

Jadwiga Fangrat

Instytut Techniki Budowlanej

Wiesław Glinka, Piotr Wolański, Marek Woliński

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

STRUKTURA DETONACJI W MIESZANINACH PYŁÓW ORGANICZNYCH Z TLENEM

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zjawiska przejścia do detonacji i struktury detonacji w mieszaninach pyłów organicznych z tlenem (pyłu drzewnego, pyłów węgla kamiennego i brunatnego). Badania przeprowadzone były w dwóch pionowych rurach detonacyjnych. Do inicjacji procesu spalania używano słabych źródeł zapłonu. Zaobserwowano, że dla wszystkich badanych mieszanin przejście do detonacji zachodziło stopniowo. W pewnych przypadkach przed właściwym frontem płomienia widoczne były pojedyncze punkty zapłonu. Nie zaobserwowano fal detonacyjnych. Prędkość detonacji zawierała się w granicach od 1550 m/s do 2160 m/s.

Na podstawie analizy pomiarów ciśnienia, świecenia oraz zdjęć rozwiniętych określono strukturę fali detonacyjnej. Stwierdzono, że w niewielkiej odległości za frontem fali można zaobserwować dodatkowe fale uderzeniowe. Szerokość strefy reakcji wynosi od 5 do 15 cm, a maksymalne temperatury we froncie detonacji dochodzą do 2900 K.

W przypadku silnie reaktywnego pyłu węgla brunatnego osiadłego na ściankach rury można było również zaobserwować quasi-detonacyjne spalanie.

WSTĘP

Mieszaniny pyłowo-powietrzne stanowią duże zagrożenie w przemyśle z uwagi na swoje właściwości wybuchowe. W niektórych przypadkach wielkość zniszczeń spowodowanych wybuchami pyłów przemysłowych była tak duża, że prawdopodobne było wystąpienie

detonacji. Spowodowało to podjęcie badań zjawiska przejścia do detonacji w takich mieszaninach [1, 2]. Wcześniejsze badania eksperymentalne wykazały, że w niektórych mieszaninach pyłów organicznych przejście do detonacji jest możliwe [3-5].

Celem obecnej pracy było badanie zjawiska przejścia do detonacji i struktury detonacji w mieszaninach pyłów organicznych z tlenem. Atmosfera tlenu umożliwia uzyskanie przejścia do detonacji w stosunkowo krótkiej rurze i przy małej energii inicjacji. Takie badania modelowe pozwalają jednak właściwie ocenić skłonność mieszaniny do spalania detonacyjnego w warunkach rzeczywistych. Ostatnio G a r d n e r [2] przedstawił eksperymentalne dowody wystąpienia gwałtownego przyspieszenia spalania w mieszaninie pyłu węgla kamiennego z powietrzem. W tym eksperymencie płomień osiągał prędkość 2850 m/s przy wzroście ciśnienia do 81,5 barów. Są to parametry charakterystyczne dla zjawiska przejścia do detonacji. Zarówno ten eksperyment, jak i wcześniejsze (przeprowadzone przez C y b u l s k i e g o [1], W o l a ń s k i e g o i innych [3, 4]), pozwalają przypuszczać, że wystąpienie detonacji w mieszaninach pyłów organicznych z powietrzem i z tlenem jest możliwe, a dla lepszego zrozumienia procesów z tym związanych, konieczne jest przeprowadzenie badań modelowych.

1. CHARAKTERYSTYKA PYŁÓW

Do badań wybrano trzy rodzaje pyłów organicznych o dużej zawartości części lotnych: pyły węgla brunatnego, kamiennego oraz pył drzewny. Parametry fizyko-chemiczne tych pyłów przedstawione są w tab.1. Parametry wybuchowe, takie jak: maksymalne ciśnienie wybuchu, maksymalna szybkość narastania ciśnienia i dolna granica wybuchowości zostały również określone przy użyciu standardowej aparatury (komora cylindryczna o objętości 5,6 l) - tab.2.

Pył węgla brunatnego charakteryzował się najwyższym ciśnieniem wybuchu i największą szybkością narastania ciśnienia

T a b e l a 1

Parametry fizyko-chemiczne badanych pyłów

Rodzaj pyłu	pył węgla brunatnego	pył węgla kamiennego	pył drzewny
Granulacja [μm]	≤ 120 ≤ 75	≤ 120	≤ 120
Ciepło spalania [kJ/kg]	30 750 *	25 750	18 170
Zawartość części lotnych [%]	55	32	76
Zawartość popiołu [%]	4	11	1,6

* Wartość opałowa.

