



Badania spalania emulsji paliwowych

Anatoliy Pavlenko^{}, Aleksander Szkarowski^{*,**}*

*Sylwia Janta-Lipińska^{**}*

^{}St. Petersburg State Polytechnical University*

*^{**}Politechnika Koszalińska*

1. Wstęp

Obecnie prawie wszystkie rafinerie doskonalały technologie przeróbki ropy. Bardziej głęboka przeróbka surowca powoduje zmiany szeregu fizyko-chemicznych właściwości mazutu, będącego końcowym produktem. Wskutek tych zmian, a także procesów zachodzących podczas następnego przechowywania i transportowania mazutu, użytkownik otrzymuje paliwo o podwyższonej zawartości wilgoci. Nawodniony mazut ma zwiększoną temperaturę zapłonu oraz inne odchylenia od norm. Podczas jego spalania występuje naruszenie wskaźników przewidywanych w karcie pracy kotła, zwiększa się niezupełność spalania, powierzchni wymiany ciepła występują osady cząstek koksu, obniżona zostaje stabilność spalania aż do zerwania płomienia.

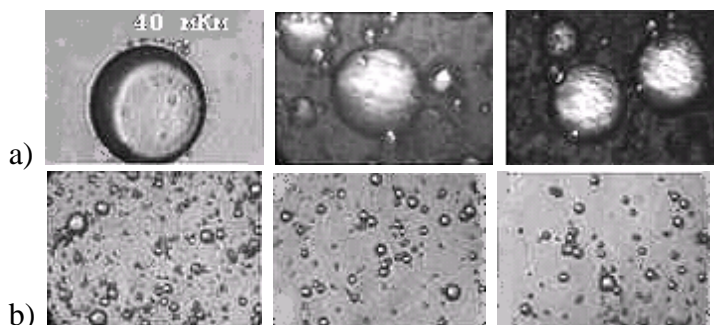
Cechy charakterystyczne spalania mazutu polegają na tym, że w celu zwiększenia szybkości i zupełności spalania, sterowalności płomienia, wypełnienia paleniska i efektywnego wykorzystania powierzchni ekranowych, stopień dyspergowania paliwa powinien być możliwie jak najwyższy. W przypadku rozpylania 1 cm^3 płynu sumaryczna powierzchnia powstałego aerozolu, zawierająca frakcje od $0,5 \mu\text{m}$ do $500 \mu\text{m}$, wynosi około 1200 cm^2 , czyli zwiększa się 250 razy. Drobne rozpryskiwanie paliwa skraca czas potrzebny do przebiegu procesów wymiany ciepła i masy, zmniejsza przed-płomieniową strefę. Jednocześnie przyspieszane są termochemiczne procesy odgazowywania stałych koksowych pozosta-

łości kropli. Jednak istniejące wtryskiwacze palników nie są zdolne zapewnić rozpylania mazutu na poziomie poniżej 100 μm .

Za kompleksowe rozwiązanie tych problemów uznaje się spalanie paliwa w postaci emulsji wodno-mazutowej (WME). W strefie wysokiej temperatury paleniska kropla emulsji wybucha, co powoduje powtórne dyspergowanie paliwa. Im więcej drobnych kropli wody w emulsji tym bardziej zauważalny jest ten efekt. W kropli emulsji o „zwykłym” wymiarze zawiera się kilka tysięcy mikrokropli wody. Gdy rozpylanie paliwa staje się bardziej drobne to ilość tych cząsteczek wody w kropli emulsji staje się mniejsza. To znaczy powstaje sprzeczność: rozpylanie mazutu powinno być bardziej drobne, ale to zmniejsza efekt wtórnego dyspergowania kropli emulsji w płomieniu.

Rozwiązaniem jest wstępne przygotowywanie mazutu do spalania, poprzez stworzenie jednorodnie rozproszonej, drobno dyspergowanej frakcji wody występującej w paliwie oraz na zniszczeniu kwazikryształicznych struktur w nim zawartych [1]. Ten proces może być usprawniony poprzez homogenizację mieszaniny wodno-mazutowej za pomocą opracowanego przez autorów specjalnego urządzenia wirowego. Nawet przy bardzo drobnym dyspergowaniu paliwa to zapewnia wymaganą ilość centrów mikrowybuchów w każdej kropli powstałej emulsji (rys. 1). Temu sprzyja kontrolowane zwiększenie zawartości wody w emulsji.

