

Marek Woliński, Piotr Wolański

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

WPŁYW CZĄSTEK NEUTRALNYCH NA DETONACJĘ MIESZANIN GAZOWYCH

W pracy przedstawiono rezultaty badań nad oddziaływaniem stosunkowo dużych cząstek obojętnych chemicznie, rozproszonych w mieszaninie gazowej, na procesy przejścia do detonacji i spalania detonacyjnego mieszaniny w układzie rurowym. Stwierdzono, że cząstki takie powodują przyspieszenie przejścia od spalania deflagacyjnego do detonacyjnego i obniżają prędkość rozprzestrzeniania się detonacji. Przedstawiono model fizyczny procesów przejścia do detonacji i rozprzestrzeniania się detonacji w takich warunkach oraz model matematyczny pozwalający określić strukturę fali detonacyjnej i wyznaczyć jej prędkość.

OZNACZENIA

- ρ - gęstość mieszaniny gazowej
- ρ_p - gęstość materiału cząstek obojętnych
- u - prędkość mieszaniny gazowej
- u_p - prędkość cząstek obojętnych
- p - ciśnienie mieszaniny gazowej
- C_p - stężenie cząstek obojętnych
- D_h - średnica rury detonacyjnej
- τ_w - lepkościowe naprężenia styczne na ściance rury
- h - entalpia mieszaniny gazowej
- h_p - entalpia cząstki obojętnej
- q_w - straty ciepła przez konwekcję do ścianek rury
- q_{cr} - ciepło wydzielane w procesie spalania mieszaniny gazowej

- T - temperatura mieszaniny gazowej
 T_p - temperatura cząstki obojętnej
 R - stała gazowa
 c_d - współczynnik oporu aerodynamicznego
 d_p - średnica cząstki obojętnej
 m_p - masa cząstki obojętnej
 \bar{c} - średnie ciepło właściwe materiału cząstek obojętnych
 λ_g - współczynnik przewodnictwa cieplnego mieszaniny gazowej
 Nu - liczba Nusselta
 A_0 - prędkość dźwięku w gazie niezaburzonym

WSTĘP

Wstępne prace badawcze nad oddziaływaniem stałych cząstek obojętnych chemicznie na spalanie mieszanin gazowych i pyłowo-gazowych wykazały, że przy pomocy takich cząstek można tłumić zarówno spalanie deflagracyjne, jak i detonacyjne [1]. W praktyce, zjawisko to wykorzystywane jest do tłumienia wybuchów mieszanin pyłowo-gazowo-powietrznych w chodnikach kopalnianych za pomocą barier z pyłu kamiennego [2].

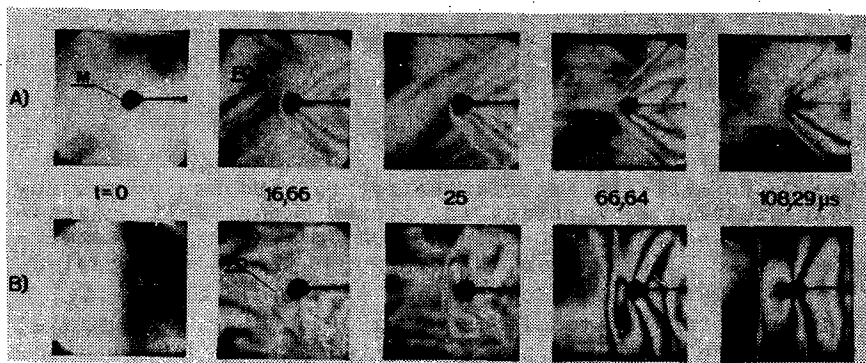
Dalsze badania wykazały, że w pewnych warunkach cząstki obojętne dodane do palnej mieszaniny gazowej mogą wspomagać detonację [3]. Stwierdzono, że cząstki o średnicy $450 \mu\text{m}$ powodują tylko niewielki spadek prędkości detonacji w mieszaninach metanowo-powietrznych, natomiast rozszerzają ubogą granicę detonacji w tej mieszaninie gazowej.

Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu stosunkowo dużych, obojętnych chemicznie cząstek stałych na procesy spalania detonacyjnego w mieszaninach gazowych. Przeprowadzono również badania modelowe nad wpływem wielkości cząstek obojętnych na zapłon mieszaniny gazowej pod działaniem zjawisk gazodynamicznych.

