

Henryk Karcz, Wiesław Jodkowski, Stanisław Nowakowski, Edward Sędzielowski, Włodzimierz Zabłocki¹⁾

Ocena eksploatacyjna i ekologiczna różnych konstrukcji olejowych palników energetycznych

Proces uruchomienia kotła energetycznego wiąże się z szeregiem trudności związanych z dyspozycyjnością eksploatacyjną palników olejowych. Jako paliwo rozpałkowe stosowane są z reguły najtańsze frakcje paliwa płynnego, olej opałowy, mazut (olej opałowy ciężki), gudron i smoła. Paliwa te stawiają jednak bardzo wysokie wymagania odnośnie do sposobu przygotowania ich do procesu spalania. Muszą być spełnione konkretne wymagania co do ich lepkości, jakości rozpylania, odparowania kropeł, wymieszania par i gazów węglowodorowych z powietrzem i utworzenia mieszaniny palnej. O ile zapewnienie lepkości (2–3°E) jest związane wyłącznie z poprawną technologią podgrzewu i zabezpieczeniem przed kawitacją, o tyle zapewnienie pozostałych wymagań, a w szczególności właściwego wymieszania paliwa z utleniaczem, jest już skomplikowanym procesem fizycznym, który nawet przy stosowaniu bardzo wymyślnych i skomplikowanych technik jest możliwy tylko dla palników o określonej mocy cieplnej.

Minimalna moc zainstalowana w palnikach rozpałkowych, które z reguły spełniają również czasami funkcję palników podtrzymujących według przyjętych zasad [1–3] musi wynosić około 25% mocy cieplnej kotła. Kryterium to jest trudne do spełnienia w kotłach dużej mocy. Ze względów konstrukcyjnych liczba palników olejowych zainstalowanych w kotle jest bowiem ograniczona, a więc wymagana moc pojedynczych palników w przypadku dużych kotłów energetycznych musi być z reguły dużo większa od 10 MW.

Dla konwencjonalnych palników ciśnieniowych i dotychczas stosowanych palników dwuczynnikowych mocą graniczną w celu dobrego wymieszania powietrza z olejem, które zapewnia całkowite i zupełne spalanie, jest moc palnika rzędu 8–10 MW. Powyżej tej granicy niezwykle trudno jest spalać ciężki olej opałowy w zimnej komorze kotła bez powstania zjawiska dymienia i separacji kropeł oleju z płomienia.

W celu zapewnienia niezawodnej eksploatacyjnie pracy oraz całkowitego i zupełnego spalania, palniki takie muszą

spełniać określone wymagania, a w szczególności muszą zapewniać:

- rozpylenie paliwa na krople o bardzo małych rozmiarach równomiernie rozłożonych w przestrzeni wokół palnikowej,
- częściowe odparowanie paliwa wewnątrz głowicy lancy palnika,
- częściowe wymieszanie utleniacza z odparowanym paliwem w bezpośrednim sąsiedztwie głowicy palnika i utworzenie palnej mieszaniny gazowej, która powoduje powstanie czoła frontu płomienia,
- doprowadzenie pozostałej ilości powietrza w strefie czoła frontu płomienia i na obrzeże żagwi, gdzie powstaje stechiometryczny front spalania,
- możliwość odpowiedniego dozowania paliwa (czynnika rozpylającego w przypadku palników dwuczynnikowych) i powietrza do spalania przy zmiennych wydajnościach cieplnych palnika,
- zachowanie odpowiedniej przestrzeni dla formowania płomienia i odprowadzania produktów spalania,
- możliwość zastosowania źródła zapłonowego o niezawodnym, prostym i bezpiecznym działaniu zapewniającego stabilny i pewny zapłon w każdej sytuacji ruchowej kotła.

Spełnienie poszczególnych wymagań zależy częściowo od usytuowania palnika w komorze kotła, lecz przede wszystkim od konstrukcji głowicy lancy palnika oraz od technologii procesu rozpylania i powstawania gazowej mieszaniny palnej. W przypadku palników gazodynamicznych mieszanina gazowa składa się głównie z gazów i par węglowodorowych powstałych w wyniku częściowego odparowania paliwa wewnątrz głowicy i na zewnątrz palnika. Palna mieszanina gazowa powstaje w wyniku doprowadzenia części utleniacza pochodzącego z czynnika rozpylającego oraz utleniacza doprowadzonego w bezpośrednie sąsiedztwo głowicy. Własności kinetyczne powstałej mieszaniny są powiązane ze składem i koncentracją komponentów gazowych.

Nieodparowane krople paliwa przedostając się przez front płomienia ulegają całkowitemu lub częściowemu odparowaniu. Odparowanie kropeł znajdujących się na peryferiach wirującej strugi w obszarze obniżonych temperatur może ulec przerwaniu. Krople takie pod działaniem siły odśrodkowej są separowane z żagwi płomienia i opadają na powierzchnie ogrzewalne komory spalania.

¹⁾ Dr inż. Henryk Karcz i inż. Wiesław Jodkowski są pracownikami Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej; mgr inż. Stanisław Nowakowski i mgr inż. Edward Sędzielowski – PKE Elektrownia Jaworzno III, a mgr inż. Włodzimierz Zabłocki, Elektrociepłowni Kujawskich.

Powstały w wyniku odparowania kropeł gaz węglowodorowy musi zostać wymieszany w ściśle określonym czasie (indukcji zapłonu) z powietrzem. Jakość powstałych produktów spalania (CO_2 i H_2O lub CO , C_nH_m i sadza) jest ściśle związana z czasem i dokładnością wymieszania. Dokładność wymieszania w czasie krótszym od czasu indukcji zapłonu gwarantuje powstanie CO_2 i H_2O . Niedokładne wymieszanie z tlenem w długim czasie (większym od czasu indukcji zapłonu), gdy cząsteczki gazu węglowodorowego znajdują się już w końcowej strefie żagwi płomienia, jest przyczyną powstawania przede wszystkim cząsteczek sadzy i WWA (wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych).

Dokładność i czas wymieszania tlenu z gazem węglowodorowym zależą od wielkości bryły geometrycznej, w której występuje proces rozpylenia i odparowania kropeł paliwa, a więc zależą od wydajności palnika oraz od ilości, prędkości i kąta zawirowania powietrza. Turbulentne mieszanie wypływającego powietrza z powstałym gazem węglowodorowym ma ograniczony zasięg fizyczny, powyżej którego proces tworzenia się jednolitej mieszaniny palnej jest utrudniony. O ile gaz węglowodorowy znajdujący się w zewnętrznych warstwach bryły paliwa zdoła się dobrze wymieszać z tlenem, to gaz węglowodorowy znajdujący się wewnątrz żagwi płomienia nie zdoła utworzyć jednolitej mieszaniny palnej. Brak możliwości częściowego utlenienia się cząstek węglowodorów powoduje powstanie cząstek sadzy i ciężkich węglowodorów [4–11]. Płomień zaczyna świecić czerwonym światłem i emitować czarny dym.

W przypadku jednolitej bryły płomienia, co jest charakterystyczne dla palników ciśnieniowych, palników dwuczynnikowych typu Y stabilizowanych przy pomocy silnie zawirowanego powietrza i palników rotacyjnych, istnieje bariera fizyczna związana z mocą palnika, powyżej której turbulentne mieszanie powietrza z paliwem jest niewystarczające do zapewnienia całkowitego i zupełnego spalania.

Urządzenia stabilizujące płomień muszą zapewniać stałe położenie czoła frontu płomienia w stosunku do głowicy palnika niezależnie od wydajności palnika i warunków panujących w komorze kotła.

Zawartą w niniejszym artykule ocenę procesu spalania mazutu dokonano na podstawie wyników pomiaru stopnia czerni spalin (zawartości sadzy) oraz pomiaru zawartości CO i NO_x w spalinach.

