

Wacław Dobrzański, Krzysztof Jurek, Wojciech Szwarz

Instytut Techniki Ciepłej

BADANIA EKSPERYMENTALNE DOŚWIADCZALNEGO KOTŁA FLUIDALNEGO OF-1,3

W pracy przedstawiono opis doświadczalnego kotła fluidalnego OF-1,3, zbudowanego z wykorzystaniem konstrukcji kotła EKM-1,3 w Laboratorium Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej. Przedstawiono główne zmiany adaptacyjne kotła EKM-1,3, podano opis i parametry techniczne podstawowych układów i instalacji pomocniczych kotła fluidalnego. Zaprezentowano cel i warunki przeprowadzonych badań oraz omówiono ich wyniki. Przedstawiono również ocenę rozwiązań projektowo-konstrukcyjnych poszczególnych zespołów kotła oraz układów pomocniczych.

1. WSTĘP

Od roku 1976 w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej prowadzone są prace nad kotłami z paleniskami fluidalnymi. Prace koncentrują się wokół dwóch zasadniczych konstrukcji kotłów fluidalnych: kotłów z paleniskami bezciśnieniowymi (o ciśnieniu atmosferycznym) oraz kotłów z paleniskami ciśnieniowymi (z perspektywnym zastosowaniem w układach parowo-gazowych). W pracy autorzy omówili zagadnienia dotyczące badań kotła z atmosferycznym paleniskiem fluidalnym.

Jednym z głównych problemów decydujących o uzyskaniu właściwych rezultatów prac prowadzonych w dziedzinie atmosferycznych kotłów fluidalnych było zbudowanie obiektu badawczego spełniającego dwa podstawowe warunki:

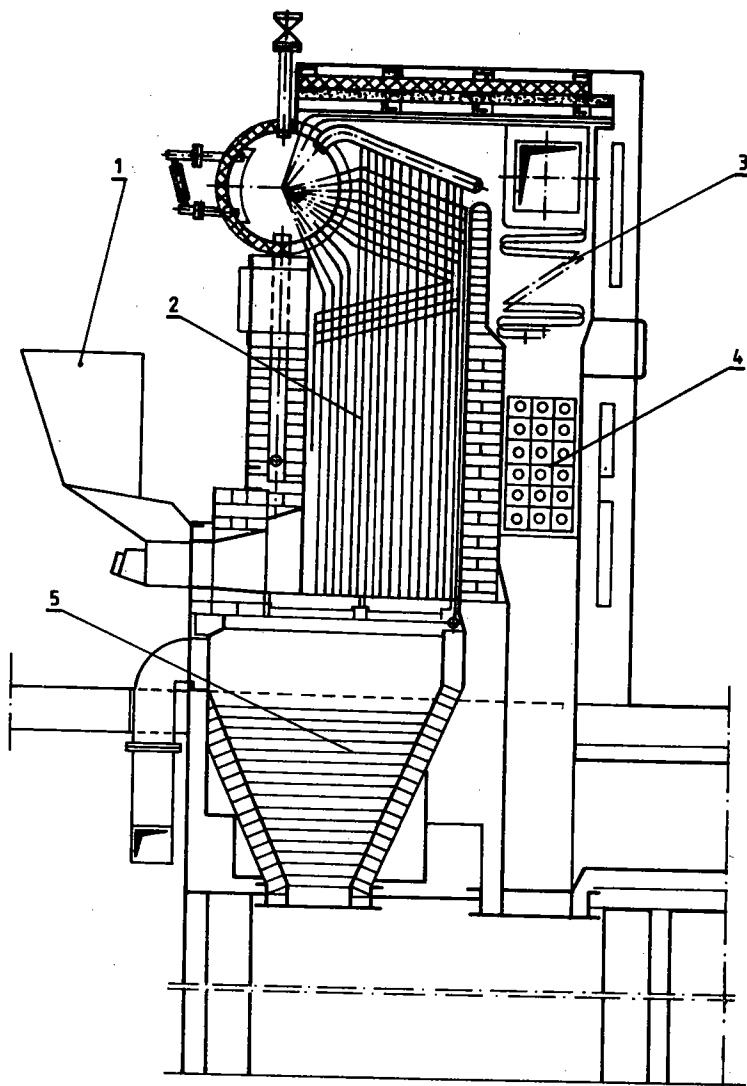
- skala obiektu musi odpowiadać rzeczywistym warunkom technicznym,

- w skład obiektu badawczego powinny wchodzić wszystkie podstawowe elementy kotła rzeczywistego.

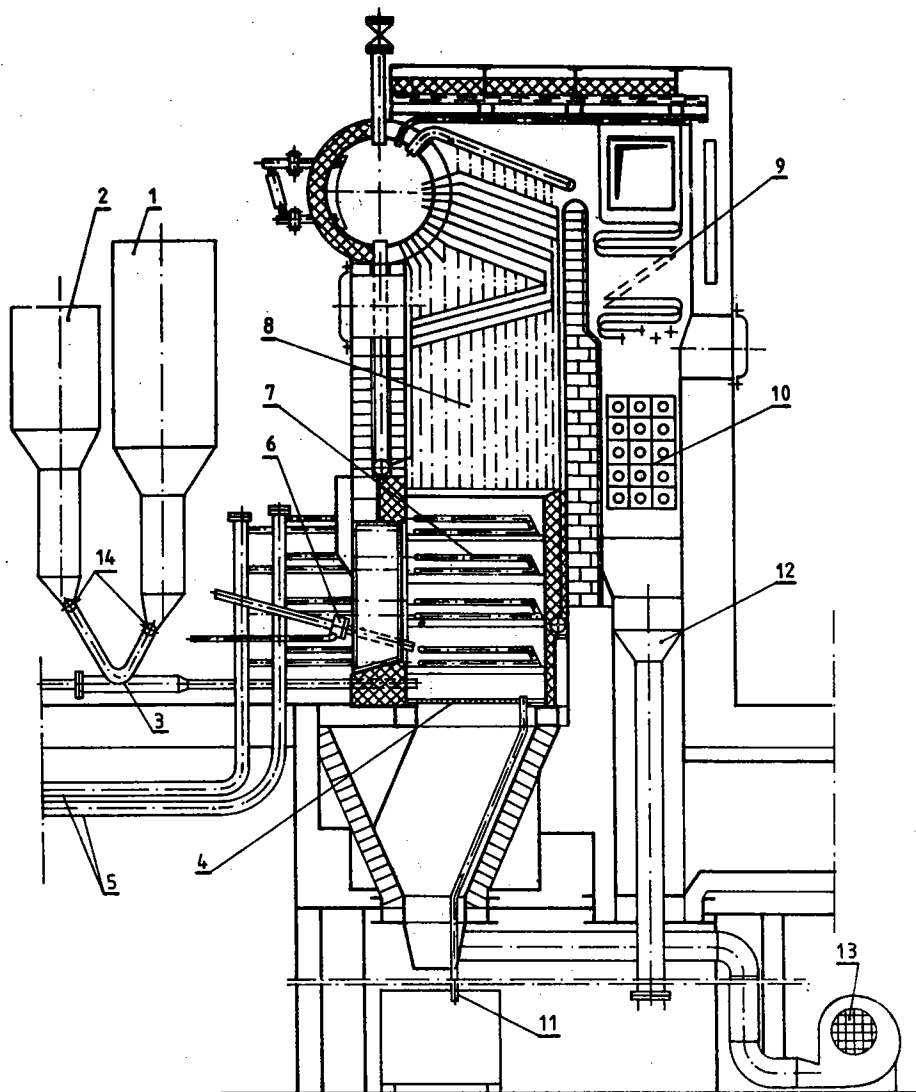
Aby zbudować planowany obiekt, zdecydowano się na adaptację zainstalowanego w Laboratorium ITC PW kotła parowego, który po odpowiedniej przebudowie spełniał oba te warunki. Dodatkowo istniała szansa uzyskania cennych doświadczeń dotyczących bardzo aktualnego problemu przeróbki istniejących kotłów rusztowych na kotły z paleniskami fluidalnymi. Założony cel został osiągnięty. Na podstawie własnych rozwiązań konstrukcyjno-projektowych oraz siłami zaplecza technicznego ITC zbudowano badawczy kocioł fluidalny o przewidywanej znamionowej mocy cieplnej 2,5 MW.