1. BADANIA MODELOWE WPŁYWU WIELKOŚCI CZĄSTEK NA ZAPŁÓN MIESZANINY GAZOWEJ

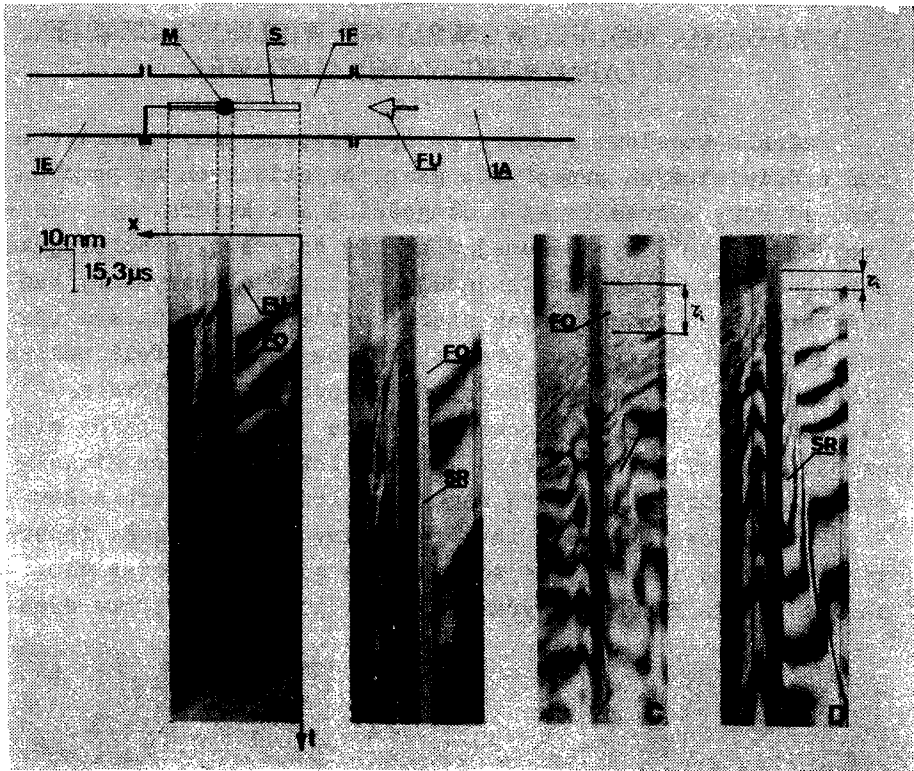
Badania modelowe zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu naddźwiękowych przepływów gazu, uzyskiwanych za pomocą typowej rury uderzeniowej o długości 3 m i kwadratowym przekroju $35 \times 35 \text{ mm}^2$, wyposażonej w sekcję buforową, oddzielającą sekcję napędzaną od napędzającej. Wykonano eksperymenty nad oddziaływaniem pojedynczych ziaren o różnych średnicach (traktowanych jako nieruchome przeszkody) na zapłon w fali uderzeniowej mieszaniny stechiometrycznej wodoru z powietrzem. Zjawiska zachodzące w otoczeniu ziarna opływanego palną mieszaniną wizualizowane były za pomocą interferometru Michelsona i rejestrowane kamerą szybką z wirującym zwierciadłem.

Przykładowe klatkowe interferogramy i rozwinięcia interferometryczne ilustrujące te zjawiska zostały przedstawione na rys. 1 i 2. Widać tu wyraźnie, że w przypadku opływu cząst-



Rys. 1. Klatkowe interferogramy opływu modelu cząstki: A) w powietrzu, liczba Macha fali uderzeniowej $M_S = 4,66$; B) w stechiometrycznej mieszaninie wodorowo-powietrznej, $M_S = 4,50$. Parametry początkowe gazów: $p_0 = 0,015 \text{ MPa}$, $T_0 = 298 \text{ K}$. Średnica modelu cząstki: $d_{pm} = 4 \text{ mm}$. Oznaczenia: M - model cząstki, FO - fala uderzeniowa odsunięta

ki powietrzem pojawia się przed cząstką odsunięta fala uderzeniowa, zachowująca się bardzo stabilnie przez stosunkowo długi okres czasu. W przypadku opływu cząstki mieszaniną palną, fala odsunięta jest widoczna przez krótki okres czasu, a następnie pojawia się zapłon mieszaniny, powodujący dalsze

