

Rudolf Klemens, Tomasz Pancewicz, Piotr Wolański

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

BADANIE STRUKTURY PŁOMIENIA HOMOGENICZNEGO I HETEROGENICZNEGO W POBLIŻU DOLNEJ GRANICY SPALANIA

W pracy podano wyniki badań struktury i mechanizmu rozprzestrzeniania się płomienia w mieszaninach gazowych, pyłowych i pyłowo-gazowych, w pobliżu dolnej granicy spalania. Badania prowadzono głównie w pionowym kanale o długości 1,2 m i przekroju prostokątnym o wymiarach $0,035 \times 0,088 \text{ m}^2$. W trakcie badań wykorzystano technikę wykonywania zdjęć interferometrycznych oraz zdjęć rozwiniętych i skompensowanych.

Mierzono również temperaturę płomienia za pomocą termometru oporowego o bardzo małej stałej czasowej. Badano pył węgla brunatnego, zaś w mieszaninach hybrydowych stosowano dodatkowo techniczny metan. Stwierdzono, że struktura płomieni pyłowych i pyłowo-gazowych jest całkowicie odmienna od struktury płomieni gazowych, badanych w tych samych warunkach. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano uproszczony model rozprzestrzeniania się płomienia w mieszaninach pyłowo-powietrznych w warunkach zbliżonych do dolnej granicy spalania.

1. WPROWADZENIE

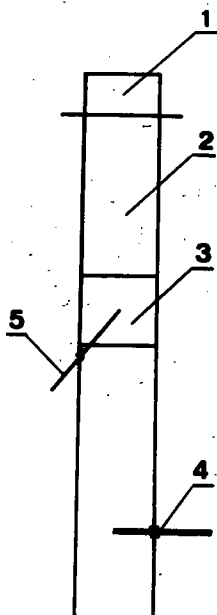
Spalanie mieszanin gazowych w pobliżu dolnej granicy spalania jest obecnie dość dobrze poznane. Znane są dokładnie graniczne stężenia gazów umożliwiające propagację płomienia, mechanizmy kontrolujące proces propagacji i gaszenia, jak również struktura tych płomieni w pobliżu dolnej granicy spala-

nia. Dla płomieni pyłowych i hybrydowych (zawierających palny pył i gaz) sytuacja jest całkowicie odmienna. Aż do końca lat siedemdziesiątych graniczne stężenia mieszaniny pyłowo-powietrznych były wyliczane niepoprawnie. Wtedy to niemal równocześnie, niezależnie od siebie Wolański [1] i Hertzberg [2] zaproponowali właściwą metodę wyznaczania dolnej granicy wybuchowości mieszanin pyłowych, zaś Buksowicz i inni [3,4], przedstawili pierwsze próby wyjaśnienia mechanizmu rozprzestrzeniania się płomienia w granicznych mieszaninach pyłowych.

Celem niniejszej pracy jest określenie struktury płomieni pyłowych i hybrydowych w pobliżu dolnej granicy spalania, porównanie tych struktur ze strukturą płomieni gazowych w podobnych warunkach oraz opisanie mechanizmu kontrolującego proces propagacji płomienia w granicznych mieszaninach pyłowych.

2. STANOWISKO BADAWCZE I METODA BADAŃ

Badania procesu rozprzestrzeniania się płomienia w mieszaninach palnych przeprowadzono zasadniczo w pionowym kanale o długości 1,2 m i przekroju prostokątnym o wymiarach $0,035 \times 0,088 \text{ m}^2$ (rys.1). W części badań wykorzystywano również kanały o przekrojach $0,035 \times 0,050 \text{ m}^2$ oraz $0,035 \times 0,035 \text{ m}^2$. Dolny wylot kanału był zawsze otwarty. Kanał zamykał od góry wibracyjny podajnik pyłu umożliwiający wypełnienie komory mieszaniną pyłowo-powietrzną. W górnej części kanału znajdował się również układ doprowadzania gazowej mieszaniny palnej o żądanym stężeniu.



W celu umożliwienia wizualizacji procesu w górnej części kanału umieszczono dwa przelotowo usytuowane wzierniki o wy-

Rys.1. Schemat stanowiska badawczego: 1 - podajnik pyłu, 2 - kanał, 3 - okno obserwacyjne, 4 - źródło zapłonu, 5 - termometr oporowy

miarach $0,080 \times 0,080 \text{ m}^2$. W polu obserwacji oka można było instalować termometr oporowy o bardzo małej stałej czasowej, który wykorzystywano do pomiaru temperatury płomienia. W dolnej części kanału umieszczono elektrody zapłonowe umożliwiające zapłon mieszaniny od pojedynczej iskry elektrycznej o energii kilku dżuli. Tego typu źródło zapłonu nie zaburzało rozprzestrzeniania się płomienia we wnętrzu komory badawczej.

Zastosowanie płaskiego kanału badawczego oraz odejście od standardowych wymiarów rury ($0,05 \times 0,05 \text{ m}^2$) podyktowane było potrzebą wizualizacji procesu. Strukturę płomienia badano za pomocą interferometru Macha-Zehndera współpracującego z szybką kamerą filmową. Prędkość rozprzestrzeniania się płomienia określano na podstawie zdjęć rozwiniętych procesu, a strukturę badano również za pomocą bezpośrednich i skompensowanych zdjęć płomienia. Mierzono także temperatury płomieni w różnych obszarach pomiędzy osią a ściankami kanału. Badania prowadzono dla dwóch pyłów: węgla brunatnego i kamiennego. W obydwu przypadkach wykorzystywano frakcje pyłu o ziarnistości mniejszej od $75 \mu\text{m}$. W mieszaninach hybrydowych jako paliwo gazowe wykorzystywano techniczny metan. Przed każdym doświadczeniem komorę badawczą przepłukowano przez okres kilku minut powietrzem, a następnie, w wypadku badania mieszanin gazowych lub hybrydowych, odpowiednią mieszaniną gazowo-powietrzną. Zapewniało to uzyskanie jednorodnej mieszaniny gazowej w całej objętości komory.

