

Henryk KARCZ, Wiesław WOSIK, Zbigniew MODLIŃSKI

Politechnika Wrocławska

Jan BUTMANKIEWICZ

Elektrownia Opole

Edward SĘDZIEŁOWSKI

Elektrownia „Jaworzno III”

Władysław MATLAK

Ministerstwo Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa

GAZODYNAMICZNY PALNIK OLEJOWY Z WEWNĘTRZNYM MIESZANIEM DROGĄ DO OBNIŻENIA EMISJI SUBSTANCJI SZKODLIWYCH DO ATMOSFERY

Streszczenie. W czasie rozruchu kotła OP-650k ze stanu „zimnego” za pomocą niskociśnieniowych palników gazodynamicznych z wewnętrznym mieszaniem, przy ciśnieniu mazutu od 0,05 do 0,6 MPa i ciśnieniu pary wodnej od 0,5 do 1,0 MPa, uzyskano zmniejszenie zużycia mazutu od 20 do 40% oraz zmniejszenie tlenków azotu (NO_x) i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) w spalinach w stosunku do palników wysokociśnieniowych typu Babcocka.

GAS-DYNAMIC OIL BURNER WITH INSIDE MIXING AS A MEASURE TO REDUCE THE POLLUTANTS EMISSION

Summary. During the starting-up of the boiler OP 650k from the „cold” state by means of low-pressure gas-dynamic burners with inside mixing, the decrease of the mazout consumption of about 20 – 40% was obtained as well as the decrease of nitric oxide (NO_x) and multiring aromatic hydrocarbons (WWA) was observed in exhaust gases at the mazout pressure from 0,05 to 0,6 MPa and water vapor pressure of 0,5 to 1,0 MPa, when compared to the high-pressure burners of Babcock type.

GASODYNAMISCHER ÖLBRENNER MIT INNEREM MISCHEN ALS MAßNAHME ZUR SCHADSTOFFEMISSIONVERMINDERUNG

Zusammenfassung. Beim Anlauf des Kessels vom Typ OP-650k vom „kalten Zustand“ mit Hilfe der gasodynamischen Niederdruckbrenner mit innerem Mischen bei dem Masutdruck von 0,05 bis 0,6 MPa und Wasserdampfdruck von 0,5 bis 1,0 MPa wurde der verkleinerte Verbrauch von Masut (von 20 bis 40%), sowie die Herabsetzung der Stickoxide (NO_x) und der mehrkernigen Aromaten (WWA) festgestellt, im Verhältnis zu den Babcock-Hochdruckbrenner.

1. WSTĘP

Obecnie w elektrowniach krajowych tak zawodowych, jak i przemysłowych paliwa ciekłe stosowane są przede wszystkim do rozruchu kotłów, a po ich uruchomieniu do stabilizacji działania głównych palników pyłowych przy zmniejszonych obciążeniach. Jedyne liczące się w naszej energetyce paliwa ciekłe to mazut i oleje opałowe.

Spalanie paliw płynnych odbywa się za pomocą urządzeń zwanych palnikami olejowymi. W urządzeniach tych strumień oleju zanim zostanie spalony, musi być rozpylony. Krople rozpylonego oleju wprowadzone są do komory paleniskowej i gdy poruszają się jako zawiesina w strumieniu powietrza, odparowują, zamieniając się całkowicie w gaz węglowodorowy. Wytworzona w ten sposób mieszanina, gdy posiada odpowiednio wysoką temperaturę, ulega zapłonowi, powodując powstanie frontu płomienia. Jednakże przestrzeń między frontem płomienia a przekrojem wylotowym dyszy palnika powinna mieć taką formę geometryczną i posiadać takie warunki aerodynamiczne, aby panująca w niej temperatura była niższa od temperatury krakingu paliwa będącego zarówno w fazie ciekłej (nieodparowane krople), jak i w fazie gazowej. Jeżeli bowiem proces krakingu rozpocznie się w fazie płynnej, wówczas z paliwa wytrąca się węgiel w postaci koksu, a gdy przebiegać będzie w fazie gazowej, wówczas powstanie sadza. Liczba i wielkość cząstek sadzy emitowanych z płomienia jest tym wyższa, im gorsze jest rozpylanie; większa jest lepkość początkowa, wyższy jest stosunek C/H i więcej jest związków aromatycznych w oleju oraz im większy jest strumień spalanego paliwa.

Ponadto stwierdzono, że formowaniu się sadzy w płomieniu towarzyszą inne składniki węglowodorowe, a przede wszystkim wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) [1–4]. Niektóre z nich są wybitnie rakotwórcze (np. fluoren, piren, benzo(α)piren). Osadzone na sadzy wnikają głęboko w system respiracyjny organizmu żywego, stanowiąc dla niego największe zagrożenie [1].

Powstałe w płomieniu WWA kondensują na powierzchni cząstek sadzy i w przypadku niespalenia emitowane są do atmosfery. Obecnie zidentyfikowano już ponad 150 różnych węglowodorów w spalinach pochodzących ze spalania paliw płynnych [5]. Są one wynikiem niezupełnego i niecałkowitego spalania. Niezupełne, czyli częściowe utlenienie może być rezultatem przerwania łańcuchowej reakcji utleniania paliwa w wyniku „gaszącego” działania otaczającego ośrodka lub lokalnego braku tlenu.

Biorąc pod uwagę elementarny skład chemiczny ciężkich paliw ciekłych, z równań stechiometrycznych wynika, że przy dostatecznej ilości tlenu jedynymi produktami spalania tych paliw będzie para wodna i dwutlenek węgla. Niestaty, dobrze wiadomo, że w zwykłych warunkach eksploatacyjnych prowadzenie procesu spalania w całkowitej zgodności z równaniami stechiometrycznymi jest jedynie nieosiągalnym stanem idealnym. Co więcej, wiadomo również, że nawet zastosowanie dość obszernego zbioru równań równowagi chemicznej także nie daje możliwości dokładnego określenia składu spalin.