2. KOCIOŁ EKM-1,3

Bazą dla badawczego kotła z atmosferycznym paleniskiem fluidalnym był zainstalowany w ITC PW, zbudowany w roku 1953, kocioł firmy EKM (rys.1) o wydajności 1,3 t/h (0,36 kg/s), ciśnieniu nominalnym 2,55 MPa i temperaturze pary przegrzanej 350°C (623 K). W wersji oryginalnej jest to kocioł opalany węglem kamiennym z paleniskiem narzutowym, zaopatrzony w dwa napędzane mechanicznie narzutniki, zainstalowane na przedniej ścianie, oraz stały płaski ruszt. Kocioł typu wodno-rurowego z naturalną cyrkulacją zbudowany jest w układzie dwuciągowym. Komora paleniskowa o przekroju prostokątnym 1600x1000 mm, tradycyjnie obmurowana, jest na wszystkich ścianach ekranowana rurami parownika. Rury ekranów przedniego i tylnego w górnej części komory paleniskowej tworzą pęczek konwekcyjny. Całkowita powierzchnia parownika przed rekonstrukcją wynosiła 43 m². W górnej części drugiego ciągu spalinowego umieszczony jest przegrzewacz pary o powierzchni 18 m², pod nim żeliwny, żebrowy podgrzewacz wody o powierzchni 54 m². Kocioł był wykonany bez podgrzewacza powietrza. Spaliny z kotła odprowadzane są poziomym kanałem do baterii czterech równolegle połączonych odpyłaczy cyklonowych i wentylatorem wyciągowym tłoczony są do blaszanego kominu. Pod komorą paleniskową oraz drugim ciągiem umieszczone są leje popielnikowe. Kocioł zasilany jest, za



Rys.1. Kocioł EKM-1,3; 1-narzutnik węgla, 2-parownik, 3-przegrzewacz pary, 4-podgrzewacz wody, 5-lej popielnikowy



Rys.2. Kocioł z paleniskiem fluidalnym OF-1,3; 1-zasobnik paliwa, 2-zasobnik sorbentu, 3-strumienica powietrzna, 4-rozdzielacz powietrza, 5-zasilanie i wylot wody chłodzącej, 6-palnik rozpakowy, 7-wymiennik ciepła, 8-parownik, 9-przegrzewacz pary, 10-podgrzewacz wody, 11-przelew materiału złoża, 12-odbiór grubszych frakcji unosu, 13-wentylator podmuchowy, 14-podajnik celkowy

pomocą pompy napędzanej elektrycznie lub turbopompy, wodą zmiękczoną w wymiennikach jonitowych i odgazowaną w odgazowaczach atmosferycznym. Kocioł zaopatrzony jest w ruchową aparaturę kontrolno-pomiarową pozwalającą na ręczną regulację parametrów pary wylotowej.

3. FLUIDALNY KOCIOŁ BADAWCZY OF-1,3

Opisany wyżej kocioł EKM-1,3, głównie ze względu na kształt i gęste ekranowanie komory paleniskowej, mógł być przetworzony drogą ograniczonych w swym zakresie adaptacji i rekonstrukcji na kocioł z paleniskiem fluidalnym (rys.2).

W pierwszej kolejności prace adaptacyjne polegały na zmianach konstrukcyjnych w dolnym obszarze komory paleniskowej kotła. Zdemontowano z przedniej ściany kotła narzutnik węgla oraz usunięto cały ruszt o powierzchni $1,37 \text{ m}^2$. Na jego miejsce wbudowano ramę stanowiącą konstrukcję podtrzymującą wmontowane rozdzielacze powietrza. Ściany boczne oraz tylna w dolnej części komory paleniskowej, od ramy nośnej rozdzielacza do wysokości $1,4 \text{ m}$, pokryte zostały wymurówką z cegły szamotowej tworząc obrys złoża fluidalnego o powierzchni przekroju poprzecznego $1,15 \text{ m}^2$. Wymurówka w tej części komory paleniskowej pokryła rury ekranowe zmniejszając powierzchnię parownika kotła. Do ramy przytwierdzono wymienne rozdzielacze powietrza. Podczas badań stosowano zamiennie rozdzielacz tradycyjny kołpakowy lub tzw. sito X (rozwiązanie chronione patentem, a charakteryzujące się małymi oporami przepływu powietrza i równomiernym napływem). Większość badań przeprowadzono na rozdzielaczu kołpakowym stosowanym w urządzeniach aparatury chemicznej. Powietrze pod rozdzielacz podawane jest od dołu ze szczelnej komory stabilizacyjnej, umieszczonej w leju popielnikowym pod komorą paleniskową za pomocą wentylatora podmuchowego. W wymurowanej części komory paleniskowej, stanowiącej właściwe palenisko fluidalne, umieszczono węzłownicowy wymiennik ciepła o powierzchni $6,75 \text{ m}^2$, wykonany z rur $\varnothing 31,8 \times 2,6$ ze stali K 18, podzielony na cztery poziome sekcje. Wyjście rur z poszczególnych sekcji na zewnątrz kotła

jest poprzez 2 przepusty wykonane w ścianie bocznej. Wymiennik, ze względu na badawczy charakter kotła ze złożem fluidalnym, chłodzony jest wodą pobieraną z obiegu chłodni wentylatorowej z możliwością uzyskania strumienia do 60 t/h. Istnieje możliwość podłączenia wymiennika zanurzonego w złożu fluidalnym do obiegu kotła, jednak nie przeprowadzono takiego eksperymentu podczas badań.

