau} \ ,\% \qquad (1)$$

де М- маса виносу, який відібраний з циклону за фіксований інтервал часу, кг; $C^г$- концентрація горючих в виносу, %; $Q^г$- теплота згоряння горючих, МДж/кг; Δτ- час відбору проб виносу, с; $B_т$- витрати палива, кг/с; Q_i^r- нижча теплота згоряння палива, МДж/кг.

Через розмір виносу, уловленого в фільтрі та циклоні, вимірювалась швидкість виносу золи із шару:

$$q_{зол}^{ун} = M_ц \times \frac{100 - C_ц^Г}{100 \times \tau_ц} + M_ф \times \frac{100 - C_ф^Г}{100 \times \tau_ф} \text{ , кг/с} \qquad (2)$$

де $M_ц$, $M_ф$ – маса виносу уловленого в циклоні і фільтрі, кг; $C_ц^г$, $C_ф^г$ – вміст горючих в виносі, %, $\tau_ц$, $\tau_ф$ – час відбору виносу, с.

Доля винесеної з шару золи вираховується як відношення:

$$\alpha_{ун} = \frac{q_{зол}^{ун}}{G_{зол}^{Т}} \times 100 \text{ , \%} \qquad (3)$$

де $G_{зол}^{т}$- швидкість поступання золи в установку, кг/с.

$$G_{зол}^{Т} = \frac{B_Т \times A^p}{100} \times \frac{100}{100 - q_4^y} \qquad (4)$$

В випробуваннях по вивченню можливості зниження викидів оксидів сірки використовувалось вапно, перед тим просіяне через сито з отворами до 5мм.

Ступінь зв’язку сірки розраховувалась за формулою, %:

$$\eta_{SO_2} = \frac{(SO_2)' - (SO_2)''}{(SO_2)'} \times 100 \text{ ,} \qquad (4)$$

де, $(SO_2)'$, $(SO_2)''$- концентрація діоксиду сірки в димових газах при спалюванні вугілля без вапна та з його добавкою, г/м^3.

Схема вимірювання концентрацій NO_x і SO_x та пилу досліджувалась на котлах ДКВР, КВФ, КЕ. Аналіз димових газів проводився газоаналізатором “ГХП” та “Евдіометр-40”.

В роботі використовувався газоаналізатор (OXY-5) Testo-33, який складається з вимірювача та аналізатора, та має можливість виводу обробленого результату на дисплей та друк.

Принцип дії приладу оснований на хімічній реакції оксиду азоту та сірки з рідинними поглиначами та з наступною зміною кольору розчину. Вимір концентрації NO_x виконувався фотоколориметричним методом.

Проведено математичне планування експерименту з дослідження тепловіддачі та екологічних факторів.

Залежність цільової функції $\alpha_{max}^{пш}$ в пульсуючому шарі (ПШ) від основних впливових та незалежних один від одного факторів може бути представлена як

$\alpha_{max}^{пш}=f(V; \Psi; d_e; W_{ср})$

де, $\alpha_{max}^{пш}$- коефіцієнт тепловіддачі від поверхні теплообміну до пульсуючого шару, (КТВ); V – частота пульсацій; Ψ - скважність; d – діаметр матеріалу; $W_{ср}$ - швидкість повітря.

Випробування проводились за планом Хартлі другого порядку.

В результаті обробки даних було отримано наступне регресійне рівняння:

$$\alpha_{max}^{пш}=390-12,7\cdot X_2-56,7\cdot X_3-58,7\cdot X_4+25,0\cdot X_2^2-92,0\cdot X_3^2-8,9\cdot X_2\cdot X_4+57,2\cdot X_2\cdot X_3+$$
$$+29,6\cdot X_4\cdot X_3 \qquad (6)$$

де $x_1=\frac{\nu-5}{5}$; $x_2=\frac{\psi-0,55}{0,25}$; $x_3=\frac{w_{ср}-0,9}{0,7}$; $x_4=\frac{d_э-1,76}{1,05}$;

Порівнюючи значення КТВ, отриманих за регресивною залежністю, та аналогічні, отримані в процесі повного факторного експерименту, виявлено ідентичність результатів.

В третьому розділі розглянуто питання організації ефективного спалювання низькосортного палива в киплячому шарі.

Можливість реалізації ефективних режимів спалювання палива в киплячому шарі обґрунтовано не тільки конструкцією топки киплячого шару, але й властивостями палива. Основними характеристиками властивостей палива є волога та мінеральні добавки. Стійке горіння палива в киплячому шарі можливе в вузькому діапазоні температур. Виконані розрахунки теоретичної температури горіння при різній вологості та зольності палива. Розрахунки виконувались при значенні коефіцієнту надлишку повітря 1,2. Теплота згорання горючої маси палива прийнята 31,4МДж/кг, q_3-5%; q_4-4%; q_5-3%. Отримана величина теоретичної температури горіння $t_г$ порівнювалась з оптимальною, з точки зору процесу горіння пального.