We wszystkich badaniach stężenie mieszaniny palnej było tylko nieznacznie wyższe od dolnej granicy spalania. W końcowej fazie badania przeprowadzono również w szklanej rurze o średnicy $0,16 \text{ m}$ i długości 3 m .

3. BADANIA

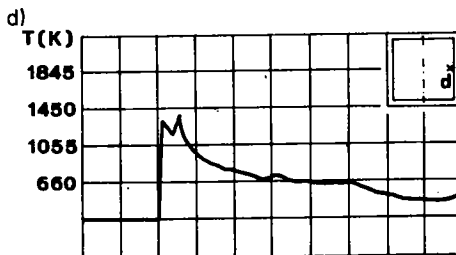
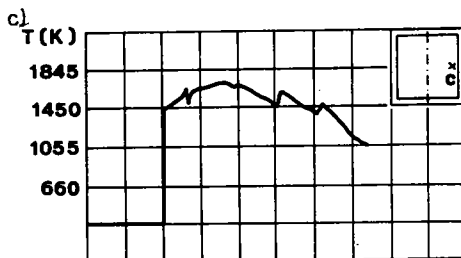
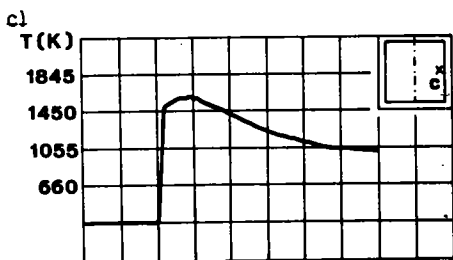
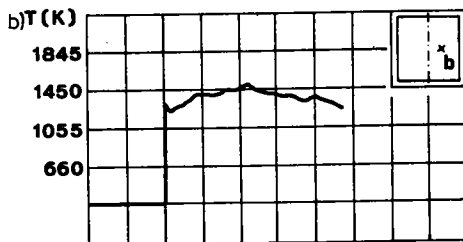
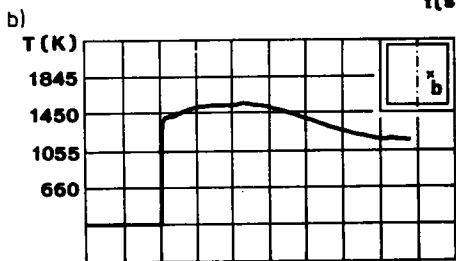
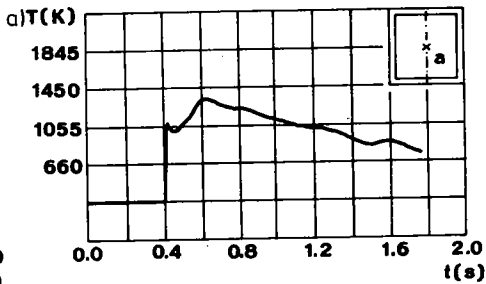
W celu uzyskania pełnego obrazu zjawiska oraz dokładnego porównania płomieni gazowych i pyłowych, na zbudowanym stanowisku przeprowadzono w tych samych warunkach badania propagacji płomienia w mieszaninach gazowych, hybrydowych (gaz-pył

i pył-gas) i pyłowych. Mieszaniną gazową nazywano mieszaninę paliwa gazowego z powietrzem. Mieszaniny hybrydowe stanowiły mieszaninę paliwa gazowego i pyłowego z powietrzem.

W mieszaninach gazowo-pyłowo-powietrznych zdecydowanie dominowało paliwo gazowe, pył występował tylko w bardzo niewielkim stężeniu. W mieszaninach tych stężenie gazu palnego było nieznacznie niższe od dolnej granicy spalania, lecz już niewielki dodatek paliwa gazowego umożliwiał spalanie. Stężenie paliwa w mieszaninach hybrydowych było zawsze bardzo bliskie dolnej granicy spalania. Mieszaninę pyłowo-powietrzną nazywano po prostu mieszaniną pyłową.

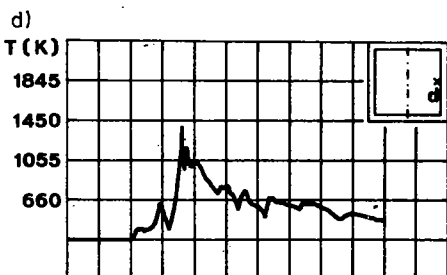
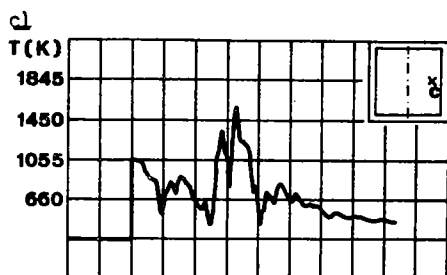
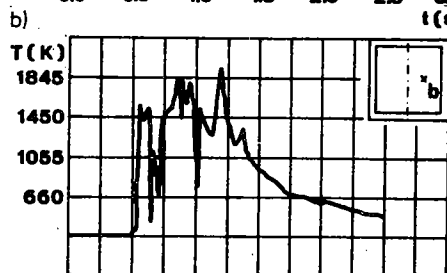
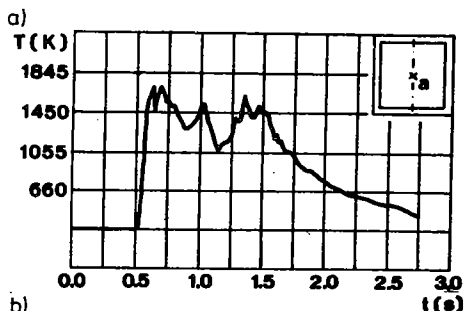
Na rys.2-5 przedstawiono zmiany temperatury badanych płomieni w różnych odległościach między osią a ścianką kanału, dla różnych mieszanin. Pomiarów te przeprowadzono w osi kanału oraz w odległościach 25 mm, 6 mm i 2 mm od ścianki. Na podstawie tych pomiarów wyznaczono profile temperatury dla różnych płomieni. Na rys.6 pokazano profile temperatury płomieni gazowych, hybrydowych i pyłowych. Z przeprowadzonych badań wynika, że dla płomieni gazowych w pobliżu dolnej granicy spalania profil temperatury w kanale płaskim ma podobny charakter do profilu temperatury otrzymywanego w kanale standardowym [5]. Maksimum temperatury występuje w pobliżu ścianek, zaś w osi kanału temperatura spada o ok. 150 K.