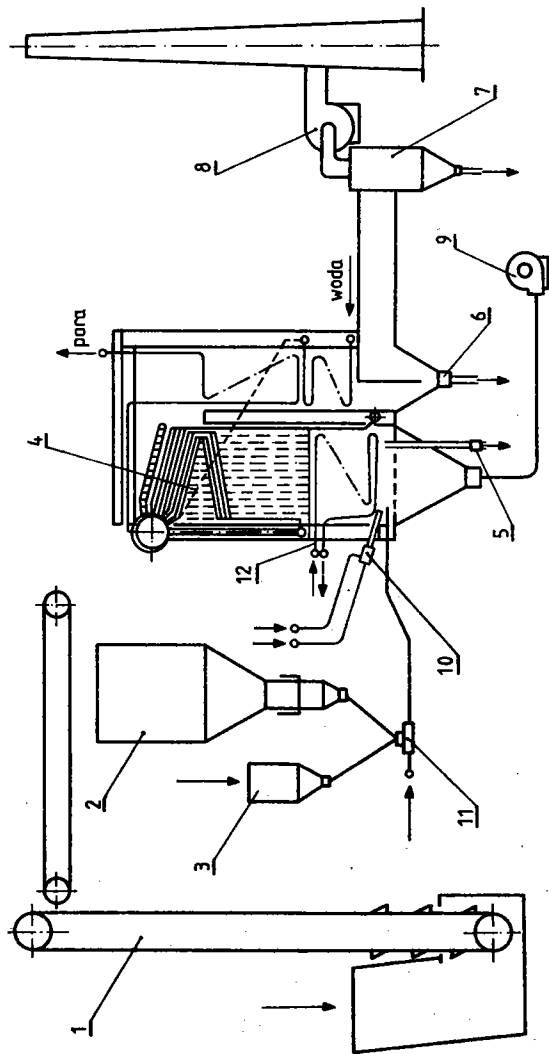
W przedniej ścianie kotła nie zamurowano okna o wymiarach 1,2x1,1 m pozostałego po zdemontowaniu narzutników. Okno to zamknięte zostaje uchylną, odpowiednio izolowaną klapą, umożliwiającą łatwy i natychmiastowy (bez uszkodzania obmurza) dostęp do obszaru komory fluidalnej. Przez klapę przeprowadzono liczbę przepustów wymaganą do zainstalowania w złożu fluidalnym czujników aparatury pomiarowej i wzierników. Zmiana paleniska kotła spowodowała konieczność zmniejszenia powierzchni przegrzewacza pary i podgrzewacza wody: powierzchnie przegrzewacza zostały częściowo przesłonięte, w przegrzewaczu wody wyłączone z obiegu dwa dalsze rzędy rur żebrowych. Ponadto w leju popielnikowym pod drugim ciągiem na wylocie spalin do czopucha zamontowano blachę kierującą, powodującą wytrącenie się do leja grubszych frakcji unosu.

4. INSTALACJE POMOCNICZE

Przeprowadzona adaptacja kotła EKM-1,3 polegająca głównie na wprowadzeniu paleniska fluidalnego na miejsce paleniska rusztowego wymagała też opracowania zmian konstrukcyjnych w instalacjach pomocniczych:

- zasilania w paliwo i sorbent,
- podmuchu i wyciągu spalin,
- odpopielania,
- rozpalowej.

Wprowadzone zmiany umożliwiły rozpalenie paleniska fluidalnego oraz pracę ciągłą w przewidywanych zakresach temperatur przy zasilaniu paleniska miałem węglowym pozbawionym frakcji ponad 10 mm. Na rys.3 przedstawiono schemat badawczego kotła



Rys. 3. Schemat połączeń kotła CF-1, 3 z instalacjami pomocniczymi: 1-instalacja nawęglania, 2-zasobnik paliwa, 3-zasobnik sorbentu, 4-kocioł fluidalny, 5-przelew zioła, 6-wychwył unosu zgrubny, 7-cyklonowy odpylacz spalin, 8-wentylator wyciągowy, 9-wentylator podmuchowy, 10-instalacja rozpalowa, 11-układ podawania paliwa i sorbentu

z paleniskiem fluidalnym, połączonego z instalacjami pomocniczymi.

4.1. INSTALACJA ZASILANA W PALIWO I SORBENT SIARKI

Transport węgla do zasobnika przykotłowego kotła badawczego odbywa się za pomocą istniejących urządzeń nawęglania, podnośnika kubełkowego oraz przenośnika taśmowego. Podawany węgiel jest wstępnie na sicie oddzielony od grubszych frakcji i wtrąceń niepalnych powstałych w transporcie a mogących przerwać ciągłą pracę instalacji zasilania w paliwo. Z zasobnika przykotłowego węgiel podawany jest, poprzez dodatkowe urządzenie wychytujące większe kawałki węgla, do automatycznej wagi kubełkowej, skąd wsypywany jest do zasobnika o pojemności ok. $0,1 \text{ m}^3$. Z zasobnika tego pionowym przewodem wykonanym ze szkła organicznego z umieszczonym od dołu podajnikiem celkowym węgiel zsypuje się do komory mieszania strumienicy powietrznej.

Równolegle do drogi zasilania w węgiel przeprowadzony jest układ złożony z zasobnika i przewodu pionowego (wykonanego ze szkła organicznego) ograniczonego od dołu drugim podajnikiem celkowym i przewodu łączącego z komorą mieszania strumienicy.

Układ wykorzystywany jest do wprowadzenia do paleniska fluidalnego sorbentu siarki (kamień wapienny lub dolomit o odpowiedniej granulacji) lub materiału inertnego złoża, którym była mieszanina otrzymany z paleniska popiołu z piaskiem kwarcowym lub innym materiałem - np. stosowano w niektórych badaniach keramzyt o średnicy kuleczek do 3 mm. Napełnianie zasobnika drugiego układu zasilania odbywa się okresowo ręcznie. Połączenie strumieni węgla i sorbentu z materiałem inertnym następuje w komorze mieszania strumienicy, skąd transportowane są one pneumatycznie do złoża fluidalnego. Położenie punktu zasilania w paliwo było podczas badań zmieniane i wybrano najodpowiedniejsze - 100 mm powyżej rozdzielacza powietrza w symetrii paleniska. Wydajność węgla i

sorbentu z materiałem inertym regulowana jest odpowiednią prędkością obrotową podajników celkowych napędzanych silnikami prądu stałego z regulacją tyrystową.

Dodatkowo zastosowano zbiornik powyżej maksymalnej dopuszczalnej wysokości złoża z możliwością wykorzystania do grawitacyjnego zasilania w materiał inertym lub we frakcje węgla powyżej 10 mm. Nie przewidziano ciągłej regulacji tych strumieni. Droga ta wykorzystywana była do szybkiego zwiększenia objętości złoża fluidalnego podczas pracy kotła.

4.2. INSTALACJA PODMUCHOWA I WYCIĄGOWA

Jako źródło powietrza podmuchowego zastosowano wentylator typu WO-25/3,3 o wydajności w warunkach nominalnych $1,67 \text{ m}^3/\text{s}$ i sprężu 14,8 kPa, z ręczną regulacją wydajności za pomocą nastawialnych kierownic wstępnych na wlocie do wentylatora. Nad króćcem tłocznym umieszczono skrzynię powietrzną, z której wprowadzono dwa przewody:

- przewód głównego powietrza podmuchowego, połączony z lejem popielnikowym pod komorą paleniskową z wmontowanym układem koncentrycznych kierownic jako dodatkowym elementem regulacji dławieniowej strumienia;
- przewód do pneumatycznego transportu węgla i sorbentu z materiałem inertym, połączony ze strumienicą z regulacją strumienia za pomocą uchylnej klapy.

Jako instalację wyciągową spalin zastosowano nie zmieniony układ kotła EKM-1,3. Wydajność wentylatora wyciągowego bez żadnych zmian pozwoliła na pracę kotła z podciśnieniem nad złożem fluidalnym rzędu 20 Pa do wydajności cieplnej paleniska ok. 1,8 MW, a po zastosowaniu silnika elektrycznego o większej mocy i większych obrotach uzyskiwano pracę z podciśnieniem do maksymalnej mocy cieplnej paleniska. Wyeliminowano przewidywaną przy maksymalnych obciążeniach pracę z niewielkim nadciśnieniem, co wymagało odpowiedniego uszczelnienia wiazów i wzierników w kotle.