T a b e l a 2

Parametry wybuchowe badanych pyłów

Rodzaj pyłu	pył węgla brunatnego	pył węgla kamiennego	pył drzewny
Maksymalne ciśnienie wybuchu [MPa]	0,75	0,70	0,65
Maksymalna szybkość narastania ciśnienia [MPa/s]	33	19,5	10
Dolna granica wybuchowości [kg/m^3]	0,10	0,19	0,14

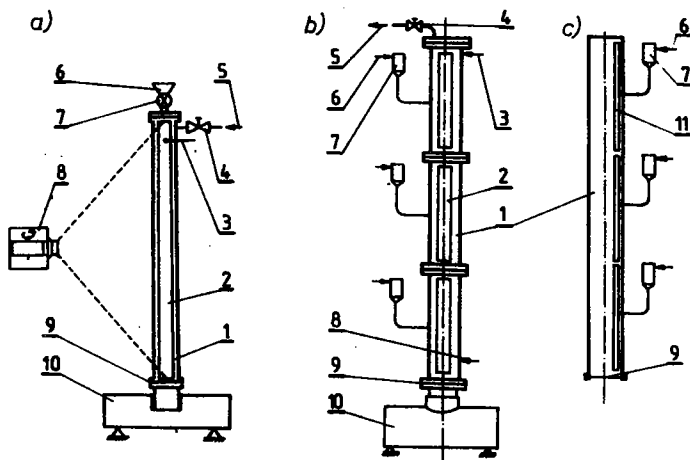
wybuchu. Spośród badanych pyłów, najmniej wybuchowy był pył drzewny (pomimo największej zawartości części lotnych).

2. OPIS BADAŃ

Badania przeprowadzono w dwóch następujących etapach:

- badanie procesu przejścia do detonacji,
- badanie struktury detonacji.

Do badań wykorzystano dwie pionowe rury detonacyjne, przedstawione schematycznie na rys.1. Pierwsza rura, o długości 3,2 m i kwadratowym przekroju poprzecznym, o długości



Rys.1. Schematy rur detonacyjnych: a) rura o długości 3,2 m i kwadratowym przekroju poprzecznym o długości boku 0,05 m: 1 - rura detonacyjna, 2 - okno ze szkła organicznego, 3 - zapłon, 4 - zawór, 5 - wlot tlenu, 6 - ślimakowy podajnik pyłu, 7 - zawór, 8 - kamera bębnowa, 9 - membrana, 10 - zbiornik tłumiący; b) rura o długości 4,5 m i kołowym przekroju poprzecznym, o średnicy 0,08 m: 1-4 - jak na rys.a, 5 - połączenie z pompą próżniową, 6 - wlot sprężonego tlenu, 7 - pojemnik pyłu, 8 - usytuowanie czujnika ciśnienia i pirometru, 9 - membrana, 10 - zbiornik tłumiący, 11 - perforowana rurka; c) schemat systemu rozpylania pyłu w rurze o długości 4,5 m; oznaczenia jak na rys.b

boku 0,05 m przedstawiona jest na rys.1a. Jedna ściana rury wykonana była ze szkła organicznego, co umożliwiało rejestrację procesu spalania przy użyciu kamery bębnowej. Pył podawany był do rury przez podajnik ślimakowy umieszczony na jej wierzchołku.

Dolna część rury połączona była z układem wentylacyjnym. Zapłon realizowany był poprzez wyładowanie baterii kondensatorów o energii 350 J przez cienki drucik miedziany, umieszczony w górnej części rury. Podajnik został wykalibrowany dla każdego z badanych pyłów, po czym określono koncentracje pyłów

wewnątrz rury. Przed każdym eksperymentem rura była przepłukiwana tlenem przez kilka minut. Następnie uruchamiano podajnik na około 12 s, aby wypełnić wnętrze rury mieszaniną pyłowo-powietrzną o założonej koncentracji pyłu, po czym podajnik był automatycznie wyłączany i w tej samej chwili inicjowane było spalanie w górnej części rury. Proces rejestrowano przy użyciu kamery bębnowej.

