

Jedna kolumna działu jest dotowana przez WFOŚiGW w Katowicau

Agnieszka Kijo – Kleczkowska¹⁾ Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Cieplnych, Zakład Kotłów i Termodynamiki

Analiza procesu atomizacji zawiesinowego paliwa węglowo-wodnego

Suspensja węglowo-wodna (w-w) utworzona jest najczęściej z mułu poflotacyjnego o zawartości wilgoci 20 - 40%, wartości opałowej 8 - 10 MJ/kg przy zawartości popiołu 20 - 35%. Koncentracja fazy stałej rozdrobnionego węgla, zapewniająca stabilność takiego "paliwa", zależy od wielkości ziaren węgla i stopnia jego metamorfizmu. Dla węgli z dużą zawartością części lotnych suspensja wykazuje dużą lepkość przy wilgotności poniżej 50% i ziarnach, których pozostałość na sicie R_{an}=20-50%. Z takim składem frakcyjnym węgli o zawartości części lotnych 10-15%, ich graniczna wilgotność zmniejsza się do 40-45%, a dla antracytów, z ich małą wilgotnością higroskopijną, jest jeszcze niższa. Jednak przy takich zawartościach wilgoci suspensja nie może być traktowana jako ciecz newtonowska; jej lepkość, a tym samym płynność, silnie zależy od wilgotności. Minimalna wilgotność, przy której suspensja może być transportowana rurociągiem i traktowana jako układ dyspersyjny z dostateczną stabilnością wynosi dla polskich węgli energetycznych 45 - 50%.

Zainteresowanie suspensjami w-w zostało wymuszone koniecznością rozwiązania problemu transportu hydraulicznego rozdrobnionego węgla w latach 30. Koncentracja węgla w tych zawiesinach dochodziła do 40% i odznaczała się grubym uziarnieniem, co utrudniało bezpośrednie wykorzystanie w energetyce. Ponowny wzrost zainteresowania tą problematyką pojawił się w latach 70. i wywołany był ówczesnym kryzysem energetycznym. Podjęto szerokie prace badawcze nad wykorzystaniem suspensji w-w jako zamiennika oleju opałowego. Prace prowadzone do chwili obecnej zaowocowały szeregiem technologii, opisanych w bogatej literaturze z zakresu preparacji, spalania oraz zastosowania zamienników paliw ciekłych [1-28]. Duże osiągnięcia w dziedzinie badania procesów spalania suspensji w-w uzyskano w byłym ZSRR, zwłaszcza w utylizacji zawiesin węglowych transportowanych rurociągami [15,19].

Uzasadnienie konieczności prowadzenia badań w tej dziedzinie w naszym kraju wynika ze struktury paliwowej polskiej energetyki, w której 97% energii elektrycznej wytwarza się z węgla. Taki niekorzystny bilans paliwowy powoduje nadmierne obciążenie środowiska, wywołane emisją NO_v, SO₂, CO₂ i pyłów, a także powiększeniem powierzchni koniecznych do składowania narastających stałych odpadów paleniskowych. Z tego powodu górnictwo, zmuszane dostarczać energetyce coraz lepsze paliwo, musi stosować coraz głębsze wzbogacanie węgla. Powoduje to ciągły wzrost odpadów w postaci mułów poflotacyjnych.

Zgodnie z literaturą, właściwości reologiczne określają zdolność suspensji węglowo-wodnej do transportu. Efektywność tego procesu uzależniona jest od rodzaju węgla, z którego utworzona jest suspensja, jego rozkładu ziarnowego i koncentracji. Bardzo dobre właściwości reologiczne cechują suspensję składającą się z węgla o właściwościach hydrofobowych, czyli dużych zdolnościach do odpychania od siebie wody. Stosunkowo małe powinowactwo do wody predysponuje taki surowiec do tworzenia trwałych, wysokoskoncentrowanych suspensji węglowo-wodnych. Węgle, które posiadają właściwości hydrofobowe cechują się zawartością węgla pierwiastkowego rzędu 85-91%. Według modelu strukturalnego Hirscha węgiel taki ma strukturę bitumiczną, a jego maceraty posiadają zdolność refleksyjną. Zdolność ta określa stopień uwęglenia, a jej optymalna wartość oscyluje wokół 1%. Ważnym parametrem z punktu widzenia przydatności węgla do tworzenia paliw zawiesinowych jest stosunek wagowy wegla pierwiastkowego do tlenu pierwiastkowego. Zazwyczaj wzrost tego stosunku powoduje zwiększenie zdolności węgla do jego trwałego łączenia się z wodą. Tworzenie suspensji z węgli charakteryzujących się właściwościami hydrofilowymi (refleksyjność 0,7-0,8% oraz zawartość węgla pierwiastkowego do 85%) wymaga przeprowadzenia jego preparacji, która wprowadza trwałe zmiany właściwości powierzchni ziaren węgla.