4.3. INSTALACJA ODPOPIELANIA

Odprowadzenie popiołu ze złoża fluidalnego odbywa się za pomocą rury przelewowej. Wlot w złożu umieszczony jest na poziomie rozdzielacza powietrza. Rura przelewowa przechodzi do dołu przez komorę powietrzną pod rozdzielaczem powietrza a następnie przechodzi przez dolne zamknięcie obok wlotu powietrza. Dolne zamknięcie rury w kształcie stożka stanowi mechanizm regulacyjny ilości odprowadzonego materiału złoża.

Wychwycenie unosu ze spalin następuje w dwu miejscach:

- grubsze frakcje w tylnym leju popielnikowym,
- pozostałość w baterii cyklonów przed wentylatorem wyciągowym.

Recykulacja materiału złoża oraz wychwyconego unosu do paleniska odbywa się okresowo i wykorzystywano instalację do zasilania sorbentu siarki z ręcznym napełnianiem zbiornika.

4.4. INSTALACJA ROZPAŁOWA

Do rozpalania kotła z paleniskiem fluidalnym zastosowano palniki zasilane gazem ziemnym pobieranym z sieci miejskiej. Rozmieszczenie i ilość palników jak i samą konstrukcję zmieniano podczas badań i ostatecznie przyjęto jako najlepsze rozwiązanie zastosowanie jednego palnika umieszczonego w komorze powietrznej pod rozdzielaczem powietrza. Zastosowano palnik kinetyczny ze stabilizatorem stożkowym, w którym zapłon inicjowany jest iskrą elektryczną z układu elektronicznego. Powietrze do spalania pobierano z osobnego wentylatora. Strumienie gazu i powietrza regulowano ręcznie przez zawory regulacyjne zainstalowane na przewodach doprowadzających. Moc cieplna instalacji rozpałowej wynosi ok. 200 kW.

5. UKŁAD POMIAROWY

Niezależnie od wykorzystania ruchowej aparatury kontrolno-pomiarowej kotła BKM-1,3, mierzącej strumienie masy, ciśnie-

nia i temperatury czynnika roboczego w układzie wodno-parowym kotła oraz ciśnienia i temperatury spalin, obszar paleniska fluidalnego został bogato oprzyrządowany w aparaturę pomiarową (stosownie do jego badawczego przeznaczenia).

Mierzone były następujące wielkości:

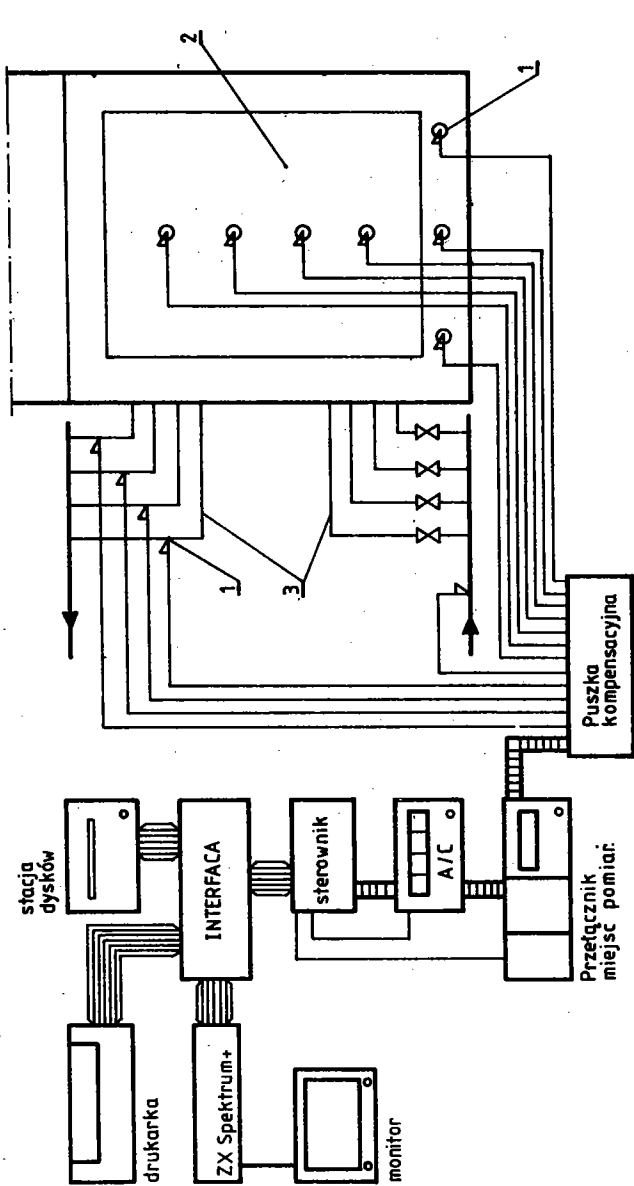
- temperatura złoża fluidalnego w różnych jego punktach oraz powietrza podmuchowego i wody chłodzącej za pomocą termoelementów i dodatkowo termometrami rtęciowymi;
- ciśnienie powietrza, spalin i rozkład ciśnienia w złożu fluidalnym za pomocą manometrów cieczowych;
- strumienie masy paliwa, sorbentu, powietrza i wody chłodzącej za pomocą wag, anometrów, rotametrów, kryz oraz dysz pomiarowych;
- skład chemiczny spalin używając analizatorów CO_2 , CO , O_2 , SO_2 .

Ponadto wykonywano cykliczne analizy składu chemicznego paliwa, sorbentu, odbieranego unosu w drugim ciągu i cyklonach oraz popiołu odbieranego bezpośrednio ze złoża.

Oprócz pomiarów tych wielkości prowadzono obserwację wizualną procesów zachodzących w złożu fluidalnym podczas pracy kotła. Do tego celu w przepustach zainstalowano wzierniki ze szkła kwarcowego. Przeprowadzono też obserwację procesu fluidyzacji na zimno, zamykając okno w przedniej ścianie kotła płytą ze szkła organicznego po podniesieniu uchylnej klapy i odpowiednio oświetlając wnętrze komory paleniskowej kotła.

Zbieranie wyników pomiarów temperatury z obszaru złoża fluidalnego oraz z wymiennika zanurzonego w nim zostało, w końcowej fazie przeprowadzonych dotychczas badań, przeprowadzane w układzie pomiarowym z minikomputerem. Układ taki umożliwiał ciągłą rejestrację wartości temperatur i ich dalsze przetwarzanie. Wyeliminowano stosowane wstępnie termoelementy przemysłowe o dużej bezwładności cieplnej, zastępując je termoelementami płaszczowymi lub wykonywanymi z cienkich drutów termoparowych.

Schemat instalacji z rozmieszczeniem punktów pomiarowych przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Schemat instalacji do automatycznego zbierania wyników pomiarów; 1-termo-
elementy, 2-palenisko fluidalne, 3-wymiennik zanurzony w złożu