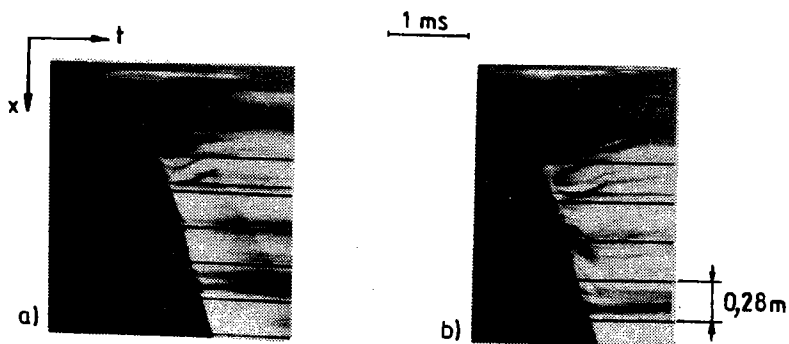
Podczas tej serii eksperymentów detonację zaobserwowano tylko w przypadku pyłu węgla brunatnego. Można było przypuszczać, że w dłuższej rurze lub w mieszaninach o wyższych koncentracjach pyłu przejście do detonacji byłoby możliwe dla wszystkich badanych pyłów.

Wobec tego, w następnej serii eksperymentów wykorzystano rurę o długości 4,5 m i kołowym przekroju poprzecznym, o średnicy 0,08 m (rys.1b). Wzdłuż rury wycięta była szczelina przesłonięta szkłem organicznym, co umożliwiała rejestrację procesu spalania. Pył rozpylany był z trzech pojemników rozmieszczonych równomiernie wzdłuż rury. Pojemniki połączone były z perforowanymi rurkami o długości 1,5 m umieszczonymi wewnątrz rury blisko ścianki. Taki system rozpylania przedstawiony schematycznie na rys.1c umożliwiał utworzenie założonej i dostatecznie jednorodnej mieszaniny pyłowo-tlenowo-powietrznej (88% tlenu) pod ciśnieniem atmosferycznym. Proces rozpylania pyłu sterowany był automatycznie. Czas przepływu sprężonego tlenu ze zbiorników do rury określony był uprzednio eksperymentalnie. Po rozproszeniu pyłu i zamknięciu zaworów, w górnej części rury realizowany był zapłon. Jako źródła zapłonu użyto niskoenergetycznego łuku elektrycznego w przypadku pyłu drzewnego oraz główek zapalonych dla pyłów węgla kamiennego i brunatnego. Proces spalania rejestrowany był przy użyciu kamery bębnowej.

Podczas eksperymentów rejestrowano również zmiany ciśnienia i temperaturę we froncie spalania. Do rejestracji przebiegów ciśnienia używano czujnika ciśnienia typu Kistler 603 B1 umieszczonego w dolnej części rury. W tym samym przekroju rury, za pomocą trójbarwowego pirometru mierzona była temperatura płomienia.

3. WYNIKI I DYSKUSJA

Proces przejścia do detonacji był początkowo badany w rurze o długości 3,2 m w mieszaninach pyłu węgla brunatnego i drzewnego. W tych warunkach detonację można było zaobserwować

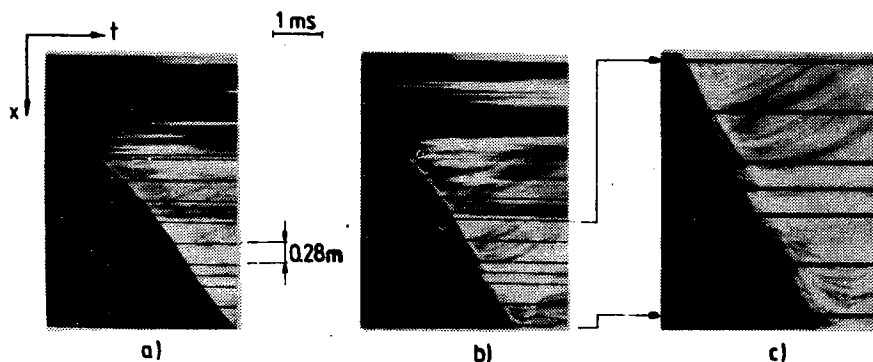


Rys.2. Typowe zdjęcia rozwinięte przejścia do detonacji w mieszaninie pyłu węgla brunatnego: a) $c=0,54 \text{ kg/m}^3$, $v = 1700 \text{ m/s}$; b) $c = 1,40 \text{ kg/m}^3$, $v = 1900 \text{ m/s}$