Efekty intensyfikacji procesu poprzez homogenizację WME przy pomocy urządzenia własnej konstrukcji były badane dla różnych kotłów co przedstawia rys. 2, na którym przedstawiono obraz spalania mazutu M100 w palenisku kotła parowego DKVR-2,5. Rys. 2-a obrazuje spalanie przy standardowej wilgotności (ok. 3%) i zwykłej technologii emulgowania zawartej wody. Rys. 2-b przedstawia wizerunek paleniska przy spalaniu homogenizowanej WME o wilgotności 7%, natomiast rys. 2-c WME o wilgotności 15%. Można wizualnie zauważyć zwiększenie świetlności płomienia, jego poszerzenie i lepsze wypełnienie paleniska, co świadczy o bardziej intensywnym i zupełnym spalaniu paliwa przy większej średniej temperaturze.



Rys. 1. Struktura WME przy zwiększeniu dyspergowania zawartej wody: a – przy tradycyjnych sposobach emulgowania; b – przy homogenizacji z wykorzystaniem urządzenia wirowego

Fig. 1. Structure of a DOE fuel at increase in dispersing of containing water: a – at traditional ways of emulsification; b – at homogenization with use of the vortex device

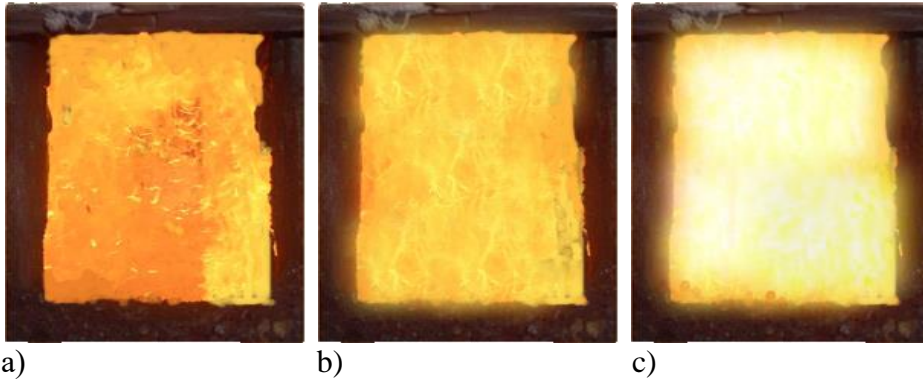
Wskutek wspomnianych mikrowybuchów, powstających w palenisku turbulentnych pulsacji i zwiększenia kropli paliwa, płomień bardziej równomiernie wypełnia komorę paleniska. Pole temperaturowe paleniska wyrównuje się: lokalne maksima temperatury są mniejsze, lecz średnia temperatura w palenisku wzrasta. Zwiększa się świetlność płomienia, rośnie powierzchnia promieniowania, istotnie zmniejsza się chemiczna niezupełność spalania. To z kolei pozwala zmniejszyć nadmiar powietrza na spalanie tym samym obniżając straty ciepła spalinowe.

Płomień palącej się w palenisku WME staje się bardziej przezroczystym, podobnym do płomienia paliwa gazowego. Temperatura gazów spalinowych w porównaniu ze zwykłym mazutem obniża się o 30...35°C. Zmiany parametrów procesu spalania i składu spalin również świadczą o ogólnym zwiększeniu efektywności zużycia paliwa.

2. Cele badań

Mazut składa się z wielu substancji palnych o różnej wartości opałowej, którym brakuje wiarygodnych danych. Dlatego też wartość opałowa mazutu prawie niemożliwa jest do określenia w sposób analityczny w oparciu o znany skład, zatem najczęściej określa się ją metodami laboratoryjnymi.

Spaliny mazutu odprowadzane do atmosfery zawierają substancje szkodliwe dla człowieka i środowiska naturalnego. Ich emisja w znacznym stopniu może zostać obniżona poprzez optymalne sterowanie procesem spalania.



Rys. 2. Obraz paleniska kotła DKVR-2,5 przy spalaniu mazutu:

a – mazut M100; b – WME 7%; c – WME 15%

Fig. 2. Photo of furnace space of a DKVR-2,5 boiler when burning black oil:

a – M100 black oil; b – 7% DOE fuel; c – 15% DOE fuel

Jednymi z najbardziej niebezpiecznych substancji są tlenki azotu. Spalanie mazutu ze współczynnikiem nadmiaru powietrza $\alpha = 1,1 \dots 1,2$ powoduje, że w jądrze płomienia rozwija się wysoka temperatura ze znacznym spadkiem od środka ku peryferii. Procesom krakingu w jądrze płomienia towarzyszy powstawanie prostych łatwopalnych substancji z małym wydzieleniem sadzy. Jednak zmniejszenie czasu spalania może zapewnić istotne obniżenie emisji NO_x tylko w przypadku intensywnego odprowadzania ciepła ze strefy aktywnego spalania oraz od spalin po zakończeniu spalania. Takie kompleksowe oddziaływanie na proces powstawania tlenków azotu może zapewnić właśnie spalanie paliwa w postaci WME.