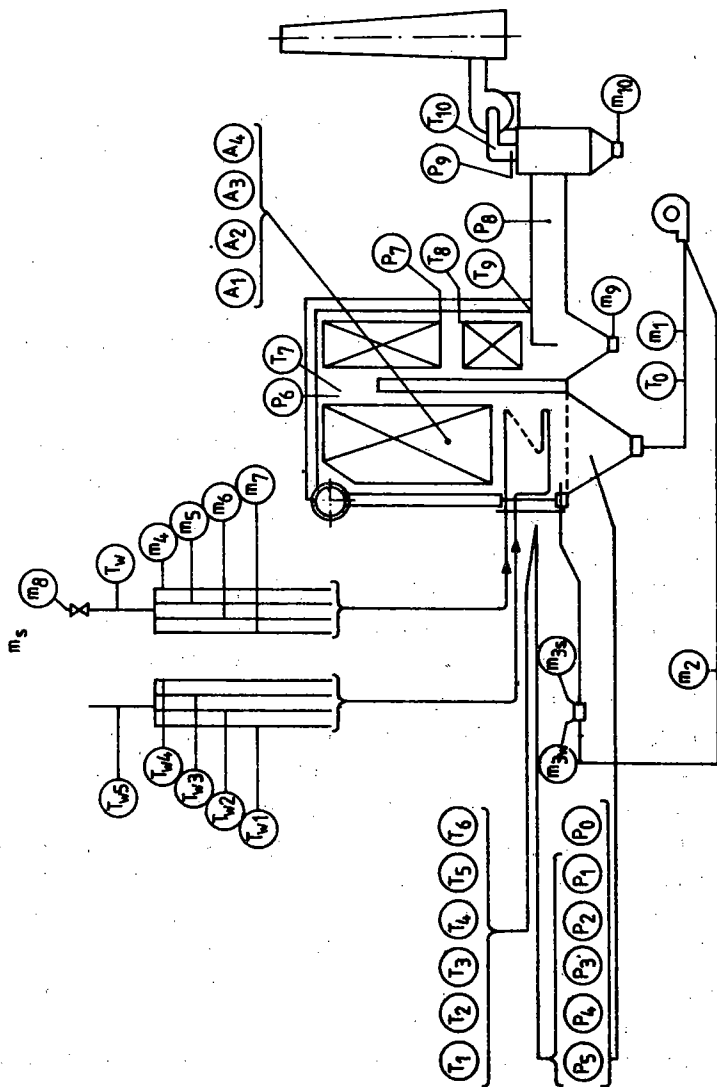
W skład systemu pomiaru temperatur wchodzi następujące elementy:

- przełącznik miejsc pomiarowych (maks. 40 pkt),
- przetwornik analogowo-cyfrowy o zmiennych zakresach pomiarowych w zależności od punktu pomiarowego umożliwiające odczyt temperatur z dokładnością $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$,
- sterownik - urządzenie wykonane specjalnie do współpracy z minikomputerem "ZX Spectrum +" służące do przesyłania danych pomiarowych oraz sterowania pracą urządzeń pomocniczych,
- minikomputer "ZX Spectrum +" z urządzeniami peryferyjnymi (drukarka, stacja dysków elastycznych, monitor).

Praca układu zbierania automatycznego pomiarów temperatur była realizowana pod nadzorem programu napisanego w języku Basic na stosowany minikomputer przy współpracy z prowadzącym badania.

Program realizował następujące zadania:

- sterowanie przełącznikiem miejsc pomiarowych oraz przetwornikiem ADC; istnieje programowa możliwość zbierania pomiarów w odstępach czasowych dowolnie większych od 0,2 sekundy z możliwością wyboru punktów;
- przetwarzanie poszczególnych otrzymywanych sygnałów cyfrowych zgodnie z charakterystykami poszczególnych termoelementów na cyfrowe wartości w $^{\circ}\text{C}$ z uwzględnieniem aktualnej temperatury zimnych końców;
- zbieranie wyników w postaci bloków o pojemności do 24 kB w odpowiedniej kolejności z rejestracją czasów zegarowych wykonywania poszczególnych pętli pomiarowych;
- przesyłania bloków z wynikami w postaci binarnej jako swoich podprogramów na dyski elastyczne, co umożliwia dokonywanie pomiarów w sposób ciągły przez dowolny okres czasowy przy wymianie zapełnionych dyskietek;
- wyświetlanie wartości aktualnie dokonywanych pomiarów na monitorze wraz z czasem zegarowym od pierwszego pomiaru;
- wyświetlanie na monitorze przebiegów temperatur w $^{\circ}\text{C}$ dla dowolnego wybranego punktu pomiarowego w funkcji czasu rzeczywistego w postaci tabeli lub wykresu;
- drukowanie przebiegów temperatur w $^{\circ}\text{C}$ dla dowolnie wybranego punktu pomiarowego z zarejestrowanego bloku w funkcji



Rys. 5. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na kotle OF-1, β ; T-pomiary temperatury, P-pomiary ciśnienia, m-pomiary wydatków, A-analiza spalin

czasu rzeczywistego w postaci tabeli lub wykresu po przeprowadzonych badaniach;

- współpraca z programami nadrzędnymi jako blok danych pomiarowych.

Zastosowanie odpowiednich przetworników ciśnień i obrotów umożliwi dokonywanie automatyczne pomiarów strumieni mocy poszczególnych czynników zasilających kocioł, co jest przewidywane podczas dalszych prac badawczych.

6. PROGRAM BADAŃ

Ramowy program badań, opracowany przed rozpoczęciem prób, za główny cel stawiał uzyskanie danych eksploatacyjnych w szerszym zakresie zmian parametrów pracy paleniska w warunkach ustalonych i nieustalonych obciążeń cieplnych, oraz ocenę rozwiązań projektowokonstrukcyjnych poszczególnych zespołów kotła oraz układów i instalacji pomocniczych z pełnym wykorzystaniem technicznej skali badanego obiektu. W rezultacie uzyskano również dane pozwalające na weryfikację opracowanych równolegle z badaniami modeli matematycznych zarówno statyki kotła do wyznaczania podstawowych charakterystyk pracy, jak i dynamiki do określania metod regulacji i sterowania.

Za ważne dla warunków eksploatacji uznano również badania procesu odsiarczania spalin w palenisku fluidalnym w stanach równowagi cieplnej kotła, oraz analizę procesu rozruchu obejmującego wszystkie stany paleniska fluidalnego w okresie od rozpoczęcia nagrzewania złoża do osiągnięcia eksploatacyjnych parametrów pracy: temperatury złoża i współczynnika nadmiaru powietrza.

7. OMÓWIENIE WARUNKÓW I WYNIKÓW BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Zgodnie z celem badań eksperymentalnych, jako podstawy do uzyskania danych eksploatacyjnych kotła w szerokim zakresie

zmian parametrów pracy paleniska w warunkach ustalonych i nieustalonych obciążeń cieplnych, warunki przeprowadzonych badań musiały odpowiadać warunkom przyjętym za racjonalne z punktu widzenia eksploatacji kotłów z paleniskami fluidalnymi:

- temperatura złoża fluidalnego $750 \pm 900^{\circ}\text{C}$
- maksymalna sprawność cieplna paleniska,
- współczynnik nadmiaru powietrza $1,15 \pm 1,25$,
- stosunek ciepła przyjętego przez wymiennik zanurzony w złożu do ciepła spalin opuszczających złożo $Q_w/Q_{sp} \geq 1$.

Cele i metodyka badań zostały zdeterminowane zbliżoną do technicznej skalą obiektu badawczego.

7.1. BADANIA PROCESU ROZRUCHU KOTŁA OF-1,3

Opisany proces rozruchu kotła z paleniskiem fluidalnym ogranicza się do rozruchu samego paleniska jako niekonwencjonalnego elementu kotła, pomijając przebieg zmian parametrów w układzie wodno-parowym, których charakter nie różni się w sposób istotny od charakteru zmian w kotłach z paleniskami konwencjonalnymi.

Proces rozruchu obejmuje wszystkie stany paleniska fluidalnego w okresie od rozpoczęcia nagrzewania złoża do osiągnięcia eksploatacyjnych parametrów pracy:

- temperatury złoża,
- współczynnika nadmiaru powietrza.

Na proces rozruchu paleniska fluidalnego składają się dwie podstawowe fazy:

- faza nagrzewania materiału złoża,
- faza rozpalania.