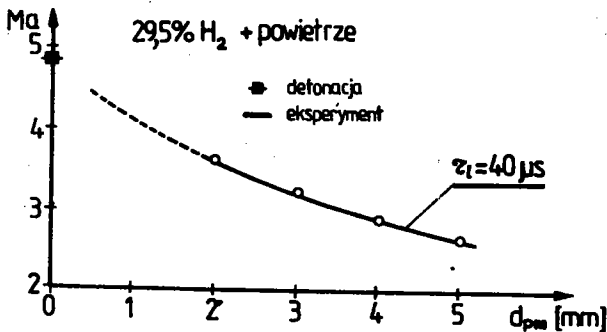


Rys.2. Rozwinięcia interferometryczne procesu opływu modelu cząstki: A) w powietrzu, liczba Macha fali uderzeniowej $M_S = 4,31$, B, C, D) w stechiometrycznej mieszance wodoru z powietrzem, $M_S = 2,25, 3,64$ i $4,45$ odpowiednio. Parametry początkowe gazów: $p_0 = 0,015$ MPa, $T_0 = 298$ K. Średnica modelu cząstki: $d_{pm} = 4$ mm. Oznaczenia: 1E - sekcja tłumiąca rury uderzeniowej, 1F - komora badawcza, 1A - sekcja napędzana rury uderzeniowej, M - model cząstki, S - szczelina do wykonywania rozwinięć, FU - fala uderzeniowa padająca, FO - fala uderzeniowa odsunięta, SR - strefa reakcji, τ_1 - czas opóźnienia zapłonu

odsunięcie fali od cząstki. W zależności od intensywności opływu (a więc od liczby Macha fali padającej) zmienia się charakter tych zjawisk, tzn. wraz ze wzrostem liczby Macha fali padającej następuje rozprzestrzenianie się reakcji chemicznej na całą objętość mieszanki z rosnącą intensywnością oraz skraca się czas opóźnienia zapłonu.

Analiza rozwinięć interferometrycznych wykonanych dla różnych średnic cząstek pozwoliła na określenie zależności

czasu opóźnienia zapłonu mieszanki od liczby Macha padającej fali uderzeniowej, oraz na określenie krytycznych liczb Macha, przy których pojawia się zapłon mieszanki po określonym czasie opóźnienia zapłonu. Na rys.3 przedstawiono zależność krytycznej liczby Macha fali padającej od średnicy cząstki d_{pm} , przy której pojawia się zapłon mieszanki po $40 \mu s$ opóźnienia zapłonu.

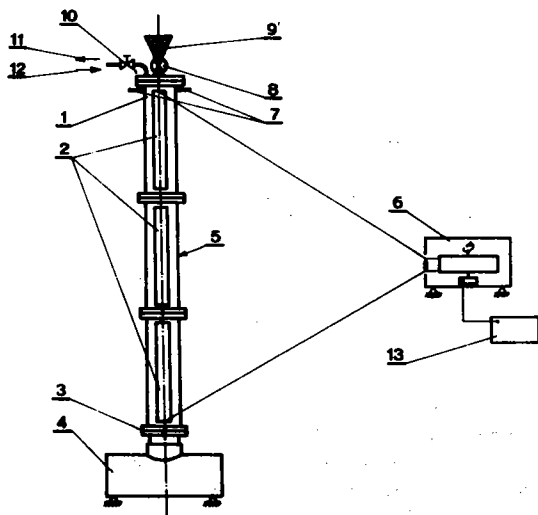


Rys.3. Zależność krytycznej liczby Macha fali padającej od średnicy cząstki d_{pm} , przy której pojawia się zapłon mieszanki po czasie opóźnienia zapłonu $\tau_1 = 40 \mu s$