Стійка робота котла в діапазоні температур 850-950^oC при спалюванні обводненого пального з беззольною твердою частиною можлива при вологості не більше 75%. На практиці вологість водовугільних суспензій вибирається за умов їх транспортування і не перевищує 50%. Таким чином, важливим фактором для процесу горіння стає вміст мінеральних добавок в твердій частині ВВС. За цієї вологості (W^p=50%) спалювання ВВС без підігріву повітря можливо при зольності A_d не більше 60%.

Спалювання вугілля марки А проходить стійко в широкому діапазоні зміни вологості та зольності (W_p<30%; A_d<60%), бурого вугілля з вологістю 10%; при підвищенні вологості до 30% значення граничної зольності знижується до 45-50%. Відходи вуглезбагачування можуть спалюватись з допустимою зольністю A_d<40-45%. Ці висновки узгоджуються з даними УПІ , де були виконані розрахунки граничних значень $W_г$ та A_d сибірського вугілля, але за інших обставин. Температура киплячого шару приймалась 900^oC, що пояснює відхилення графіка граничних значень А та $W_г$ у бік більш великих значень.

В роботі розвивається наукове положення про значний вплив складу летких і відношення складу вуглецю і летких в паливі. Вугілля з високим вмістом летких більше підходить для

спалювання в КШ. Доказано що за ефективністю спалювання донецьке вугілля можна розділити на: донецький Г, К(промпродукт), Т, АШ.

Екологічні засоби, які направлені на зниження оксидів сірки та азоту (ступінчаста та пульсуюча подача повітря та води в шар, добавки - уловлювачі сірки та інші) викликають певні зміни гідродинаміки киплячого шару та ефективності процесів тепло - і масообміну.

Аналіз результатів експериментальних і теоретичних робіт, виконаних різними авторами показав, що пульсації потоку зріджуваного агента приводять до інтенсифікації процесу горіння та збільшують швидкість горіння при шаровому спалюванні в 2-2,3 рази. Отримана економія палива 10-30%, витрати ожижаючого агента на 30% менші ніж за стаціонарного псевдозрідження.

Залежність коефіцієнту тепловіддачі від швидкості повітря у пульсуючому шарі (ПШ) має такий же характер, як і для стаціонарного киплячого шару: спочатку збільшується та доходить до максимального значення, а далі залишається постійним (рис.1). Особливістю пульсуючого шару є те, що максимальне значення α^{max} досягається при менших швидкостях повітря, що характерно для високих температур киплячого шару. Максимальні значення коефіцієнту тепловіддачі в пульсуючому шарі на 20-30% вище, ніж в стаціонарному киплячому шарі. Зі зменшенням діаметру частинок коефіцієнт тепловіддачі збільшується на 30-50%.

На рис.2,3 представлені результати досліджень залежності коефіцієнта тепловіддачі від частоти та скважності пульсацій. Як видно, коефіцієнт тепловіддачі для гладкої труби мало залежить від частоти пульсації. Якщо при υ=0,5Гц- α^{max}=600Вт/м^{2}К, то при υ =2,0Гц- α^{max}=670Вт/м^{2}К. При подальшому збільшенні частоти пульсації до 10 Гц, коефіцієнт тепловіддачі зменшується до 620-630Вт/м^{2}К. Таким чином, при пульсаційній подачі повітря в киплячий шар з частотою до 1,0-2,0 Гц коефіцієнт тепловіддачі збільшується на 10-15%, при подальшому збільшенні частоти пульсації інтенсивність теплообміну киплячого шару з поверхні практично не відрізняються від стаціонарного киплячого шару.

Найбільша ефективність пульсації спостерігається при значеннях скважності потоку 0,25-0,35. Так при Ψ=0,8 значення α^{max}=240-260Вт/м^{2}К для оребрених труб. Зі збільшенням швидкості повітря вплив скважності на інтенсивність теплообміну зменшується. Коефіцієнт тепловіддачі в киплячому шарі α^{max} визначаємо:

$$Nu_{op}^{max} = Nu_o^{max} + Z_{рп} \cdot \Psi^{0,9} \qquad (7)$$

де, $Z_{рп}$- коефіцієнт ефективності ребра, віднесений до повної ребристої поверхні; Ψ- коефіцієнт оребрення поверхні теплообміну, Nu_{op}^{max}, Nu_o^{max}- критерій Нусельта для оребрених і гладких труб.