Sprawność spalania w zależności od wydajności palnika określono dla optymalnych parametrów mediów przy optymalnym układzie stabilizacji i sposobie doprowadzenia powietrza do spalania.

Określono wpływ konstrukcji palnika oraz jego mocy na sprawność spalania i emisję substancji szkodliwych do atmosfery przy zapewnieniu optymalnych warunków stabilizacji i sposobu doprowadzenia powietrza.

Wcześniejsze badania płomieni palników, które nie tworzą jednolitej bryły płomienia [9,10,12–15] wykazały, że zarówno w części obwodowej jak i w części centralnej żagwi tworzą się wiry recyrkulacyjne powodujące powstanie

gradientów ciśnienia w kierunku do osi żagwi, powstała struktura płomienia jest bardzo dogodna dla procesu tzw. samoorganizacji powietrza koniecznego do spalania paliwa. Wytworzone na obwodzie żagwi oraz w jej wnętrzu podciśnienie wprowadza tlen i część spalin do płomienia.

Żagiew płomienia składa się z szeregu oddzielnych, rozczłonkowanych płomieni w formie warkoczy z wolnymi od płomienia przestrzeniami zarówno na obwodzie żagwi jak i w jej części centralnej.

Z pewnym przybliżeniem, stosując analogię do płomienia gazowego, można stwierdzić, że usytuowanie frontu żagwi wokół głowicy lancy palnika wynika ze stanu równowagi normalnej prędkości spalania i prędkości napływu mieszanki palnej, a o sprawności spalania decydują dwa procesy: proces powstawania mieszanki palnej oraz proces utleniania. O ile szybkość powstawania mieszanki palnej zależy od sposobu i efektywności rozpylenia paliwa ciekłego oraz od sposobu doprowadzenia powietrza i jego efektywnego mieszania z powstałą mieszaniną gazów palnych, o tyle efektywność procesu utleniania zależy od składu chemicznego mieszaniny gazowej temperatury ośrodka oraz od równomierności wymieszania gazów palnych z utleniaczem i ich wzajemnych stosunków stechiometrycznych [4, 5,16–27].

Mechanizm spalania paliw ciekłych

Krople rozpylonego oleju wprowadzane są do komory paleniskowej i poruszając się jako zawiesina w strumieniu powietrza odparowują, zamieniając się całkowicie w gaz węglowodorowy. Wytworzona w ten sposób mieszanina, mając odpowiednio wysoką temperaturę, ulega zapłonowi powodując powstanie frontu płomienia. Przestrzeń pomiędzy frontem płomienia a przekrojem wylotowym dyszy palnika powinna mieć formę geometryczną i spełniać 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 są tym wyższe, im gorsze jest rozpylenie, większa jest lepkość, cięższe paliwo (wyższy jest stosunek C/H) i więcej jest związków aromatycznych oraz im większy jest strumień spalanego paliwa [2–9].

Ponadto stwierdzono, że formowaniu się sadzy w płomieniu towarzyszą inne składniki węglowodorowe, a przede wszystkim wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) [6–8, 28, 29].

Niektóre z nich są wybitnie rakotwórcze (na przykład: fluoren, pirenn, benzo(α)piren). Osadzone na sadzy wnikają głęboko w system respiracyjny organizmu żywego, stanowiąc dla niego największe zagrożenie [30].

Powstałe w płomieniu WWA kondensują na powierzchni cząstek sadzy i w przypadku niespalenia emitowane są do atmosfery. Obecnie zidentyfikowano w spalinach już ponad 150 różnych węglowodorów pochodzących ze spalania paliw płynnych [28–31].

Paliwa ciekłe mają więc wysoki udział w zanieczyszczeniu środowiska groźnymi dla życia biologicznego substancjami powstającymi szczególnie przy spalaniu ciężkich paliw ciekłych w kotłach energetycznych.

Do najgroźniejszych składników emitowanych do atmosfery należy sadza, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), szczególnie benzo(α)piren, tlenek węgla, tlenki azotu i tlenki siarki.

Mechanizm zapłonu i spalania paliw ciekłych można podzielić na następujące stadia:

- nagrzew i parowanie,
- termiczne rozłożenie par i częściowe utlenienie z tlenem doprowadzonym w strefę przyplomienną,
- tworzenie palnej mieszanki gazowej w strefie frontu płomienia,
- zapłon i powstanie frontu płomienia,
- doprowadzenie powietrza do strefy poza frontem płomienia i utworzenie palnej mieszanki gazowej wewnątrz żagwi płomienia.

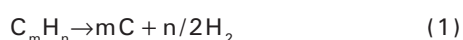
Stadia te są powiązane ze sobą zarówno w czasie, jak i przestrzeni.

Przy spalaniu paliw ciekłych w zależności od ich właściwości fizycznych i chemicznych możliwe są dwa zasadnicze mechanizmy:

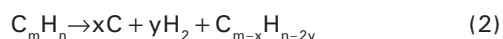
- pierwszy obejmuje spalanie paliw łatwo odparowujących, takich jak benzol, benzyny, nafta, oleje lekkie, których odparowanie i wymieszanie z utleniaczem przebiega w specjalnych podkomorach, z których palna mieszanka gazowa podawana jest do komór spalania (silniki spalinowe);
- drugi obejmuje spalanie ciężkich paliw ciekłych, które nie ulegają wstępnemu odparowaniu; do paliw tych należą oleje opałowe lekkie, ciężkie oleje takie jak mazut, gudron i smoła.

Ciężkie paliwa ciekłe podawane do palników nie ulegają z reguły przed wyjściem z dyszy palnika wcześniejszemu odparowaniu. Dotychczas nie ma pewnej i jednoznacznej teorii procesu spalania paliw ciekłych, które nie ulegają wstępnemu odparowaniu.

Proces zapłonu, spalania ciężkich paliw ciekłych komplikuje wiele pobocznych zjawisk, wynikających z istoty i właściwości węglowodorów powstających w trakcie odparowania paliwa. Węglowodory paliw ciekłych należą do grupy termicznie niestabilnych w czasie nagrzewu i bez obecności tlenu ulegają termicznemu rozkładowi (krakingowi) według reakcji:



lub

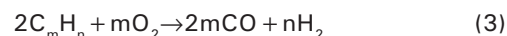


Wskutek przebiegu reakcji (1) lub (2) mogą powstać produkty o różnym powinowactwie chemicznym dla procesów utleniania, zapłonu i spalania. W wyniku reakcji termicznego rozkładu mogą powstać węglowodory lekkie (takie jak CH_4 , C_2H_2 , C_2H_6), które łatwo ulegają zapłonowi i spalaniu oraz węglowodory ciężkie ($C_{m-x}H_{n-2y}$) i sadza (mC), które trudno ulegają zapłonowi i spalaniu.

Sadza i węglowodory ciężkie są prekursorami powstania szkodliwych dla urządzeń stałych narostów (nagar) oraz szkodliwych dla środowiska człowieka ciężkich węglowodorów aromatycznych (WWA).

Jakość powstających węglowodorów w czasie odparowania jest zależna od temperatury. W niskiej temperaturze (do 772–872 K) rozkład węglowodorowy przebiega symetrycznie z wydzieleniem węglowodorów lekkich. W temperaturze wyższej niż 900 K rozpad węglowodorów jest niesymetryczny. Na równi z węglowodorami lekkimi powstają węglowodory ciężkie, trudne do spalania.

Termiczny rozkład paliwa płynnego w obecności tlenu ma nieco inny mechanizm. Powstające węglowodory w obecności tlenu ulegają utlenianiu według reakcji:



generując gazy palne CO i H_2 .