Zmierzone w ten sposób czasy opóźnienia zapłonu zostały porównane z danymi [4] z pomiarów w fali uderzeniowej padającej. Stwierdzono, że w opisywanych tu badaniach uzyskano czasy opóźnienia zapłonu krótsze niż dla lepiej reagującej mieszanki $H_2 + 1/2 O_2$. Ułatwienie zapłonu możliwe było wskutek sprężenia jej i podgrzania w fali odsuniętej, powstającej w okolicy modelu cząstki. W rzeczywistych warunkach mieszanki gazowej z rozproszonymi w niej cząstkami stałymi, w której przemieszcza się fala uderzeniowa, można oczekiwać występowania podobnych zjawisk i zależności. Będą one ponadto intensyfikowane wskutek wzajemnych oddziaływań fal odsuniętych, wytworzonych na pojedynczych cząstkach bądź grupach cząstek.

2. BADANIA NAD ODDZIAŁYWANIEM CZĄSTEK ROZPROSZONYCH W MIESZANINIE NA PROCES PRZEJŚCIA DO SPALANIA DETONACYJNEGO I ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ DETONACJI

Kontynuując i rozwijając badania prezentowane w [5] i [6] wykonano serie eksperymentów nad oddziaływaniem cząstek obo-



Rys.4. Schemat stoiska do badań nad wpływem cząstek obojętnych na procesy spalania detonacyjnego w mieszaninach gazowych: 1 - segment rury detonacyjnej, 2 - wziernik, 3 - miejsce zamontowania membrany, 4 - zbiornik tłumiący, 5 - miejsce zamontowania czujnika ciśnienia, 6 - kamera bębnowa, 7 - elektrody zapłonowe, 8 - zawór stożkowy, 9 - zasobnik z cząstkami obojętnymi, 10 - zawór, 11 - do pompy próżniowej, 12 - doprowadzenie badanej mieszanki gazowej, 13 - układ pomiarowy prędkości obrotowej bębna kamery

jętnych chemicznie na procesy spalania detonacyjnego dla różnych mieszanin gazowych. Badania te prowadzono na stoisku przedstawionym na rys.4. Głównym elementem stoiska była pionowa rura detonacyjna o długości 4,56 m i kołowym przekroju wewnętrznym $\phi 80$ mm ($L/D = 57$). Była ona wyposażona we wzierniki umożliwiające bezpośrednią rejestrację procesów zachodzących w rurze w postaci rozwinięć czasowych za pomocą kamery bębnowej. Zamontowany w rurze piezokwarcowy czujnik ciśnienia umożliwiał rejestrację przebiegów ciśnienia w rurze

podczas spalania za pomocą oscyloskopu z pamięcią. Rura miała próżnioszczelną konstrukcję, co pozwalało na wypompowywanie z niej powietrza i napełnianie do ciśnienia atmosferycznego badaną mieszaniną gazową, przygotowaną uprzednio w butli.

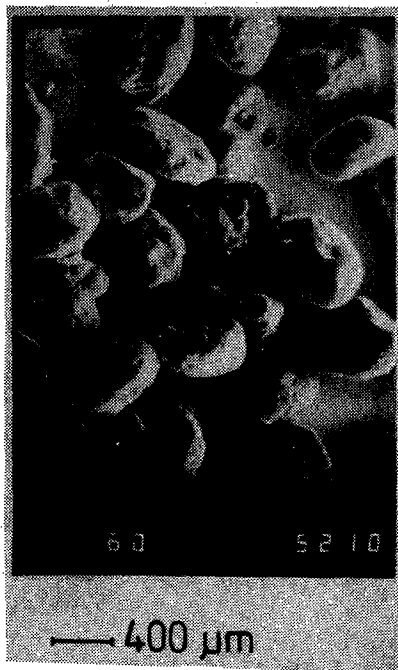
Cząstki obojętne podawane były z lekkowego zasobnika umieszczonego na szczycie rury, oddzielonego od niej zaworem

stożkowym. Po napełnieniu rury mieszaniną był on automatycznie otwierany i cząstki zaczynały grawitacyjnie opadać w badanej mieszaninie. Jednocześnie z zamknięciem tego zaworu (i zakończeniem dostarczania cząstek) był inicjowany zapłon mieszaniny. Zapłon inicjowano przy górnym końcu rury, za pomocą słabego łuku elektrycznego - tak aby nie dopuścić do bezpośredniego przejścia spalania w detonację.