Коефіцієнт ефективності ребра $Z_{РП}$ визначаємо по α_o^{max} (максимальний коефіцієнт тепловіддачі гладкої труби) в предположені постійності за висотою ребра:

$$Z_{рп}=(Z_р+F_р+F_{ор}')/(F_{ор}'+F_р) \qquad (9)$$

Максимальне значення коефіцієнту тепловіддачі гладкої труби α_o^{max}:

$$Nu_o^{max}=0,85A_r^{0,19}+0,006A_r^{0,5}\cdot Pr^{0,33} \quad (10)$$

Досліджувалась залежність коефіцієнту тепловіддачі високотемпературного пульсуючого та стаціонарного киплячого шару від температури шару. Результати показують, що залежності коефіцієнту тепловіддачі для пульсуючого та стаціонарного киплячого шару практично однакові. При збільшені температури шару від 850-1100^oC при спалюванні різних палив значення коефіцієнту тепловіддачі збільшується на 5-10%.

Таким чином, теплообмін гладких та оребрених труб в високотемпературному пульсуючому шарі характеризується досягненням максимальних значень коефіцієнту тепловіддачі при більш низьких значеннях середньої швидкості повітря, ніж для стаціонарного киплячого шару. При цьому значення α^{max} на 20-30% вище, ніж в стаціонарному киплячому шарі. Спостерігається збільшення α^{max} на 10-15% від частоти пульсації в діапазоні 1,0-2,0 Гц, зі зменшенням скважності до 0,25-0,30 α^{max} збільшується на 30-35%, зі зменшенням діаметру частинок α^{max} збільшується на 30-50%. Підвищення температури шару на 200^oC проводить до підвищення α^{max} на 25-30%. Результати отримані при спалюванні різних палив (високовологе буре вугілля, донецьке вугілля марки А, Г, природного газу).

Гідродинамічні характеристики високотемпературного пульсуючого шару вимірювались при спалюванні в шарі різних палив розміром частинок $d_т$=1-5мм. Спостерігалось періодичне підвищення перепаду тиску киплячого шару та висоти шару. Висота спалаху збільшувалась з збільшенням скважності та зниженням частоти пульсації. Так, для киплячого шару частинок $d_т$=1мм за частотою 0,5 Гц і скважності 0,5 висота динамічного розширення шару дорівнює 250-300мм, а за частотою 4 Гц відповідно 180-200мм. Висота розширення шару збільшується при зменшенні початкової висоти шару, та збільшенні швидкості зріджуваного повітря. Дані досліджень узгоджуються з розрахунковими. Нестаціонарний характер руху продуктів спалювання і періодичний імпульс надлишкового тиску зазначають зниження середнього значення втрат тиску в киплячому шарі порівняно зі стаціонарним. Так, при стаціонарному режимі опір шару дорівнює 1900-2000Па, тоді як при пульсуючому режимі середнє значення перепаду тиску дорівнює 1300-1500Па, при цьому максимальне значення опіру 2500Па.

Таким чином, використання пульсаційної подачі повітря дозволяє зменшити середнє значення гідродинамічного опіру шару на 20-30%, в порівнянні зі стаціонарним киплячим шаром.

Спалювання твердого та газообразного палива в пульсуючому шарі з частотою υ=0,5-3,0 Гц дозволяє отримати більш повне вигоряння, та досягнення максимальної температури шару на 150-200^oC вище, ніж за непреривної подачію повітря. Час розігріву шару скорочується в 1,5-2,0 рази. З підвищенням температури шару при α=1,0-1,4, концентрація горючих в продуктах

спалювання знижується, зменшуються втрати теплоти від неповного згоряння палива, підвищується ефективність його спалювання.

На рис.4,5 показана залежність виходу оксидів азоту від частоти ПШ частинок твердого палива. В стаціонарному КШ при спалюванні кам'яного вугілля с N^p=0,9 концентрація NO_x в продуктах спалювання була 300мг/м^3.

При накладенні пульсації на повітряний потік вихід оксидів азоту зменшувався. Якщо ВВС частинок вугілля стаціонарного псевдозрідження концентрація NO_x складає 300мг/м^3, то зі збільшенням частоти пульсації до 10Гц концентрація NO_x складала приблизно 250 мг/м^3, при цьому відбувається зниження на 15-20% в діапазоні частот від 0 до 10Гц.

Таким чином, спалювання твердого та газоподібного палива в пульсуючому шарі з частотою 3-10 Гц дозволяє знизити концентрацію NO_x на 25-30%, в порівнянні з киплячим шаром, і на 45-60% з порівнянням факельного горіння. З підвищенням температури шару вихід NO_x збільшується. Залежність концентрації NO_x від коефіцієнту повітря в ПШ носить аналогічний характер такий, як і для КШ. Зі зменшенням скважності потоку від 0,8 до 0,3 вихід оксидів азоту зменшується на 15-20%.