Badania zachowania się zawiesin węglowo–wodnych

Celem badań była analiza oddziaływania typu węgla, wilgotności paliwa, ciśnienia powietrza i średnicy dyszy rozpylającej na proces atomizacji i rozpylania suspensji węglowo-wodnej. Optymalny rozkład uziarnienia powinien gwarantować najlepsze upakowanie ziaren węgla w suspensji.

W celu precyzyjnej interpretacji wyników badań wykorzystano wykonaną uprzednio analizę techniczną i elementarną oraz petrograficzną i porozymetryczną zastosowanych węgli (tab. 1-3).

¹⁾ e-mail: kijo@kkt.pcz.czest.pl

²⁾ Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2008 oraz 2008-2010 jako projekty badawcze.



Tabela 1

Analiza techniczna i elementarna węgli wykorzystanych w badaniach (stan analityczny)

Typ węgla	Analiza techniczna				Analiza elementarna			
	części lotne	wilgoć całkowita	popiół	wartość opałowa	Ca Ha	На	Sa	Oa
	Va	Wa	Aa	Qa				
	%	%	%	kJ/kg	%	%	%	%
Brunatny	42,5	14,5	18,5	18460	46,0	4,4	1,1	21,4
Kamienny typ 31.2	27,9	12,4	16,7	21558	55,8	4,5	1,44	12,2
Antracyt typ 42	3	1,5	2,5	39350	97,0	1,7	0,23	1,01

Tabela 2

Objętość Porowatość Średni Gęstość Gestość Powierzchnia właściwa całkowita właściwa promień pora rzeczywista pozorna Typ węgla porów % mm³/g m²/g nm g/cm³ g/cm³ 425,768 20,747 37,77 3807,434 0,887 0,967 Brunatny Kamienny typ 31.2 13,75 80 535 20,097 834,490 1,196 1,263 5,27 44,061 8,6 2,968 1,707 1,979 Antracyt

Wyniki analizy porozymetrycznej węgli

Analiza petrograficzna badanych węgli

Tabela 3

Typ węgla, kopalnia		Substancja mineral-		
	witrynit,%	egzynit (liptynit),%	inertynit,%	na,%
Brunatny	24	69,6	5,2	1,2
Kamienny typ 31.2	58	17	18	7
Antracyt typ 42	99	0	0	1
Niepewność pomiarowa	4	2	3	1

Badania polegały na rozpylaniu suspensji w-w na szklaną powierzchnię płaską (rys.1, tab. 4, 5).



Rys. 1. Schemat stanowiska do rozpylania suspensji węglowo-wodnej;

1– szyba z podziałką milimetrową, 2– dysza, 3– pistolet, 4– zawór, 5– regulator ciśnienia, 6– stojak

Rozpylanie suspensji w-w polega na przejściu mocno upakowanej suspensji w spray utworzony z kropelek paliwa na skutek podmuchu strumienia powietrza. Proces rozpylania suspensji ww składa się zatem z trzech faz: ciało stałe (ziarna węgla), ciecz (woda) oraz gaz (powietrze pod odpowiednim ciśnieniem) [21]. Stwierdzono, iż lepkość suspensji węglowo-wodnej wzrasta wraz z obniżaniem rozmiaru ziaren. W wyniku rozpylenia suspensji w-w wzrasta jej efektywna objętość, a ta z kolei wzrasta wraz ze zwiększeniem lepkości suspensji i obniżeniem średniego rozmiaru ziaren węgla. Wzrost powierzchni zawodnionych ziaren węgla powoduje, że napięcie powierzchniowe w przypadku suspensji jest większe niż w przypadku czystej wody. Lepkość suspensji w-w zbudowanej z mniejszych ziaren węgla jest większa, ze względu na mocniejsze ich upakowanie w całej objętości zawiesiny. Większa koalescencja mocno upakowanej suspensji sprawia, że może ona rozpylać się do kropel zawiesiny o większych średnicach. Ponadto, wzrost zagęszczenia i całkowitej powierzchni drobnych ziaren węgla powoduje zwiększenie oporu, który uniemożliwia poruszanie się ziaren węgla w wodzie. Dlatego też suspensja, która zawiera mniejsze ziarna węgla rozpylana jest do większych kropel zawiesiny. Rysunek 2 przedstawia przykładowy schemat rozpadu suspensji węglowo-wodnej podczas rozpylania.



