

Piotr Wolański

Instytut Techniki Ciepłej  
Politechniki Warszawskiej

## ZAPŁON I SPALANIE PYŁÓW ORGANICZNYCH W FALACH UDERZENIOWYCH

Przedstawiono krótki przegląd badań zapłonu pyłów w falach uderzeniowych, inicjowanie spalania detonacyjnego przez fale uderzeniowe oraz badań struktury i zakresu występowania detonacji w mieszaninach pyłów organicznych z powietrzem.

### WPROWADZENIE

Badania zapłonu i spalania pyłów organicznych w falach uderzeniowych są prowadzone od szeregu lat, lecz dopiero w ostatnich latach znacznie zwiększyła się liczba publikacji dotyczących tego problemu. Jest to związane w szczególności ze stale wzrastającym zagrożeniem wybuchowym licznych pyłów przemysłowych.

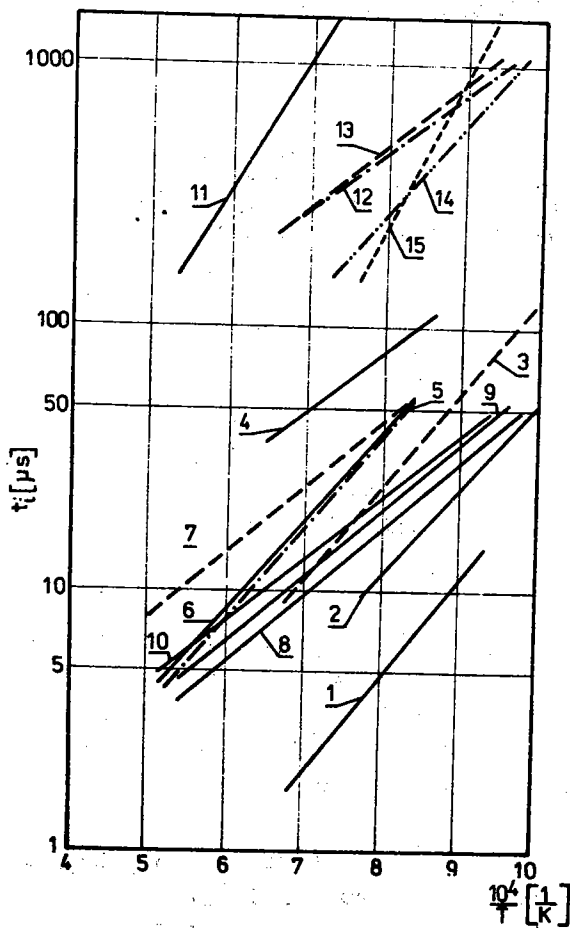
Wybuchy pyłowe często są inicjowane przez mniejsze lokalne wybuchy, same wybuchy pyłowe mogą również być źródłem fal uderzeniowych. Istotnym elementem większości wybuchów pyłowych są więc fale uderzeniowe mogące inicjować zapłon, intensyfikować spalanie, a w efekcie doprowadzić nawet do spalania detonacyjnego.

Celem obecnej pracy jest przedstawienie krótkiego przeglądu badań zapłonu pyłów za falą uderzeniową, inicjowania spalania detonacyjnego przez fale uderzeniowe oraz badań struktury i zakresu występowania detonacji w mieszaninach pyłowo-

-gazowych. Praca niniejsza ogranicza się tylko do omówienia tych problemów dla pyłów organicznych.

## 1. ZAPŁÓN PYŁU W FALI UDERZENIOWEJ

Pyły węglowe, ze względu na zagrożenia górnicze, najwcześniej zajmowały uwagę badaczy. *Nettleton* i *Stirling* badali zapłon pyłu węglowego w falach uderzeniowych oraz wpływ dodatków inhibitujących na jego spalanie w falach [1], [2]. Większa liczba prac dotyczy badania zapłonu pyłów rolniczych (powstających przy składowaniu i



Rys.1. Zależności czasu opóźnienia zapłonu pyłów w falach uderzeniowych padających i odbitych w funkcji odwrotności temperatury za falą. Dane uzyskane za falą padającą: 1 - pszenica (aerozol) [3], 2 - miko (aerozol) [3], 3 - mąka (aerozol) [3], 4 - węgiel (aerozol) [3], 5 - lycopodium (pryzma) [10], 6 - pszenica (pryzma) [10], 7 - węgiel drzewny (pryzma) [10], 8 - lycopodium w tlenie (pryzma) [10], 9 - pszenica w tlenie (pryzma) [10], 10 - węgiel drzewny w tlenie (pryzma) [10]. Dane uzyskane w fali odbitej: 11 - węgiel kamienny (warstwa) [6], 12-15 odpowiednio: pszenica, kukurydza, miko, soja (aerozol) [4]

transportie niektórych produktów rolnych, np. pyły zbożowe, lniarskie itp.) i spożywczych (wytwarzanych przy produkcji żywności, np. kawa czy kakao w proszku, cukier puder, mąka itp.) [3÷7]. Wnikliwe badania zapłonu pyłu węglowego w falach uderzeniowych połączone z analizą teoretyczną nagrzewania i zapłonu cząstki przedstawił w swej pracy doktorskiej U r a l [8], podczas gdy analizę zapłonu pyłów zbożowych i węglowych przeprowadzili M i e d w i e d i e w i i n n i [9].