Trudności dokładnego określenia produktów spalania paliw węglowodorowych, w tym także ciężkich paliw ciekłych, biorą się głównie z ogromnej ilości wtórnych reakcji chemicznych, a także z występujących w procesach spalania stanów nierównowagowych. Z tego względu w rozważaniach nad zanieczyszczeniem środowiska przez produkty spalania paliw ciekłych przyjmuje się zwykle tylko kilka substancji, mianowicie:

- tlenki siarki,
- tlenki azotu,
- dwutlenek węgla,
- lekkie węglowodory,
- tlenek węgla,
- aldehydy,
- wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne.

Poza dwutlenkiem węgla, który wpływa jedynie na „efekt szklarniowy” naszej planety, wszystkie pozostałe substancje są groźnymi truciznami bądź nawet kancerogenami. W tablicy 1 przykładowo podano wartości emisji szkodliwych produktów spalania pochodzących z bloku energetycznego 1000 MW opalanego ciekłym paliwem ciężkim, takim jak np. mazut. W tablicy podano zarówno zanieczyszczenia w kilogramach na 1 t spalanego paliwa, jak i sumaryczną emisję roczną. Blok energetyczny (1000 MW) zużywa rocznie około 1,5 mln ton paliw ciekłych, a obecnie około 10% energii elektrycznej wytwarza się na świecie z tych właśnie paliw.

Niecałkowite natomiast spalanie odnosi się głównie do separacji dużych kropeł z zagwi płomienia do otaczającego ośrodka. W takiej sytuacji mówi się, że palnik zaczął „łać”. Na powierzchniach ogrzewalnych tworzą się trudno usuwalne naloty. Jakość rozpylania, którego miarą jest wielkość kropeł, ich rozkład i koncentracja w strumieniu gazu, jest tak ważnym parametrem dla

procesu spalania, ponieważ w głównej mierze decyduje o szybkości odparowania i tworzenia się gazu palnego. Krople paliwa winny więc być jak najmniejsze, o zbliżonej do siebie wielkości, a rozkład i koncentracja ich w strumieniu powinna być w miarę jednorodna. W przypadku bowiem gdy krople nie są jednakowe i gęstość ich rozkładu w strumieniu nie jest również jednakowa, zachwiany zostaje proces powstawania gazu palnego i mieszania go z tlenem. W praktyce oznacza to, że występuje koagulacja kropeł i że większe krople osiagają strefę frontu płomienia przed zakończeniem procesu odparowania i że są separowane z płomienia oraz że występuje nierównomierna koncentracja gazu palnego, a więc i nierównomierne jego wymieszanie z powietrzem, co w konsekwencji prowadzi do niezupełnego spalania.

Tablica 1

Emisja zanieczyszczeń z bloku 1000 MW opalanego ciężkim paliwem ciekłym [1]

Rodzaj zanieczyszczenia	Emisja zanieczyszczeń	
	w kg na 1 tonę spalanego paliwa	w tonach w ciągu roku
Tlenki siarki	31,400	52618
Tlenki azotu	13,000	21682
Cząstki stałe (sadza)	0,440	726
Węglowodory	0,400	667
Aldehydy	0,070	117
Tlenek węgla	0,005	8,3

Opierając się na własnych doświadczeniach i danych literaturowych można stwierdzić, że nawet przy zachowaniu wszelkich wymogów technicznych i eksploatacyjnych proces spalania ciężkich paliw płynnych (mazut, gudron) w kotłach parowych, szczególnie w tak ekstremalnych sytuacjach, jakimi są uruchomienie kotła z tzw. stanu „zimnego”, przebiega ze sprawnością nie większą niż 80%.

Potrzebą chwili stało się więc poszukiwanie takiego sposobu przygotowania paliwa do rozpylania, sposobu rozpylania oraz spalania powstałej mieszaniny dwufazowej (paliwo płynne + gaz węglowodorowy), aby skonstruowany palnik miał charakter urządzenia uniwersalnego (szeroki zakres regulacji wydatku paliwa), zapewniającego stabilny i szybki zapłon w warunkach ekstremalnych (zimna komora), pewnego w eksploatacji, zapewniającego całkowite i zupełne spalanie (bez emisji szkodliwych substancji węglowodorowo-sadzowych) oraz eliminującego bariery techniczne i eksploatacyjne przy zwiększeniu (zmianie modułu) wielkości urządzenia palnikowego.

2. TEORETYCZNO-DOŚWIADCZALNE KIERUNKI BADAŃ NAD SPALANIEM PALIW PŁYNNYCH W PALNIKACH OLEJOWYCH

Literatura światowa bogata jest w teoretyczne i doświadczalne studia na temat spalania pojedynczych kropeł jednoskładnikowych paliw ciekłych [2–8]. Badania nad spalaniem paliw ciekłych w formie rozpylonej strugi kropeł, czyli w postaci występującej w palnikach olejowych, rozpoczęto stosunkowo niedawno i wydaje się, że droga do zadowalającego poznania kompleksu zjawisk fizykochemicznych występujących w spalaniu strugi kropeł jest jeszcze bardzo daleka. Pomimo że większość przeprowadzonych w tej mierze badań ma charakter wybitnie eksperymentalny, czynione są próby teoretycznych analiz, sporządzanie fizykochemicznych modeli procesu, matematycznego ich opisanie oraz ich weryfikacji za pomocą odpowiednio zaplanowanych eksperymentów doświadczalnych.

Zasadniczym zjawiskiem, na które nakłada się proces spalania, jest proces rozpylania. Proces rozpylania ma fundamentalne znaczenie i stanowi „o takiej a nie innej” jakości spalania. Technika rozpylania paliw płynnych i zjawiska fizykochemiczne towarzyszące temu procesowi opisane są w wielu monografiach [9]. Badania nad rozpylaniem koncentrują się na wyjaśnieniu wpływu sposobu rozpylania, geometrii dyszy, własności fizykochemicznych parametrów cieczy i parametrów otoczenia na wielkość i rozkład kropeł.

Na proces rozpylania nakładają się procesy parowania, wymiany ciepła, wymiany masy i pędu oraz reakcje chemiczne. Wszystkie te zjawiska uzależnione są od wielu czynników, z których najistotniejsze to:

- rozkład średnic kropeł,
- gęstość kropeł,
- względna gęstość kropeł,
- ciepło parowania paliwa,
- temperatura i skład chemiczny ośrodka gazowego.