Ефективність спалювання твердого палива визначається низьким складом горючих в газоподібних продуктах спалювання і твердих пилових частинок, що виносяться з топочного пристрою. Аналіз виносу дозволяє виявити механізм його формування. Так, диференційний розподіл маси горючих виносу по розмірам виносних частинок дозволяє розділити весь винос на великофракційний (0,15-2,0мм) і мілкофракційний $d_т$<0,15мм (рис.6). Розмір великофракційного виносу визначається як аеродинамічними обставинами, так і густиною виносних частинок.

При спалюванні вугілля великофракційний винос відбувається тільки за подачею початкового палива з розміром як той, що виноситься.

Частина великофракційного виносу складається з частинок коксу, які отримані при догорянні великофракційного вугілля до виносного розміру. При спалюванні палива окислювач поступає в об'єм частинки через великі щілини, визначає їх роздріб на більш дрібні, які переходять в винос.

Аналізуючи приведені функції розподілу горючих в виносі, можна побачити різко спадаючі ділянки ліній для великофракційного виносу ($d_т$>0,35мм), які відображають пропорційність виносу числу поданих частинок. Ця частина виносу формується при первинних перетвореннях палива. Такий механізм формування великофракційного виносу можливий при спалюванні дрібного вугілля $d_т$<1мм. При спалюванні бурого вугілля з частинками більш 1-3мм, великофракційний винос стабілізується на рівні, який визначає допалювання до виносного розміру. Для донецького вугілля марки Т такої стабільності не відбувається, а залежність від розміру палива, що подається, змінюється на більш слабку.

Дрібнофракційний винос $d_т$<0,25-0,35 мм має інший характер формування. Як виявлено, концентрація горючих в виносі прямопропорційна розміру палива, що подається. Можливо припустити, що величина реагуючої поверхні в шарі постійна для даного виду палива. Дрібнофракційний винос формується з наружною поверхнею палива, яка руйнується під час ударів частинок палива з частинками інертної насадки. Це припущення підтверджується:

- наявністю горючих в розмірі $d_т$<0,25-0,35мм, за відсутністю частинок такого розміру в паливі, що подається;
- відсутністю залежності втрат дрібнофракційного виносу від розміру палива, що подається, а також затримання за часом його появлення після завантаження в шар вугілля.

Вміст великофракційної золи палива залежить від властивостей мінеральної частини палива та його зольності. Результати досліджень вказують на те, що з підвищенням температури механічний недопал збільшується. Це можна пояснити процесом спучування та роздрібнення частинок палива, а потім виносом дрібних частинок з шару з підвищенням температури, що підтверджується збільшенням масової витрати горючих і підвищенням їх концентрації в виносу. Зниженням питомої масової витрати золи при температурі шару вище 900^{o}C можна пояснити осадженням дрібнодисперсної золи на частинках інертного наповнювача при наближенні її до пластичного стану. Механічний недопал має мінімальне значення при $\alpha_в$=1,15-1,25. При подальшому підвищенні коефіцієнта надлишку повітря спостерігається підвищення механічного недопалу. Це пов’язано з інтенсифікацією процесу горіння, та збільшенням товщини зони реагування. Виникнення дрібнофракційного виносу визначається стиранням гарячої поверхні. Поглиблення зони реагування призводить до збільшення масових витрат дрібних частинок, що є причиною росту механічного недопалу. Витрати золи, яка виноситься, зменшуються зі збільшенням коефіцієнту надлишку повітря. Підвищення ефективності уловлювання золи в шарі є причиною підвищення процентного складу горючих у виносі. Підвищення вологості виносу перед подачею в шар позитивно відображається при випалюванні. Так механічний недопал знижується з 17% до 5,7%. Найбільше допалювання відбувається при подачі в киплячий шар виносу у вигляді окатишів. Загальний механічний недопал знижувався до 3,7%. В експериментах проводилось спалювання окатишів донецького вугілля марки Г і Т діаметром 5-30мм, виготовлених з частинок вугілля розміром $d_т$<1мм. При спалюванні окатишів розміром 5-10мм механічний недопал знижується до значення 2-4,3% і 8,9-14,8% відповідно для донецького вугілля марки Г і Т. Визначалися швидкість горіння та час повного вигоряння окатишів. Їх зольність однакового складу, спалюваних в шарі, змінюється за часом. Склад горючих в окатишах зменшується зі зменшенням розміру частинок, з яких вони виготовлені. Швидкість горіння їх менше, через більшу товщину золової прошари, яка заважає попадати кисню до поверхні горіння. На рис.7 показана залежність зміни маси окатишів від часу перебування в шарі. Встановлено, що зменшення маси окатишів, які виготовлені з більших частинок, відбувається

швидше за рахунок інтенсивного горіння та стирання. Було проведено математичне планування експерименту залежності механічного недопалу від впливових факторів: X_1- температура киплячого шару; X_2- швидкість газового потоку; X_3- коефіцієнт надлишку повітря; X_4- вологість палива; X_5- зольність. За результатом обробки експериментальних даних отримано лінійне регресійне рівняння:

$$q_4=8,26-1,15X_1+0,072X_2-0,281X_3-1,752X_4-0,28X_5 \quad (10)$$

Визначалась надлишкова дисперсія і дисперсія відновлення та за критерієм Фішера оцінювалась адекватність математичної моделі.