Jeżeli proces nagrzewu i odparowania kropeł paliwa przebiega szybko w obecności tlenu, to występują najbardziej korzystne warunki do zapłonu i pełnego spalania. Szybki nagrzew i szybkie odparowanie kropeł oraz szybkie wymieszanie z tlenem są wynikiem drobnego rozpylenia i równomiernego rozkładu kropeł w strumieniu powietrza. Obecność powietrza w strumieniu kropeł powoduje, że proces odparowania i pierwotne stadium rozkładu węglowodorów przebiega w dogodnych warunkach temperaturowych (poniżej 772 K) i w atmosferze utleniającej.

Wydzielające się pary i gazy węglowodorów lekkich mają dogodne warunki do wstępnego utleniania i przejścia w łatwopalne gazy (CO , H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_6 itp.), które szybko ulegają zapłonowi i spalaniu w czole frontu płomienia. Powolne odparowanie i brak procesu wstępnego utleniania są przyczyną wystąpienia głębokiego rozkładu termicznego węglowodorów z powstaniem trudno palnych cząstek stałych.

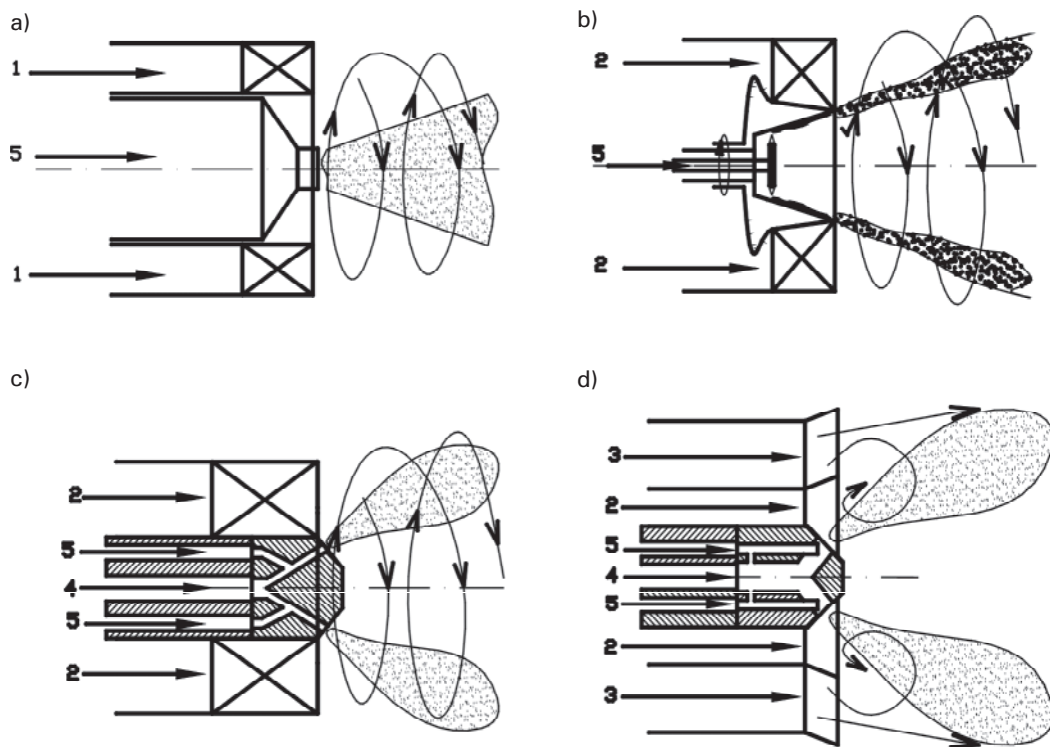
Występowanie procesów utleniających produkty odparowania kropeł paliwa przed ich zapłonem jest zjawiskiem bardzo pożądanym, ponieważ w dużej mierze eliminuje procesy krakingu i stwarza dogodne warunki do zupełnego spalania. Częściowo z tej przyczyny zdecydowanie lepszy wydaje się sposób rozpylania ciężkich paliw płynnych za pomocą gazowych czynników rozpylających. Ze względu na wstępne utlenianie węglowodorów, do rozpylania mazu bardziej korzystne wydaje się powietrze niż para wodna. Zdecydowanie łatwiej jest doprowadzić tlen w strefę wstępnego utleniania przed frontem płomienia w przypadku, gdy płomień jest rozczłonkowany na szereg oddzielnych żagwi niż w przypadku jednolitej bryły.

Dotychczasowe wyniki badań eksploatacyjnych wykazały jednak, że proces zapłonu, jakość spalania i stabilność frontu płomienia są zależne zarówno od rodzaju czynnika rozpylającego, jak i od jego parametrów termodynamicznych. Na wybór czynnika rozpylającego rzutuje również moc palnika oraz zakres zmian jego obciążenia. Dla palnika o dużej mocy, powyżej 10 MW, pracującego w wąskim zakresie zmian obciążenia korzystniejszym czynnikiem rozpylającym jest przegrzana para wodna, a dla palników mniejszej mocy, pracujących w szerokim zakresie zmian obciążenia (np. od 20 do 100%) korzystniejsze jest sprężone powietrze.

Badane palniki olejowe

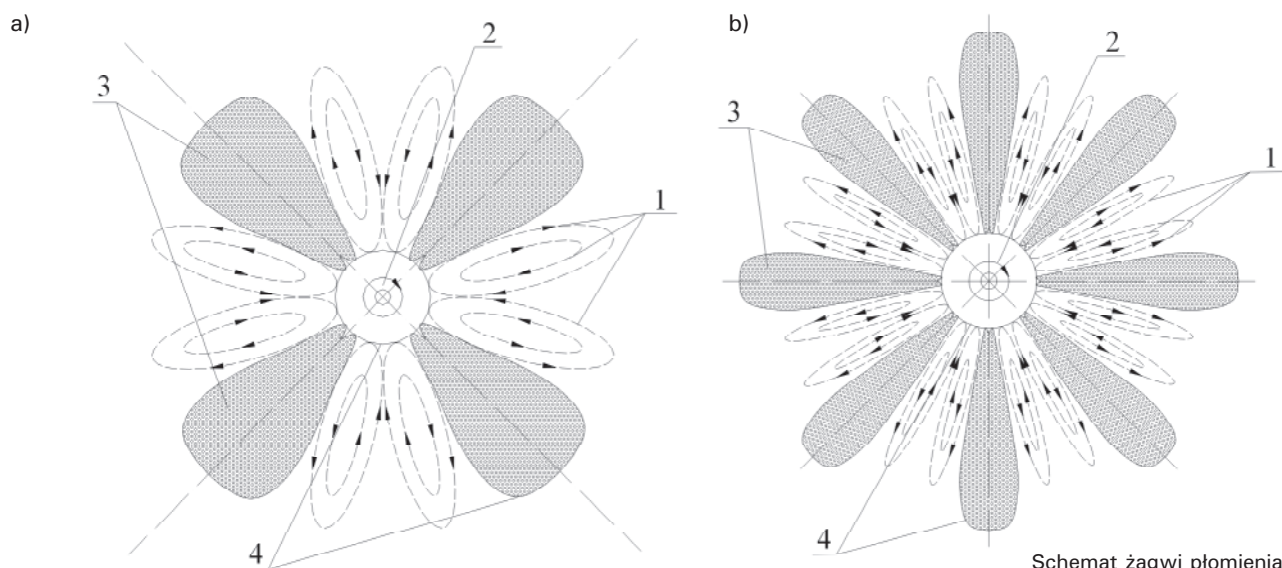
Najczęściej stosowane są cztery typy olejowych palników energetycznych: ciśnieniowe, rotacyjne, dwuczynnikowe i gazodynamiczne z wewnętrznym mieszaniem. Schematy tych palników przedstawiono na rysunku 1.

W palniku ciśnieniowym paliwo pod wysokim ciśnieniem wypływa z dyszy i miesza się z zawirowanym powietrzem poza wylotem z palnika tworząc jednolitą bryłę płomienia. Podobnie w palniku rotacyjnym, gdzie paliwo rozpylane jest w wirującej tarczy, mieszanina palna powstaje na wylocie z palnika generując jednobryłowy płomień.