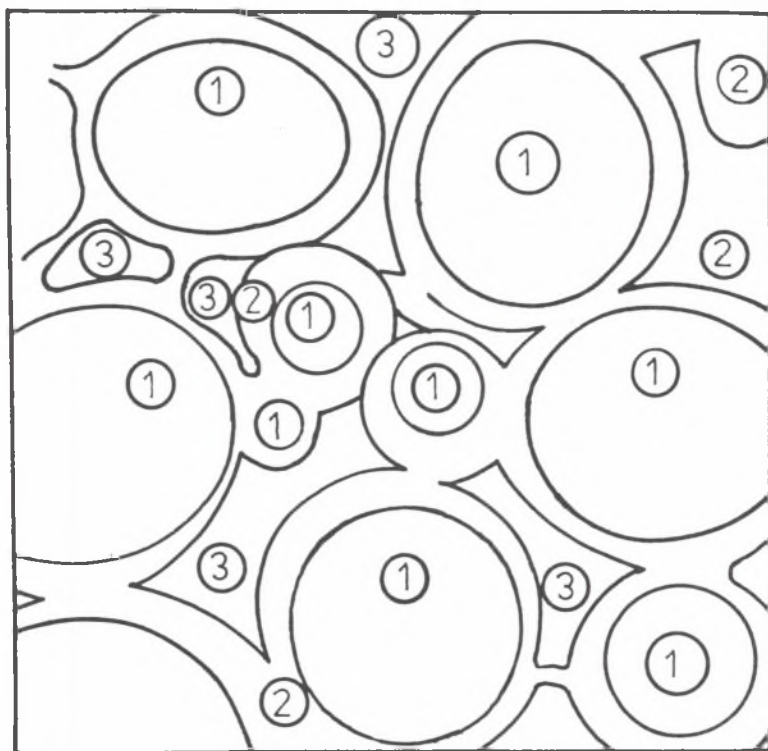
Prowadzone prace eksperymentalne mają dwojaki podział:

- badania klasycznych płomieni olejowych,
- badania charakterystycznych parametrów spalania w obszarze wypełnionym mieszaniną rozpylonego paliwa i powietrza.

Podany podział nie jest oczywiście ścisły, gdyż spalanie rozpylonych strug może być realizowane w bardzo różnorodnych okolicznościach. Odpowiada on jednak ogólnie przyjętemu w teorii spalania podziałowi na płomień dyfuzyjny i kinetyczny.

Dla gęsto rozpylonych strug, gdy krople prawie się ze sobą stykają, obserwuje się wyraźne oddziaływanie kropeł zarówno w czasie parowania, jak i spalania [14–15]. Przypadek ten jednak dla znanych klasycznych konstrukcji palników jest mało prawdopodobny. Przeprowadzone badania wykazały, że jest to możliwe do osiągnięcia wtedy, gdy tzw. „pierwotny” rozpad strugi

paliwa następuje wewnątrz palnika, szczególnie wtedy gdy wytwarzana jest mieszanina gazowo-paliwowa (rys. 1). Krople paliwa na drodze z przekroju wylotowego dyszy do strefy czoła płomienia zdążają odparować. Do strefy reakcji dostają się pary i gazy węglowodorowe. Powstały płomień jest bardzo podobny do kinetycznego płomienia gazowego [16–17]. Jest to skutkiem fizykochemicznych własności wytworzonej mieszaniny charakteryzującej się dużą podatnością na rozdrobnienie (mała lepkość), dużą odparowalnością i częściovym wymieszaniem z utleniaczem. Typ płomienia zależy więc zarówno od własności fizykochemicznych wpływającego paliwa, jak i od geometrii płomienia i parametrów otoczenia.



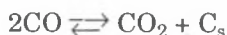
Rys. 1. Struktura emulsji olejowo-wodno-powietrznej: 1 – powietrze, 2 – woda, 3 – olej

Fig. 1. Structure of oil-water-aerial emulsion

2.1. Powstawanie szkodliwych składników spalin podczas spalania paliw płynnych

2.1.1. Powstawanie sadzy

W ostatnich 50 latach dokonano istotnego postępu w poznaniu mechanizmu powstawania sadzy z węglowodorów. Nie oznacza to jednak, że problem ten został rozwiązany. W dalszym ciągu istnieje pytanie, w jaki sposób cząsteczki zawierające tylko kilka atomów węgla oraz znaczną liczbę innych pierwiastków są przekształcane w cząsteczki węglowe zawierające tysiące lub miliony atomów węgla. Powstawanie cząstek sadzy nie jest tylko związane ze spalaniem węglowodorów. Sadza może powstawać również podczas procesów pirolicywnych zarówno w fazie gazowej, jak i w układach heterogenicznych. Ma to miejsce w obszarach wysokotemperaturowych bez udziału tlenu. Bulewicz E. [1] twierdzi, że paliwa zawierające węglowodory aromatyczne tworzą łatwiej sadzę niż inne węglowodory. Według Boudouarda [2] sadza może również powstawać w strefie popłomiennej niskotemperaturowej reakcji [$< 1000^{\circ}\text{C}$ (1273K)]



Liczba i wielkość cząstek sadzy w płomieniu rosną ze wzrostem stosunku C/H i C/O oraz zależą od:

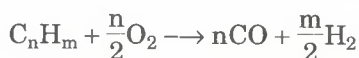
- temperatury wrzenia poszczególnych związków węglowodorowych w paliwie,
- początkowej wielkości kropeł,
- lepkości początkowej i natężenia strumienia spalanego paliwa,
- szybkości narastania temperatury w strefie przedpłomieniowej,
- szybkości turbulentnego tworzenia mieszaniny palnej,
- stężenia tlenu w mieszaninie palnej,
- struktury frontu płomienia.

Z punktu widzenia termodynamicznego węgiel będzie utleniany w płomieniu, jeżeli C/O jest większe od jedności. Eksperymentalnie określone granice powstawania sadzy są zbliżone do 0,5 a nie 1 [8]. Przy niedoborze tlenu proces powstawania sadzy może być częściowo wytłumiony za pomocą pary wodnej [9].