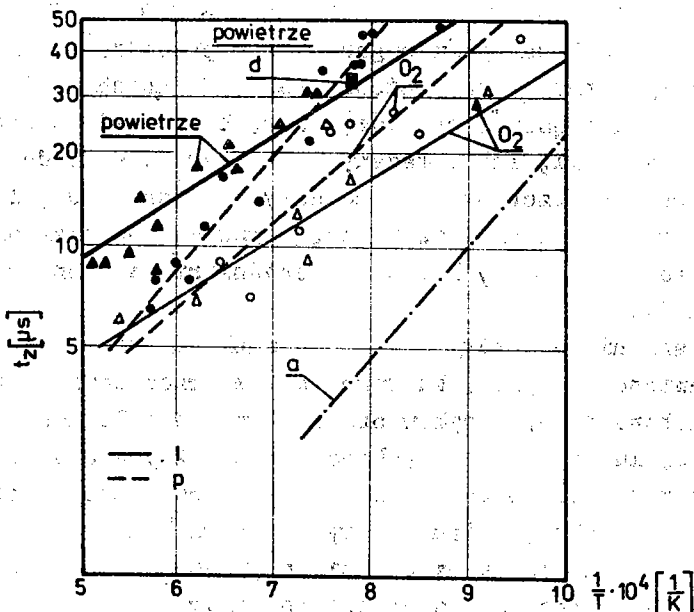
Badania zapłonu pyłów organicznych prowadzono w rurach uderzeniowych przy wykorzystaniu fal padających i odbitych. Badany pył najczęściej był rozpylany, bezpośrednio przed wygenerowaniem fali, lub układany był w warstwie na dolnej ścianie rury uderzeniowej. Dane dotyczące zapłonu pyłu można również, w ograniczonym zakresie, uzyskiwać bezpośrednio z badań detonacji pyłowych (tzn. z opóźnienia zapłonu w fali detonacyjnej).

Zestawienia niektórych wyników zapłonu pyłów organicznych przedstawiono na rys.1. Na rysunku tym przedstawiono wyniki badań zapłonu różnych pyłów organicznych w fali uderzeniowej (padającej lub odbitej) uzyskane przez różnych autorów. Niektóre z tych pyłów przed zapłonem były rozpylane, inne układane były na dolnej ścianie rury w pryzmie lub warstwie, a ich rozpylanie realizowane było dopiero przez padającą falę uderzeniową [10]. Zestawione wyniki pomiarów wskazują na istnienie dwóch oddzielnych grup wyników. Jedna grupa obejmuje pyły zapalane w fali padającej, druga w fali odbitej. Różnice w sposobie umieszczenia pyłu powodują tylko stosunkowo niewielkie odchylenia wewnątrz poszczególnych grup.

Tak znaczne różnice występujące w czasach opóźnienia zapłonu w poszczególnych grupach wynikają przede wszystkim z faktu odnoszenia czasu opóźnienia zapłonu za falą padającą do temperatury statycznej za falą padającą. W rzeczywistości, w przypadku zapłonu cząstki pyłu za falą padającą w początkowym okresie istnieje duża różnica prędkości pomiędzy cząstką a gazem. Prowadzi to do utworzenia w okolicy cząstki lokalnej fali uderzeniowej. Temperatura gazu w obszarze pomiędzy cząstką a lokalną falą jest znacznie wyższa od temperatury za falą padającą i znacznie przyspiesza zapłon. Odnoszenie czasu opóźnie-

nia zapłonu cząstek za falą padającą do temperatury statycznej za tą falą stanowi więc pewne uproszczenie, a bardziej wskazane byłoby odniesienie tych czasów opóźnienia do liczby Macha fali padającej.

Wpływ sposobu umieszczenia pyłu, rodzaj utleniacza oraz aparatury pomiarowej pokazano na rys.2.



Rys.2. Zależność czasu opóźnienia zapłonu pyłu pszenicy w funkcji odwrotności temperatury za falą padającą: a - dane dla aerozolu [3], d - opóźnienie określone z rozwinięcia smugowego procesu detonacji [5], pozostałe wyniki zapłonu warstwy - l i pryzmy - p w powietrzu i tlenie [10]

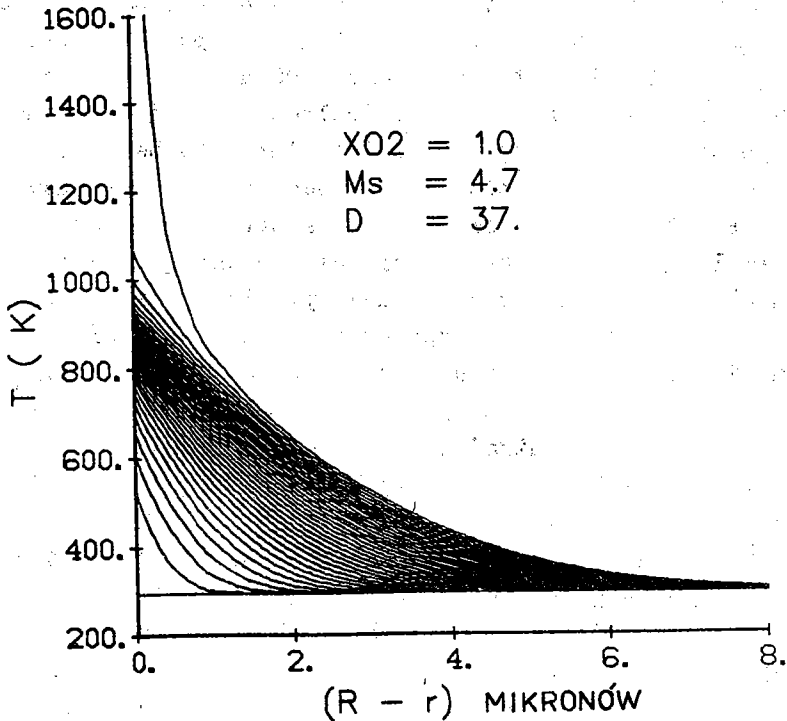
Rysunek ten obrazuje zależność czasu opóźnienia zapłonu tego samego pyłu pszenicy zapalnego falą padającą w różnych układach. Pokazano zależności otrzymane dla pyłu w warstwie i w pryzmie w powietrzu i tlenie oraz pyłu rozpylonego w powietrzu na chwilę przed wytworzeniem fali uderzeniowej. Na rysunku pokazano również wartość czasu opóźnienia zapłonu mieszaniny pyłu pszenicy z powietrzem, określoną w oparciu o analizę rozwiniętych zdjęć smugowych detonacji tej mieszaniny.