Płomień gazowe o wyższym od granicznego stężeniu gazu palnego (rys.6b) wykazują maksimum temperatury płomienia w osi kanału. Profile temperatury granicznych płomieni gazowo-pyłowych (rys.6c) są podobne do profili temperatury granicznych płomieni gazowych (rys.6a). Dla płomieni gazowo-pyłowych można już jednak zauważyć pewne niewielkie lokalne fluktuacje temperatury (rys.3). Jeżeli zawartość pyłu (w mieszaninie granicznej) wzrasta, to fluktuacje temperatury zwiększają się (rys.4), lecz średnia temperatura jest zbliżona do temperatury granicznych płomieni gazowych i jest bardziej wyrównana w poprzek kanału. Dla płomieni pyłowych fluktuacje temperatury są jeszcze wyraźniejsze (rys.5) i czasami dochodzą nawet do 1000 K. Świadczy to o kolejnym przechodzeniu przez element pomiarowy obszarów spalania i świeżej mieszaniny. Takie zmiany temperatury są charakterystyczne dla płomienia turbulენტnego. Dla płomieni

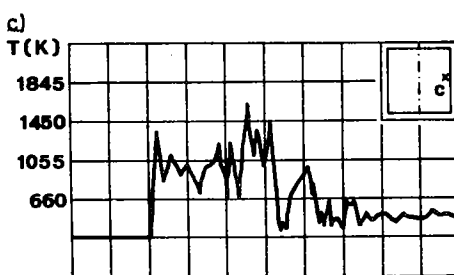
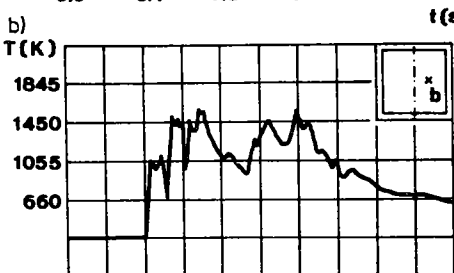
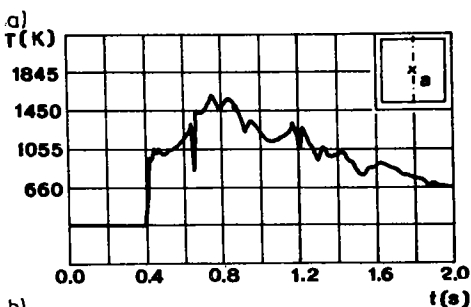


Rys.2. Rozkład temperatury w płomieniu gazowo-powietrznym w różnych odległościach od ścianki kanału. a) w osi kanału, b) 25 mm od ścianki, c) 6 mm od ścianki, d) 2 mm od ścianki

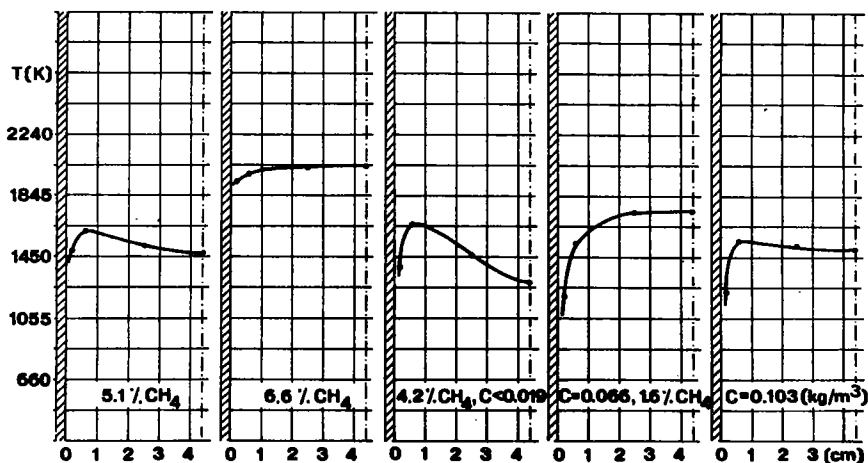
Rys.3. Rozkład temperatury w płomieniu gazowo-pyłowo-powietrznym, w różnych odległościach od ścianki kanału (pył węgla brunatnego). a) w osi kanału, b) 25 mm od ścianki, c) 6 mm od ścianki, d) 2 mm od ścianki



Rys.4. Rozkład temperatury w płomieniu pyłowo-gazowo-powietrznym, w różnych odległościach od ścianki kanału (pył węgla brunatnego): a) w osi kanału, b) 25 mm od ścianki, c) 6 mm od ścianki, d) 2 mm od ścianki



Rys.5. Rozkład temperatury w płomieniu pyłowo-powietrznym, w różnych odległościach od ścianki kanału (pył węgla brunatnego): a) w osi kanału, b) 25 mm od ścianki, c) 6 mm od ścianki, d) 2 mm od ścianki