2.1.2. Powstawanie tlenku węgla, CO

Tlenek węgla powstaje głównie w strefie gazów popłomiennych. Główną przyczyną obecności CO w spalinach jest niedostatek tlenu.

Spalanie węglowodorów z niedomiarem tlenu może być przedstawione w formie sumarycznej za pomocą równania:



Mechanizm kinetyczny powstawania CO jest bardzo skomplikowany i nie może być przedstawiony za pomocą prostych reakcji. Tylko w przypadku niektórych węglowodorów udało się określić kinetykę powstawania CO. Tlenek węgla może powstawać zarówno w wysokotemperaturowym procesie utleniania węglowodorów (np. CH_4), jak i może być rezultatem niskotemperaturowego utleniania w tzw. zimnym i niebieskim płomieniu, co w przypadku spalania metanu ma miejsce w temperaturze niższej od 550°C [19].

Tlenek węgla może być także produktem rozpadu aldehydu (H_2CO – produkt przejściowy spalania paliwa) lub dysocjacji CO_2 w wysokich temperaturach strefy popłomiennej.

2.1.3. Powstawanie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, WWA

Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) emitowane w paleniskach pochodzących z paliw płynnych powstają w procesie wysokotemperaturowej termicznej pirolizy węglowodorów. WWA powstałe w procesie wysokotemperaturowego rozkładu w atmosferze redukcyjnej zawierają głównie węgiel i wodór. Niskotemperaturowy proces rozkładu węglowodorów przebiegający w częściowo utleniającej atmosferze stwarza warunki do powstawania WWA zawierających oprócz atomów węgla i wodoru, atomy tlenu i siarki. Niespalone WWA, po przejściu przez strefę spalania, ulegają kondensacji w otoczeniu cząstek sadzy lub innych cząstek stałych.

W dotychczasowych badaniach zidentyfikowano w płomieniu mazutu około 150 różnych typów węglowodorów. Ich ilość i koncentracja zmieniają się w zależności od odległości od czoła palnika. Wykres na rys. 7 przedstawia rozkład koncentracji WWA wzdłuż osi płomienia mazutu spalanego w palniku ciśnieniowym Babcocka (krzywa 1) i w palniku gazodynamicznym z wewnętrznym mieszaniem. W obu przypadkach były zachowane optymalne parametry pracy palnika (ciśnienie mazutu i ciśnienie pary wodnej przy palniku gazodynamicznym).

2.1.4. Powstawanie tlenków azotu, NO_x

Są dwa źródła emisji tlenków azotu przy spalaniu paliw:

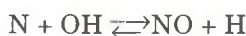
- termiczny NO_x (NO_t) powstający przez utlenienie azotu atmosferycznego,
- paliwowy NO_x (NO_p) powstający przez utlenienie azotu organicznego związanego w paliwie.

Ponieważ obecność azotu w paliwach płynnych jest na tyle mała, że nie wpływa w istotny sposób na emisję NO_x , głównym źródłem emisji tlenków azotu z płomienia olejowego jest utleniony w strefie gazów popłomienych azot atmosferyczny.

Mechanizm powstawania tlenku azotu z azotu atmosferycznego w strefie gazów popłomiennych jest dość dobrze poznany i powszechnie akceptowany – łańcuchowy mechanizm Zeldowicza z reakcjami [20, 21]



rozszerzony o reakcję azotu atomowego z rodnikiem wodorotlenowym



oraz należy uwzględnić reakcje, w których pośrednio występują rodniki węglowodorowe HCN i CN [19].

Zgodnie z równaniami Zeldowicza podstawową metodą obniżania koncentracji NO w produktach spalania jest obniżenie temperatury w płomieniu i zmniejszenie ilości powietrza – obniżenie liczby nadmiaru powietrza.

3. GAZODYNAMICZNY PALNIK OLEJOWY Z WEWNĘTRZNYM MIESZANIEM

Dotychczasowe konstrukcje palnika pozostawiały wiele do życzenia i przez wiele lat prowadzono prace badawcze nad skonstruowaniem nowego typu palnika. Założono, że konstrukcja ta powinna zapewniać spalanie zupełne w szerokim zakresie zmiany wydajności znamionowej, niezależnie od parametrów otoczenia. Realizacja tego zadania możliwa jest tylko wtedy, gdy uzyska się niezależność efektu rozpylenia paliwa od jego ciśnienia oraz niezależność transportu tlenu do strefy spalania od tzw. „organizacji” powietrza zasilającego. Konieczne jest również wyeliminowanie lub zneutralizowanie czynników powodujących tworzenie sadzy i koksiku w strefie przedpłomiennej.

Na rys. 2 przedstawiono schematycznie dyszę nowego typu niskociśnieniowego gazodynamicznego palnika o szerokim zakresie regulacji w przedziale od 15 do 130% wydajności znamionowej.

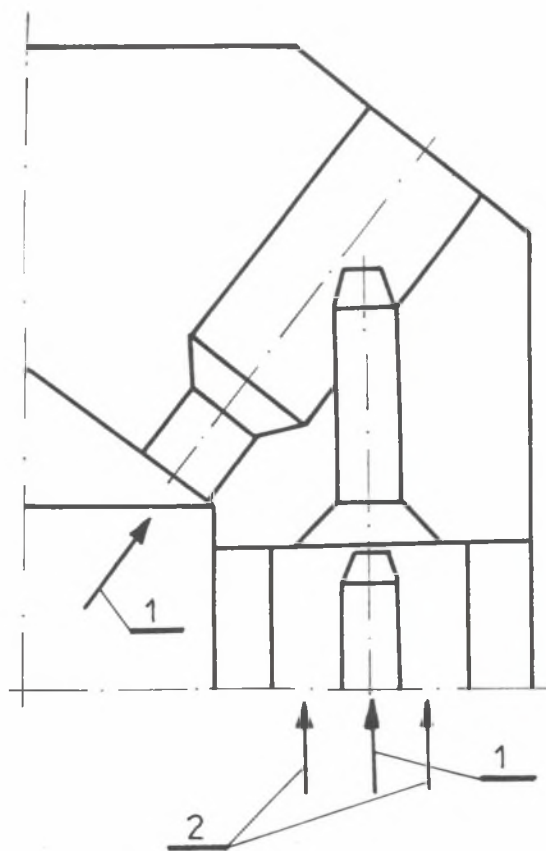
Za pomocą takiej konstrukcji dyszy mogą być spalane dowolne paliwa płynne począwszy od olejów napędowych, a skończywszy na paliwach ciężkich, takich jak mazuty i asfalty. Ciśnienie paliwa może dowolnie zmieniać się w przedziale od 0,02 do 1 MPa. Czynnikiem rozpylającym może być zarówno para wodna (przegrzana i wilgotna), jak i powietrze o ciśnieniu od 0,2 do 1,2 MPa.