Rys. 1. Schematy palników rozpałkowych
a) ciśnieniowy, b) rotacyjny,
c) dwuczynnikowy typu Y,
d) gazodynamiczny z wewnętrznym mieszaniem

- 1 – powietrze rozpylające,
- 2 – powietrze pierwotne,
- 3 – powietrze wtórne,
- 4 – para wodna,
- 5 – mazut



Rys. 2.
Schemat żagwi płomienia o mocy:
a) 8 MW (4 żagwie), b) 25 MW (8 żagwi)

W palniku dwuczynnikowym paliwo mieszane jest w dyszy z parą wodną i pod niewysokim ciśnieniem wypływa z dyszy mieszając się z zawirowanym powietrzem. W palniku gazodynamicznym palna mieszanina gazowa powstaje w wyniku doprowadzenia pary stanowiącej czynnik rozpylający oraz z powietrza doprowadzonego w bezpośrednie sąsiedztwo głowicy i na zewnątrz palnika.

Powstaje w ten sposób płomień o rozczłonkowanej strukturze, umożliwiającą łatwy dostęp powietrza do wnętrza płomienia. Schemat struktury żagwi płomienia o różnej mocy cieplnej przedstawiony jest na rysunku 2.

W palnikach dwuczynnikowych typu Y, palnikach rotacyjnych, palnikach ciśnieniowych kanały powietrza zakończone były łopatkowymi aparatami zawirowującymi z regulowanym kątem naporu 20, 30, 40, 50° w stosunku do tworzącej kanału. W przypadku palnika gazodynamicznego kanały powietrza zakończone są dyfuzorami. Przepływ powietrza przez kanały jest prostoliniowy o wyrównanym polu prędkości na całym przekroju kanałów. Łopatkowy układ zawirowujący w przypadku palników dwuczynnikowych typu Y, palników ciśnieniowych i palników rotacyjnych oraz kanałowy układ zakończony dyfuzorem w przypadku palników gazodynamicznych typu K, stabilizuje front płomienia dzięki wytworzeniu stref recyrkulacyjnych.

Zakres i metodyka badań

Oceny procesu spalania dokonano dla palników:

- ciśnieniowych,
- dwuczynnikowych typu Y,
- rotacyjnych,
- gazodynamicznych z wewnętrznym mieszaniem.

Palniki pracowały w optymalnym zakresie ciśnień mazu i pary rozpylającej. Wartości parametrów pracy palników pokazano w tabeli 1.

Tabela 1

Parametry pracy palników

Parametry pracy palnika	Palniki			
	ciśnieniowy	dwuczynnikowy	rotacyjny	gazodynamiczny
Wydajność mazu, kg/h	200–4000	200–4000	200–4000	200–4000
Temperatura mazu, K	410	410	410	410
Ciśnienie mazu, MPa	3,2–3,5	1,0–1,5	0,25–0,5	0,15–0,65
Ciśnienie pary rozpylającej, MPa	–	1,2–1,6	–	0,3–0,9
Temperatura pary rozpylającej, K	–	570	–	570
Obroty rotora, obr/min	–	–	6000	–
Współczynnik nadmiaru utleniacza	1,25–1,5	1,25–1,5	1,25–1,5	1,05–1,1
Prędkość wypływu powietrza pierwotnego, m/s	15–25	15–25	15–25	10
Prędkość wypływu powietrza wtórnego, m/s	20–40	15–25	15–25	25

Badania prowadzono przy optymalnych dla danego typu palnika warunkach stabilizacji czoła frontu płomienia i sposobie doprowadzania powietrza do spalania.

Badania prowadzono przy następujących układach stabilizujących:

- bez stabilizatora,
- ze stabilizatorem łopatkowym (tzw. aparat zawirowujący) ,
- ze stabilizatorem kanałowym zakończonym dyfuzorem,
- ze stabilizatorem stożkowym,

oraz przy następujących układach zasilających w powietrze:

- ◆ z łopatkowym aparatem zawirowującym,
- ◆ z kanałowym układem prostoliniowym,
- ◆ z kanałowym układem zakończonym dyfuzorem stożkowym.

Badania prowadzono w komorach kotłów OP-140, OP-230, OP-650 i BB-1150 w stanie „zimnym”, a badania porównawcze w komorze kotła OP-650 w *Elektrowni Jaworzno III*.

Ocenę procesu spalania mazu dokonano na podstawie wyników pomiaru stopnia czerni spalin oraz pomiaru zawartości CO w spalinach opuszczających komorę kotła.

Sprawność spalania i zależności od wydajności palnika określono dla optymalnego układu stabilizacji i optymalnego sposobu doprowadzenia powietrza do spalania.

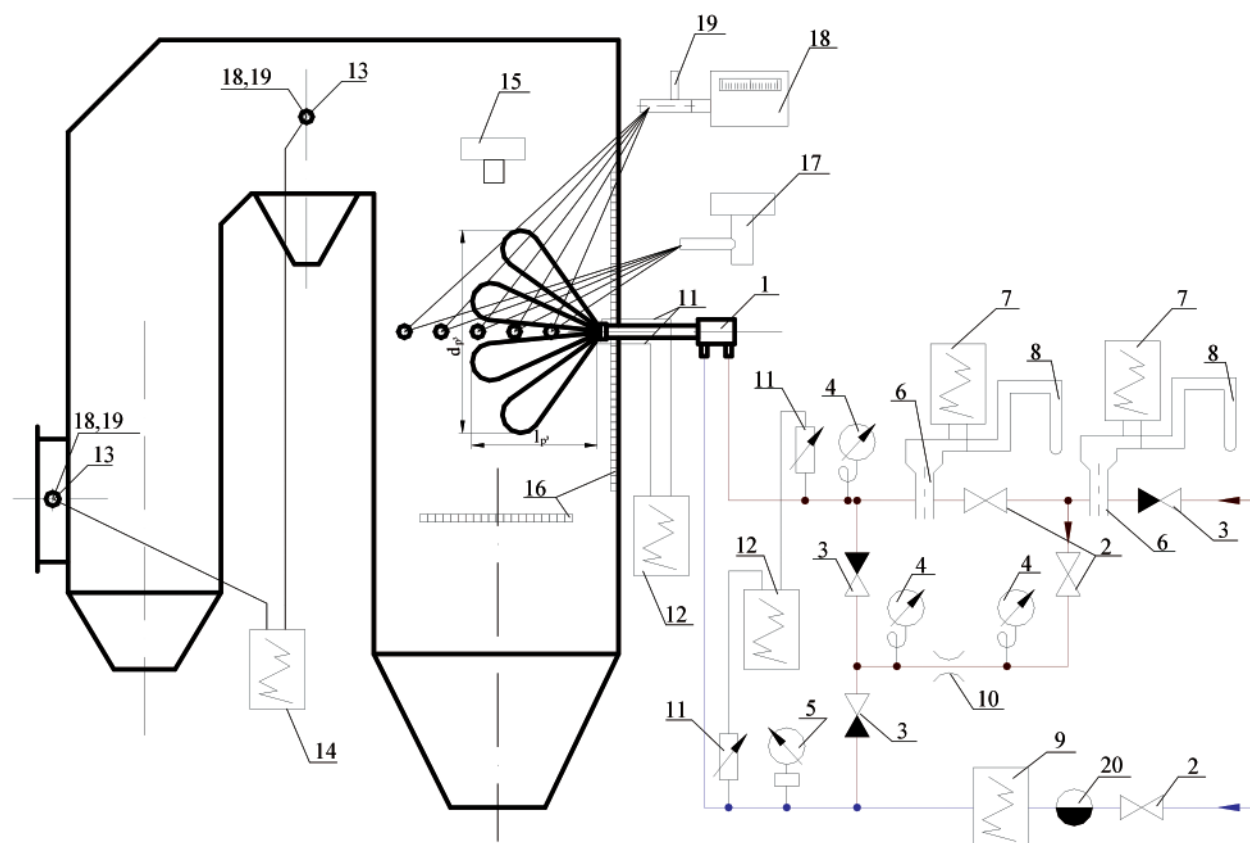
Badania geometrii czoła frontu płomienia prowadzono metodą rejestracji fotograficznej, a badania procesu spalania przeprowadzono przy pomocy analizatora gazowego typu IMR-300P ze specjalnie skonstruowaną sondą aspiracyjną z komputerem analizującym stopień czerni płomienia (liczba sadzowa Bacharacha).