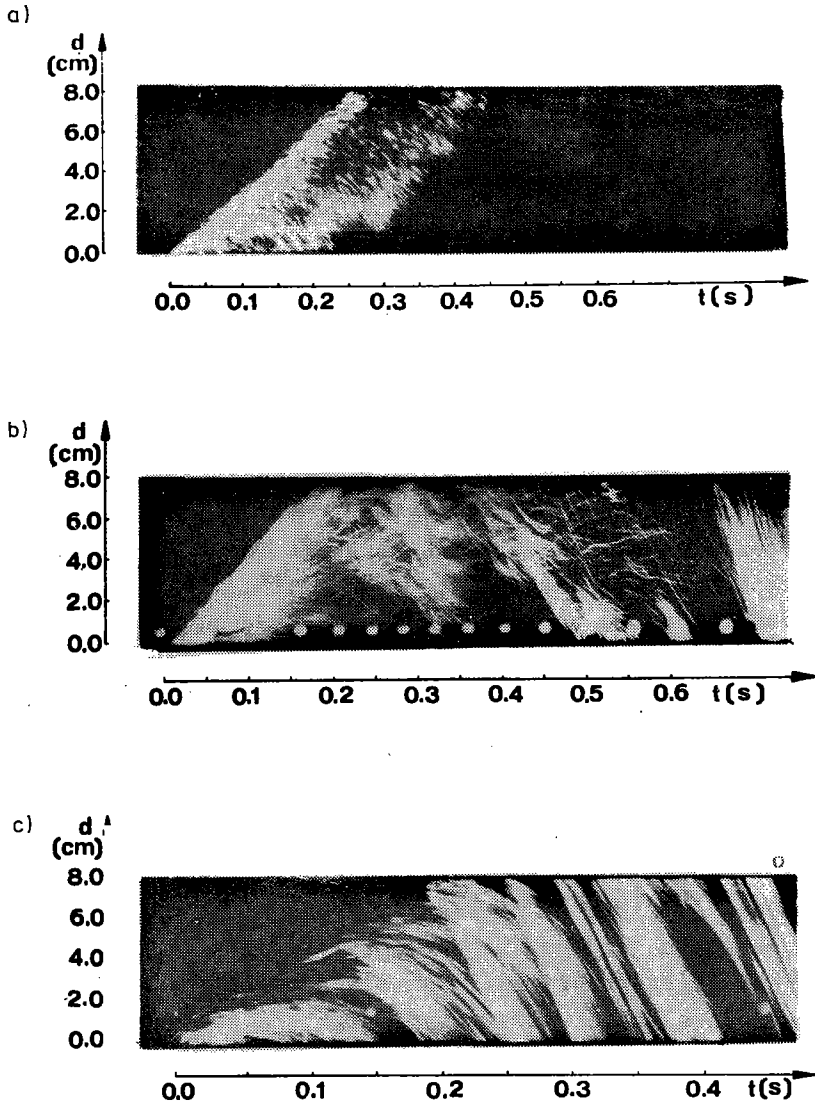


Rys. 6. Profile temperatury płomieni różnych mieszanin w płaskim kanale (pokazano przebiegi temperatury dla połowy szerokości kanału)

pyłowych fluktuacje te występują szczególnie intensywnie w pobliżu ścianki kanału. Wartości temperatur w granicznym płomieniu pyłowym są nieznacznie niższe od temperatur występujących w granicznych płomieniach gazowych (rys. 6).

Przeprowadzone pomiary zmian temperatury we froncie płomienia pozwoliły na określenie jego grubości. Za grubość frontu płomienia przyjęto odcinek leżący na stycznej do maksymalnego gradientu przyrostu temperatury, ograniczony punktami przecięcia tej stycznej z liniami temperatury początkowej i maksymalnej. Wyniki pomiarów wartości tak zdefiniowanej grubości frontu płomienia, zmierzone w osi kanału, pokazano w tabl. 1. Widać wyraźnie, że grubość frontu płomienia w mieszaninach pyłowych jest ok. 5 razy większa od grubości frontu płomienia w mieszaninach gazowych i gazowo-pyłowych.

Prędkość rozprzestrzeniania się płomienia określono w oparciu o analizę zdjęć rozwiniętych. Przykładowo rozwinięcia płomieni gazowo-pyłowych, pyłowo-gazowych i pyłowych pokazano na rys. 7. zaś wyniki pomiarów prędkości rozprzestrzeniania się wszystkich rodzajów płomieni przedstawiono w tabl. 1. W tabelicy tej przedstawiono również obliczenia liczby Reynoldsa dla badanych płomieni, stosując powszechnie przyjętą konwencję



Rys.7. Zdjęcia rozwinięte płomieni: a) płomień gazowo-pyłowo-powietrzny (4,2% CH_4 , $C = 0,019 \text{ kg/m}^3$, b) płomień pyłowo-gazowo-powietrzny (1,6% CH_4 , $C = 0,066 \text{ kg/m}^3$), c) płomień pyłowo-powietrzny ($C = 0,103 \text{ kg/m}^3$); pył - węgiel brunatny

T a b l i c a 1

Parametry płomienia różnych mieszanin w płaskim kanale
o przekroju $0,035 \times 0,088 \text{ m}^2$

Rodzaj mieszaniny	Grubość frontu płomienia [mm]	Prędkość propa- gacji płomienia [m/s]	Re
metan-powietrze (5,1% CH_4)	2,8	0,26	910
metan-powietrze (6,6% CH_4)	2,3	0,58	2000
gaz-pył	2,6	0,27	940
pył-gaz	11,7	0,45	1550
pył	11,4	0,57	1960

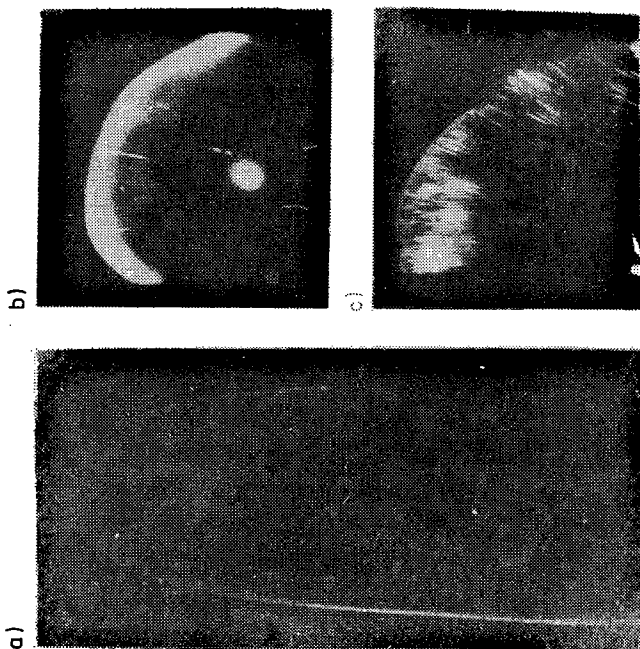
przy ich określaniu [6,7]. Najwyższe wartości liczby Reynoldsa występują dla płomieni gazowych o zawartości 6,6% CH_4 oraz dla płomieni pyłowych, podczas gdy dla granicznych płomieni gazowych i gazowo-pyłowych liczba Re przyjmuje wartości mniejsze.