tylko w przypadku pyłu węgla brunatnego. W mieszaninach pyłu drzewnego z tlenem uzyskiwano tylko ciągłe przyspieszanie frontu spalania wzdłuż długości rury. Typowe zdjęcia rozwinięte procesu przejścia do detonacji w tej rurze pokazane są na rys.2. Zdjęcia przedstawiają inicjację detonacji w mieszaninie pyłu węgla brunatnego z tlenem przy różnych koncentracjach pyłu. Wierzchołek rury znajduje się w górnej części fotografii, a fala udrzeniowa przemieszcza się w dół. Widoczne jest stosunkowo szybkie przejście do detonacji, na odcinku o długości 1-0,5 m, który zmniejsza się ze wzrostem koncentracji pyłu. Mieszanina pyłu węgla brunatnego detonuje przy koncentracji pyłu w zakresie od $0,23 \text{ kg/m}^3$ do $1,40 \text{ kg/m}^3$ przy prędkości zmieniającej się w zakresie od 1550 m/s do 1900 m/s. Widoczne na rys.2a fluktuacje prędkości spowodowane są prawdopodobnie niejednorodnością mieszaniny. Można również zaobserwować zapłon mieszaniny przed właściwym frontem płomienia, w dolnej części rury.

Podczas eksperymentów zaobserwowano również quasi-detonacyjne spalanie warstwy pyłu węgla brunatnego osiadłego na

ściankach rury. Na rys.3 widoczne są przykładowe zdjęcia rozwinięte tego procesu. Widać wyraźnie, że początkowo front płomienia stopniowo przyspiesza, po czym osiąga stałą prędkość.

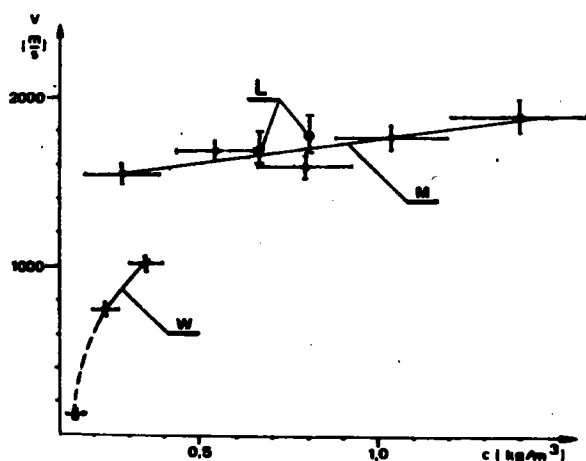


Rys.3. Zdjęcia rozwinięte quasi-detonacyjnego spalania warstwy pyłu węgla brunatnego: a) $c = 0,24 \text{ kg/m}^3$, $v_{\text{max}} = 750 \text{ m/s}$; b) $c = 0,35 \text{ kg/m}^3$, $v_{\text{max}} = 1000 \text{ m/s}$; c) powiększenie struktury frontu spalania quasi-detonacyjnego widocznej na zdjęciu b

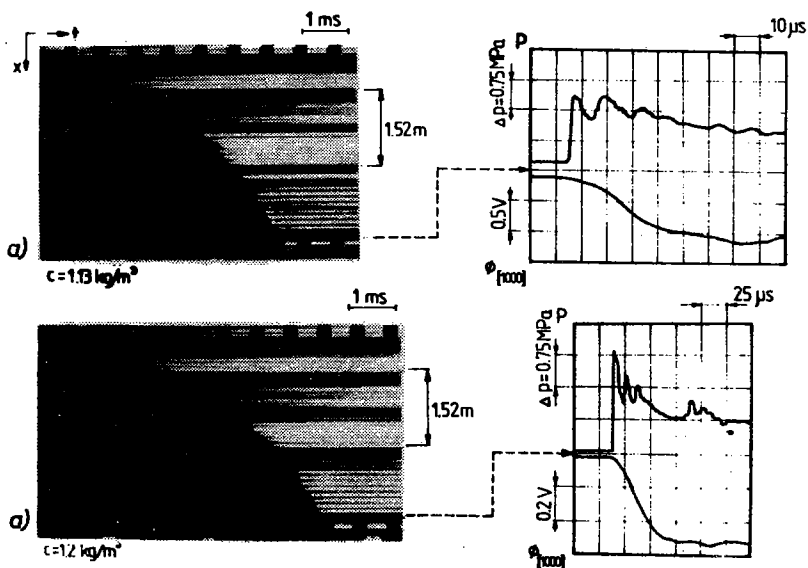
Wartość tej prędkości zależy od ilości pyłu i wzrasta ze wzrostem jego koncentracji. Na rys.3b widoczna jest interesująca, podwójna struktura frontu spalania. Jest ona związana prawdopodobnie z intensyfikacją procesu spalania spowodowaną postępującym unoszeniem pyłu przez wiodącą falę uderzeniową.