Faza nagrzewania ma na celu doprowadzenie materiału złoża do średniej temperatury umożliwiającej zapłon inicjujący ciągłe spalanie podanego na początku fazy drugiej paliwa. Temperatura ta, ze względu na efekt wychłodzenia złoża powietrzem podawanym do spalania, powinna być o ok. 100 K wyższa od temperatury zapłonu paliwa i wynosić od ok. 450°C dla krajowych węgla energetycznych o dużej zawartości części lotnych do ok. 700°C dla karbonizatów.

Nagrzewanie prowadzić można przy dwu stanach materiału złoża:

- sfluidyzowanym,
- nieruchomym,

dla różnych wysokości złoża.

Sposób nagrzewania uzależniony jest od mocy cieplnej układu rozpałowego. Nagrzewanie złoża sfluidyzowanego wymaga palników rozpałowych o dużej mocy, które oprócz nagrzewania materiału złoża, muszą podgrzewać do odpowiednio wysokiej temperatury powietrze w ilości odpowiadającej co najmniej granicznej prędkości fluidyzacji. Ocenia się, że wymagana w tym przypadku moc instalacji rozpałowej powinna wynosić ok. 40% mocy znamionowej paleniska. Z tego względu ten sposób nagrzewania złoża nie wydaje się uzasadniony.

Nagrzewanie* złoża nieruchomego prowadzić można przy znacznie mniejszej mocy instalacji rozpałowej. Czas nagrzewania zależy wtedy od następujących czynników:

- mocy cieplnej palników rozpałowych,
- sposobu ich usytuowania w palenisku,
- grubości nagrzewanej warstwy.

Zależność czasu nagrzewania od mocy palników i grubości warstwy jest oczywista. W praktyce możliwe są trzy sposoby usytuowania palników rozpałowych:

- poziomo z wylotem skierowanym do obszaru złoża,
- ukośnie z wylotem ponad powierzchnię złoża,
- pod rozdzielaczem powietrza.

Sposoby te zostały przebadane w palenisku kotła OF-1,3. Użyte wyniki wykazują zdecydowaną przewagę nagrzewania przez rozdzielacz powietrza nad pozostałymi sposobami. Przy nagrzewaniu poziomym struga wypływających z palnika spalin złożyła kanał w materiale złoża, nagrzewanie następowało przez przewodzenie ciepła, mało efektywne w materiale syplikim. Znaczny rozrzut temperatur w materiale złoża powodował częste powstawanie spieków w fazie rozpalania, czemu zapobiegano przez wstępne fluidalne przemieszczanie materiału powietrzem, co jednak obniżało temperaturę złoża i wydłużało czas nagrzewania. Palnik usytuowany ukośnie i nagrzewający złożę od góry powodował ślizganie się strumienia spalin po powierzchni zło-

za, co pogarszało efektywność wymiany ciepła i wydłużało czas nagrzewania, nie likwidując zjawiska spiekania się materiału złoża. Przy małej mocy palnika rozpałowego ok. 200 kW nie zdołano tym sposobem nagrzać złoża do temperatury zapewniającej zapłon i samoczynne podtrzymywanie procesu spalania. Palnik ten, 8% mocy znamionowej paleniska, dający strumień cieplny w przekroju poprzecznym paleniska 175 kW/m^2 , zainstalowany pod rozdzielaczem powietrza nagrzewał warstwę o grubości 100 mm do temperatury średniej 500°C w czasie ok. 25 min, zaś zainstalowany poziomo nad rozdzielaczem - w ok. 60 min. Z powyższych danych wynika, iż najbardziej racjonalnym sposobem nagrzewania złoża jest przepuszczanie medium grzejnego przez rozdzielacz powietrza. Skracca to czas nagrzewania i zapewnia równomierny rozkład temperatury w przekroju poprzecznym złoża. Sposób ten wymaga jednak wykonania rozdzielacza powietrza z materiału odpornego na wysokie temperatury lub, odpowiedniego jego chłodzenia.

Druga faza procesu rozruchu paleniska fluidalnego - faza rozpalania - rozpoczyna się z chwilą podania paliwa do paleniska. Doświadczenia uzyskane w trakcie badań kotła OF-1,3 wskazują, że dla uniknięcia gwałtownego wychładzania złoża strumień powietrza fluidyzującego powinien być podany do złoża po upływie ok. 30 s od momentu rozpoczęcia podawania paliwa.

Osiągnięcie eksploatacyjnej wartości współczynnika nadmiaru powietrza związane jest z koniecznością zwiększenia wysokości złoża fluidalnego aż do osiągnięcia odpowiedniego kontaktu z powierzchnią wymiennika, zapewniającego stan równowagi cieplnej paleniska. Przyrost masy materiału złoża osiągnąć można przez zewnętrzne zasilanie materiałem inertym lub przez narastanie masy popiołu ze spalanego paliwa, którego szybkość zależy od zawartości popiołu w paliwie, składu ziarnowego paliwa oraz obciążenia cieplnego paleniska i związanej z nim prędkości fluidyzacji. Z badań eksperymentalnych przeprowadzonych na kotle OF-1,3 wynika, że dla konkretnego paliwa (przy utrzymywaniu określonej temperatury złoża) przyrost masy popiołu możliwy jest jedynie w określonym zakresie obciążeń

cieplnych oraz istnieje obciążenie optymalne, przy którym szybkość przyrostu masy złoża osiąga maksimum.

Z przedstawionych rozważań wynika, że dla zapewnienia prawidłowego rozruchu paleniska fluidalnego konieczne jest uwzględnienie zależności między wszystkimi jego parametrami.

7.2. BADANIA KOTŁA OF-1,3 W STANACH USTALONYCH

Badania te przeprowadzono w stanach równowagi cieplnej, za którą uznano stan niezmienności w czasie następujących parametrów:

- strumienia masy paliwa;
- współczynnika nadmiaru powietrza, określanego na podstawie wskazań analizatorów spalin (O_2, CO_2, CO);
- temperatury złoża.

Łączna czas badań wyniósł ok. 270 h a poszczególne próby prowadzono przy różnych wartościach następujących parametrów pracy paleniska:

- mocy cieplnej i związanych z nią prędkościach fluidyzacji,
- wysokości złoża fluidalnego,
- współczynnika nadmiaru powietrza,
- temperatury spalania,
- rodzaju i, ziarnistości paliwa.

Badania obejmowały również proces wiązania siarki w złożu fluidalnym. Moc cieplna paleniska zmieniała się w granicach $0,65 \pm 2,6$ MWt, strumień paliwa $100 \div 500$ kg/h, prędkość fluidyzacji $0,7 \div 3$ m/s, wysokość złoża $300 \div 900$ mm. Jako początkowy materiał złoża stosowano najpierw kamień wapienny o ziarnistości $0 \div 3$ mm, później kruszywo budowlane-keramzyt $0 \div 5$ mm.