Z wykresu tego widać wyraźnie, że opóźnienie zapłonu zależy znacznie od rodzaju "mieszanki", tzn. sposobu umieszczenia lub rozpylenia pyłu. Niektóre z różnic w czasie opóźnienia zapłonu mogą wynikać z arbitralności przyjęcia momentu uznawanego za początek zapłonu. Uniemożliwia to bezzględnego porównanie czasów opóźnienia zapłonu tego samego pyłu uzyskanych w Politechnice Warszawskiej dla pyłów umieszczonych w warstwie lub przyzmi i czasów opóźnienia zapłonu aerozolu tego samego pyłu, uzyskanych w Uniwersytecie Michigan. Pewne różnice występujące w tym przypadku uzasadnione są różnymi sposobami "umieszczenia" pyłu w rurze, pewne jednak zależą od sposobu określania czasu opóźnienia zapłonu. Określenie bezwzględnych różnic wynikających z różnego sposobu "umieszczenia" pyłów może być dokonane tylko za pomocą tej samej aparatury.

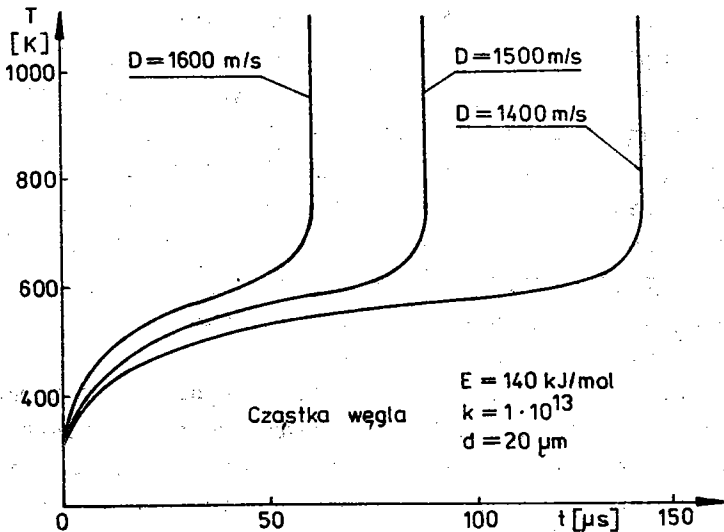
Duży wpływ na czas opóźnienia zapłonu ma zawartość tlenu w atmosferze gazowego utleniacza. Szczególnie silny wpływ tlenu można zauważyć dla mniejszych liczb Macha (dłuższych czasów opóźnienia zapłonu), podczas gdy przy wysokich temperaturach wpływ ten staje się znacznie mniejszy. Również w wyższych temperaturach wpływ sposobu umieszczenia pyłu zmienia się. Dla mniejszych liczb Macha zapłon pyłu w przyzmi jest trudniejszy niż w warstwie, podczas gdy w wyższych temperaturach obserwuje się odwrotne zachowanie. Wynika to najprawdopodobniej z wpływu istnienia większych obszarów lokalnych temperatur spiętrzenia występujących w obszarze przyzmy [10].

Szczegółową analizę procesu zapłonu pojedynczych cząstek za falą padającą przeprowadzili Ural [8] oraz Miedwiediew i inni [9]. Ural w swej analizie uwzględnił proces nagrzewania cząstek nie tylko w funkcji czasu lecz także w funkcji promienia cząstki. Przykładowy przebieg nagrzewania zewnętrznych warstw cząstki pyłu węglowego w okresie zapłonu, otrzymany przez Urala, pokazano na rys.3.

Z obliczeń tych wynika, że w okresie opóźnienia zapłonu nagrzaniu ulega tylko zewnętrzna kilkumikronowa warstwa cząstki. Dla małych cząstek o dużej porowatości powierzchni można przyjąć uproszczenia zakładające równomierne nagrzewanie cząstek w całej objętości [9]. Typowy przebieg zmian temperatury



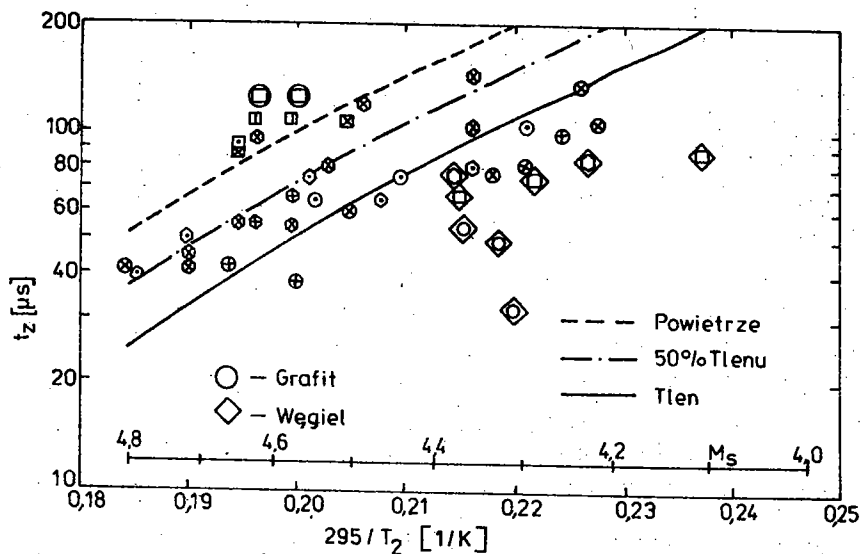
Rys.3. Obliczone zmiany temperatury w zewnętrznej warstwie cząstki pyłu węglowego w okresie opóźnienia zapłonu dla cząstki o średnicy  $37 \mu\text{m}$  w tlenie [8]



Rys.4. Obliczone zmiany temperatury cząstek pyłu w czasie w zależności od prędkości fali uderzeniowej. Cząstka węgla  $d = 20 \mu\text{m}$  [10]

ry cząstki w czasie, otrzymany z takiego modelu, pokazany jest na rys.4.