В розділі 4 розглянуто питання спалювання водовугільних суспензій в киплячому шарі.

В експериментах спалювались водовугільні суспензії високореакційного донецького вугілля Г і АШ та вугільні шлами.

Результати аналізу виносу показали наступне. В діапазоні температур шару 900-1000^{o}C найбільший склад горючих існує в частинках розміром менше 0,5мм ($t_{кс}$=900-950^{o}C), і в частинках 2-3мм ($t_{кс}$=960-1000^{o}C). Основну масу виносу при спалюванні з вапном донецького вугілля Т і Г і відходів його збагачування складають частинки неминуючого виносу, швидкість вітання яких менше швидкості повітря. Так при швидкості 1,25-1,35м/с неминучий виніс визначає втрати 3,5-14% поданих палив та вапна, значна частина виносу (17-40%) формується за рахунок динамічних викидів. Розподіл частки виносу золи $\alpha_{ун}^{i}$ по фракціям вказує, що найбільший об'єм золи виноситься із шару частинками фракцій 0-0,5мм.

Значення $\alpha_{ун}^{i}$ залежить від температури киплячого шару при спалюванні, частинки фракції 0-0,5мм відповідають температурі киплячого шару 950-970^{o}C, а при спалюванні суміші вугілля та вапна 880-900^{o}C.

Аналізуючи розподіл виносу золи $\alpha_{ун}^{i}$ при спалюванні донецького вугілля в діапазоні температур киплячого шару 950-1000^{o}C кількість золи, що виноситься із шару частинками фракцій 0-1мм, в 1,6-5,2 раза перевищує кількість золи, яка вноситься в шар частинками цих фракцій палива. При температурі шару 900-950^{o}C значення $\alpha_{ун}^{i}$ не перебільшує 50%. Зі збільшенням температури киплячого шару (>950^{o}C) інтенсифікується процес розтріскування та стирання частинок палива. Розподіл втрат з механічного неповного спалювання $q^{ун}_4$ при спалюванні донецького вугілля представлено на рис.8. Основна частка втрат (75-96%) визначається втратами фракцій 0-1,0 мм. Частинки виносу 1-3 мм дають не більше 10% втрат $q^{ун}_4$, але при збільшенні $t_{кс}$ до 980-1000^{o}C вклад частин фракціями 1-3мм збільшується до 23,2%, що пов'язано зі збільшенням частки цих частинок в виносу до 16,8-19,3%. При спалюванні в киплячому шарі донецького вугілля марки Т і відходів збагачування в суміші з вапном (Ca/S=1,8-2,0) в діапазоні температур 750- 1000^{o}C, основну частку втрат вносять фракції 0-0,25мм- 40,2-67,5%. При більш низьких температурах 800-820^{o}C розподіл втрат $q^{ун}_4$ по фракціях більш однаковий. Максимальне значення втрат $q^{ун}_4$=2,8-3,5% при температурі шару

950-980°С, швидкість повітря 1,25-1,35м/с; $\alpha_в$=1,20-1,28. При спалюванні разом з вапном втрати $q^{ун}_4$=0,8-3,2%. Величина $q^{ун}_4$ може бути набагато занижена (0,5-0,6%) через неповне утримання виносу в циклоні. На загальний недопал вугілля впливає значення механічного недопалу з золою провалу $q_4^{зл}$. Вона залежить від режимних параметрів процесів спалювання твердого палива і конструктивних параметрів топкового та повітророзподільного пристрою, системи золовидалення. Аналіз золи провалу визначив, що склад горючих в різних фракціях зольного залишку не перевищує 1% при $t_{кс}$=950-1000°С. При більш низьких температурах (800-850°С) він дорівнює 4-4,5%. Склад горючих в виносі залежить від температури киплячого шару і діаметру частинок. В частинках розміром 0-0,25мм $С_у^г$ на 3-6% вища ніж в частинках розміром 0,25-0,5. При спалюванні ВВС вологістю 30-35% склад горючих в частинках виносу зменшується з порівнянням ВВС вологістю 45-60%. Зниження вологості спалювання ВВС до 30-35% приводить до зниження $С_{ун}^г$ до 1,5-2,5% в діапазоні температур 800-950°С, а при зниженні $t_{кс}$=750-780°С $С_{ун}^і$ збільшується до 5,5-6,3%.