Badania przeprowadzone w pionowej rurze o długości 4,5 m wykazują zasadniczo podobne rezultaty. Wyniki wszystkich eksperymentów przeprowadzonych dla pyłu węgla brunatnego przedstawiono na rys.4, gdzie zaznaczone są również odchylenia standardowe pomiarów koncentracji pyłu i prędkości. Dwa punkty wyższej krzywej obrazują wyniki uzyskane w dłuższej rurze, w której obserwowano prędkości bardzo zbliżone do prędkości osiąganych w krótszej rurze. Wyniki mogą być zinterpolowane prostą. Dolna krzywa przedstawia rezultaty uzyskane dla warstwy pyłu węgla brunatnego osiadłego na ściankach rury. Dwa punkty po prawej stronie krzywej odpowiadają quasi-detonacyjnemu spalaniu. Na powiększeniu (rys.3c) widoczna jest bardziej szczegółowo struktura tego frontu spalania.

W ramach drugiego etapu badane było zjawisko przejścia do detonacji i struktura detonacji w dłuższej rurze dla wszy-



Rys.4. Prędkość V frontu płomienia w funkcji koncentracji pyłu węgla brunatnego; W - quasi-detonacyjne spalanie (warstwa pyłu na ścianie rury), M, L - detonacja (pył rozproszony wewnątrz rury), L - wyniki otrzymane w rurze o długości 4,5 m

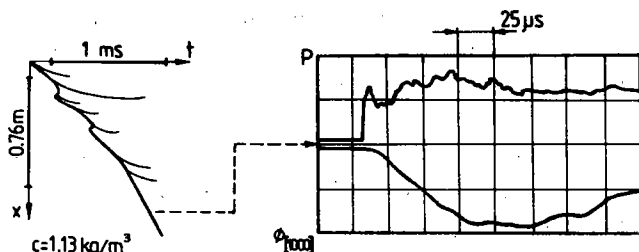


Rys.5. Typowe zdjęcia rozwinięte przejścia po detonacji w dłuższej rurze wraz z przebiegiem ciśnienia (p) i profilami świecenia frontu detonacji (dla $\lambda = 1000$ nm, $\phi [1000]$), mieszanin pyłu drzewnego: a) $c = 1,13$ kg/m³, $v = 1950$ m/s; b) $c = 1,20$ kg/m³, $v = 2060$ m/s

stkich wymienionych uprzednio pyłów. Na rys.5 widoczne są typowe zdjęcia rozwinięte przejścia do detonacji w mieszaninie pyłu drzewnego z tlenem i powietrzem wraz z profilami ciśnienia i świecenia frontu detonacji. Wszystkie zdjęcia pokazują stosunkowo powolne przejście do detonacji na odcinku o średniej długości 3 m od punktu zapłonu.

Przed przejściem do detonacji widoczny jest zapłon mieszaniny pyłu poprzedzający właściwy front płomienia, a zmiany prędkości płomienia widoczne są podczas przejścia. Tylko w jednym przypadku można było zaobserwować słabą oznakę obecności fali detonacyjnej. W samym froncie detonacji obecnych było zwykle kilka pików ciśnienia. Może to sugerować bardziej złożoną strukturę frontu detonacji i prawdopodobieństwo występowania poprzecznych fal uderzeniowych. Określenie położenia maksymalnej temperatury i jej wartości możliwe było na podstawie zarejestrowanych na oscyloskopie krzywych świecenia dla trzech długości fal (na rys.5 widoczna jest emisja dla długości fali $\lambda = 1000$ nm). Stwierdzono, że maksimum temperatury położone jest w odległości od 5 cm do 15 cm za wiodącą falą. Oznacza to, że odległość wiodącej fali uderzeniowej od określonej teoretycznie płaszczyzny C-J jest tego samego rzędu.