Z pomiarów tych wynika, że wszystkie płomienie powinny mieć strukturę laminarną. Przedstawione wcześniej pomiary temperatury oraz zdjęcia skompensowane płomieni (rys.8-11) wykazują jednak odmienną strukturę płomieni pyłowo-gazowych i pyłowych w porównaniu z płomieniami gazowymi i gazowo-pyłowymi. Graniczne płomienie gazowe i gazowo-pyłowe mają strukturę typowo laminarną, nawet płomienie gazowe o zawartości 6,6% CH_4 , o wyższej liczbie Reynoldsa, także wykazują laminarny charakter. Można to wyraźnie zaobserwować na zdjęciu skompensowanym (rys.8c), gdzie do wizualizacji linii prądu użyto śladowych ilości pyłu węglowego. Płomień gazowo-pyłowy posiada również strukturę zbliżoną do klasycznej struktury gazowego płomienia granicznego, opisanej przez Zeldowicza i innych [6].

Dla odmiany płomienie pyłowo-gazowe i pyłowe posiadają wyraźnie zarysowane struktury turbulენტne wewnątrz płomienia i czasami front tych płomieni rozbity jest już na oddzielne komórki (rys.10.11). W niektórych płomieniach front płomienia jest laminarny (rys.12c), lecz w pewnej odległości pojawiają się wyraźnie widoczne zawirowania. We wszystkich płomieniach, przy większych odległościach od frontu przepływ laminaryzuje



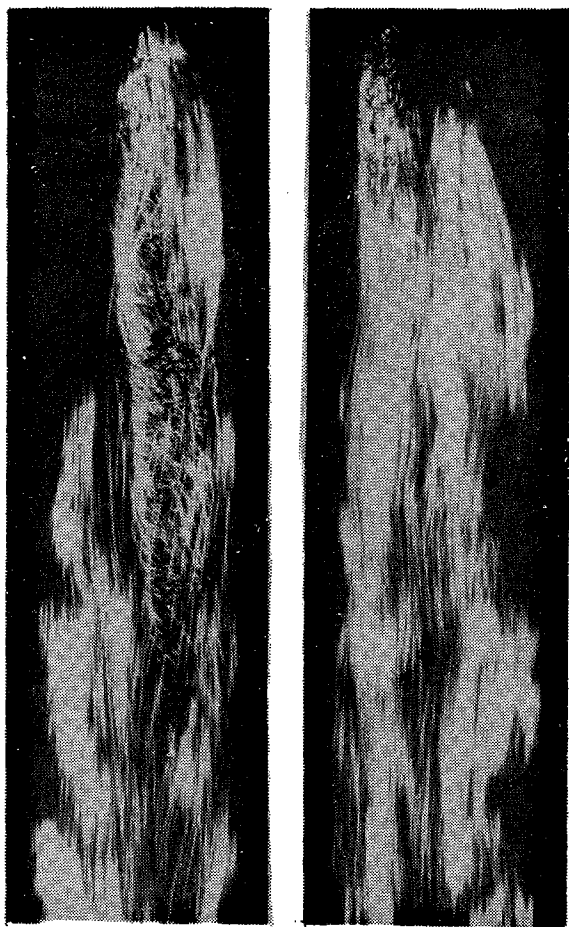
Rys.9. Zdjęcie skompensowane promienia gazowo-pyro-żowo-powietrznego; $C = 4,2\%$ CH_4 , $C = 0,019$ kg/m^3



Rys.8. Zdjęcia skompensowane promieni gazowo-powietrznego: a) 5,1% CH_4 , b,c) 6,6% CH_4

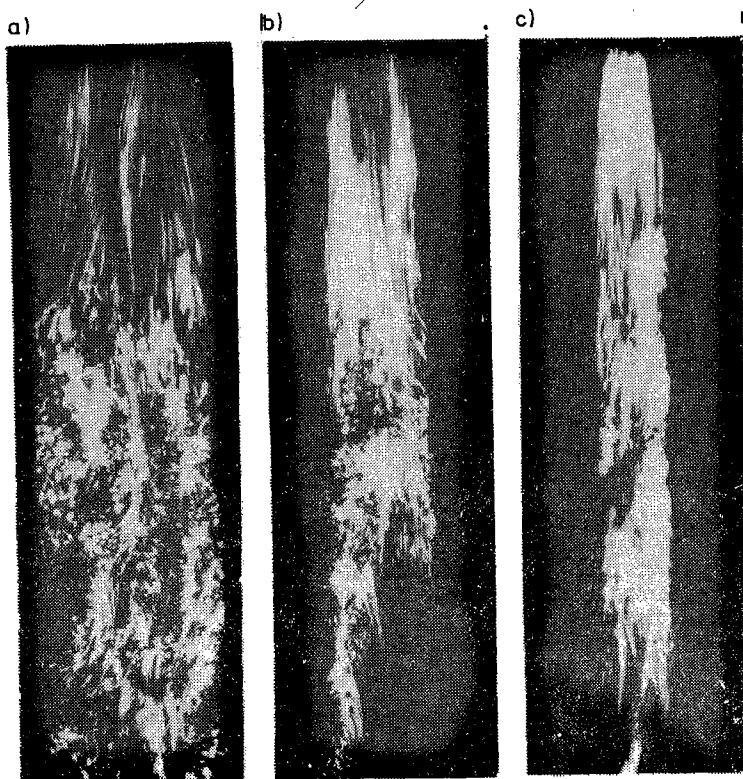


Rys.10. Zdjęcia skompensowane płomieni
pyłowo-gazowo-powietrznych; 1,6% CH₄,
C = 0,066 kg/m³



Rys.11. Zdjęcia skompensowane płomieni
pyłowo-powietrznych. $C = 0,103 \text{ kg/m}^3$

się, pomimo znacznego wzrostu prędkości przepływu w produktach spalania. Jest to spowodowane głównie większą jednorodnością produktów spalania oraz znacznym wzrostem lepkości.