При спалюванні ВВС вологістю 45-50% при $t_{кс}$=800-850°С і 980-1000°С частка золи $\alpha_{ун}^і$ частинками фракцій 0-0,25мм перебільшує кількість золи, яка вноситься в шар частинками палива цієї фракції. Величина $\alpha_{ун}^і$ значно менша при спалюванні необводненого вугілля марки Г. На величину $\alpha_{ун}^і$ частинок розміром 0-0,25мм впливає температура шару. Так при збільшені $t_{кс}$ від 800-920°С, $\alpha_{ун}^і$ збільшується в два рази.

При температурі шару 900-950°С збільшення $\alpha_в$ від1,02 до 1,14 приводить до зниження втрат $q_4^{ун}$ більш ніж в 4 рази від 2,1 до 0,58%. Подальше збільшення $\alpha_в$ до 1,4 не приводить до вагомих змін $q_4^{ун}$.

Втрати теплоти з хімічною неповнотою згоряння $q_з$ розраховувались за результатами хроматографічного аналізу продуктів спалювання. Залежність $q_з$ від коефіцієнту надлишку повітря показує, що величина $q_з$ зменшується із збільшенням $\alpha_в$ і при значені $\alpha_в$=1,20-1,25 $q_з$ не перевищує 0,3-0,5%, що в 8-10 разів нижче, ніж при спалюванні необводненого донецького вугілля. Збільшення температури киплячого шару від 850-950°С при α=1,20-1,25, приводить до зниження $q_з$ з 4,0-4,5% до 0,5-0,8%.

В п’ятому розділі розглянуті результати промислових досліджень спалювання низькосортного палива на діючих котлах ДКВР, КВФ, КЕ.

Вказано вплив на паливні втрати котлів режиму і потужності котла, швидкості зріджуваного повітря і кількості віднесеної теплоти зануреними поверхнями нагріву (рис.9,10). При зменшені коефіцієнту надлишку повітря нижче $\alpha_в$=1,2 має місце хімічний недопал палива. Збільшення коефіцієнту надлишку повітря приводить до зросту втрат тепла з вихідними газами (рис.11).

Висота КШ впливає на ефективність спалювання палива. Рішенням проблеми є зменшення потужностей закидувача палива на 20-30%, або збільшення потужностей котлів.

Ефективність котлів з киплячим шаром максимальна, якщо 50% виділеного тепла вбирають занурені поверхні нагріву. Середній рівень оксидів азоту на котлах НТКС складає 630-650мг/нм^3. Найбільшим фактором впливу є температура шару. Концентрація NO_x збільшується на 150мг/м^3 при збільшені температури шару на 50^{o}С. Валові викиди NO_x від котлів ДКВР 10-13- складають 40-50т/рік, від котла ДКВР 4,5-13 відповідно 20-23т/рік.

Середній рівень викидів сірки складав 1100-1250мг/м^3 (α=1,4). Не практикувалась добавка в шар вапна. За цих умов практично вся сірка палива згорала і видалялась з димовими газами у вигляді SO_2. Утримання сірки можливо, доданням вапна в шар. Відомо, що при мольному відношенні Ca/S=3 можна утримати до 85% сірки. Питома концентрація СО в димових газах складає 20-40мг/м^3. Основний напрямок зменшення є коефіцієнт надлишкового повітря, а також організація вторинного дуття в об'єм топки над шаром. Викиди СО на котлах ДКВР 10-13 –2-2,5т/рік; ДКВР 4-13 – 1-1,2т/рік.

В результаті узагальнення дослідних даних (рис.12) по викидам NO_x отоплюючих котлів з топками киплячого шару отримана регресійна залежність:

$$C_{Nox}=1{,}368x10^4-59{,}029t+0{,}084t^2-3{,}847x10^{-5}t^3 \qquad (11)$$

справедлива в діапазоні регулюючої температури киплячого шару 700-1000˚С . Коефіцієнт надлишку повітря в процесі регулювання змінюється від 1,04 до 4. Дисперсія відхилення даних складає 0,995.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Показані діапазони регулювання теплової потужності котлів і допустимих значень параметрів - зольності і вологості низькосортного вугілля України при його спалюванні в киплячому шарі отоплюючих котлів (граничні значення зольності A<65-68%, вологості W<50-60%). В роботі розвивається наукове положення про значний вплив складу летких і відношення складу вуглецю і летких в паливі. Вугілля з високим вмістом летких більше підходить для спалювання в КШ. Доказано що за ефективністю спалювання донецьке вугілля можна розділити на: донецький Г, К(промпродукт), Т, АШ.