Konstrukcja palnika jest chroniona patentami [22, 23].

4. PROGRAM PRÓB BADAWCZYCH

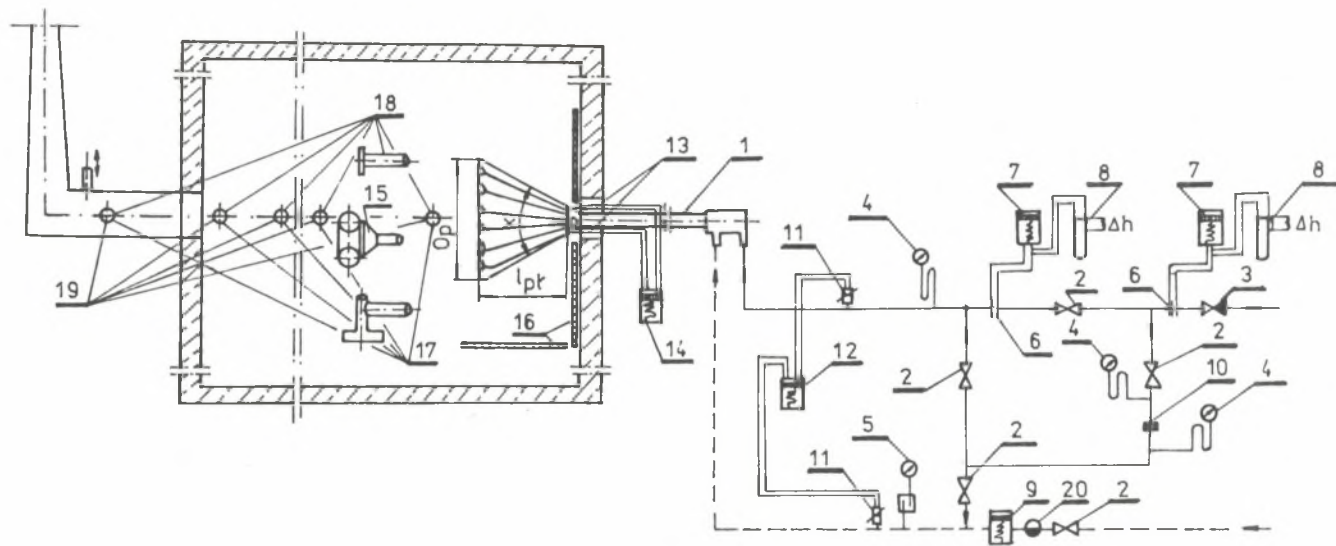
4.1. Stanowisko badawczo-pomiarowe

Ocenę procesu spalania i określenie charakterystyk technicznych palnika przeprowadzono na stanowisku badawczym w Energoinvest ITEN Sarajewo i w Elektrowni „Jaworzno III”. Badania prowadzono w kotle OP-650k bloku 200MW w czasie jego postoju w stanie „zimnym”. Schemat instalacji pomiarowej przedstawiony jest na rys. 3.



Rys. 2. Schemat układu elementarnych dysz niskociśnieniowego palnika olejowego z wewnętrznym mieszaniem: 1 – para wodna, 2 – olej

Fig. 2. Arrangement of the elementary low-pressure nozzles of the internal mixing oil burner



Rys. 3. Schemat instalacji pomiarowo-badawczej: 1 – palnik, 2 – zawór zaporowy, 3 – zawór zwrotny, 4 – manometr parowy, 5 – manometr mazutowy, 6 – kryza pomiarowa, 7 – paromierz z rejestratorem, 8 – manometr różnicowy, 9 – przepływomierz mazutowy, 10 – kryza dławiąca, 11 – termometr oporowy, 12 – wielozakresowy wskaźnik temperatury, 13 – termoelement, 14 – wielozakresowy wskaźnik temperatury, 15 – kamera filmowa, 16 – przymiar do pomiaru parametrów geometrycznych płomienia, 17 – pirometr dwubarwowy, 18 – analizator spalin, aparat Baharaha, 19 – sonda do poboru sadzy, spektroskop masowy

Fig. 3. Diagram of measurement equipment

W czasie badań mierzono:

- ilości pary (V_p), ilości mazutu (V_m), parametry: pary (T_p , P_p) i mazutu (T_m , P_m),
- strukturę geometryczną płomienia (D_{pb} , I_{pb} , α) i jego temperaturę (T_{pl}),
- skład produktów spalania (CO , CO_2 , SO_2 , NO_x , WWA, sadza) oraz temperaturę spalin (T_{sp}) i temperaturę elementów głowicy palnika (T_g).

Badania geometrii żagwi płomienia przeprowadzono metodą rejestracji fotograficznej i oceny wizualnej, a badanie procesu spalania przeprowadzono przy użyciu analizatora gazów typu IMR-3000P ze specjalnie skonstruowaną sondą aspiracyjną i komputerem analizującym stopień czerni płomienia (liczba sadzowa Baharaha – L_sB). Koncentrację sadzy w płomieniu i w strefie popłomiennej (strefa gazów spalinowych) określano na podstawie pojawienia się jej na filtrze, a badania powstawania WWA dokonano za pomocą chromatografu gazowego sprzężonego ze spektrometrem masowym.