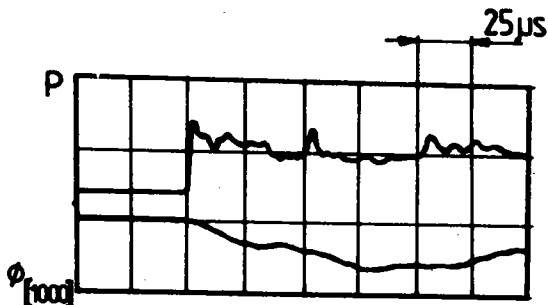
Rysunek 6 przedstawia schemat przejścia do detonacji wraz z profilami ciśnienia i świecenia frontu detonacji w pyłe węgla kamiennego. Podstawowe cechy tej detonacji są podobne



Rys.6. Schemat przejścia do detonacji wraz z profilami ciśnienia (p) i świecenia ($\phi_{[1000]}$) frontu detonacji w mieszaninie pyłu węgla kamiennego

jak w przypadku pyłu drzewnego. Różne są tylko wartości prędkości detonacji i maksymalnych temperatur.

Zmiany ciśnienia i emisji promieniowania frontu detonacji pyłu węgla brunatnego widoczne są na rys.7. Także w tym przypadku obserwowane zmiany ciśnienia i położenie maksimum temperatury są podobne do uzyskanych dla poprzednich pyłów.



Rys.7. Typowe profile ciśnienia (p) i świecenia frontu detonacji w mieszaninie pyłu węgla brunatnego w dłuższej rurze; $c = 0,67 \text{ kg/m}^3$, $v = 1650 \text{ m/s}$

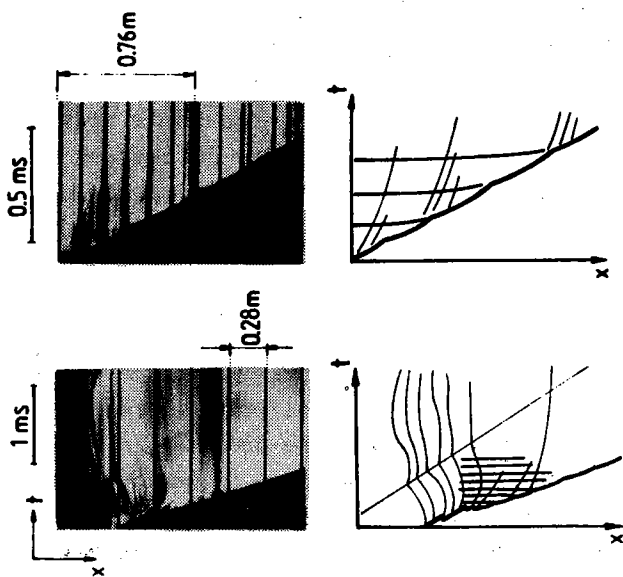
najdłuższe czasy opóźnień zapłonu za czołem fali uderzeniowej.

Stwierdzono, że dla wszystkich badanych mieszanin odległość, na jakiej narastał wiodący pik ciśnienia (grubość frontu fali uderzeniowej), była dużo większa niż dla mieszanin gazowych i zmieniała się w zakresie od 2÷8 mm.