Koncentracje sadzy i CO określono w strefie popłomiennej. Oznaczenia ilości spalonego oleju i czynnika rozpylającego oraz ich parametrów termodynamicznych dokonano za pomocą aparatury standardowej, według schematu przedstawionego na rysunku 3.

W czasie pomiarów mierzono:

- przepływ oleju (V_m) przez palnik, jego ciśnienie (P_m) i temperaturę (T_m),
- przepływ pary wodnej (V_p), jej ciśnienie (P_p) i temperaturę (T_p),
- temperaturę żagwi płomienia (T_{pl}),
- wymiary geometryczne płomienia (D_{pl} , l_{pl}),
- temperaturę elementów konstrukcyjnych głowicy palnika (T_g),
- skład gazów spalinowych i zawartość sadzy w spalinach.

Określenie składu chemicznego żagwi płomienia prowadzono w komorze kotła przy pomocy systemu pomiarowego przedstawionego w [9,14–15]. Mierzono stężenie następujących składników. O_2 , CO i CO_2 przy użyciu analizatorów ULTRAMAT23 typu NDIR oraz analizatora IMR-3. Pobierano również próbki do analizy chromatograficznej, gdzie określano stężenie C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 oraz C_3H_8 , C_4H_{10} .



Rys. 3. Schemat instalacji pomiarowej

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 – wskaźnik temperatury, 15 – kamera filmowa, 16 – przyrząd do pomiaru parametrów geometrycznych płomienia, 17 – pirometr dwubarwowy, 18 – analizator spalin, aparat Bacharacha, 19 – sonda do poboru spalin, 20 – filtr

Ocenę procesu spalania i określenie charakterystyk technicznych palników przeprowadzono przy pomocy instalacji pomiarowej zainstalowanej w kotle OP-650K w *Elektrowni Jaworzno III*.

Badania procesu spalania oraz wyznaczenie charakterystyk technicznych palnika prowadzono w czasie postoju bloku w stanie „zimnym” kotła.

Instalacja pomiarowa przedstawiona jest na rysunku 3.

Instalacja umożliwiła pomiar ilości – V_m (9) i parametry – P_m (5), T_m (11) spalonego oleju oraz ilości – V_p (7,8) i parametry – P_p (4), T_p (11) pary rozpylającej i pary czyszcząco-chłodzącej palnik (1).

Geometrię i strukturę żągwii płomienia – D_{pl} , l_{pl} określano metodą rejestracji fotograficznej (15) i oceny wizualnej (16). Badania procesu spalania przeprowadzono przy użyciu analizatora gazowego sprzężonego z układem pobierczym spalin (18) przystosowanym do wysokich temperatur. Koncentrację sadzy w płomieniu i w strefie popłomiennej określano metodą Bacharacha przy pomocy analizatora gazów typu IMR-300P z komputerem analizującym stopień czerni płomienia.

Koncentrację WWA mierzono chromatografem gazowym sprzężonym ze spektroskopem masowym (19). Temperaturę płomienia i strefy gazów spalinowych mierzono piro-

metrem dwubarwowym oraz przy pomocy sondy aspiracyjnej chłodzonej wodą (17). Temperaturę głowicy palnika mierzono termoparami wspawanymi w badane elementy.

Wyniki badań

To, jakie produkty spalania powstaną, jest ściśle związane z czasem i dokładnością wymieszania paliwa i utleniacza. Szybkość i dokładne wymieszanie gwarantuje zupełne i całkowite spalanie. Złe wymieszanie paliwa z tlenem w długim czasie, gdy cząsteczki gazu węglowodorowego docierają do końca strefy żągwii płomienia, jest przyczyną powstawania przede wszystkim tlenku węgla, cząsteczek sadzy i WWA (wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych).

Dokładność i czas wymieszania powietrza z gazem węglowodorowym jest zależna od wielkości bryły geometrycznej, w której występuje proces rozpylenia i odparowania kropelek paliwa, a więc od wydajności palnika oraz od ilości, prędkości i zawirowania strumienia powietrza.

Wyniki określające wpływ wydajności różnych typów palników na emisję zanieczyszczeń z procesu spalania mazutu przy rozruchu kotłów energetycznych przedstawiono na rysunkach 3–5.

Stężenie CO w spalinach

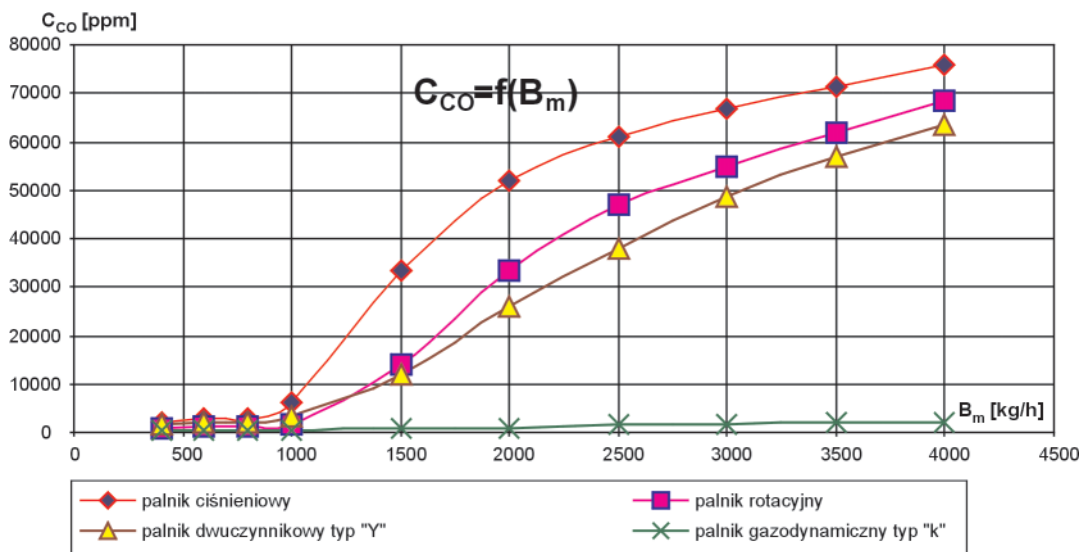
Stężenie CO w spalinach na wylocie z komory kotła w zależności od wydajności palnika przedstawiono na rysunku 4, a zawartość tlenu na rysunku 5.

Stężenie CO w spalinach, jak wynika z przeprowadzonych badań zależy od typu palnika i jego wydajności. Jedynie w przypadku palnika gazodynamicznego z wewnętrznym mieszaniem zawartość CO jest praktycznie niezależna od wydajności. Dla wydajności mniejszych od 1000 kg/h stężenie CO w spalinach jest dla wszystkich typów palników śladowe. Najwyższe wartości rzędu 200 ppm charakterystyczne są dla palników ciśnieniowych typu „Babcock” a najniższe rzędu 60–80 ppm charakterystyczne są dla palników gazodynamicznych.