Główna część NO_x (do 80%) przy spalaniu powstaje w strefie maksymalnego wydzielania się ciepła. Zatem zwiększenie wydzielania się ciepła w palenisku kotła skutkuje zwiększeniem emisji tlenków azotu. Dlatego potrzebna jest optymalizacja wskaźników procesu spalania w celu zapewnienia warunków maksymalnego wydzielania się ciepła przy minimum emisji NO_x .

3. Wyniki badań

Wyniki w zakresie emisji NO_x ze spalinami emulsji wodno-mazutowej uzyskano z wykorzystaniem metod planowania eksperymentów [2–6]. Wstępnie przyjęto, że zawartość NO_x w spalinach wyznaczana jest poprzez: stosunek mazutu i wody w emulsji (x_1), udział substancji powierzchniowo czynnej (x_2), czas spoczynku przed wykorzystaniem emulsji (x_3) oraz współczynnik nadmiaru powietrza (x_4). Wymienione czynniki zmieniane były w zakresie: $x_1 = 0,6 \dots 1,0$; $x_2 = 0 \dots 30\%$; $x_3 = 0 \dots 12 \text{ h}$; $x_4 = 1,0 \dots 1,5$.

Za niezależną zmienną y_1 przyjęto zawartość NO_x w spalinach. W celu wykluczenia błędu systematycznego ustalono przypadkowy porządek wykonania doświadczeń w czasie. Żeby opisać badaną wieloczynnikową zależność wybrano ortogonalny wielo-kompozycyjny plan 2^4 oraz model kwadratowy.

Po statystycznej obróbce wyników eksperymentów, wykonanej według ogólnie przyjętych metod, otrzymano równanie regresji dla obliczania parametru optymalizacji z dokładnością $\pm 0,7\%$ (obszerne ilościowe wyniki pomiarów w pracy zostały pominięte z uwagi na jej objętość):

$$\begin{aligned} y_1 = & 1,387 - 3,6 \cdot 10^{-2} x_1 + 4,08 \cdot 10^{-2} x_4 + 8,54 \cdot 10^{-3} x_3^2 - \\ & - 2,187 \cdot 10^{-2} x_1 \cdot x_2 - 1,94 \cdot 10^{-2} x_1 \cdot x_3 - 2,187 \cdot 10^{-2} x_1 \cdot x_4 + \\ & + 1,18 \cdot 10^{-2} x_2 \cdot x_4. \end{aligned} \quad (1)$$

Analiza wyników pokazuje, że największy wpływ na emisję NO_x ma stosunek mazutu i wody w emulsji, czyli wraz ze wzrostem zawartości wody w WME stężenie NO_x w spalinach zmniejsza się. Porównanie procesu spalania mazutu i WME świadczy o tym, że drobno dyspergowana woda wywiera zarówno fizyczny, jak i chemiczny wpływ na procesy paleniskowe.

Oddziaływanie fizyczne polega na wspomnianym zjawisku mikrowybuchów kropelek wody zawartych w kropli emulsji paliwowej. Przy tym zachodzi dodatkowe mieszanie paliwa z powietrzem. Dysocjacja pary wodnej wyswobodzonej w wyniku mikrowybuchów, skutkuje wzrostem zawartości aktywnych rodników w strefie spalania. Przede wszystkim rosnące stężenie rodnika wodorotlenowego znacznie przyspiesza spalanie

trudnopalnego tlenku węgla. Ponad to spalanie WME jest bardziej doskonałe w wyniku reakcji między parą wodną a rozżarzonym węglem. To wszystko pozwala na zmniejszenie nadmiaru powietrza praktycznie do krytycznych wartości, a przez to zwiększenie sprawności kotła.

Wzrost ilości aktywnych centrów reakcji intensyfikuje spalanie i odpowiednio zmniejsza zawartość pierwiastkowego tlenu w strefie powstawania tlenków azotu. Jest to drugi mechanizm obniżenia emisji NO_x przy spalaniu WME. Wynika to wprost z „termicznej” teorii utleniania azotu. Szybkie i zupełne spalanie paliwa sprzyja również zmniejszeniu emisji sadzy.