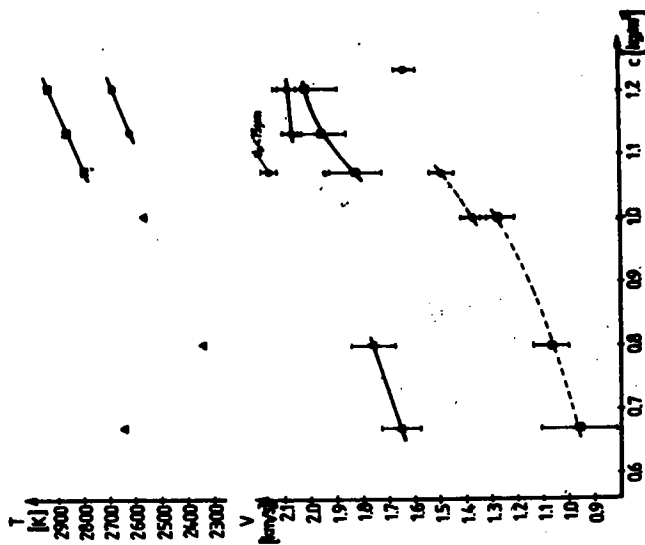
Dla mieszanin znajdujących się w pobliżu granicy detonacji zaobserwowano oscylację prędkości detonacji podobną do oscylacji prędkości frontu w detonacji spinowej w mieszaninach gazowych (rys.8). Na rys.8a widoczna jest pojawiająca się kolejno w oknie rury tylna fala spływowa oraz słaba oscylacja, podczas gdy wyraźne oscylacje frontu prędkości detonacji można zaobserwować na rys.8b.

Maksymalna temperatura we froncie detonacji zmierzona przy użyciu trójbarwowego pirometru zawierała się w granicach od 2350 do 2900 K. Wartości te zbliżone są do wartości uzyskanych przez Kaufmana i innych [4] i numerycznie obliczonych przez Wolańskiego i innych [6].

Rys.9 przedstawia wszystkie wyniki uzyskane w dłuższej rurze. Prędkość detonacji osiągała wartości do 2160 m/s i zależna była w dużym stopniu od koncentracji pyłu. Dla przypadków, w których nie uzyskano przejścia do detonacji, linie prze-



Rys. 8. Zdjęcia rozwinięte oscylacji prędkości detonacji: a) mieszanina pyłu węgla brunatnego w krótszej rurze: ($c = 0,23 \text{ kg/m}^3$, $v = 1550 \text{ m/s}$), b) mieszanina pyłu drzewnego w dłuższej rurze ($c = 1,13 \text{ kg/m}^3$, $v = 1890 \text{ m/s}$)



Rys. 9. Prędkość detonacji i maksymalna temperatura we froncie detonacji w funkcji koncentracji dla trzech różnych typów pyłu: M - pył drzewny, $d_p \leq 120 \mu\text{m}$; B - pył węgla kamiennego, $d_p \leq 120 \mu\text{m}$; ■ - pył węgla brunatnego, $d_p \leq 75 \mu\text{m}$

rywane obrazują maksymalną prędkość propagacji płomienia w końcowym odcinku rury. Przejście do detonacji najłatwiej było zrealizować w mieszaninach pyłu węgla brunatnego (o wysokim cieple spalania i dużej zawartości części lotnych), podczas gdy wysokoenergetyczny pył, ale z mniejszą zawartością części lotnych (węgiel kamienny) lub niskokaloryczny pył o dużej zawartości części lotnych (pył drzewny) miały mniejszą skłonność do przejścia w detonację.

Można było zaobserwować, że zdolność mieszaniny do wystąpienia detonacji i podtrzymania stabilnej detonacji w mieszaninach drobnych pyłów zależna jest nie tylko od zawartości części lotnych w pyłe, lecz także od właściwości energetycznych mieszaniny.

4. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Przejście do detonacji w mieszaninach pyłów organicznych z tlenem jest możliwe nawet dla słabego źródła zapłonu, jeśli rura jest dostatecznie długa. Takie przejście zaobserwowano dla trzech rodzajów pyłów: pyłu węgla brunatnego i kamiennego oraz pyłu drzewnego. Przed przejściem obserwowano zapłon pyłu poprzedzający właściwy front płomienia oraz zmiany prędkości płomienia w obszarze przejścia do detonacji.
2. Dla drobnych i reaktywnych pyłów o dużej zawartości części lotnych (pył węgla brunatnego) osiadłych na ściankach rury, można zaobserwować quasi-detonacyjne spalanie.
3. Dla pyłu drzewnego i węgla brunatnego w warunkach bliskich granicy detonacji zaobserwowano oscylację frontu detonacji (podobną do detonacji spinowej w mieszaninach gazowych).
4. Prędkość detonacji zarejestrowana podczas eksperymentów mieściła się w granicach od 1550 m/s do 2160 m/s.
5. Dla wszystkich przypadków detonacji można było zaobserwować jedną lub więcej fal uderzeniowych pomiędzy wiodącą falą uderzeniową a płaszczyzną maksymalnej temperatury.