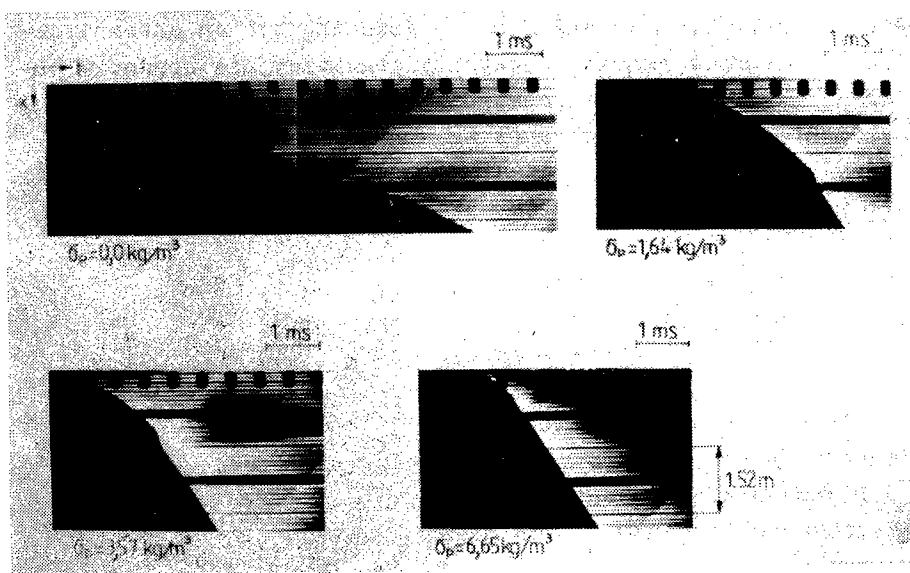
W badaniach wykorzystano mieszaniny wodoru z powietrzem, gazu płynnego propanu-butanu z powietrzem wzbogaconym w tlen oraz metanu z powietrzem wzbogaconym w tlen. Jako cząstki obojętne zastosowano przesiane ziarna piasku (rys.5) o średnicach zawartych w przedziale $0,4 < d_p \leq 0,6$ mm. Zmiany koncentracji cząstek w objętości rury uzyskiwano zmieniając zasobniki instalowane na szczycie rury.

Początkowo przeprowadzono eksperymenty z wykorzystaniem mieszanin gazowych bez cząstek. Wykazały one, że jedynie w mieszaninie stechiometrycznej metanu z powietrzem wzbogaconym do 40% tlenu następowało przed końcem rury przejście do spalania detonacyjnego; w innych przypadkach obserwowane było wyłącznie przyspieszanie płomienia. Dalsze badania prowadzono już dla mieszanin gazowych z cząstkami. Przykładowe bezpośrednie rozwinięcia czasowe wykonane w trakcie tych badań zostały przedstawione na kolejnych rysunkach.

Rys.6 i 7 przedstawiają wpływ cząstek obojętnych na przejście do spalania detonacyjnego w mieszaninach wodoru z powietrzem, zawierających 25%, 29,5% i 37% H_2 . We wszystkich przypadkach cząstki obojętne o koncentracjach mniejszych