Rys. 2. Schemat rozpylania suspensji w-w zawierających: a) duże ziarna węgla, b) małe ziarna węgla [21]



Energetyka i Ekologia

Tabela 5

Wpływ średnicy dyszy i ciśnienia powietrza na proces rozpylania

W – wilgotność suspensji w-w,
 D – średnica dyszy rozpylającej,
 p – ciśnienie rozpylania,
 d – średnica ziaren pyłu węglowego

Zmiana parametru	W = 35%, d=125-160 μm węgiel brunatny (kopalnia <i>Bełchatów</i>)	W = 35%, d=125-160 μm węgiel kamienny 31.2 (kopalnia <i>Sobieski</i>)	W = 35%, d=125-160 μm antracyt 42 (poch. Rosja)
p = 2 at D = 1 mm			
p = 2 at D = 3 mm			:
p = 1 at D = 2 mm			
p = 3 at D = 2 mm			

Podczas rozpylania suspensji w-w strumień powietrza z określoną prędkością i pod wysokim ciśnieniem rozdziela skoagulowaną suspensję w-w, mocno upakowaną pod wpływem działania sił kapilarnych [21]. W przypadku większych ziaren węgla aglomerat posiada słabsze siły kapilarne, dlatego też woda może luźno przepływać pomiędzy ziarnami. Osłabienie hydratacji prowadzi do separacji większych ziaren od siebie i od wody, pod wpływem działania podmuchu powietrza. Do osłabienia koalescencji prowadzi również mniejsze zagęszczenie i mniejsza powierzchnia całkowita większych ziaren. Podczas rozpylania suspensji w-w składającej się z dużych ziaren węgla stwierdzono, iż:

- krople łatwo separują się od zawiesiny w-w,
- krople wody generowane z zawiesiny separowane są od ziaren węgla.

Taką mieszaninę charakteryzuje duża ilość rozpylonych kropel wody. Tendencje do izolowania ziaren wewnątrz rozpylonej suspensji w-w mają suspensje utworzone z węgla kamiennego i antracytu o większych frakcjach ziaren, np. 315 – 400 μm, w przypadku wszystkich wilgotności.

Jak już wspomniano, większe upakowanie ziaren i większa powierzchnia całkowita ziaren, w przypadku suspensji



- Rozpylanie suspensji w-w na szklaną płaską powierzchnię
 - W wilgotność suspensji w-w,
 - D średnica dyszy rozpylającej, p – ciśnienie rozpylania,
 - d średnica ziaren pyłu węglowego

Typ węgla	W = 20%, p = 2 at, D = 2 mm	W = 35%, p = 2 at, D = 2 mm	W = 50%, p = 2 at, D = 2 mm
Brunatny d=p.63 μm (kopalnia <i>Bełchatów</i>)	•	*	-
Brunatny d=125-160 µm (kopalnia <i>Bełchatów</i>)		1.1.1.1	
Brunatny d=315-400 µm (kopalnia <i>Bełchatów</i>)		- qž	*
Kamienny 31.2 d=p.63 µm (kopalnia <i>Sobieski</i>)	-		
Kamienny 31.2 d=125-160 μm (kopalnia <i>Sobieski</i>)	*	*	
Kamienny 31.2 d=315-400 μm (kopalnia <i>Sobieski</i>)	12.	and and a second	AND N
Antracyt 42 d=p.63 μm (poch. Rosja)		N.	
Antracyt 42 d=125-160 μm (poch. Rosja)		*	
Antracyt 42 d=315-400 μm (poch. Rosja)	12	đ.	3.11

Energetyka i Ekologia

zawierającej drobne ziarna węgla, prowadzi do zdecydowanie większych sił pomiędzy ziarnami oraz pomiędzy ziarnami a wodą. W tym przypadku nie jest łatwo rozdzielić ziarna węgla, ze względu na duże więzi hydratacyjne, a koalescencja pomiędzy ziarnami powoduje rozpylanie mieszaniny do kropli zawierających dużo drobnych ziaren. Suspensja, która zawiera drobne ziarna węgla rozpyla się zatem do kropel o większej średnicy.