Obliczenia numeryczne czasów opóźnienia zapłonu w pewnych warunkach dobrze opisują wyniki eksperymentalne. Przykładowy przebieg obliczeń czasu opóźnienia zapłonu dla cząstek pyłu węglowego w atmosferze o różnej zawartości tlenu przedstawiono na rys.5. Dane te zaczerpnięte są z pracy Urala [8].



Rys.5. Porównanie zależności czasu opóźnienia zapłonu w funkcji odwrotności temperatury za falą dla pyłów węglowych uzyskanych w rurze uderzeniowej do czasów określonych w oparciu o opracowaną teorię [8]. Oznaczenia:  $\circ$  -  $O_2$ ,  $\ominus$  - 50%  $O_2$ ,  $\square$  - powietrze; węgiel:  $\cdot$  -  $d < 37 \mu$ ,  $+$  -  $37 \mu < d < 53 \mu$ ,  $\times$  -  $53 \mu < d < 74 \mu$

Widać wyraźnie, że dla przyjętego w tej pracy modelu zapłonu cząstki węgla, zależność logarytmu czasu opóźnienia zapłonu w funkcji odwrotności temperatury za falą padającą nie jest zależnością liniową. Silny wpływ na to opóźnienie ma również wzrost zawartości tlenu w atmosferze gazowego utleniacza.

Z przeprowadzonych badań zapłonu pyłów w falach uderzeniowych można uzyskać dane opisujące kinetykę zapłonu cząstek. Energia aktywacji zapłonu dla pyłów organicznych zawiera się

w zasadzie w zakresie od 40 kJ/kmol do 100 kJ/kmol. Energie te są porównywalne z energiami zapłonu węglowodorów. Należy dodatkowo stwierdzić, że niektóre pyły wykazują mniejsze opóźnienia zapłonu za falą padającą niż stechiometryczna mieszanina wodorowo-tlenowa [6]. Tylko wyniki badań prezentowane przez niektórych badaczy wykazują znacznie większe czasy opóźnienia zapłonu, niż wyniki przedstawione na rys.1 [11].

Uzyskane w badaniach zapłonu wyniki są również bardzo przydatne do oceny skłonności danych pyłów do spalania detonacyjnego. Skłonności takie wykazują w szczególności te pyły, których ziarna charakteryzują się dużą porowatością, małymi średnicami, dużą masą oraz małym współczynnikiem oporu aerodynamicznego. Do grupy pyłów podatnych na spalanie detonacyjne należą pyły owsa i pszenicy, mniej skłonne są pyły mąki i węgla. Zdjęcia mikroskopowe tych pyłów wskazują tu na duże różnice w budowie, a w szczególności na różnice w strukturze powierzchni zewnętrznej. Należy również dodać, że na charakterystyki zapłonowe duży wpływ ma ziarnistość i wilgotność pyłu, jak również skłonności tych pyłów do tworzenia aglomeracji pyłowych. Aglomeracje pyłowe są rozbijane w pierwszym okresie oddziaływania fali, a ich struktura może mieć wpływ na zapłon, w szczególności w przypadku dużych liczb Macha i małych czasów opóźnienia zapłonu.

Pyły organiczne stanowią bardzo dużą grupę pyłów. Różnorodność ich struktury, ziarnistości i innych parametrów fizykochemicznych prowadzi do znacznego zróżnicowania ich charakterystyk zapłonowych. Z tego powodu konieczne okazuje się przeprowadzenie dalszych badań, w celu lepszego i pełniejszego poznania wszystkich mechanizmów rządzących procesami ich zapłonu w fali padającej lub odbitej.

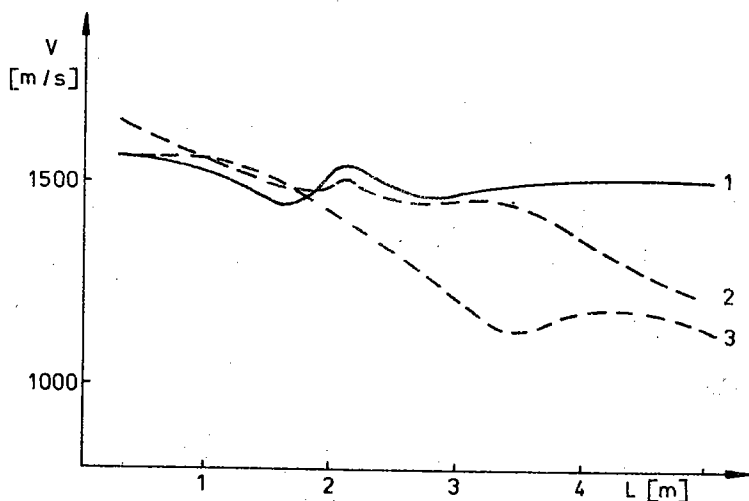
## 2. DETONACJA PYŁÓW ORGANICZNYCH

Możliwość występowania detonacji w mieszaninach pyłowych jako pierwszy udowodnił C y b u l s k i [12]. Przeprowadził on doświadczenia, w którym zrealizowano przejście płomie-