Zależność emisji NO_x od współczynnika nadmiaru powietrza ma naturalny ekstremalny charakter. Na początku wraz ze wzrostem α zawartości NO_x w spalinach zwiększa się do wartości maksymalnej, co wyjaśnia się poprzez wzrost stężenia wolnego tlenu w strefie reakcji. Przy dalszym wzroście α emisja NO_x w większym stopniu zależy od zmniejszającej się temperatury płomienia i dlatego się zmniejsza.

Analogicznie zbadano wpływ tychże czynników na wartość opałową emulsji (niezależna zmienna y_2). Po obróbce wyników eksperymentów uzyskano równanie regresji do obliczania parametru optymalizacji z dokładnością $\pm 1\%$:

$$\begin{aligned}
 y_2 = & 6976,946 + 483,42x_1 - 339,77x_2 + 248,28x_3 + 217,07x_4 - \\
 & -246,9966x_1^2 - 222,0042x_2^2 + 552,7617x_3^2 - 421,9439x_4^2 - \\
 & -176,25x_1 \cdot x_2 - 126,25x_1 \cdot x_3 - 103,75x_1 \cdot x_4 - 662,5x_2 \cdot x_3 \\
 & -125x_2 \cdot x_4 - 187,5x_3 \cdot x_4.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Analiza wyników wykazuje, że największy wpływ na wartość opałową paliwa wywiera ten sam czynnik – zawartość wody w emulsji. Oczywiście jest wniosek, że wraz ze zwiększeniem zawartości dyspergowanej wody kaloryczność WME obniża się. Jednak obserwuje się wzrost temperatury w palenisku potwierdzony w eksperymencie jakościowo i ilościowo. Wyjaśnia to pozytywny wpływ drobno dyspergowanej wody na proces dalszego rozdrabniania kropli mazutu w płomieniu.

W palenisku powstaje strumień o znacznie większej dyspersyjności, a kropelki paliwa o mniejszych wymiarach szybciej wyparowują. Spalanie przebiega szybciej, z mniejszą niezupełnością fizyczną i che-

miczną, płomień staje się krótszy, ale lepiej wypełnia palenisko na całej szerokości. Z kolei proces wymiany ciepła na drodze promieniowania przebiega bardziej intensywnie. Dlatego, mimo, że wartość opałowa WME obniża się w porównaniu z mazutem, analiza bilansowa pracy kotła wykazuje niewątpliwy pozytywny efekt.

Jednak zwiększenie zawartości wody w emulsji jest ograniczone. Doświadczalnie zostało potwierdzone, że maksymalny udział wody stanowi 21%. Dalszy wzrost wilgotności paliwa powoduje nieuzasadnione zmniejszenie wartości opałowej, co skutkuje obniżeniem sprawności kotła i praktycznie nie wpływa na emisję NO_x .

Ponieważ uzyskane zależności regresyjne dla badanych wskaźników okazały się adekwatne, pozwoliło to zastosować je do sterowania spalaniem WME w celu optymalizacji pracy kotła. Za funkcję celu wybrano wartość opałową. Opracowano model optymalizacyjny spalania emulsji wodno-paliwowej z maksymalnym wydzielaniem ciepła.

4. Wykorzystanie wyników

Uzyskane wyniki badań wykorzystano w celu poprawy sprawności cieplnej rekonstruowanego kotła KSV-2,9G. Objętość komory paleniskowej kotła wynosi 48 m^3 ; powierzchnie grzewcze – 110 m^2 ; ład części rurowej $1,6 \text{ m}^3$; wydajność wodna 56 t/h . Ściany paleniska są ekranowane gładkimi rurami z rozstawem 60 mm .

Kocioł wyposażony jest w dwa palniki z mechanicznymi wirowymi wtryskiwaczami. Całość powietrza potrzebnego do spalania podaje się do korzenia płomienia przy pomocy sterujących registrów łopatkowych. Strumienie ciepłe mierzono termicznymi czujnikami w 12 punktach. Temperaturę spalin określano pirometrem optycznym. W pierwszej serii eksperymentów spalano mazut M100, natomiast w drugiej – WME o zawartości wody $10...30\%$.

Wykonane testy bilansowe kotła pozwoliły skonfrontować ilość ciepła przekazaną w palenisku. Różnica na korzyść emulsji wodno-mazutowej wzrastała wraz z czasem pracy kotła i osiągała wartość 30% . Wyjaśnia się to zwiększającym się zabrudzeniem powierzchni kotła osadami popiołu i koksu w przypadku pracy na czystym mazucie. Poza tym stwierdzono istotną różnicę danych obliczeniowych i wyników eksperymentów, zwłaszcza dla spalania WME. Efekty spalania emulsji nie są

uwzględniane w żadnej z rozpowszechnionych metod obliczeń procesów paleniskowych.