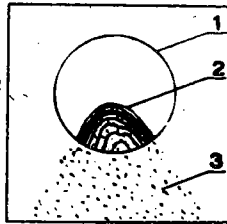
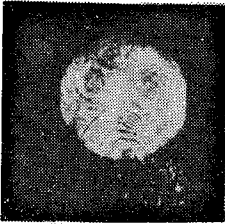


Rys.12. Zdjęcia skompensowane płomieni pyłowych w kanałach o różnej szerokości: a) 80 mm, b) 50 mm, c) 35 mm

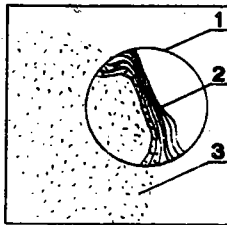
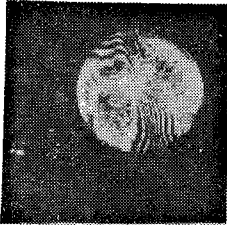
W celu dokładniejszego zbadania procesów zachodzących we froncie płomienia wykonano zdjęcia interferometryczne wydzielonego obszaru spalania. Obraz interferometryczny obejmował w tym przypadku tylko obszar środka komory o średnicy 35 mm. Z pozostałej części komory rejestrowano natomiast obraz bezpośredni. Zastosowanie takiej techniki filmowania umożliwiło równoczesne zarejestrowanie, niezależnie od siebie, obrazu interferometrycznego gorącego frontu produktów spalania oraz obrazu bezpośredniego przedstawiającego lokalizację zapalających się ziaren i aglomeracji pyłu.

Zdjęcia na rys.13 pokazują dwa z wielu typowych obrazów zarejestrowanych za pomocą kamery o częstotliwości filmowania

a)



b)



Rys.13. Zdjęcia interferometryczne bezpośrednie płomieni pyłowych: a) front płomienia, b) boczna powierzchnia frontu płomienia; 1 - pole widzenia interferometru, 2 - front gorących produktów spalania, 3 - palące się cząstki

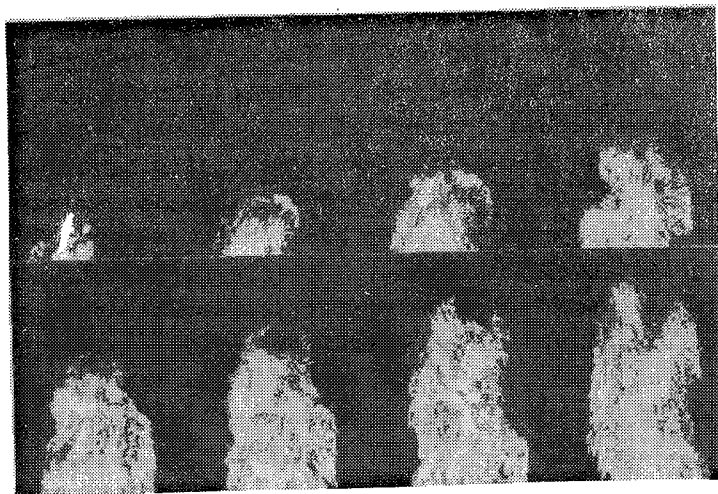
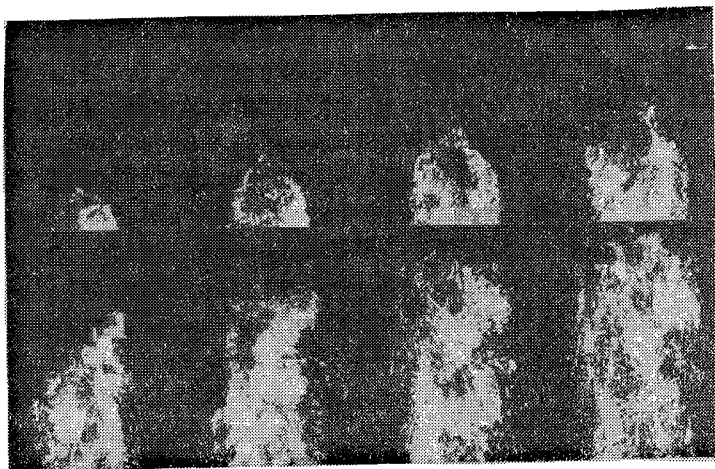
200 klatek/s. Na zdjęciach tych możemy wyraźnie zaobserwować położenie obszaru płomienia, gdzie następuje zapłon cząstek pyłu. Można zauważyć, że w części wiodącej płomienia, cząstki pyłu zapalają się w odległości 2-3 mm od punktu wiodącego, podczas gdy na bocznej powierzchni płomienia odległość ta jest większa i wynosi 5-10 mm. Zdjęcia te pokazują również, że cząstki i aglomeracje pyłu spalają się indywidualnie we froncie płomienia i nie widać oznak występowania płomienia gazowego.

Zdjęcia interferometryczne pozwoliły także stwierdzić, że najdrobniejsze struktury wirowe we froncie płomienia mają wymiary rzędu 1-3 cm.

Badano również wpływ szerokości kanału na strukturę płomienia. Stwierdzono, że jeżeli szerokość kanału maleje, to graniczne stężenie pyłu oraz graniczna prędkość rozprzestrzeniania się płomienia rosną, lecz liczba Reynoldsa zmienia się tylko nieznacznie.