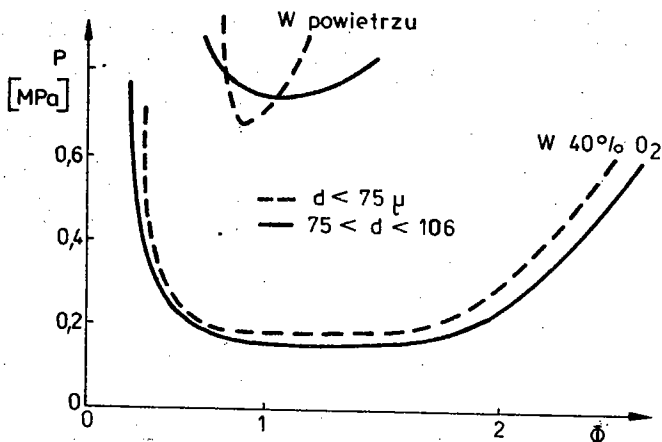
nia do detonacji w mieszaninie pyłu węglowego z powietrzem w chodniku badawczym kopalni doświadczalnej "Barbara". Możliwości detonacji mieszanin pyłu węglowego z powietrzem potwierdził w swych badaniach Rea [13], a Bartknecht [14] przedstawił wyniki detonacji pyłów pigmentowych. Pokazano również, że pyły organiczne stosunkowo łatwo mogą detonować w mieszaninach z tlenem [3], [5], [15], [16]. Pierwsze badania wykazały, że detonacja w mieszaninach pyłowo-powietrznych może rozprzestrzeniać się z prędkością od 1300 m/s do 2000 m/s, a ciśnienia we froncie detonacji mogą dochodzić nawet do 5 MPa (50 atm). Stwierdzono również, że możliwe jest samoczynne przejście do detonacji, jeśli rozprzestrzenianie płomienia odbywa się w stosunkowo długim kanale. Szczegółowe badania inicjowania, zakresów i struktury detonacji pyłowo-powietrznej zostały przeprowadzone w późniejszym okresie [3], [5], [7], [17], a numeryczną analizę struktury detonacji pyłu zbożowego z powietrzem przedstawili Wołański i inni [18].

Inicjowanie detonacji w badaniach laboratoryjnych odbywa się najczęściej przy pomocy fali uderzeniowej lub silnego źródła zapłonu. Rysunek 6 przedstawia zmianę prędkości fali



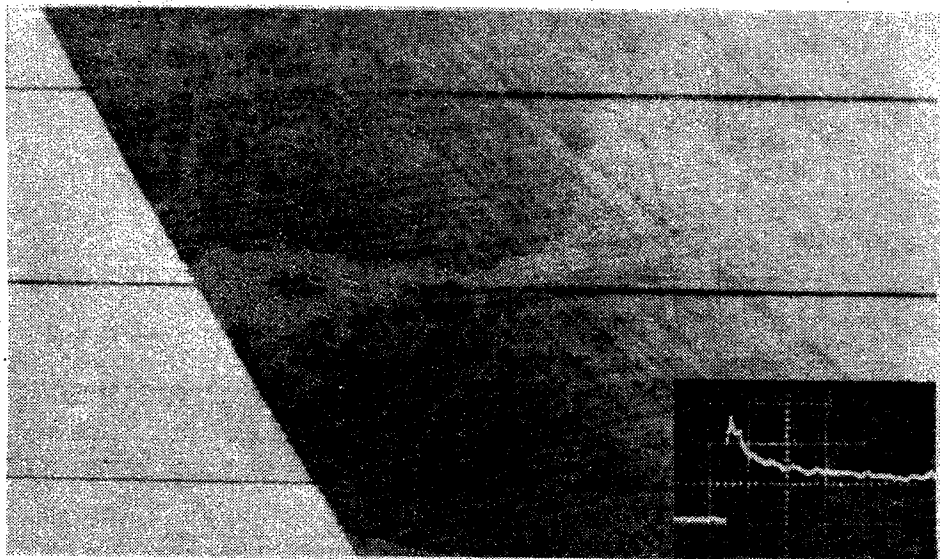
Rys.6. Zmiana prędkości fali wzdłuż rury detonacyjnej w mieszaninie owsa z powietrzem. Inicjacja za pomocą wstępnego wybuchu mieszaniny  $H_2/O_2$ . Pył o ziarnistości  $d < 75 \mu m$  i koncentracji: 1 -  $0,27 \text{ kg/m}^3$ , 2 -  $0,3 \text{ kg/m}^3$ , 3 -  $0,235 \text{ kg/m}^3$

w mieszaniu pyłu owsa z powietrzem przy różnych koncentracjach pyłu i tej samej energii inicjatora. Widać wyraźnie, że tylko w jednym przypadku obserwuje się osiągnięcia stacjonarnej detonacji, podczas gdy w dwóch innych przypadkach występuje stopniowy zanik spalania detonacyjnego. Przejście do detonacji może nastąpić również na drodze przyspieszenia płomienia. Do zrealizowania takiego przypadku niezbędne jest wykorzystanie (w warunkach laboratoryjnych) mieszanin pyłowo-tlenowych. W mieszaninach z powietrzem tylko niektóre pyły detonują w warunkach laboratoryjnych. Stwierdzono, że pyły pszenicy z powietrzem detonują w zakresie koncentracji  $0,250-0,305 \text{ kg/m}^3$ , a pyły owsa z powietrzem w zakresie  $0,220-0,275 \text{ kg/m}^3$ . Zakres ten znacznie się rozszerza, jeśli mieszaninę wybuchowo wzbogacimy w tlen (rys.7).