Osady na powierzchniach ekranowych i ich wpływ na wymianę ciepła szybko zwiększają się wraz z czasem pracy kotła na mazucie. W wykonanych badaniach ustalono, że już po pierwszych trzech godzinach spalania mazutu M100 na powierzchniach rur ekranowych obserwowano osady, obniżające efektywność przekazywania ciepła do 60...70% w porównaniu z czystą powierzchnią (rys. 3, a). A po 30 godzinach sprawność cieplna ekranów wynosiła tylko 30%. Natomiast spalanie emulsji nie powodowało osadów popiołowych na rurach (rys. 3, b). Maksymalną średnią temperaturę w palenisku uzyskano przy wilgotności emulsji 15...20% (w zależności od obciążenia kotła).



a)



b)

Rys. 3. Stan powierzchni ekranowych kotła: a – przy spalaniu mazutu M100; b – przy spalaniu WME o wilgotności 17%

Fig. 3. Condition of screen surfaces of a boiler: a – when burning M100 black oil; b – when burning 17% DOE fuel

5. Wnioski

Optymalna organizacja procesu spalania emulsji wodno-mazutowej pozwala zmniejszyć emisję tlenków azotu do 60% poprzez zmniejszenie nadmiaru powietrza, do 50% poprzez intensyfikację odprowadzania ciepła oraz do 40% stosując wprowadzenie pary wodnej lub wtryskiwanie wody do płomienia. Efekt zmniejszenia emisji NO_x przy jednoczesnym stosowaniu metod nie jest sumowany.

Powyższe efekty ekologiczne towarzyszą ogólnemu usprawnieniu pracy kotła, zwiększeniu efektywności wykorzystania paliwa. Wydłuża się czas sprawnej i bardziej wydajnej eksploatacji sprzętu, przestaje stanowić problem zawarta w mazucie woda, łatwo dokonuje się utylizacji wód powstających w technologii zużycia mazutu, które nie mogą być odprowadzane do kanalizacji.

Literatura

1. Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И.: *Теплофизические процессы в эмульсиях*. Наукова думка. Киев 2005.
2. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В.: *Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов*. Мир. Москва 1977.
3. Konkol J.: *Wprowadzenie do praktycznego planowania eksperymentu*. Materiały StatSoft Polska, 43–58 (2008).
4. Strzałkowski A., Śliżyński A.: *Matematyczne metody opracowania wyników pomiarów*. PWN, Warszawa 1973.
5. Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN, Warszawa 1984.
6. Polański Z.: *Badania empiryczne – metodyka i wymagania komputerowe* (rozdz. IV monografii Współczesna metrologia- zagadnienia wybrane; praca zbiorowa pod red. J. Borzykowskiego). WNT, Warszawa 2004.

Research on Burning of Water Black Oil Emulsions

Abstract

Now the majority of oil refineries seek to improve technologies of oil refining. Deeper processing of raw materials leads to change of physical and chemical indicators of the black oil being the final product. As a result when burning black oil indicators of work of a boiler are broken, incompleteness of combustion, adjournment of particles of coke on heating surfaces, and also decrease in stability of burning increases up to torch failure.

The complex solution of this problem is fuel burning in the form of a water black oil emulsion (DOE fuel). In a zone of high temperature of a fire chamber the drop of an emulsion blows up that leads to secondary dispersion of fuel. Than more small drops of water contain in an emulsion, especially this effect is noticeable. Therefore is necessary preliminary preparation of fuel oil by preparation of uniformly distributed and small dispersed fraction of water which contains in fuel and by destruction of the quasicrystal structures which were in it.

Researches of formation of NO_x when burning DOE fuel showed that the black oil and water ratio in an emulsion has the greatest impact on concentration of oxides of nitrogen. Influence of the same factors on combustion value of an emulsion was researched also. The analysis of data showed that the same factor the content of water in an emulsion has the greatest impact on the combustion value of fuel. Though the increase of the dispersed water content reduces combustion value of fuel, temperature growth in a fire chamber was observed. It is explained by positive influence of small dispersed water on process of further dispersion of fuel oil in a flame.

The received results of researches were used in practice for increase in efficiency of the reconstructed boiler KSV-2,9G. The gained ecological effect accompanied the general improvement of work of a boiler and increase of efficiency of use of fuel.

Słowa kluczowe: spalanie, emulsje wodno-mazutowe, tlenki azotu NO_x

Key words: combustion, water black oil emulsions, nitrogen oxides NO_x