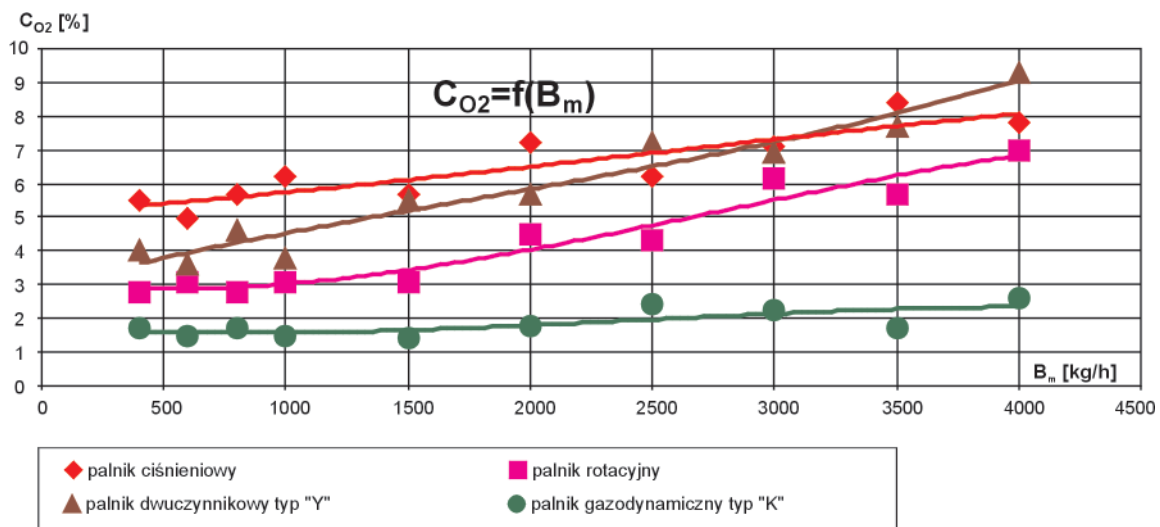
Palniki rotacyjne i dwuczynnikowe typu Y charakteryzują się pośrednimi wartościami emisji CO. Powyżej wydajności 1000 kg/h emisja CO bardzo szybko rośnie i osiąga dla palnika dwuczynnikowego typu Y wartość około 6%, a dla palnika ciśnieniowego wartość rzędu 7,5% przy maksymalnej wydajności 4000 kg/h. Stężenie CO w spalinach dla maksymalnych wydajności palnika gazodynamicznego wynosi około 200 ppm.

Każdy palnik pracował przy nadmiarze tlenu. Stężenie tlenu w spalinach (rys. 5) było najwyższe w przypadku palnika ciśnieniowego i rosło proporcjonalnie z jego wydajnością.

Stężenie tlenu w spalinach było mniejsze dla palnika dwuczynnikowego typu Y, rotacyjnego, a najmniejsze dla palnika gazodynamicznego.



Rys. 4. Stężenie CO w spalinach w zależności od wydajności palnika



Rys. 5. Stężenie O₂ w spalinach od wydajności palnika

Mimo, że ilość powietrza dobierano poszukując minimum CO w spalinach, przy znacznych nadmiarach utleniacza, jest zaskakujące wysokie stężenie CO dla niektórych typów palników. Wytłumaczeniem takiego przebiegu procesu spalania może być fakt, że przy maksymalnych wydajnościach palników w warunkach niedostatecznego wymieszania paliwa z utleniaczem może powstać niedopał, a ponadto powstały w tych warunkach duży płomień, napotyka chłodne ściany komory spalania, na których dochodzi do przerwania procesu spalania.

Sadza w spalinach

Stężenie sadzy scharakteryzowano przy pomocy tzw. liczby sadzowej Bacharacha (L_{SB}).

Przedstawione na rysunku 6 wartości liczby sadzowej (L_{SB}) odnoszą się do strefy popłomiennej na wylocie z komory kotła, gdzie temperatura ośrodka gazowego jest stosunkowo niska i gdzie proces dopalania sadzy został zakończony.

Z przedstawionego wykresu wynika silna zależność liczby sadzowej (L_{SB}) od wydajności w przypadku palników: ciśnieniowych, rotacyjnych, dwuczynnikowych typu Y.

Palniki ciśnieniowe, rotacyjne i dwuczynnikowe posiadają wyraźnie dwa przedziały procesu spalania w zależności od wydajności palnika. Dla wydajności mniejszych od 1000 kg/h w przypadku palników ciśnieniowych proces spalania przebiega z wysoką sprawnością, bliską całkowitemu i zupełnemu spalaniu, gdzie liczba sadzowa (L_{SB}) wynosi około 1. Powyżej wydajności 1000 kg/h następuje gwałtowne pogorszenie procesu spalania, czego efektem jest wzrost L_{SB} do wartości około 6, przy wydajności około 1500 kg/h i dalszy wzrost L_{SB} do 7,8 przy wydajności 4000 kg/h mazutu (palnik ciśnieniowy i rotacyjny).

W palniku gazodynamicznym liczba sadzowa (L_{SB}) bardzo niewiele zależy od wydajności palnika. Zmienia się w przedziale od 0,2 do 0,4 przy zmianie wydajności od 400 do 4000 kg/h mazutu, co świadczy o całkowitym i zupełnym spalaniu w zakresie badanych wydajności palnika.

Można założyć z dużym prawdopodobieństwem, że sadzy towarzyszyć będą węglowodory aromatyczne, a ich stężenie zmieniać się będzie z wydajnością palnika podobnie jak liczba sadzowa.

Zawartość WWA w spalinach

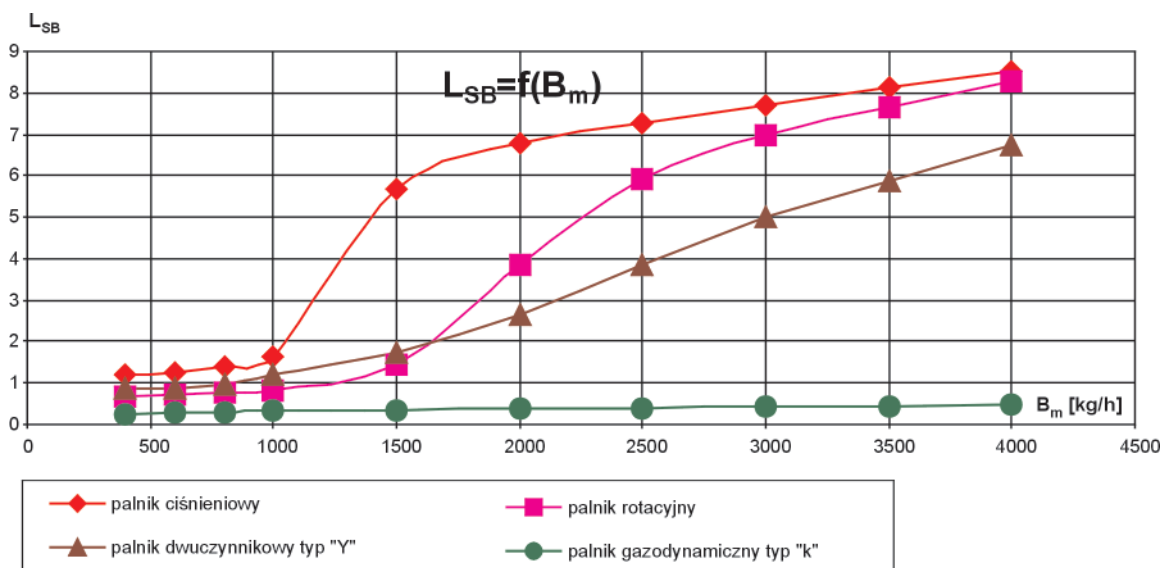
Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne występują praktycznie we wszystkich produktach spalania substancji organicznej.

Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) są jednym z najbardziej szkodliwych substancji powstających przy spalaniu paliw ciekłych. Niektóre z nich: fluaranten, cyklopentan (c, d), piren, benzo(α)piren mają kancerogeny charakter. Przykładowo, współczynnik toksyczności benzo(a)pirenu $C_{20}H_{12}$ jest ponad 6000 razy większy od dwutlenku siarki [6–8].