W przypadku, gdy suspensja w-w utworzona zostanie z dużych ziaren węgla przejście w spray zaobserwowano przy zdecydowanie niższych ciśnieniach strumienia powietrza. Suspensja zawierająca ziarna większych rozmiarów charakteryzuje się swobodnym upakowaniem ziaren w wodzie ze względu na mniejszą wartość sił kapilarnych, co powoduje luźne upakowanie ziaren między sobą oraz ziaren z wodą. W rezultacie tego na spray składają się zarówno krople czystej wody o bardzo małych średnicach, jak i mniejsze krople suspensji zawierające niewielką ilość ziaren węgla. Średnia średnica kropli zawiesiny obniża się zatem wraz ze wzrostem rozmiaru ziaren węgla.

Kolejnym etapem badań była obserwacja zachowania się kropel suspensji w-w pod mikroskopem stereoskopowym (rys. 3–9, tab. 6–8). Wilgoć na powierzchni węgla może doprowadzić do jej naładowania, a w konsekwencji do obniżenia lepkości suspensji. Jak wiadomo z literatury fuzynit, który jest składnikiem egzynitu, ze względu na porowatą strukturę i większą powierzchnię właściwą, podnosi lepkość suspensji węglowo-wodnej. Dlatego suspensje utworzone z niższych typów węgla wykazują większą lepkość. Mniejsza zawartość wilgoci w węglu wynika z jego mniejszej porowatości. Matowe macerały w strukturze węgla (fuzynit i semifuzynit) posiadają komórkowe ściany, które zapewniają miejsce dla wody. Witrynit, będący składnikiem antracytu, nie posiada takiej otwartej struktury i wykazuje tendencje do mikroporów.

a)









Rys. 3. Węgiel kamienny typ 31.2 (ziarna węgla o rozmiarach 200-250 μm) a) pył węglowy, b) suspensja węglowo-wodna o zawartości wilgoci 20%, c) suspensja węglowo-wodna o zawartości wilgoci 35%,

d) suspensja węglowo-wodna o zawartości wilgoci 55%,



Rys. 4. Suspensja węglowo-wodna utworzona z pyłu węgla brunatnego o rozmiarach ziaren: a) 125-160 μm, b) 315-400 μm, c) 50% – ziarna poniżej 80 μm i 50% – 315-400 μm; zawartość wilgoci – 50%



Rys. 5. Suspensja węglowo-wodna, utworzona z pyłu węgla kamiennego typ 31.2 o rozmiarach ziaren: a) ziarna poniżej 80 μm, b) 315-400 mm, c) 50% – ziarna poniżej 80 μm i 50% – 315-400 μm; zawartość wilgoci – 50%



Rys. 6. Suspensja węglowo-wodna utworzona z pyłu antracytu o rozmiarach ziaren: a) poniżej 80 μm, b) 315-400 μm, c) 50% – ziarna poniżej 80 μm i 50% – 315-400 μm; zawartość wilgoci – 50%



Rys. 7. Suspensja w-w utworzona z węgla kamiennego: frakcja ziaren p.63, W = 90%

Energetyka

Energetyka i Ekologia



Rys. 8. Suspensja w-w utworzona z węgla kamiennego: frakcja ziaren 125-160, W = 90%



Rys. 9. Suspensja w-w utworzona z węgla kamiennego: frakcja ziaren p.63 i 125-160, W = 90%

Jak wspomniano, wraz ze wzrostem gęstości suspensji wzrasta również jej lepkość, dla różnych rozkładów ziarnowych. Szeroki rozkład ziarnowy powoduje, że drobne ziarna węgla wypełniają pory pomiędzy grubymi ziarnami, co prowadzi do otrzymania wyższych frakcji objętościowych. Chcąc uzyskać jak największe zagęszczenie ziarna węgla powinny mieć zróżnicowane wymiary, tak aby najbardziej wypełniały przestrzeń międzyziarnową. Przy tym samym udziale masowym węgla w paliwie największymi lepkościami charakteryzują się suspensje zawierające najdrobniejsze ziarna węgla. Stwierdzono ponadto, iż dodatek grubszych frakcji węgla do suspensji utworzonej z drobnych ziaren może obniżyć lepkość suspensji.

Ciekawym elementem badań była obserwacja zawiesin stanowiących mieszaninę ziaren węgla, wody i pyłu biomasy. Stwierdzono, iż dodatek biomasy do paliwa zawiesinowego prowadzi do wzrostu lepkości zawiesiny, przy tej samej wilgotności paliwa. Przy mniejszych wilgotnościach paliwa zaobserwowano hamowanie przez pył biomasy wypływania drobnych ziaren węgla na obrzeża kropli oraz tendencję do kumulacji ziaren paliwa wewnątrz zawiesiny.