6. Pomiarы wykazały, że maksymalna temperatura (zblizona do płaszczyzny C-J) była umiejscowiona średnio 5-15 cm za wodącym frontem i osiągała wartości od 2350 do 2900 K.

Przeprowadzone eksperymenty dostarczyły bardziej szczegółowych informacji o zjawisku przejścia do detonacji w mieszaninach pyłowych i strukturze tej detonacji, ale dalsze badania są konieczne dla lepszego zrozumienia zachodzących procesów.

LITERATURA

- [1] Cybulski W.: Detonation of Coal Dust. Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences 19 (1971), p.37-41.
- [2] Gardner B.R., Winter R.J. and Moore M.I.: Deflagration-to-Detonation Transition in Ducted Coal Dust/Air Suspension, Second International Colloquium on Dust Explosions, Jadwisin, November 3-6, 1986.
- [3] Kauffman C.W., Wolański P., Ural E., Nicholls J.A., Van Dyk R.: Shock Wave Ignited Combustion of Grain Dust. Proceedings of the International Symposium on Grain Dust, Manhattan, Kansas 1979, pp. 164-190.
- [4] Kauffman C.W., Wolański P., Arisoy A., Adams P.R., Maker B.N. and Nicholls J.A.: Dust, Hybrid and Dusty Detonations. Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations: AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics (edited by J.R. Bowen, N. Manson, A.K. Oppenheim and R.I. Soloukhin), Vol. 94, pp.221-240, AIAA, New York 1984.
- [5] Fangrat J., Glinka W., Wolański P.: Flame Acceleration and Detonation Transition in the Suspension and Layer of Organic Dusts, Göttingen, April 1986.
- [6] Wolański P., Lee D., Sichel M., Kauffman C.W. and Nicholls J.A.: The Structure of Dust Detonations: AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics (edited by J.R. Bowen, N. Manson, A.K. Oppenheim and R.I. Soloukhin), Vol. 94, pp.241-263, AIAA, New York 1984.

СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИИ В СМЕСЯХ ОРГАНИЧЕСКОЙ ПЫЛИ С КИСЛОРОДОМ

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований явления перехода горения в детонацию и структуры детона-

ции в смесях органической пыли (древесная пыль, пыль каменного и бурого угля) с кислородом. Исследования проводились в двух вертикальных детонационных трубах. Для иницирования процесса горения использовались слабые источники зажигания. Отмечается, что для всех исследуемых смесей переход в детонацию происходит постепенно. В некоторых случаях перед собственно фронтом пламени наблюдаются одиночные очаги воспламенения. Ретонационные волны обнаружены не были. Скорость детонации изменялась в пределах от 1550 м/с до 2160 м/с. Анализ результатов измерений давления, свечения и разверток дает возможность определения структуры обнаруженной детонационной волны. Утверждается, что на небольшом расстоянии за фронтом волны образуются дополнительные ударные волны. Ширина зоны реакции составляет от 5 до 15 см, а максимальные температуры во фронтовых частях волны доходят до 2900 К. В случае пыли бурого угля, отличающейся большой реактивностью, осевшей на стенках трубы, также наблюдается псевдодетонационное сгорание.

DETONATION STRUCTURE OF ORGANIC DUSTS-OXYGEN MIXTURES

S u m m a r y

The deflagration to detonation transition process as well as the structure of detonation were studied in vertical tubes for organic dust-oxygen mixtures (wood dust, brown and black coal dusts). Two vertical tubes were used: one with rectangular cross-section of 0.05 m and with the length of 3.2 m and the other with circular cross-section of 0.08 m and the length of 4.5 m. Weak initiation sources, i.e. exploding wire, weak electric arc or electrical fuse heads were applied.

It was found that transition to detonation was gradual for all mixtures. In some cases, however, the ignition spots were visible ahead of original flame front. Retonation waves were not observed. Recorded detonation velocities are within the range of 1550 m/s to 2160 m/s.

The detonation structure was examined by means of pressure measurements, recording of the radiation emission in three different wavelengths and by direct streak photography. It was found that a few pressure peaks were usually present in the detonation front; the distance between the leading shock and C - J plane varied from 5 cm to 15 cm and the maximum temperature did not exceed 2900 K.

In the case of highly reacting brown coal dust sticking initially to the tube walls, the quasi-detonation combustion was also observed.