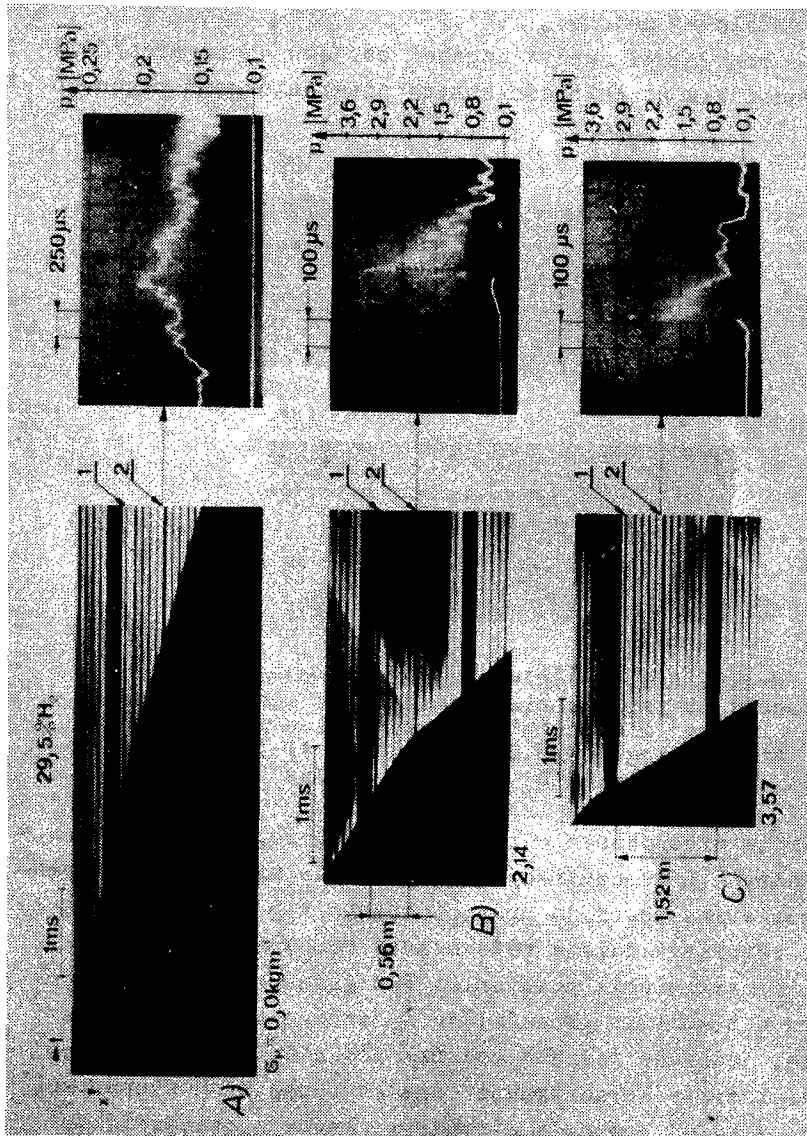
Rys.5. Ziarna piasku (cząstki obojętne) wykorzystane w badaniach. Zdjęcie wykonane przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego



Rys. 6. Bezpośrednie rozwinięcie czasowe procesu przyspieszania płomienia w mieszaninach wodorowo-powietrznych: a) 25% H₂, $\sigma_p = 0$ i 1,64 kg/m³ odpowiednio, b) 37% H₂, $\sigma_p = 3,57$ i 6,65 kg/m³ odpowiednio

niż 1 kg/m³ powodowały jedynie przyspieszenie płomienia bez przejścia do detonacji. Dopiero dodatek tych cząstek o koncentracji powyżej 1 kg/m³ przyspieszał płomień na tyle, aby umożliwić przejście do spalania detonacyjnego przed końcem rury. Dla takich koncentracji proces ten miał charakter "wybuchu w wybuchu" z towarzyszącymi mu silnymi falami retonacyjnymi. Dalsze zwiększanie koncentracji cząstek obojętnych prowadziło do skrócenia czasu i odległości potrzebnych na przejście do detonacji, zmniejszenia intensywności "wybuchu w wybuchu" (tzn. osłabienia fal retonacyjnych).

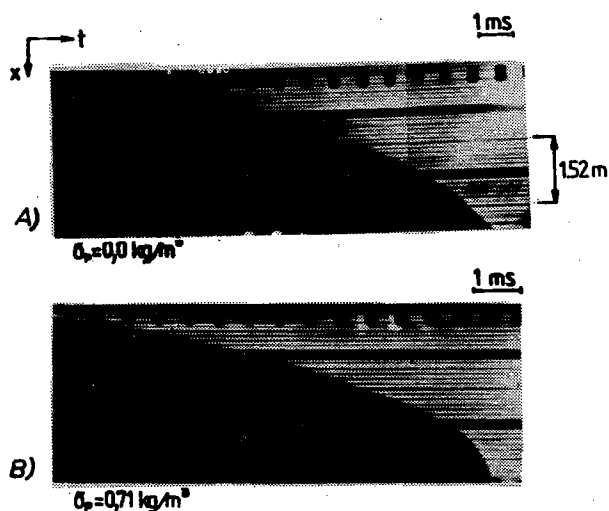
Na rys. 7 przedstawiono rozwinięcia i oscylogramy zmian ciśnienia zarejestrowanych przy przemieszczaniu się płomienia w stechiometrycznej mieszaninie wodorowo-powietrznej. Wykazują one istotne zmiany w charakterze profilu ciśnienia i wartościach, jakie osiąga maksymalne ciśnienie w procesie spalania mieszaniny w zależności od koncentracji cząstek obojętnych: od profilu ciśnienia typowego dla spalania deflagacyjnego, ze słabym przyspieszaniem płomienia (A), przez przy-