Oprócz tego można zaobserwować mniejsze fluktuacje i słabiej zaznaczoną obecność struktur wirowych w węższym kanale. W celu uzupełnienia badań prowadzonych w kanale płaskim przeprowadzono także badania rozprzestrzeniania się płomienia w rurze pyreksowej o średnicy 0,16 m. Na rys.14 pokazano 6 kadrów z filmu przedstawiających kolejne fazy procesu rozprzestrzeniania się płomienia w granicznej mieszaniu pyłowo-po-

wietrznej. Widać na nich wyraźnie małe zawirowania deformujące front płomienia. Poza frontem płomienia można również zaobserwować zawirowania o dużo większej skali. Wizualna obserwacja takich płomieni wskazuje na ich spinowy charakter. We froncie tego płomienia można również rozróżnić palące się indywidualnie ziarna lub aglomeracje ziaren. Płomienie te mają jednak



Rys.14. Zdjęcia bezpośrednie płomienia pyłowego w szklanej rurze o średnicy 0,16 m. Częstość filmowania 24 klatki/s

typowo turbulentny charakter. Liczba Reynoldsa wynosi tutaj ok. 6000.

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Płomień gazowo-pyłowy, w którym dominującą fazą palną jest mieszanina metanowo-powietrzna rozprzestrzeniania się podobnie jak płomień w granicznych mieszaninach gazowych. Zgodnie z obserwacjami poczynionymi w pracach [8 i 9] proces spalania kontrolowany jest tutaj przez siły wyporu. Według tych teorii, spaliny unoszone są przez siły wyporu od dolnego otwartego końca do górnego zamkniętego końca kanału. Obliczona według Davisa-Taylora prędkość unieszenia gorącego "bąbla" dobrze opisuje prędkość propagacji płomienia dla tych przypadków. Struktura tych płomieni może być zadowalająco opisana przy wykorzystaniu modelu Zeldowicza i innych [6]. Laminarną strukturę posiadają również płomienie gazowe o wyższej zawartości metanu (6,6%), rozprzestrzeniające się ze znacznie wyższymi prędkościami, przy liczbach Reynoldsa dochodzących do 2000.

W granicznych mieszaninach pyłowych i pyłowo-gazowych obserwuje się strukturę płomieni zasadniczo różną od granicznych mieszanin gazowych. Grubość frontu płomienia jest tutaj ok. pięciokrotnie większa niż w granicznych mieszaninach gazowych, powierzchnia frontu spalania jest ok. dwukrotnie większa, a w strefie spalania pojawiają się wiry turbulentne.

Średnie temperatury produktów spalania są porównywalne z temperaturą produktów spalania granicznych mieszanin gazowych, lecz prędkość rozprzestrzeniania się płomieni pyłowych i pyłowo-gazowych jest ok. dwukrotnie wyższa. Całkowity czas spalania pyłu jest stosunkowo długi, zależy od wielkości cząstki i dla danych parametrów pyłu zawiera się w zakresie 0,05 do 0,2 s. Tak długie czasy spalania znacznie wydłużają całkowitą długość płomienia.

Front płomienia w mieszaninach pyłowych i pyłowo-gazowych jest zwykle bardzo nieregularny, może ulegać rozbiću na dwa podfronty (przy liczbach Reynoldsa ok. 2000). Oddziaływanie

tego frontu na pył rozpoczyna się już w niewielkiej odległości przed czołem płomienia. Jest ono wynikiem przepływu gazu wyindukowanego ruchem płomienia. W efekcie oddziaływań aerodynamicznych następuje zmiana prędkości cząstek od prędkości swobodnego opadania do prędkości bardzo zbliżonej do prędkości propagacji płomienia. Obliczenia numeryczne przeprowadzone dla 50 μm ziaren pyłu wykazują, że opadające swobodnie cząstki mogą osiągnąć prędkość równą prędkości przepływu gazu przed frontem płomienia, na drodze kilku centymetrów. Potwierdzeniem tego są zdjęcia rozwinięte, które pokazują, że prędkość ruchu pyłu w okolicy frontu płomienia jest niewiele mniejsza niż prędkość samego płomienia. Ten mechanizm wydłuża czas przebywania cząstek pyłu w czole płomienia i ułatwia jego zapłon. Na zdjęciach interferometrycznych można dostrzec widoczne oznaki zapłonu pyłu już w odległości ok. 1-3 mm za frontem gorących produktów gazowych. Poza punktem wiodącym płomienia odległości te są większe. Wynika to z istnienia większych prędkości względnych występujących między pyłem a produktami gazowymi. Zawirowania występujące w płomieniach pyłowych i pyłowo-gazowych mają różną intensywność w różnych obszarach płomienia. W tej samej mieszaninie palnej raz zajmują one duży obszar płomienia, innym razem są widoczne tylko w niewielkim jego obszarze. Pojawianie się tych zawirowań ma charakter przypadkowy i nie można ich przewidzieć. Jest to spowodowane głównie tym, że zawirowania są efektem niejednorodności pola wydzielania ciepła wewnątrz płomienia. Jest to z kolei wynikiem nierównomiernego rozpylania pyłu. Pomiar niejednorodności procesu rozpylania wykazuje zmiany lokalnej koncentracji rzędu $\pm 20\%$ koncentracji obliczeniowej.

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano uproszczony model procesu rozprzestrzeniania się płomienia w warunkach zbliżonych do dolnej granicy spalania. Płomień przemieszczający się wewnątrz kanału indukuje przepływ gazu przed swoim frontem. Przepływ ten oddziałuje aerodynamicznie z opadającymi swobodnie cząstkami i aglomeracjami pyłu, co w efekcie prowadzi do wyrównania prędkości gazu i cząstek. To z kolei powoduje wydłużenie czasu wzajemnego oddziaływania gorących gazów i cząstek pyłu, ułatwiając zapłon ziaren. Początkowo cząstki

i aglomeracje pyłu palą się indywidualnie i dopiero później można zaobserwować płomień gazowy wewnątrz zasadniczej struktury płomienia. Niedoskonałość rozpylenia pyłu jest przyczyną niejednorodności w procesie wydzielania ciepła i prowadzi do powstawania zawirowań. Zawirowania intensyfikują procesy wymiany masy i ciepła, wpływają na wielkość i kształt płomienia i prowadzą do zwiększenia prędkości jego propagacji. Poprawienie jednorodności mieszaniny w wyniku jej wymieszania i wzrostu lepkości będącego wynikiem wzrostu temperatury prowadzi do laminaryzacji przepływu w tylnej części płomienia. Z uwagi na stosunkowo długi czas spalania cząstek pyłu, całkowita grubość płomienia może osiągnąć 0,5 m.

5. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań wynika, że graniczne płomienie pyłowe i pyłowo-gazowe mają odmienną strukturę i odmienny mechanizm propagacji niż graniczne płomienie gazowe oraz gazowo-pyłowe. Graniczne płomienie pyłowe i pyłowo-gazowe charakteryzują się następującymi cechami:

1. Grubość frontu płomienia jest około pięciokrotnie większa w porównaniu z granicznymi płomieniami gazowymi i wynosi 11-12 mm.

2. Proces spalania pyłu przebiega początkowo na drodze "indywidualnego" spalania cząstek i aglomeracji pyłu. We froncie płomienia nie widać żadnych oznak płomienia gazowego. Pojawia się on dopiero w większych odległościach od czoła płomienia.

3. We froncie płomienia obserwuje się struktury wirowe nawet przy liczbach Reynoldsa < 2000 . Zawirowania w płomieniach pyłowych są wynikiem niejednorodności pola wywiązywania się ciepła, co z kolei spowodowane jest niedoskonałym rozpyleniem pyłu w mieszaninie. Struktury wirowe zanikają w dalszych odległościach od czoła płomienia i obserwuje się laminaryzację przepływu.

4. Prędkość rozprzestrzeniania się płomienia w granicznych mieszaninach pyłowych i pyłowo-gazowych jest około dwukrotnie

większa niż w granicznych mieszaninach gazowych. Spowodowane to jest znacznym wzrostem powierzchni frontu płomienia oraz intensyfikacją procesów wymiany masy i ciepła w płomieniach pyłowych i pyłowo-gazowych.

Wnioseków tych nie należy jeszcze uogólniać na wszystkie warunki i rodzaje mieszanin pyłowych. Mogą być one słuszne tylko dla przebadanych rodzajów pyłów w danych układach badawczych. Przed wyciągnięciem ogólniejszych wniosków należy przeprowadzić badania dodatkowe dla bardziej zróżnicowanych granicznych mieszanin pyłowych i układów badawczych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Wolański P.: Explosion Hazards of Agricultural Dust. Proceedings of the International Symposium on Grain Dust, Manhattan, Kansas 1979, pp.422-426.
- [2] Hertzberg M., Cashdollar K.L. and Opferman J.J.: The Flammability of Coal Dust-Air Mixtures. U.S. Bureau of Mines RI 8360 (1979).
- [3] Buksowicz W., Klemens R., Wolański P.: An Investigation of the Structure of Dust-Air Flame. Second Int. Specialists Meeting of the Combustion Institute on Oxidation, Budapest 1982.
- [4] Buksowicz W., Wolański P.: Flame Propagation in Dust-Air Mixtures at Minimum Explosive Concentration; Shock Waves, Explosions and Detonations. Progress in Astronautics and Aeronautics 86, 414-425.
- [5] Jarosiński J., Strehlow R.A., Azarbarzin A.: The Mechanism of Lean Limit Extinguishment of an Upward and Downward Propagation Flame in a Standard Flammability Tube. 19th Symp. (Int.) on Combustion, 1982.
- [6] Zeldovitch Ya.B., Istratov A.G., Kidin N.I. and Libro-vitch V.B.: Flame Propagation in Tubes: Hydrodynamics and Stability. Comb. Sci. and Tech. 24, 1-13, 1980.
- [7] Oppenheim A.K., Ghoniem A.F.: Aerodynamic Features of Turbulent Flames. AIAA 21st Aerospace Scientific Meeting, 1983.
- [8] Babkin V.S. et al.: Effect of Tubes Diameter on the Propagation Limits of Homogeneous Gas Flames. The Physics of Combustion and Explosion 18, No. 2, 1982 (in russian).
- [9] Markstein G.: Experimental and Theoretical Studies of Flame Front Stability. J. Aero. Sci. 18, 199.

СТРУКТУРА ПЛАМЕНИ В ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЯХ ВЕЛИЗИ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ГОРЕНИЯ

А н н о т а ц и я

В работе приводятся результаты исследований структуры и механизма распространения пламени в газовых, пылевых и пыле-газовых смесях вблизи нижней границы горения. Исследования проводились в основном в вертикальном канале длиной 1,2 м прямоугольного сечения размером $0,035 \times 0,088 \text{ м}^2$. Во время исследований была использована техника интерферометрических съемок, а также развернутых и компенсированных съемок. Измерялась также температура пламени при помощи резистивного термометра, обладающего очень малой постоянной времени. Исследовалась пыль бурого угля, а в гибридных смесях дополнительно использовался технический метан. Установлено, что структура пылевого и пыле-газового пламени, исследованного в идентичных условиях, ко-ренным образом отличается от структуры газового пламени. На основе проведенных исследований была разработана упрощенная модель распространения пламени в пылевоздушных смесях в условиях, близких нижней границы сгорания.

FLAME STRUCTURE IN HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS MIXTURES NEAR THE LEAN FLAMMABILITY LIMIT

S u m m a r y

In this work the structure and the mechanism of the flame propagation in gas dust and dust-gas mixtures near the flammability limit was studied. Experiments were conducted mainly in a rectangular duct of dimensions $0,035 \times 0,088 \text{ м}^2$ and in length 1,2 m. Interferometric cinematography as well as direct frame, streak and compensation photography were used for this study. Temperature measurements with a resistance thermometer were also conducted. Lignite dust were used in tests and in hybrid mixtures technical methane was used as the gaseous fuel. It was found that dust and dust-gas flames under the same testing conditions have a very different structure than gas flames. The simplified model of flame propagation in dust-air mixtures at conditions close to the lean limit is presented on the basis of the conducted experiments.