 Tabela 6

 Wpływ typu pyłu węglowego na zachowanie się suspensji w-w

Węgiel brunatny d=p.63 µm i d=125-160 µm (kopalnia <i>Bełchatów</i>) W = 90%	
Węgiel kamienny 31.2 d=p.63 µm i d=125-160 µm (kopalnia <i>Sobieski</i>) W = 90%	
Antracyt 42 d=p.63 μm i d=125-160 μm (poch. Rosja) W = 90%	<i>8</i>

Tabela 7

Zdjęcia kropel suspensji w-w wykonane pod mikroskopem stereoskopowym

Typ węgla	W = 40%	W = 90%	
Brunatny d=p.63 µm (kopalnia <i>Bełchatów</i>)		•	
Brunatny d=125-160 μm (kopalnia <i>Bełchatów</i>)	*		
Kamienny 31.2 d=p.63 µm (kopalnia <i>Sobieski</i>)	-	à	
Kamienny 31.2 d=125-160 µm (kopalnia <i>Sobieski</i>)	N.		
Antracyt 42 d=p.63 μm (poch. Rosja)		-	
Antracyt 42 d=125-160 µm (poch. Rosja)		* 6 .*	



	Tabela 8 Oddziaływanie własności suspensji w-w na powierzchnię jej rozpylenia	
	Węgiel brunatny (kopalnia Bełchatów)	
Frakcja zia	ren: 63 µm, 125-160 µm, 315-400 µm, D = 2 mm; p = 2 at	
W=20%	Rozpylona suspensja tworzy na powierzchni kilka dużych wyraźnych kropel (aglomeratów) o średnicy d _s =1–3 mm	
W=35%	Na rozpylonej powierzchni powstaje bardzo duża ilość kropel o średnicy d _s < 1 mm	
W=50%	Na powierzchni rozpylania powstają dwa obszary. Pierwszy, centralny zawiera bardzo dużą ilość drobnych kropel trudnych do wyodrębnienia. Krople te znajdują się blisko siebie tworząc zaciemniony obszar. Drugi obszar to duża ilość aglomeratów o średnicy d _s =1–2 mm, ulokowanych dookoła obszaru pierwszego	
	Węgiel kamienny 31.2 (kopalnia <i>Sobieski</i>)	
Fra	kcja ziaren: 63 μm, 125-160 μm; D = 2 mm; p = 2 at	
W=20%	Suspensja rozpylona na powierzchni tworzy dużą ilość wyraźnych kropel (aglomeratów) o średnicy d _s <1 mm	
W=35%	Na rozpylonej powierzchni powstaje bardzo duża ilość kropel o średnicy d _s <1 mm	
W=50%	Na powierzchni widać dwa obszary. Obszar środkowy zawiera bardzo dużą ilość drobnych kropel trudnych do wyodrębnienia, wokół którego znajdują się większe krople rozpylonej suspensji, o średnicach do d _s =3 mm	
Frakcja ziaren: 315-400 μm; D = 2 mm; p = 2 at		
W=20-50%	Suspensja rozpyla się na dość dużym obszarze. Nie wykazuje tendencji do tworzenia aglomeratów. Można zaobserwować, iż każde ziarno węgla jest otoczone wodą. Powierzchnia rozpylenia to skupisko dużej liczby ziaren otoczonych wodą	
Antracyt		
Frakcja ziaren: 63 µm, 125-160 µm, 315-400 µm; D = 2 mm; p = 2 at		
W=20-50%	Suspensje utworzone z antracytu rozpylają się na	

Rysunek 10 ilustruje porównanie zachowania się węglowo--wodnego paliwa zawiesinowego oraz zawiesiny zawierającej w 50% pył biomasy (wierzba energetyczna). Dodatek biomasy do zawiesiny zdecydowanie zmienia reologię paliwa zawiesinowego. Wzrost wilgotności zawiesiny zawierającej biomasę (przy tym samym jej udziale, co węgla) prowadzi do sytuacji odwrotnej, tzn. wypływania na obrzeża kropli ziaren węgla o większych rozmiarach, które są jakby wypychane przez zawilgocony pył biomasy (rys. 11).

powierzchni płaskiej podobnie do suspensji w-w

utworzonych z węgla kamiennego





Rys.10. Zachowanie się paliwa zawiesinowego: a) zawierającego wyłącznie ziarna węgla b) zawierającego ziarna węgla oraz pył biomasy



Rys. 11. Zachowanie się wysokozawodnionego paliwa zawiesinowego zawierającego pył biomasy

W przypadku suspensji w-w, które utworzono z mieszaniny ziaren węgla o rozmiarach 63 µm oraz 120-160 µm zaobserwowano, iż ziarna większe grupują się wewnątrz kropli, a ziarna o mniejszych rozmiarach wypływają na obrzeże kropli. Rysunek 12 ilustruje przykład zachowania się suspensji w-w zbudowanej z ziaren węgla o zróżnicowanych rozmiarach.