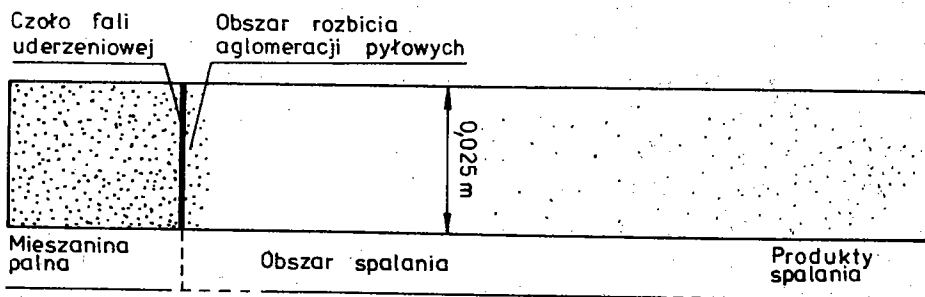


Rys.7. Zakres detonacji dla pyłu owsa [17]. Zależność ciśnienia początkowego mieszaniny gazowej niezbędnej do zainicjowania detonacji pyłu owsa w funkcji współczynnika stechiometrycznego ( $\phi$ ) mieszaniny pyłowej (o różnej koncentracji tlenu i różnej ziarnistości pyłu)

Rozwinięcie smugowe procesu detonacji mieszaniny pyłu pszenicy z powietrzem pokazano na rys.8, a strukturę detonacji pyłowej zrekonstruowaną z laserowej fotografii smugowej na rys.9. Dla dokładniejszego przeanalizowania zmian parametrów czynnika we froncie detonacji przeprowadzono pomiary temperatury. Przykładowe wyniki tych pomiarów pokazano na rys.10 [17].

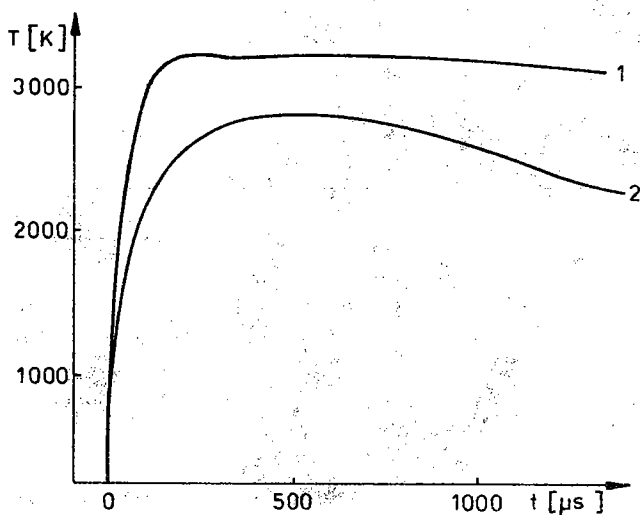


Rys.8. Smugowe rozwinięcie detonacji mieszaniny pyłu owsa z powietrzem. W prawym rogu pokazano przebieg zmiany ciśnienia.  
 $V = 1525$  m/s



Rys.9. Schemat struktury detonacji pyłowej [6]

Z wykresów tych widać, że temperatura za frontem osiąga maksimum po czasie około 200-400  $\mu\text{s}$ . W mieszaninach o 40% za-



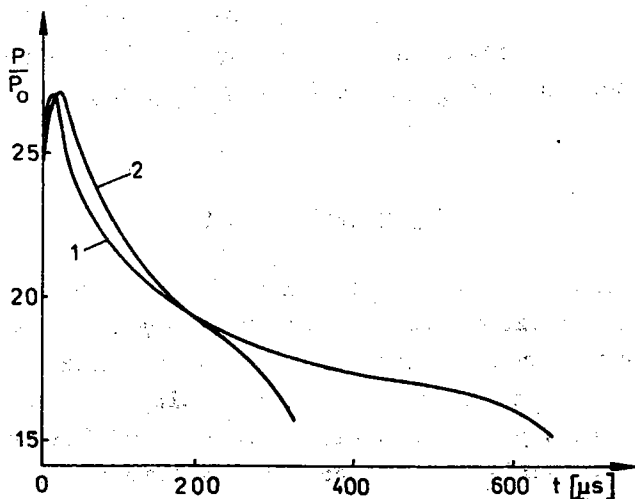
Rys.10. Profile temperatur w fali detonacyjnej: 1 - owies z powietrzem wzbogaconym w tlen (40%  $\text{O}_2$ ),  $d < 75 \mu$ ,  $C = 0,3 \text{ kg/m}^3$ ,  $V = 1600 \text{ m/s}$ , 2 - owies w powietrzu  $d < 75 \mu$ ,  $C = 0,256 \text{ kg/m}^3$ ,  $V = 1430 \text{ m/s}$

wartości tlenu maksymalne temperatury czynnika we froncie detonacji zawierają się w zakresie od 3000 K do 3550 K, a w mieszaninach powietrznych w zakresie od 2400 K do 2750 K. Stwierdzono również, że promieniowanie nie penetruje poprzez falę uderzeniową. Wynika to z faktu, że po rozbiściu aglomeracji pyłowych droga swobodnej penetracji promienia świetlnego bardzo maleje. Mieszanina w rurze o grubości 0,0635 m staje się nieprzezroczysta nawet dla promieniowania laserowego. Promienie świetlne mogą penetrować przez rurę dopiero po częściowym wypaleniu się mieszaniny. Z tych pomiarów wynika jednoznacznie, że promieniowanie ze strefy spalania nie może ogrzewać mieszaniny przed frontem fali detonacyjnej, może natomiast powodować wzrost szybkości reakcji w obszarze, gdzie następuje zapłon pyłu za falą.