5. WYNIKI BADAŃ

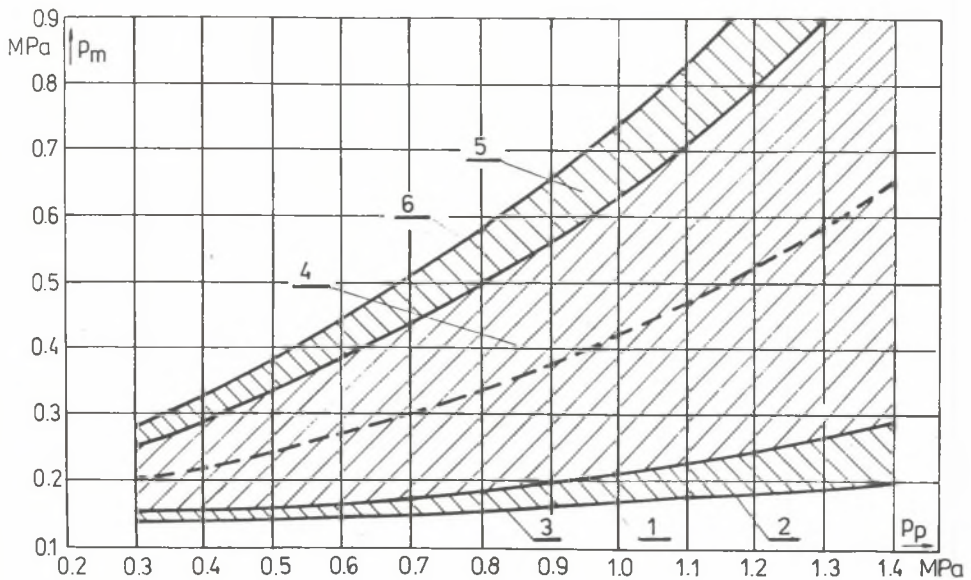
Oceny procesu spalania oraz stabilności zapłonu i pracy palnika dokonano wizualnie poprzez określenie barwy płomienia i stopnia fluktuacji czoła frontu płomienia. Wyniki określające wpływ ciśnienia mazutu i ciśnienia pary wodnej na proces zapłonu i spalania mazutu przedstawiono na rys. 4.

Obecność sadzy we froncie płomienia wzdłuż osi żagwi, w zależności od obszaru pracy palnika, przedstawiono na wykresie – rys. 5.

Koncentrację sadzy scharakteryzowano za pomocą tzw. liczby sadzowej Baharaha (L_sB). Dla porównania przytoczono krzywą określającą rozkład L_sB wzdłuż żagwi płomienia palnika ciśnieniowego typu „Babcock”, pracującego przy ciśnieniu (3 MPa) zbliżonym do znamionowego. Biorąc pod uwagę optymalne zakresy pracy palnika ciśnieniowego (krzywa 5) i palnika gazodynamicznego (krzywa 2) widać, że liczba L_sB jest kilkakrotnie większa dla palnika Babcocka.

Rozkład koncentracji tlenku węgla, dwutlenku węgla i tlenu w przekrojach poprzecznych, w początkowej, środkowej i końcowej strefie płomienia jest zróżnicowany. Z rozkładu wynika, że szerokość strefy frontu płomienia i strefy popłomieniowej rośnie w miarę oddalania się od czoła żagwi.

W początkowej strefie żagwi szerokość frontu płomienia wynosi około 0,1 m, a w końcowej strefie około 0,2 m. Maksymalna koncentracja CO występuje we froncie płomienia i rośnie wzdłuż osi żagwi. W strefie popłomiennej koncentracja CO spada do 0. Wzrost koncentracji CO wzdłuż osi żagwi spowodowany jest postępującym przebiegiem termicznych procesów rozkładu substancji węglowodorowej, znajdującej się we wnętrzu żagwi płomienia. W początkowej strefie żagwi koncentracja CO w osi jest niewielka i praktycznie równa 0.



Rys. 4. Wpływ ciśnienia mazutu i ciśnienia pary wodnej na proces spalania: 1 – niestabilny zapłon, 2 – pulsacyjne spalanie, 3 – granica zapłonu, 4 – całkowite i zupełne spalanie, 5 – niezupełne spalanie, 6 – dymienie żagwi płomienia (niecałkowite i niezupełne spalanie)

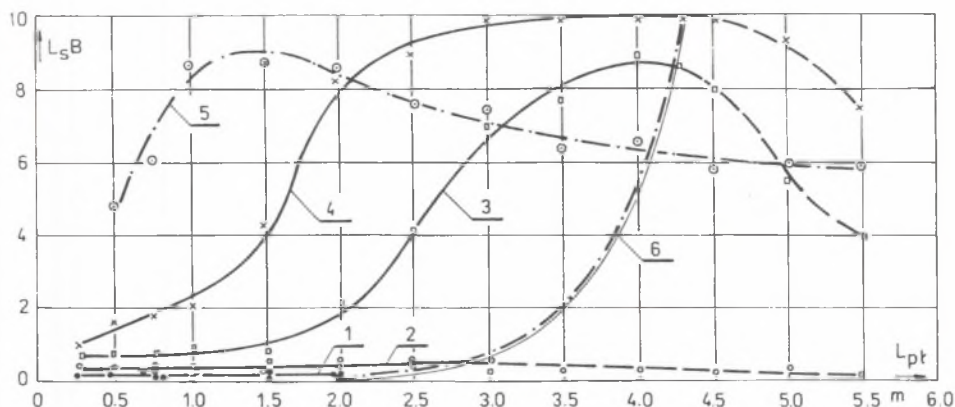
Fig. 4. The influence of mazout pressure and water vapour on combustion process

W miarę oddalania się od czoła żagwi koncentracja CO w osi jest coraz wyższa.

Koncentracja CO_2 na całej długości płomienia jest maksymalna w strefie popłomiennej – rośnie wzdłuż osi żagwi – osiągając najwyższe wartości w końcu żagwi i jest ściśle związana z koncentracją CO i CO_2 w strefie frontu płomienia i w strefie popłomiennej.

Tlenki azotu (NO_x) przy spalaniu paliw płynnych pochodzą głównie z utleniania azotu atmosferycznego. Szybkość powstawania „termicznych” NO_x zależy przede wszystkim od temperatury płomienia i liczby nadmiaru powietrza (λ).