Rys. 12. Zachowanie się suspensji w-w zawierającej ziarna węgla różnych rozmiarów

Na podstawie przeglądu literatury [1-28] oraz przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż lepkość zawiesiny wzrasta wraz z obniżeniem rozmiaru ziaren węgla, przy tym samym udziale paliwa. Wskutek wzrostu zagęszczenia oraz całkowitej powierzchni drobnych ziaren wzrasta opór do ich poruszania się



Energetyka i Ekologia

w wodzie. Stwierdzono, iż ziarna węgla o większych rozmiarach są bardziej separowane od wody. W przypadku całkowitej separacji ziaren, czyste krople wody są mniejsze od odseparowanych ziaren węgla.

Obserwuje się dwa rodzaje atomizacji ziaren w suspensji:

- w przypadku rozpylania suspensji zbudowanej z większych ziaren węgla – powstają krople wody oraz krople zawierające ziarna węgla i wodę,
- w przypadku rozpylania suspensji zbudowanej z mniejszych ziaren – powstają krople zawierające wyłącznie wodę i ziarna węgla.

W przypadku większych prędkości rozpylania można zaobserwować całkowitą separację, w której średnica kropli czystej wody jest mała w porównaniu z średnim rozmiarem ziaren węgla, a pozostałe krople zawierają ziarna węgla.

W przypadku mniejszych prędkości rozpylania krople wody są większe niż średni rozmiar ziarna węgla. W sprayu suspensji w-w można znaleźć krople z pojedynczymi ziarnami węgla lub krople zawierające dużo ziaren węgla.

Modelowanie rozpylania suspensji w-w

Ciekawym elementem modelowania stało się prognozowanie rozpylania suspensji w-w do kropel o określonej wielkości (rys. 13). Należy podkreślić, że proces ten jest losowy.

Przyjęto następujące dane wejściowe:

V_{sus catk} – objętość suspensji, która będzie rozpylana, v_{pocz krop} – prędkość kropel opuszczających rozpylacz, a_{rozp} – maksymalny kąt rozpylania kropel.

a_{rozp} – maksymany kątrozpyranie i są wyznaczane losowo przy Średnice kropel suspensji di są wyznaczane losowo przy zachowaniu rozkładu normalnego N(d_{śr}, *s*), gdzie d_{śr} jest wartością oczekiwaną rozkładu, a *s* odchyleniem standardowym. Przyjęto dodatkowo ograniczenie wylosowanych średnic d tak, że minimalną średnicą kropel jest d_{min}, a maksymalną d_{max}, aby nie zostały przypadkowo wylosowane zbyt małe lub zbyt duże średnice kropel (ma to wpływ na numeryczny krok całkowania równań różniczkowych ruchu kropel).

Ruch kropel po opuszczeniu rozpylacza został opisany układem równań:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_{di}$$
(1)

$$m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = F_{di}$$
 (2)

$$m_{i} \frac{d^{2} z_{i}}{dt^{2}} = -m_{i}g + m_{i}g \left(\frac{\rho_{p}}{\rho_{s}}\right) + F_{di}$$
(3)

gdzie:

W celu rozwiązania układu równań różniczkowych zastosowano metody numeryczne – metodę Rungego-Kutty 4. rzędu. Wprowadzono kroki czasowe: 0 = t_1 , t_2 , t_3 , t_4 ,..., t_1 = (i1)dt, gdzie dt – krok całkowania.