Obliczenia numeryczne struktury strefy detonacji wskazują, że bezpośrednio za falą uderzeniową tworzy się lokalnie obszar

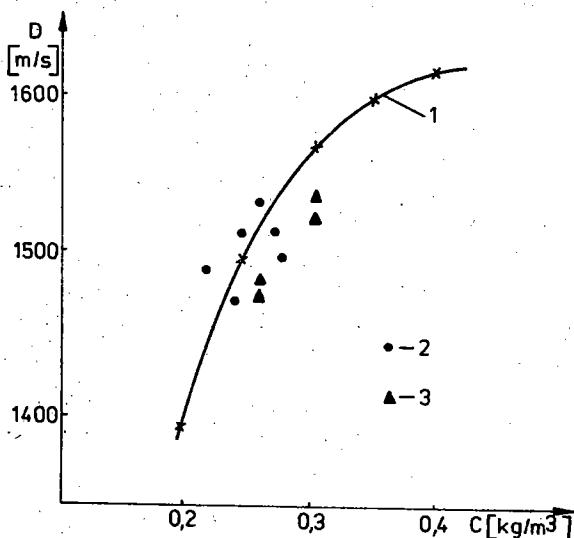
wzbogaconej w utleniacz mieszaniny palnej. Przyczyną powstania tego obszaru jest fakt, że czynnik gazowy zostaje praktycznie natychmiast przyspieszony do prędkości za falą, podczas gdy prędkość cząstek pyłu stopniowo rośnie. Następuje więc gwałtowny wzrost gęstości fazy gazowej i powolny wzrost koncentracji cząstek. Dzieje się to w obszarze, gdzie następuje zapłon i początkowa faza spalania cząstek. Zjawisko to stwarza dogodne warunki do zapłonu i spalania pyłu we froncie fali detonacyjnej. W późniejszym okresie prędkość gazu zmienia się (na skutek wywiązywania ciepła) i następuje chwilowe zrównanie prędkości czynnika gazowego i fazy stałej, jednak ze względu na bezwładność cząstek i szybką zmianę prędkości fazy gazowej różnice w ich prędkościach występują nawet w płaszczyźnie Chapmana-Jougeta.

Z przeprowadzonych obliczeń numerycznych wynika, że straty z obszaru ograniczonego falą uderzeniową i płaszczyzną C-J w mieszaninach pyłowo-powietrznych w rurze o przekroju  $0,0635 \times 0,0635 \text{ m}^2$  wynoszą ok. 5% ciepła wywiązywanego w detonacji [18]. Przykładowe przebiegi obrazujące zmiany ciśnienia w fali detonacyjnej obliczone i zmierzone dla detonacji



Rys.11. Zależności zmian ciśnienia w detonacji mieszaniny pyłu pszenicy z powietrzem [18]: 1 - eksperyment, 2 - teoria

pyłowej pokazano na rys.11, a obliczone i pomierzone prędkości detonacji pyłów zbożowych pokazano na rys.12. Z przeprowa-



Rys.12. Zależność teoretyczna prędkości detonacji pyłów zbożowych od koncentracji pyłu: 1 - teoria, 2 - dane dla pyłu owsa, 3 - dane dla pyłu pszenicy

dzonych obliczeń wynika, że zastosowany do obliczeń model numeryczny dobrze aproksymuje wyniki uzyskanych pomiarów.

### 3. PODSUMOWANIE

Przemysłowe pyły organiczne można stosunkowo łatwo zapalać za pomocą fal uderzeniowych. Zapłon niektórych pyłów może następować nawet przy liczbach Macha mniejszych niż liczby Macha wymagane do zapłonu gazowych mieszanin palnych. Zapłonowi w fali sprzyja duża porowatość ziaren (duża powierzchnia nagrzewania) oraz tworzenie się (w początkowym okresie) lokalnej fali uderzeniowej, która powoduje dodatkowe podniesienie temperatury w okolicy zapalanej cząstki. Lokalne fale uderzeniowe powstają w okresie, gdy prędkość cząstek, w stosunku do prędkości gazu za falą, jest prędkością naddźwiękową. Cząstka pyłu

przyspiesza się w wyniku istnienia oporu aerodynamicznego. Jej przyspieszanie zależy więc od średnicy, współczynnika oporu i masy. Ze względu na tworzenie lokalnych przyrostów temperatury w falach przycząsteczkowych korzystne jest, aby cząstka posiadała dużą masę i mały współczynnik oporu (wolno się przyspieszała), z drugiej strony, ze względu na szybkość nagrzewania cząstka pyłu powinna posiadać małą masę i dużą powierzchnię nagrzewania. Analiza ta wykazuje istnienie optymalnych rozmiarów cząstek pyłów, które najłatwiej ulegają zapłonowi. Doświadczalnie stwierdzono, że dla pyłów organicznych optymalna, ze względu na zapłon, średnica cząstek znajduje się w zakresie od  $50\mu\text{m}$  do  $100\mu\text{m}$ .