Przeprowadzone wyniki badań nad zawartością tlenków azotu we froncie płomienia i w strefie gazów popłomienych przy spalaniu mazutu w palniku ciśnieniowym Babcocka i w palniku gazodynamicznym z wewnętrznym mieszaniem (rys. 2) w pełni potwierdziły przyjęte przesłanki. Na wykresie (rys. 6) przedstawiono rozkład NO_x w początkowym i końcowym przekroju płomienia palnika gazodynamicznego i w końcowym przekroju płomienia palnika ciśnieniowego.



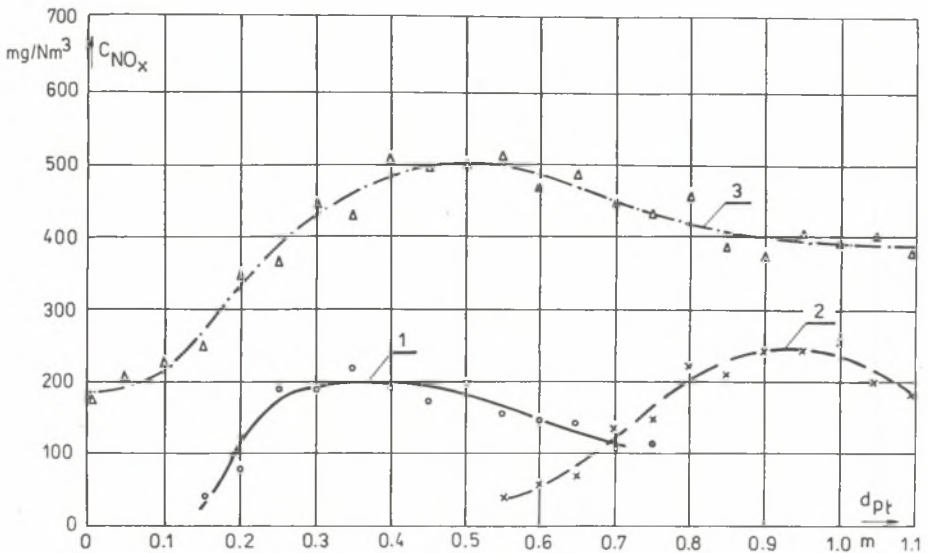
Rys. 5. Zależność „liczby sadzowej” Baharaha (L_sB) od odległości od przekroju wylotowego dyszy i obszaru pracy palnika: 1 – niestabilny zapłon, pulsacyjne, całkowite i zupełne spalanie, 2 – całkowite i zupełne spalanie, 3 – niezupełne spalanie – dymienie żagwi płomienia, 4 – niezupełne i niecałkowite spalanie – dymienie płomienia i separacja kropeł na zewnątrz żagwi płomienia, 5 – płomień palnika ciśnieniowego, 6 – krzywa określająca długość płomienia.

Fig. 5. Dependence of Baharaha's carbo black number (L_sB) on the distance of the outlet intersection of the nozzle and area of burner operation

Rozkład NO_x w przekroju płomienia jest podobny do rozkładu O_2 w płomieniu. Największe koncentracje tlenków azotu występują w jego końcowej części. Ten charakter przebiegu jest podobny do rozkładu temperatury. Zupełnie odmienny charakter generacji tlenków azotu występuje przy spalaniu mazutu w palnikach ciśnieniowych, gdzie tlenki azotu powstają w całym przekroju płomienia i poziom ich koncentracji jest podobny na całej długości żagwi.

W przypadku palnika ciśnieniowego ilość generowanych NO_x jest znacznie wyższa od ilości NO_x powstających przy spalaniu mazutu w palniku gazodynamicznym. Uzasadnieniem tego faktu jest znacznie wyższa koncentracja tlenu i azotu w płomieniu palnika ciśnieniowego przy zbliżonych wartościach temperatury płomienia. Wykres na rys. 7 przedstawia rozkład koncentracji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) wzdłuż osi płomienia mazutu spalane go w palniku ciśnieniowym Babcocka (krzywa 1) i w palniku gazodynamicznym z wewnętrznym mieszaniem.

W obu palnikach proces spalania był realizowany przy optymalnych parametrach mazutu i pary wodnej (w przypadku palnika gazodynamicznego).



Rys. 6. Zawartość NO_x w początkowej (1) i końcowej (2) strefie płomienia palnika gazodynamicznego i w końcowej strefie (3) płomienia palnika ciśnieniowego Babcocka

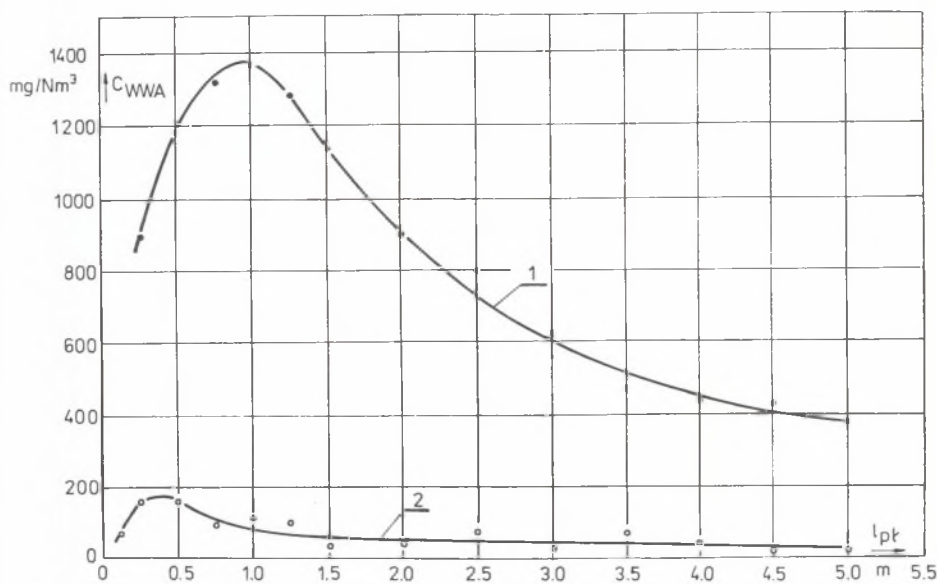
Fig. 6. NO_x contents in the initial (1) and final (2) zone of the flame of the gaseousdynamic burner and in the final (3) zone of the flame of the pressure burner of Babcock type

Koncentracja WWA w przypadku palnika ciśnieniowego jest kilkakrotnie wyższa niż w przypadku palnika gazodynamicznego.