Na wstępie przeprowadzono badania układu zasilania paleniska w paliwo i sorbent jako podstawowego elementu zapewniającego prawidłową eksploatację kotła. Przyjęty w kotle OF-1,3 pneumatyczny układ zasilania w początkowym okresie badań wykazywał dużą zawodność działania. Ustalono, że jej podstawową przyczyną była nadmierna wilgotność węgla, powodująca zawieszanie się oblepianie paliwa we wszystkich elementach układu, szczególnie w strumienicy systemu pneumotransportu. Badania

wykazały, że dla prawidłowej pracy pneumatycznego układu zasilania kotła fluidalnego konieczne jest pozbawienie węgla wilgoci przemijającej, a więc konieczny jest zabieg wstępnego suszenia. Podczas badań sposobu doprowadzania mieszaniny paliwowo-powietrznej do paleniska fluidalnego ustalono, że zasilanie od dołu przez rozdzielacz powietrza, bez stosowania urządzeń kierujących na boki, pionowo wypływającą strugę, prowadzi do przebicia warstwy fluidalnej o wysokości mniejszej od 500-600 mm powodując wzrost straty unosu. Dla warstwy o większej wysokości ten sposób zasilania był odpowiedni. Właściwe zasilanie paleniska we wszystkich warunkach jego pracy uzyskano przy poziomym skierowaniu strugi paliwowo-powietrznej przez ścianę komory paleniskowej do przestrzeni pomiędzy rozdzielaczem powietrza a dolnym rzędem rur wymiennika.

Oprócz zasilania pneumatycznego badano również zasilanie grawitacyjne z podawaniem paliwa na powierzchnię warstwy fluidalnej. Zasilanie takie przy węglu o dużej zawartości frakcji drobnych, powodowało wzrost straty unosu. Sposób ten okazał się odpowiedni dla zasilania paleniska przesianymi, grubymi frakcjami. Badano również hybrydowy układ zasilania: drobne frakcje podawane były do dolnej strefy złoża transportem pneumatycznym, frakcje grube grawitacyjne - nad złożo. Układ ten wykazał szczególne zalety przy dynamicznych wzrostach obciążenia cieplnego paleniska fluidalnego.

7.2.1. Określenie granicznych parametrów pracy paleniska fluidalnego

Dla określenia zakresu zmienności parametrów pracy paleniska fluidalnego konieczne było wyznaczenie parametrów granicznych, zapewniających bezawaryjne działanie urządzenia. Za stany awaryjne uznano:

- niestabilne spalanie w złożu fluidalnym, połączone z nierównomiernym rozkładem temperatur w obszarze złoża, w skrajnym przypadku zgaśnięcie złoża;
- aglomerację (spiekanie) materiału złoża.

Ustalono, że podstawowym parametrem pracy paleniska, determinującym powyższe stany, jest temperatura złoża. Parame-

trem dodatkowym, oddziałującym pośrednio, jest nadmiar powietrza biorącego udział w procesie spalania.

Badania dolnej granicznej temperatury pracy paleniska fluidalnego nie wykazały jej zależności od nadmiaru powietrza. Stabilne spalanie z wyrównanym rozkładem temperatur w obszarze złoża uzyskano przy temperaturze rzędu 600°C . Poniżej tego poziomu pojawiły się nierównomierności w rozkładzie temperatur w przekroju poziomym złoża, które jednak do temperatury ok. 400°C nie wykazywało tendencji do zgaśnięcia. Górna graniczna temperatura pracy złoża zależna jest od charakterystyki temperaturowej popiołu spalanego paliwa i związana jest z nadmiarem powietrza. Przekroczenie tej temperatury powoduje spiekanie się materiału złoża. Badania wykazały, że przy różnicy pomiędzy temperaturą początku mięknięcia popiołu a temperaturą złoża wynoszącą $50-70\text{ K}$, bez względu na stosowany nadmiar powietrza, występuje spiekanie złoża. Przy większych różnicach tych temperatur intensywność procesu spiekania zależna jest od nadmiaru powietrza, którego większe wartości wpływają na proces hamująco. Stwierdzono, że przy współczynniku nadmiaru powietrza $1,2$ bezpieczna różnica między temperaturą złoża i początku mięknięcia popiołu powinna wynosić ok. 120 K .

7.2.2. Wpływ parametrów eksploatacyjnych paleniska fluidalnego na jego bilans cieplny i masowy.

Podstawowymi parametrami eksploatacyjnymi mającymi decydujący wpływ na bilans cieplny i masowy paleniska fluidalnego są:

- skład ziarnowy paliwa,
- prędkość fluidyzacji, będąca odpowiednikiem obciążenia cieplnego paleniska (przy zachowaniu stałego współczynnika nadmiaru powietrza).

Determinują one ilość unoszonego ze złoża paliwa oraz materiału inertnego. Unos masy palnej będący głównym źródłem straty niecałkowitego spalania, ma istotny wpływ na bilans cieplny paleniska fluidalnego, nie oddziałuje jednak bezpośrednio na sam sposób eksploatacji paleniska. Ilość unoszonego materiału złoża decyduje o sposobie eksploataowania paleniska:

- przy niskich wartościach unosu następuje przyrost masy materiału złoża, którym jest popiół powstały przy spalaniu węgla, a więc konieczne jest jego odprowadzenie przewodem przelewowym;
- przy wysokich wartościach unosu ubytek materiału złoża stwarza konieczność jego uzupełniania.

Eksploatacja kotła doświadczalnego OF-1,3, zasilanego węglem pobieranym ze składowiska elektrowni i przesianym do granulacji 0÷10 mm, w którym średnia zawartość frakcji 0÷1 mm wynosiła 50-60% wykazała, że graniczna prędkość fluidyzacji, przy której obserwowano przyrost materiału złoża, wynosiła ok. 1,5 m/s. Przy prędkościach wyższych konieczne było stałe uzupełnianie materiału złoża. Przewidując, iż paliwo o tym składzie ziarnowym będzie w polskich warunkach typowe dla palenisk fluidalnych, należy powyższy fakt uwzględnić przy doborze parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych przyszłych kotłów z paleniskami fluidalnymi.

7.2.3. Weryfikacja współczynników wnikania ciepła

Uzyskane w trakcie badań kotła OF-1,3 wyniki potwierdzają wartości współczynników wnikania ciepła od złoża do powierzchni wymiennika rurowego zamieszczone w literaturze. Ze względu na sposób ich wyznaczania, pozwalający na otrzymanie wartości średnich z segmentu wymiennika obejmującego pewien obszar złoża fluidalnego, uzyskany rozrzut wartości jest znacznie mniejszy niż w przypadku badań pojedynczych rur wprowadzonych do złoża.

Badania zależności współczynnika wnikania ciepła od prędkości fluidyzacji potwierdziły znany jej charakter dla złożeń polidispersyjnych. Dla prędkości bliskich granicznych fluidyzacji obserwuje się wyraźny wpływ prędkości fluidyzacji na współczynnik wnikania ciepła; przy wyższych prędkościach zależność jest płaska. Przy temperaturze złoża 840°C w zakresie prędkości fluidyzacji 0,8-1,2 m/s uzyskano średnie wartości współczynnika wnikania ciepła w przedziale 210-320 W/m²K w środkowej strefie złoża. Odpowiednie wartości były niższe w górnych warstwach złoża fluidalnego.

Badania wpływu temperatury złoża na wartość współczynnika wnikania ciepła wykazały wzrost tych wartości ze wzrostem temperatury. W zakresie temperatur złoża 700-900°C uzyskano średni przyrost współczynnika wnikania ciepła $\Delta\alpha/\Delta t_f = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}^2$.

7.3. BADANIA KOTŁA OF-1,3 W STANACH NIEUSTALONYCH

Badania doświadczalnego kotła fluidalnego OF-1,3 w stanach nieustalonych miały na celu wyznaczenie charakterystyk dynamicznych paleniska fluidalnego jako obiektu sterowania przy zastosowaniu dwu podstawowych sposobów regulacji wydajności cieplnej:

- zmiany temperatury złoża fluidalnego,
- zmiany wysokości warstwy (zmiany powierzchni wymiany ciepła).