Łatwość zapłonu pyłów organicznych prowadzi do wniosku, że mieszaniny tych pyłów mogą detonować nawet w mieszaninach z powietrzem. Przeprowadzone badania wykazały, że łatwopalne pyły detonują nawet w rurach o małej średnicy. Długość strefy reakcji w fali detonacyjnej jest większa niż dla mieszanin gazowych, a czas spalania we froncie detonacji jest mniejszy od 1 ms. Z obliczeń numerycznych wynika, że straty do ścianek, nawet w przypadku detonacji w stosunkowo cienkich rurach, wynoszą około 5% całkowitego ciepła spalania. Fakt występowania detonacji w najtrudniej zapalnych mieszaninach pyłowych - w mieszaninie pyłu węglowego z powietrzem - prowadzi do wniosku, że w odpowiednich warunkach znakomita większość pyłów organicznych może spalać się detonacyjnie. Krytyczna średnica rury, w której może występować spalanie detonacyjne mieszanin pyłowych jest znacznie większa niż dla gazów i istnieją duże trudności z dokładnym jej określeniem. Ciśnienie w fali detonacyjnej w mieszaninach pyłowo-powietrznych zawiera się najczęściej w zakresie 2-3 MPa, a po odbiciu się fali od ścianki może jeszcze wzrosnąć 2-3 razy. Tak duże ciśnienia nie spotykane są przy deflagacyjnym wybuchu tego rodzaju mieszanin. Pocieszenie może stanowić fakt, że do zaistnienia spalania detonacyjnego musi nastąpić jednoczesne spełnienie wielu warunków, takich jak: odpowiednia koncentracja i ziarnistość, źródło zapłonu, długi kanał z mieszaniną itp., co powoduje, że w praktyce przemysłowej tego rodzaju spalania są stosunkowo rzadko spotykane. Zjawiska tego rodzaju występują jednak w

praktyce przemysłowej, dlatego istnieje potrzeba dokładniejszego i pełniejszego poznania zjawisk zapłonu i detonacji tych mieszanin, co powinno się przyczynić do lepszego zabezpieczenia się przed możliwością powstawania i rozprzestrzeniania się tego rodzaju wybuchów w górnictwie i przemyśle.

## BIBLIOGRAFIA

- [ 1 ] Nettleton M.A., Stirling R.: The ignition of clouds of particles in shock heated oxygen. Proc. Roy. Soc. London v.300 (1967), pp.62-67.
- [ 2 ] Nettleton M.A., Stirling R.: The influence of additives on burning of clouds of coal particles in shocked gases. Combustion and Flame v.22 (1974) pp.543-549.
- [ 3 ] Kauffman C.W., Wolański P., Ural E., Nicholls J.A., Van Dyk R.: Shock wave initiated combustion of grain dust. Symposium on Grain Dust, U.S. Grain Marketing Research Laboratory. Manhattan, KS (1979).
- [ 4 ] Breipohl G., Lester T.W., Marklin J.F.: Shock tube studies of the mechanism of grain dust ignition. Symposium on Grain Dust, U.S. Grain Marketing Research Laboratory, Manhattan, KS (1979).
- [ 5 ] Kauffman C.W., Wolański P., Ural E., Nicholls J.A.: Detonation waves in confined dust clouds. Trzecia Międzynarodowa Szkoła Wybuchowości Pyłów Przemysłowych, Turawa (1982).
- [ 6 ] Wolański P.: Problems of dust explosions. First Specialists Meeting (International) of the Combustion Institute, Bordeaux (1981).
- [ 7 ] Kauffman C.W., Nicholls J.A.: Dust Explosion Research at the University of Michigan. Fuel-air explosions, University of Waterloo Press (1982).
- [ 8 ] Ural E.: Shock wave ignition of pulverized coal. Ph.D.Thesis, The University of Michigan, Ann Arbor (1981).
- [ 9 ] Медведев А.Е., Федоров А.В., Фомин В.М., Теодорчик А., Волянски П. Математическое моделирование процесса воспламенения аэродинамических систем. Trzecia Międzynarodowa Szkoła Wybuchowości Pyłów Przemysłowych, Turawa (1982).
- [ 10 ] Boiko V.M., Papyrin A.N., Woliński M., Wolański P.: The dynamics of shattering and ignition of a dust layer by a shock wave. The paper submitted for IX International Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems.



- [11] Davis W.P., Baer A.D., Ryan N.W.: A study of the ignition of a Western Coal by a special shock tube technique. WSCI 83-9.
- [12] Cybulski W.B.: Detonation of coal dust, Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences 21 (1971).
- [13] Rea D.: Initiation of weak coal dust explosions in long galleries and the importance of the time dependence of the explosion pressure. Fourteenth International Symposium on Combustion, Pittsburgh (1972).
- [14] Bartknecht W.: Gas, vapor and dust explosions, International Symposium on Grain Elevator Explosions, National Academy of Sciences, Washington, DC 1978.
- [15] Nettleton M.A., Stirling R.: Detonation in suspension of coal dust in oxygen. Combustion and Flame v. 21 (1973).
- [16] Wójcicki S., Zalesiński M.: The mechanism of transition from combustion to detonation in a mixture of coal dust and gaseous oxygen. Recent Developments in Shock Tube Research (1973).
- [17] Arisoy A., Wolański P., Kaufman C.W., Nicholls J.A.: Measurements on Agricultural dust detonations. Chemical and Physical Processes in Combustion, Atlantic City (1982).
- [18] Wolański P., Lee D., Kaufman C.W., Nicholls J.A., Sichel M.: The structure of dust detonations. Chemical and Physical Processes in Combustion, Atlantic City (1982).

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ПЫЛЕЙ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

### К р а т к о е   с о д е р ж а н и е

В настоящей работе дается краткий обзор результатов исследований воспламенения пылей в ударных волнах, процессов детонационного сгорания, возбужденного ударными волнами, а также структуры и зон детонации в смесях органической пыли с воздухом.

## IGNITION AND COMBUSTION OF THE ORGANIC DUSTS IN SHOCK WAVES

### S u m m a r y

The review of a dust ignition behind the shock wave, initiation of a detonation as well as a structure and the detonation limit in an organic dust-air mixture, is presented.

Rękopis dostarczono w listopadzie 1983 r.