6. WNIOSKI

Proces spalania paliw płynnych – szczególnie paliw ciężkich – za pomocą klasycznych palników ciśnieniowych jest związany z emisją do atmosfery CO, sadzy, NO_x, WWA i innych składników szkodliwych dla środowiska. Wydaje się, że nawet w bardzo dobrych konstrukcjach palników standardowych, z uwagi na realizowaną technologię rozdrobnienia paliwa, odparowania i wymieszania z powietrzem, nie można uniknąć emisji niektórych szkodliwych składników, takich jak np. NO_x lub WWA. Poziom NO_x i WWA można znacznie obniżyć za pomocą palników gazodynamicznych z wewnętrznym mieszaniem.

Palnik ten, oprócz znacznego obniżenia emisji szkodliwych dla otoczenia składników, zapewnia znaczne obniżenie zużycia paliwa dla realizacji konkretnych zadań technologicznych. W kotłach bloków energetycznych – w kilku



Rys. 7. Rozkład koncentracji WWA wzdłuż płomienia mazutowego: 1 – palnik ciśnieniowy, 2 – gazodynamiczny palnik z wewnętrznym mieszaniami

Fig. 7. Concentration distribution WWA along the mazout flame

elektrowniach – palniki gazodynamiczne pozwoliły zaoszczędzić od 25 do 40% paliwa płynnego przy uruchamianiu kotłów ze stanu „zimnego”. Palniki posiadają płynną regulację wydajności w przedziale od 15 do 130% wydajności nominalnej.

LITERATURA

- [1] Hucknal D. J.: Chemistry of Hydrocarbon Combustion, Chapman and Hall, London, New York, 1985.
- [2] Słupek S.: Proces spalania wodnych emulsji paliwa ciekłego, ZN. AGH, Mat. Odl., z. 75, 1977.
- [3] Koval A. A., Shaler A., Słupek S., Kokkinos A., Miskovsky N. M., Essenh.: Combustion Characteristics of Oil-Water-Air Emulsion, Paper prepared for Research of the Symposium Los Angeles, Nov. 1975.
- [4] Słupek S.: O możliwości ograniczenia szkodliwości produktów spalania paliw ciekłych. Hutnik nr 11, 1984.

- [5] Kowalewicz A.: Tworzenie mieszanki i spalanie w silnikach o zapłonie iskrowym, WKiŁ, Warszawa 1984.
- [6] Law C. K.: Recent advances in droplet vaporization and combustion. Przeg. in Energy and Combust. Science. Vol. 8, 1982.
- [7] Faeth G. M.: Current status of droplet and liquid comb. Prog. in Energy and Combust. Science, Vol. 3, 1977.
- [8] Wilk R.: Badania zjawiska spalania kropli ciężkiego paliwa ciekłego, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka nr 81, Gliwice 1982.
- [9] Kulagin L. V., Ochotnikow S. S.: Sziganije tjażołych zidkich topliw, Nedra, Moskwa, 1967.
- [10] Willams FR. A.: Tiejorija gorenija, Izd. Nauka, Moskwa 1971.
- [11] Wilk. R., Zaliński Z.: Badania czasu spalania kropli ciężkiego paliwa, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka nr 79, Gliwice, 1982.
- [12] Petela R.: Paliwa i ich spalanie, G. V. Laboratorium, Pol. Śl., Gliwice 1984.
- [13] Orzechowski Z.: Rozpylanie cieczy, WNT, Warszawa 1976.
- [14] Umemura A., Ogawa S., Oshima N.: Analysis of the interaction between two burning droplets, Combustion Science and Flame 41, 1981.
- [15] Twardus E., Brzustowski T.: Combustion Science and Technology 17, 1978.
- [16] Karcz H., Zembrzuski M.: A New Concept of low Pressure Atmosphere, XI-th International Symposium on Combustion Processes, Międzyzdroje, September, 1989.
- [17] Karcz H.: Now to Minimize Environment Pollution due to Combustion of Neavy Oil, Sc. ICUS. XVII Seventeenth International Conference on de Unity of the Sciences, Los Angeles 1988.
- [18] Karcz H., Jodkowski W.: Palnik mazutowy o wydajności znamionowej 600 kg/h o szerokim wydatku dla Elektrowni „Łagisza” w Będzinie. Raport serii Sprawozdania: I-20, Pol. Wrocł., Wrocław 1988.
- [19] Glassman J.: Combustion Academic Press, New York, San Francisco, London 1977.
- [20] Nelson H. F.: Nitric oxide formation in combustion AJAA, Vol 14, No 9, 1976.
- [21] Zeldowicz Y. B.: The oxidation of nitrogen in combustion explosions. Acta Physicochim., USSR 21.577, 1947.
- [22] Wanatowicz St., Karcz H.: Palnik olejowy. Świadcetwo autorskie wzoru użytkowego Ru 43115 z dnia 30.10.1985.
- [23] Wanatowicz St., Karcz H., Zembrzuski M.: Palnik do spalania paliwa ciekłego. Patent nr 150725 z dnia 30.01.1987.

Recenzent: Dr hab. inż. Ryszard WILK

Wpłynęło do Redakcji 30. 08. 1994

Abstract

At the starting up phase of pulverized coal boiler of OP 650k type from the „cold state” by means of low-pressure gas-dynamic burners with inside mixing, where mazout of 0,05 MPa to 0,6 MPa was broken up in a two stage process with water vapour of 0,5 to 1,0 MPa, there obtained considerable lowering of the contents of such substances as carbon black, CO, NO_x and multiring aromatic hydrocarbons, which are harmful for the environment, in the exhaust gas due the burner construction which makes it possible to break up the fuel better, evaporize it and mix it with air. The burner is characterized whith a smooth regulation of the output from 15 to 130 % of the rated output of the burner at the reliability of firing and keeping the flame stability, which considerably increases boiler avaiiability. The burner is little sensitive to the „organization” of air supply to the combustion zone, thus it can also be used for the modernization in the existing boilers of different constructions at maintaining full operational safety.