2. Експериментально встановлено, що ефективність тепловіддачі гладких та оребрених труб в пульсуючому киплячому шарі на 20-25% вища, ніж в стаціонарному киплячому шарі при спалюванні твердих палив. Запропоновані критеріальне і регресійне рівняння для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі.

3. Встановлено, що вихід NO_x в пульсуючому киплячому шарі менший, ніж в стаціонарному киплячому шарі і становить відповідно 220-240мг/м^3 і 300-350мг/м^3.

4. Експериментально досліджено механізм формування виносу частинок з топки киплячого шару в залежності від швидкості зріджуваного повітря, температури киплячого шару, коефіцієнту надлишку повітря, фракційного складу палива та інших параметрів. Встановлено, що повернення виносу для допалювання не забезпечує зменшення q_4; укрупнення виносу до частинок розміром 5-10мм, підвищує ефективність його допалювання, при цьому значення q_4

знижується від 18-25% до 3-5%. Отримано регресійне рівняння для розрахунку q_4 від впливових параметрів.

5. Результати дослідження підтвердили можливість ефективного стійкого процесу горіння водовугільних суспензій вологістю до 30-50% та зольністю до 50% в топках з киплячим шаром. При цьому втрати з механічним недопалом складають 2,4-3,5%, а з хімічним недопалом 0,5%.

6. Експериментально встановлено вплив режимних параметрів на концентрацію оксидів азоту і діоксиду сірки при спалюванні ВВС донецького вугілля різних найменувань. Встановлено, що вихід NO_x і SO_x нижче, ніж при спалюванні необводненого вугілля та складає відповідно 250мг/м^3 і 170 мг/м^3.

7. Результати дослідження в промисловості підтвердили ефективність технологічних засобів для зменшення шкідливих викидів в NO_x; SO_x, пилових частинок за рахунок укрупнення і зволоження виносу, що повертається на допалення, ступінчаста подача повітря – вторинного до 20-25%, пульсаційна подача повітря з частотою υ=1-5Гц і скважністю до 0,3. В результаті обробки і узагальнення експериментальних даних по викидам NO_x отримана регресійна залежність концентрації NO_x від температури киплячого шару в діапазоні 700-980˚С і α_B=1,05-4.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджені в КП “Харківтеплоенерго”.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ВИКЛАДЕНО В ПУБЛІКАЦІЯХ:

1. Редько И.А., Горбатенко И.В. и др. Высокотемпературный теплообмен поверхности в кипящем слое при сжигании водотопливных суспензий // “Энергетическое машиностроение” -1996г.-Харьков - С.168-172.

2. Редько И.А Математическое моделирование процессов сжигания водотопливных суспензий в кипящем слое // Вестник ХГПУ.-Харьков: ХГПУ.-1998 г.-Вып.6.-С.139-142.

3.Касилов В.И., Редько И.А. и др. Метод сжигания осадков сточных вод в топках с кипящим слоем// VIII Всеукраинская научная конференция аспирантов и студентов “Охрана окружаю-щей среды и рациональное использование природных ресурсов” -Донецк.-1998г.-С.56-61.

4.Редько И.А., Касилов В.И. и др. Методы исследования теплообменных труб в кипящем слое// Вестник Национального технического университета “ХПИ” -Харьков: НТУ “ХПИ”.-2001г.-С.171-175.

5.Редько И.А. Касилов В.И. и др. Экологические показатели котлов при сжигании низкосортных углей в кипящем слое // Вестник Национального технического университета “ХПИ”.-Харьков: НТУ “ХПИ”. -2002г.- с.153-156.

6. Редько И.А. Экологические показатели эксплуатации котлов малой мощности при сжигании низкосортного топлива в циркуляционном кипящем слое // Перша обласна конференція молодих науковців.-Харків.-2002.-С.78-81.

7. Редько И.А., Касилов В.И. и др. Технология сжигания сточных вод в топках с кипящим слоем.// Вестник Национального технического университета “ХПИ”.- Харьков: НТУ “ХПИ”.-2002г.- с.89-92

8. Редько И.А., Редько А.А., Басова Н.М. Ступенчатое сжигание твердых топлив в топках с кипящим слоем // Науковий вісник будівництва.- №25.- ХДТУБА.- Харків.- 2004.-С.94-98

АНОТАЦІЯ

Редько І.О. Підвищення теплотехнічної і екологічної ефективності при спалюванні низькосортних палив в киплячиму шарі отоплюючих котлів.- Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03- вентиляція, освітлення і теплогазопостачання. - Донбаська державна академія будівництва й архітектури Міністерства освіти і науки України, Макіївка, 2004.