WWA są to związki zbudowane z dwóch lub więcej pierścieni benzenu lub cyklopentadienu. W spalinach stwierdzono obecność ponad 100 związków WWA. Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne powstają w wyniku niezupełnego spalania substancji organicznych, przy czym nie jest warunkiem koniecznym występowanie struktur aromatycznych w paliwie.

Do głównych czynników decydujących o powstawaniu WWA podczas spalania zaliczany jest niedomiar tlenu, niska temperatura, skład paliwa, obecność związków aromatycznych tzw. prekursorów WWA w paliwie [29].

Mając na uwadze technologię rozpalania kotłów energetycznych oraz warunki pracy olejowych palników rozpał-



Rys. 6. Liczba sadzowa (L_{SB}) w spalinach w zależności od wydajności palnika

kowych, najistotniejszym czynnikiem, który wpływa na proces powstawania WWA podczas spalania ciężkich paliw ciekłych jest niedomiar utleniacza w początkowych obszarach płomienia, gdzie następują procesy odparowania i termicznego rozkładu w gaz węglowodorowy. Z węglowodorów paliwowych w obszarach z niedostatkim tlenu w procesie pirolizy, pirolizy utleniającej lub krakingu powstają lekkie węglowodory w postaci rodników i związków trwałych. Związki te przy braku utleniacza tworzą jednopierścieniowe związki aromatyczne. Powstawanie związków wielopierścieniowych przebiegać może poprzez reakcje jednopierścieniowych węglowodorów z węglowodoraми C_2 , C_3 i cyklizację pierścieni.

WWA opuszczają komorę kotła w postaci gazów, par lub w postaci aerozolu skondensowanego i zaabsorbowanego na cząsteczkach sadzy.

Analityka wykrywania zawartości WWA w spalinach jest bardzo skomplikowana. Najbardziej pracochłonną i kosztowną czynnością analityczną było przygotowanie próbek do analizy instrumentalnej. Próbki gazów o objętości kilku metrów sześciennych poddawane są wieloczynnościowej procedurze analitycznej, której produktem końcowym jest wykroplony kondensat. Uzyskany ekstrakt analizowany jest chromatograficznie i spektroskopowo.

Wyniki uzyskanych w ten sposób oznaczeń jako sumaryczna zawartość WWA przedstawione są na rysunku 7.

Wyniki przedstawiają zależność WWA od rodzaju konstrukcji palnika i jego wydajności.

Największą zawartość WWA stwierdzono w spalinach palnika ciśnieniowego. Wzrost zawartości WWA jest szczególnie duży w zakresie wysokich wydajności palnika. Zawartość WWA w spalinach szybko rośnie ze wzrostem wydajności palnika dwuczynnikowego typu Y i palnika rotacyjnego.

Wzrost ten jest związany z niedoborem tlenu w strefie przejścia paliwa ciekłego w gaz węglowodorowy.

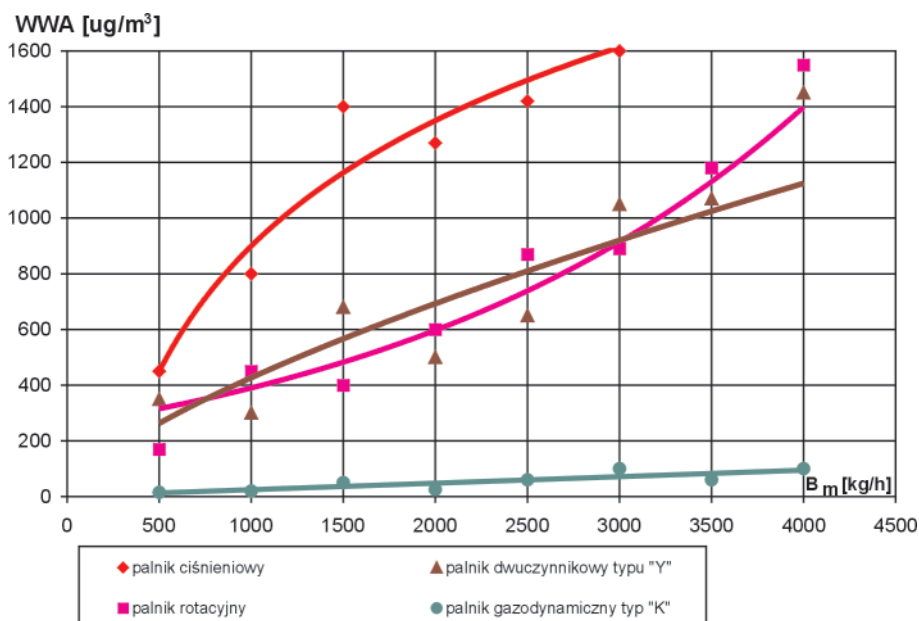
Z powodu niedoboru utleniacza przebiegają zamiast procesów utleniających procesy krakingu i cyklizacji węglowodorów. Przeciwnieństwem tych zjawisk są procesy przebiegające przy spalaniu mazutu za pomocą palnika gazodynamicznego. Ponieważ niezależnie od wydajności palnika procesy przejścia fazy ciekłej w fazę gazową przebiegają w atmosferze utleniającej, bliskiej stechiometrycznej, nie występują zjawiska krakingu lecz procesy wstępnego utlenienia i powstania lekkich węglowodorów i rodników, które prowadzą do powstania CO_2 i H_2O . Ze wzrostem wydajności palnika zawartość WWA w spalinach palnika gazodynamicznego bardzo niewiele się zmienia.

Stężenie tlenków azotu

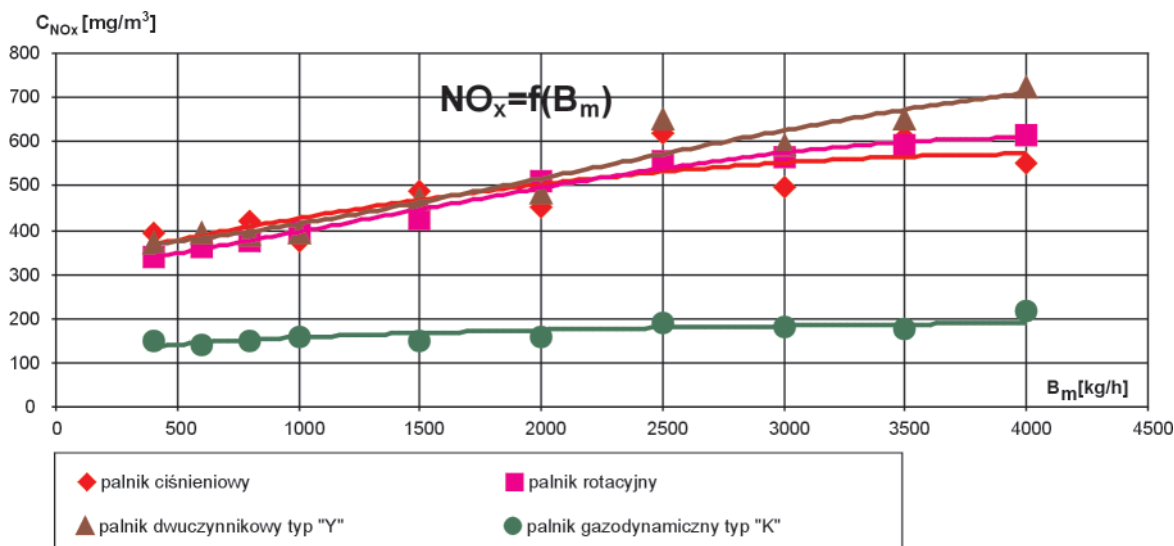
Tlenki azotu NO_x przy spalaniu paliw płynnych pochodzą głównie z utleniania azotu atmosferycznego. Szybkość powstawania takich tlenków azotu zależy przede wszystkim od temperatury płomienia i liczby nadmiaru powietrza λ .