Zakres regulacji wydajności cieplnej przez zmianę temperatury złoża fluidalnego zależy jest od średniej temperatury czynnika odbierającego ciepło. Przy zmianach temperatury złoża w granicach 750°C-900°C dla średniej temperatury czynnika chłodzącego 50°C uzyskano zmianę obciążenia cieplnego (przy stałej wysokości warstwy) o ok. 18%. Dla temperatury chłodzenia 450°C wartość ta wynosiła odpowiednio ok. 47%.

Charakterystyki dynamiczne kotła OF-1,3 przy regulacji obciążenia zmianą temperatury złoża wyznaczono przez skokową zmianę ilości paliwa podawanego do paleniska. Przebiegi czasowe zmian temperatury złoża wykazały zależność od kierunku i wielkości zmiany obciążenia oraz składu granulometrycznego paliwa. Przy skokowym zmniejszeniu strumienia paliwa o 25 i 40% uzyskano średnie wartości szybkości zmian temperatury odpowiednio 1,15 i 1,5 K/s oraz wartości maksymalne 1,83 i 2,15 K/s, przy czym zmiana temperatury następowała praktycznie bez opóźnienia czasowego, a wpływ ziarnistości paliwa był pomijalnie mały.

Przy zwiększeniu strumienia paliwa obserwowano opóźnienie w reakcji temperaturowej paleniska i początkowy spadek temperatury tym większy, im wyższa była zawartość frakcji drobnych w paliwie. Wzrost temperatury złoża następował po upływie ok. 60 s dla zmiany strumienia paliwa o 25% oraz po ok. 90 s dla

zmiany 40%. Średnie szybkości zmian temperatury wynosiły odpowiednio 0,67 oraz 0,83 K/s, maksymalne 2,0 i 2,3 K/s.

Charakterystyka dynamiczna paleniska fluidalnego przy regulacji obciążenia cieplnego przez zmianę wysokości warstwy zależy od możliwości technicznych zmiany masy złoża. W badanym kotle fluidalnym OF-1,3 średnica wewnętrzna przewodu przelewowego wynosiła 70 mm, zaś stosunek przekroju przelewu do przekroju paleniska - 0,00335. Przy takich parametrach konstrukcyjnych uzyskano szybkość zrzutu obciążenia w granicach 7,5-10 kW/s, przy czym reakcja paleniska na otwarcie przewodu przelewowego była natychmiastowa. Szybkość zwiększenia obciążenia zależna jest od (oprócz możliwości technicznych układu zasilania paleniska w materiał inertny) granulacji inerty i paliwa. Maksymalne szybkości wzrostu obciążenia uzyskane w palenisku kotła OF-1,3 zasilanym paliwem i inertem pozbawionymi frakcji 0-1 mm wynosiły 5-8,5 kW/s, przy czym opóźnienie narastania obciążenia od chwili zwiększenia strumienia paliwa wynosiło ok. 90 s. Zasilając palenisko paliwem i materiałem inertnym z dużą zawartością drobnych frakcji uzyskano znacznie niższe wartości szybkości narastania obciążenia, zaś w zależności od składu granulometrycznego materiału inertnego nie udawało się przekroczyć odpowiedniego poziomu obciążenia utrzymując stałą temperaturę spalania.

7.4. BADANIA PROCESU ODSIARCZANIA SPALIN

Badania procesu odsiarczania spalin prowadzone były w palenisku fluidalnym kotła OF-1,3 w stanach równowagi cieplnej przy zachowaniu 20% nadmiaru powietrza. W badaniach tych jako sorbent siarki stosowany był kamień wapienny o ziarnistości 0÷3 mm z kopalni Pisarzowice k. Kamiennej Góry, w którym udział masowy CaO wynosił 54,41%. Materiałem wyjściowym złoża był keramzyt. Zawartość siarki palnej w paliwie zmieniano przez dostarczenie do węgla granulatu siarki o czystości 99,99 i ziarnistości 0÷3 mm. Badania potwierdziły maksymalną efektywność procesu wiązania siarki w temperaturze ok. 850°C.

Maksymalny uzyskany stopień wiązania zbliżał się do 90% i występował przy stosunku molowym CA/S w granicach 2,5÷3 dla paliwa o zawartości siarki powyżej 2% (dla paliwa mniej zasiarzonego efektywność była nieco mniejsza). Uzyskany w trakcie badań udział masowy sorbentu w stosunku do 1 kg paliwa dla maksymalnej efektywności procesu wiązania siarki wyniósł:

- dla zawartości siarki w paliwie 1,25% ok. 0,11 kg;
- dla zawartości siarki 3% ok. 0,26 kg.

O wielkości te wzrasta masa popiołu odprowadzanego z paleniska.

8. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych kotła z paleniskiem fluidalnym stanowią obszerny materiał, który może być wykorzystany zarówno w procesie projektowania kotła tego typu jak i podczas ich eksploatacji. Szczególnie istotnym etapem badań była weryfikacja modeli matematycznych statyki i dynamiki paleniska. Modele te mogą stać się podstawą metodyki obliczeń palenisk fluidalnych oraz projektowania układów automatycznego sterowania procesami w kotłach fluidalnych.

Uzyskane w trakcie badań wyniki i doświadczenia mają istotne znaczenie dla kontynuacji prac w dziedzinie kotłów fluidalnych z paleniskami ciśnieniowymi, w których ITC uczestniczy w ramach CPER.

BIBLIOGRAFIA

1. Dobrzański W., Jurek K., Szwarz W.: Badanie i opracowanie podstaw obliczania i projektowania kotłów z paleniskami fluidalnymi. Opracowanie ITC PW, Warszawa 1981.
2. Dobrzański W., Jurek K., Szwarz W.: Badawczy kocioł z paleniskiem fluidalnym. GPiE nr 3, 1981 r.
3. Dobrzański W., Jurek K., Szwarz W.: Badanie procesów spalania wymiany ciepła i masy oraz zastosowanie nowych konstrukcji w kotłach z paleniskami fluidalnymi i konwencjonalnymi. Opracowania ITC PW, Warszawa 1982, 1983, 1984 r.
4. Dobrzański W., Jurek K., Szwarz W.: Investigations of the experimental fluidized bed boiler under variable load conditions. 4th Conference on Energetic Machine Building, Budapest 1983.

5. Dobrzański W., Szwarc W.: Rozruch kotłów z paleniskami fluidalnymi. TERMOFLUID 85, Częstochowa 1985 r.
6. Dobrzański W.: Badania eksploatacyjne doświadczalnego kotła fluidalnego OF-1,3. TERMOFLUID 85, Częstochowa 1985.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА
С КИПЯЩИМ СЛОЕМ OF-1,3**

А н н о т а ц и я

В работе приводится характеристика экспериментального парогенератора с кипящим слоем OF-1,3, построенного в лаборатории Теплоэнергетического института Варшавского Политехнического института. Дается описание и технические параметры основных и вспомогательных систем парогенератора. Приводится программа и результаты лабораторных испытаний. Работа содержит также обсуждение проектно-конструкционных решений отдельных узлов установки и вспомогательного оборудования.

**INVESTIGATIONS OF THE EXPERIMENTAL FLUIDIZED
BED BOILER OF-1,3**

S u m m a r y

The paper presents design and technical parameters of the experimental fluidized bed boiler OF-1,3 and its auxiliary instalations, located at the Institute of Heat Engineering at Warsaw Technical University. The programme, conditions and results of experimental investigations were described.