Дисертація присвячена дослідженню теплотехнічних параметрів і зниження шкідливих викидів в атмосферу в опалювальних котлах з метою підвищення їх ефективності при спалюванні низькосортних палив і водовугільних суспензій.

Огляд літературних даних показав, що процеси спалювання низькосортних палив у топках з киплячим шаром для малих котлів вивчені недостатньо.

Проведено дослідження механічного і хімічного недопалу при спалюванні низькосортного палива і водовугільних суспензій у киплячому шарі. Показано вплив гранулометричного складу палива, швидкості повітря, температури киплячого шару, коефіцієнта надлишку повітря й інших параметрів на теплові втрати за рахунок укрупнення виносу можливо зменшити механічний і хімічний недопал.

Отримано регресійне рівняння впливу режимних параметрів на механічний недопал. Установлено, що механічний недопал при спалюванні ВВС менше, ніж при спалюванні необводненого вугілля.

Проведено дослідження в промислових умовах процесів спалювання низькосортного вугілля у киплячому шарі. Отримано аналітичну залежність розрахунку NO_x від режимних параметрів пульсуючого киплячого шару. Отримано узагальнююче рівняння для розрахунків концентрації NO_x від температури киплячого шару.

Результати роботи у вигляді методики впроваджені в КП “Харьківтеплоенерго”.

Ключові слова: киплячий шар, водовугільні суспензії, низькосортне паливо, шкідливі викиди, процеси спалювання.

АННОТАЦИЯ

Редько И.А. Повышение теплотехнической и экологической эффективности при сжигании низкосортных топлив с кипящем слое отопительных котлов. - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03- вентиляция, освещение и теплогазоснабжение. Донбасская государственная академия строительства и архитектуры Министерства образования и науки Украины, Макеевка, 2004.

Диссертация посвящена исследованию теплотехнических параметров и снижение вредных выбросов в атмосферу в отопительных котлах с целью повышения их эффективности при сжигании низкосортных топлив и водоугольных суспензий.

Обзор литературных данных показал, что процессы сжигания низкосортных топлив в топках с кипящим слоем для малых котлов изучены недостаточно. Приводится описание методик и экспериментальных установок по исследованию сжигания и теплообмена в стационарном и пульсирующем кипящем слое, в промышленных условиях в топках водогрейных и паровых котлов.

Выполнено математическое планирование экспериментов.

Исследован теплообмен и гидродинамика в пульсирующем слое. Определено, что теплообмен увеличивается на 20-30% по сравнению с стационарным кипящем слоем. При этом уменьшаются гидравлические потери.

Проведены исследования механического и химического недожога при сжигании низкосортного топлива и водо-угольных суспензий в кипящем слое. Показано влияние гранулометрического состава топлива, скорости воздуха, температуры кипящего слоя, коэффициента избытка воздуха и др. параметров на тепловые потери за счет укрупнения уноса возможно уменьшить механический и химический недожог.

Получено регрессионное уравнение влияния режимных параметров на механический недожог. Установлено, что механический недожог при сжигании ВУС меньше, чем при сжигании необводненного угля.

Проведены исследования в промышленных условиях процессов сжигания низко-сортных углей в кипящем слое. Получена аналитическая зависимость расчета NO_x от режимных параметров пульсирующего кипящего слоя. Получено обобщающее уравнение для расчетов концентрации NO_x от температуры кипящего слоя.

Разработаны и исследованы инженерные мероприятия по снижению вредных выбросов в атмосферу такие как подача воды, ступенчатая и пульсационная подача воздуха в слой.

Результаты работы в виде методики внедрены в КП “Харьковтеплоэнерго”.

Ключевые слова: кипящий слой, водоугольные суспензии, низкосортное топливо, вредные выбросы, процессы сжигания.

SUMMARY

Redko I.A. Increasing the heat-engineering and ecological efficiency during incineration of the low-grade fuel in the heating boiler furnaces with fluidized bed. – Thesis.

Ph.D. thesis for engineering sciences in specialty of 05.23.03 – ventilation, lighting, heat and gas supply. Donbass State Academy of Civil Engineering and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Makeyevka 2004. The thesis is devoted to investigation of the heat engineering parameters and reduction of harmful exhaust into atmosphere from the heating boilers to increase their efficiency when incinerating the low-grade fuels and coal –water suspension.

A review of the references showed that the incineration process of the low-grade fuels in the furnaces with boiling bed for small boilers has not been adequately studied The incineration processes of the low-grade coal in the boiling bed were investigated in the industrial conditions. The results of this work have been introduced at the CE “Kharkovteploenergo” in the form of methodical procedur.

Key words: fluidized bed, coal-water suspensions, low-grade fuel, harmful exhausts, incineration processes.