Z rysunku 8 wynika, że stężenie NO_x w spalinach palników ciśnieniowych, dwuczynnikowych i rotacyjnych jest zbliżone i rośnie z wydajnością palnika od wartości 400–500 mg/nm^3 przy wydajności 400 kg/h do wartości 600–700 mg/nm^3 przy wydajności 4000 kg/h.

Stężenie NO_x w spalinach palnika gazodynamicznego zmienia się od wartości 150 mg/nm^3 przy wydajności 400 kg/h do wartości 200 mg/nm^3 przy wydajności 4000 kg/h. Wynika to z charakteru płomienia w palniku gazodynamicznym, w którym nie występują obszary bardzo wysokich temperatur przy nadmiarze utleniacza, co szczegółowo omówiono w [8–9].



Rys. 7. Stężenie WWA w spalinach w zależności od wydajności palniki



Rys. 8. Zależność zawartości NO_x w spalinach od wydajności palnika

Wnioski

Stwierdzono wysokie emisje substancji toksycznych z niektórych typów palników rozpałkowych w fazie rozruchu kotłów energetycznych dużej mocy. Badane typy palników jedynie w zakresie małych obciążeń charakteryzują się niską emisją badanych składników toksycznych spalin (CO, sadza, NO_x).

Wzrost obciążenia palników powyżej 1500 kg/h mazu powoduje znaczny wzrost stężeń składników toksycznych spalin.

Palnik gazodynamiczny jako jedyny spełnia wymagania rozpałkowego palnika niskoemisyjnego w zakresie obciążeń 400–4000 kg/h.

Płomień o jednolitej bryle płomienia, co jest charakterystyczne dla palników ciśnieniowych, palników dwuczynnikiowych typu Y stabilizowanych przy pomocy silnie zawieranego powietrza i palników rotacyjnych przy dużym obciążeniu palnika, nie zapewnia właściwego mieszania się powietrza z paliwem, co w konsekwencji prowadzi do niecałkowitego i niepełnego spalania. Występujące w tych palnikach obszary bardzo wysokich temperatur są też przyczyną wysokiej emisji NO_x.

Palniki o rozczłonkowanej bryle płomienia posiadają zdecydowanie lepsze warunki aerodynamiczne do właściwego doprowadzania i wymieszania utleniacza z paliwem, nie powstają też obszary wysokich temperatur, niezależnie od wydajności palnika.

Mając na uwadze fakt, że proces rozruchu kotłów energetycznych dużej mocy jest wielogodzinny, postuluje się kontrolę emisji zanieczyszczeń z palników rozpałkowych. Rozważenia wymaga konieczność opracowania norm emisji dla fazy rozruchu kotłów energetycznych dużej mocy.

LITERATURA

- [1] Kruczek S.: Kotły. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001
- [2] Knorre G.F.: Topocnyje processy, Gosenergizdort 1959
- [3] Chzmal'jan D.M.: Vvedenije v teoriju gorenija Izd-vo MZJ 1953
- [4] Zel'dović J.B.: Teorija gorenija i detonacji gazov. IZD-VO ANSSSR 1944
- [5] Chitrin L.N.: Fizika gorenija i vzryva. IZD-VO MGU 1957
- [6] Słupek S.: Proces spalania wodnych emulsji paliwa ciekłego ZN AGH, Mat. Odl., 1997, z. 75
- [7] Koval A.A., Shaler A., Słupek S., Kokkinos A., Miskovsky N.M.: Essenhigh: Combustion Characteristic of Oil-Water — Air Emulsion. Paper prepared for Research of the Symposium Los Angeles, Nov. 1975
- [8] Słupek S.: O możliwości ograniczenia szkodliwości produktów spalania paliw ciekłych. *Hutnik* 1984, nr 11
- [9] Karcz H., Jodkowski W., Wojtiuk Z., Andryjowicz C.: Ekologiczne spalanie ciężkich paliw płynnych. Krajowa Konferencja Energetyczna. Poznań-Rydzyń, 20–22 października 1999
- [11] Banaszak T., Miller R.: Modelowanie kinetyki powstania WWA w płomieniu. Konferencja naukowo-techniczna „Energetyka 2002”. Wrocław, 6–8 listopada 2002
- [10] Karcz H., Zembruski M.: A new concept of low pressure atmosphere, XI-th International Symposium on Combustion Processes. Międzyzdroje; September 1981
- [12] Wojtiuk Z.: Wdrożenie i eksploatacja olejowych palników rozpałkowych „TKW Combustion” na kotłach OP-380 nr 1 i 2 oraz OP-430 nr 4 w *Elektrociepłowni Kraków SA*. Seminarium Naukowo-Techniczne w EC Kraków pt.: „Instalacje olejowych palników rozpałkowych wraz z systemem dozoru płomienia w kotłach energetycznych”. Kraków, maj 1999
- [13] Karcz H.: Sposób i układ zapłonu ciężkich paliw płynnych w komorze spalania kotła energetycznego. Zgłoszenie patentowe z dnia 18 stycznia 1997
- [14] Karcz H., Sikorski W., Adynowski J., Sokołowski P.: Zapłon ciężkich paliw płynnych w komorach kotłów energetycznych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej* Nr 225/2000, z. 49 ss. 219–229. GRE 2000, VII Forum Energetyków „Pod Szyn-dzielnią”. Opole 2000

- [15] Karcz H., Adynowski J., Sokołowski P.: Systemy zapłonu palników olejowych. *Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej* nr 56, Seria Konferencje" nr 10, ss. 399—406, „Energetyka 2000”. Wrocław 8—10 listopada 2000
- [16] Karabin A.J.: Sziganije židkovo topliva v promyšlennych ustanovkach. Metalurgizdat 1951
- [17] Kac'nelson B.D., Švab V.V.: Issl'eclovaniye racpyliraniya mazula Sb „Issl'eclovaniye processov gorenija natural'nogo topliva” Gosenergoizdat 1948
- [18] Bacerić V.J.: O rlijanj predvaritel'nogo isparenija na palnotu i ustoičnost gorenija papylennogo topliva Izd-vo AN.SSSR OTN N.2 — 1958
- [19] Kowalewicz A.: Tworzenie mieszanki i spalania w silnikach o zapłonie iskrowym. KKiŁ, Warszawa 1984
- [20] Law C. K.: Recent advances in droplet vaporization and combustion. *Prog in Energy and Combust. Science* 1982, Vol. 8
- [21] Faeth G.M.: Current status of droplet and liquid comd. *Prog in Energy and Combust. Science* 1997, Vol 3
- [22] Wilk R., Zaliński Z.: Badania zjawiska spalania kropli ciężkiego paliwa ciekłego. *Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, Seria: Energetyka* nr 81, Gliwice 1982
- [23] Kulagin L. V., Ochotnikov S.S.: Sziganie tjażelych žadkich topliv. Nedra, Moskva 1967
- [24] Williams FR.A.: Teorija Gorenija. Izd. Nauka, Moskva 1971
- [25] Umemura A., Ogawa S., Oshima N.: Analysis of the interaction between two burning droplets. *Combustion Science and Flame* 1981, 41
- [26] Twardus E, Brzustowski T.: *Combustion Science and Technology* 1978, 17
- [27] Glassman J.: Combustion Academic Press, New York, San Francisco, London 9 1977 [35] Nelson H F.: Nitric oxide formation in combustion AJAA Vol. 14, No. 9, 1996
- [28] Levis B., Elbe G.: Von, combustion flames and Explosions of Gases, New York — London Academy Press 1961
- [29] Banaszczak T., Miller R.: Modelowanie kinetyki powstawania WWA w płomieniu. Konferencja Naukowo-Techniczna „Energetyka 2002”. Wrocław, 6—8 listopada 2002