Warunki początkowe dla powyższego układu równań przyjęto następujące: $x_i(t = t_i) = x_p$, $y_i(t = t_i) = y_p$, $z_i(t = t_i) = z_p$, gdzie x_p , y_p , z, - są współrzędnymi przestrzennymi wylotu rozpylacza, a t są kolejnymi krokami całkowania czasowymi, $v_{yi}(t = t_i) = v_{yi}$, $v_{yi}(t = t_j)$ = v_{yp} , $v_{zi}(t = t_i) = v_{zp}$, gdzie v_{xp} , v_{yp} , v_{zp} – są składowymi prędkości początkowej kropel, dobranymi w ten sposób, by wypadkowa prędkość wynosiła v pocz krop i kąt rozproszenia nie był większy niż a_{rozn} . W przypadku zadania 2D: $v_{xp} = 0$, $v_{yp} = \cos a_i$, $v_{zp} = \sin a_i$, gdzie a, = (RAND - 0.5)a_{rozo}, RAND - liczba losowa (rozkład jednorodny) z przedziału <0, 1>. W poszczególnych krokach czasowych "wypuszczane" są kolejne krople z rozpylacza. W pierwszym kroku obliczeń rozwiązano układ dla jednej kropli, w drugim kroku dla dwóch kropel, itd. Krok całkowania dt dobrano tak, aby spełniona była zależność d_{max} < v_{pocz krop} dt (aby kropla w czasie dt zdążyła przemieścić się na odległość większą niż d_{max} zanim w kolejnym kroku w położeniu początkowym pojawi się następna kropla). "Wypuszczanie" kolejnych kropel trwa dotąd, aż suma objętości wszystkich kropel S, pd, 3/6 > V_{sus całk}. Następnie rozwiązywane są tylko równania ruchu. W poszczególnych krokach obliczeń sprawdzano kontakty pomiędzy poszczególnymi kroplami. W przypadku stwierdzenia kontaktu następuje łączenie się kropel (z dwóch powstaje jedna o sumarycznej masie i objętości, a położenie i prędkość nowej kropli jest średnią ważoną położenia i prędkości kropel sprzed połączenia).



Energetyka www.energetyka.eu



Wnioski

Zawarta w artykule analiza złożonej morfologii kropel suspensji w-w w różnych warunkach umożliwiła sformułowanie następujących wniosków.

- Rozkład uziarnienia i koncentracja substancji węglowej w suspensji w-w decydują o lepkości oraz właściwościach reologicznych paliwa zawiesinowego.
- Ziarna węgla w kropli suspensji w-w rozmieszczone są nieregularnie. Woda wchodząca w skład suspensji w-w zwilża ziarna węgla i penetruje pomiędzy te ziarna. W związku z tym ziarna węgla mają możliwość poruszania się między sobą pod wpływem działania sił kapilarnych.
- 3. Ciecz w zawiesinie łączy poszczególne ziarna węgla w większe aglomeraty.
- 4. Obniżenie zawartości wody w suspensji prowadzi do wzrostu lepkości wytworzonej zawiesiny.
- Zmniejszenie rozmiaru ziaren prowadzi do wzrostu całkowitej powierzchni węgla w jednostce objętości paliwa zawiesinowego oraz zwiększenia średnicy kropli zawiesiny wskutek wzrostu lepkości suspensji i mocniejszego upakowania ziaren w całej objętości paliwa.
- W przypadku suspensji utworzonych w znacznym procencie z bardzo drobnych ziaren obserwuje się ich mocne upakowanie w zawiesinie między grubymi ziarnami.
- Wzrost lepkości zawiesiny i całkowitej powierzchni drobnych ziaren węgla powoduje zwiększanie się oporu, który uniemożliwia poruszanie się ziaren w wodzie.
- Większe upakowanie ziaren i większa powierzchnia całkowita ziaren, w przypadku suspensji zawierającej drobne ziarna węgla, doprowadza do intensywniejszego oddziaływania pomiędzy ziarnami oraz pomiędzy ziarnami a wodą.
- W przypadku rozpylania suspensji w-w zbudowanej z mniejszych ziaren węgla obserwuje się powstawanie kropel zawierających wyłącznie wodę i ziarna węgla.
- 10. W przypadku suspensji zbudowanych z większych ziaren węgla w aglomeracie występują słabsze siły kapilarne, dlatego też woda może luźno przepływać pomiędzy ziarnami. Mniejsze zagęszczenie oraz powierzchnia całkowita większych ziaren prowadzi do osłabienia ich koalescencji oraz luźnego upakowania ziaren między sobą oraz ziaren z wodą. Podczas rozpylania powoduje to separację większych ziaren węgla od siebie i od wody.
- 11. W przypadku suspensji w-w utworzonych z ziaren węgla różnych rozmiarów zaobserwowano tendencję do grupowania większych ziaren wewnątrz zawiesiny oraz wypływania mniejszych na obrzeże kropli.
- Dodatek pyłu biomasy do zawiesiny węglowo-wodnej powoduje podwyższenie lepkości paliwa i zmienia mechanizm atomizacji ziaren w suspensji.

LITERATURA

 Al-Amrousi F.A., Al-Sabahh A.M., Osman M.M.: Physicocheemical characterization of emulsion fuel from fuel oil-water-charcoal and surfactants. *Fuel*, vol. 75, 1996

- [2] Atesok G., Boylu F., Sikeci A.A., Dincer H.: The effect of coal properties on the viscosity of coal-water slurries. *Fuel*, vol. 81, 2002
- Blaschke W.: Przygotowanie czystego węgla do spalania. Energetyka, nr 2, 1992
- [4] Boylu F., Dincer H., Atesok G.: Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal–water. Fuel Processing Technology 2004
- [5] Burdukov A.P., Popov V.I., Tomilov V.G.: The rheodynamics and combustion of coal–water mixtures. *Fuel*, vol. 81, 2002
- [6] Chan K.K.: Pilot-scale combustion tests on coal-water mixtures with reference to particle agglomeration. *Fuel*, vol. 73, 1994
- [7] Dunn-Rankin D., Baxter L.: The role of dispersants in CWS agglomeration during combustion. *Fuel*, vol. 70, 1991
- [8] Dunn-Rankin D. and authors: Combustion of coal-water slurries.
 Evolution of particle size distribution for coals of different rank.
 Fuel, vol. 66, 1987
- [9] Elperin T., Krasovitov B.: Evaporation of liquid droplets containing small solid particles. Int. J. Heat Mass Transfer, vol.38, 1995
- [10] Fu Xiao-an, Guo Donghong, Jiang Long: A low-viscosity synfuel composed of light oil, coal and water. *Fuel*, vol. 75, no 14, 1996
- [11] Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A.: Mechanizm i kinetyka procesu spalania suspensji węglowo-wodnych. X Międzynarodowa Konferencja Kotłowa, Aktualne problemy Budowy i Eksploatacji Kotłów, Prace IMiUE Politechniki Śląskiej, tom 2, 195-214, Gliwice 2006
- [12] Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A.: Mechanizm i kinetyka procesu spalania zawiesin węglowo-wodnych. Archiwum Spalania, vol. 7, nr 1-2, 2007
- [13] Hycnar J.: Ciekłe paliwo weglowe: suspensje węglowo-wodne. Wiadomości Górnicze, nr 2, 2001
- [14] Kaji R., Muranaka Y., Otsuka K., Hishinuma Y.: Water absorption by coals: effects of pore structure and surface oxygen. *Fuel*, vol.65, 1986
- [15] Канторвич Б.В.: Основы теории горения и газификации твердого топлива. Издателъство Академии Наук СССР, Москва 1958. изд. – во ANCCCR
- [16] Kubica R., Smołka W.: Zawiesinowe paliwa węglowe rozwój, charakterystyka i perspektywy zastosowania. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 1, 2000
- [17] Liu G.E., Law C.K.: Combustion of coal-water droplets. Fuel, vol. 65, 1986
- [18] Mulhelm B.: Solid-liquid separation In suspension atomization", Chemical Engineering Science, 2006
- [19] Ргаса zbiorowa: Сжигание высокоободненного топлива в виде водоугольных суспензии. изд. "Наука", Москва 1967
- [20] Sarti G. and authors: Hypothesis for an agglomeration mechanism in concentrated coal-water slurries. *Fuel*, vol. 71, 1991
- [21] Son S.Y., Kihm K.D.: Effect of coal particle size on coal-water slurry (CWS) atomization. *Atomization and Sprays*, vol. 8, 1998
- [22] Stocki J., Głowiński J.: Wodna zawiesina węglowa jako paliwo. G*ospodarka Paliwami i Energią*, nr 12, 1988
- [23] Ślączka A.:Zawiesinowe paliwo węglowo wodne na bazie węgli koksujących i energetycznych. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, z. 231,1996
- [24] Tosai S.C., Viers B.: Airblast Atomization of viscous liquids. Fuel, vol. 69, 1980
- [25] Tosai S.C., Truc V.: Atomization of coal-water slurry using twinfluid jet atomizer. *Fuel*, vol. 69, 1987
- [26] Tsai S.C., Knell E.W. Viscometry and rheology of coal water slurry. *Fuel*, 65, 1986
- [27] Yavuz R., Kucukbayrak S., Williams A.: Combustion characteristics of lignite-water slurries. *Fuel*, vol. 77, 1998
- [28] Zimny J.: Suspensja węglowo-wodna jako paliwo alternatywne do zasilania wysokoprężnych silników spalinowych. Wiadomości Górnicze, nr 7, 2001