Rys. 7. Bezpośrednie rozwinięcia czasowe procesu przyspieszenia płomienia i profile ciśnienia w czasie spalania, zarejestrowane dla stoichiometrycznej mieszaniny wodorowo-powietrznej: A) bez cząstek, przyspieszanie płomienia; B) $\rho_p = 2,14 \text{ kg/m}^3$, tuż przed przejściem do detonacji; C) $\rho_p = 3,57 \text{ kg/m}^3$, detonacja; 1 - miejsce zainstalowania fotodiody wyzwalającej oscyloskop, 2 - miejsce zainstalowania czujnika ciśnienia

padek, w którym przejście do detonacji nastąpiło w niewielkiej odległości za czujnikiem ciśnienia (B), aż do profilu ciśnienia dla ustalonej detonacji (C).

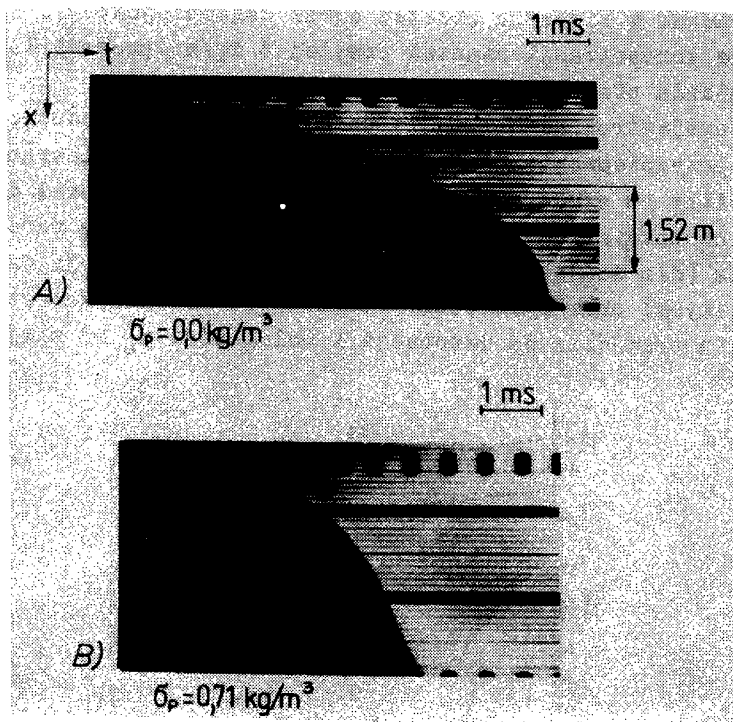
Rys.8 przedstawia wpływ cząstek obojętnych na przejście do detonacji dla stechiometrycznych mieszanin gazu płynnego



Rys.8. Bezpośrednie rozwinięcia czasowe procesu przyspieszania płomienia w stechiometrycznej mieszaninie propan-butan z powietrzem wzbogaconym do 30% tlenu: A) bez cząstek, B) $\sigma_p = 0,71 \text{ kg/m}^3$

z powietrzem wzbogaconym w tlen. Stwierdzono, że dodatek cząstek obojętnych o koncentracji 1-2 kg/m^3 do mieszaniny propan-butan-powietrze powoduje przyspieszenie i pulsacje płomienia w rurze, natomiast dalsze zwiększanie koncentracji cząstek prowadzi do stłumienia płomienia. Wzbogacanie mieszaniny do 30% tlenu w powietrzu prowadzi do znacznego przyspieszenia płomienia, jednakże jeszcze bez przejścia do detonacji. Dopiero zwiększanie koncentracji cząstek obojętnych stopniowo, aż do ok. 2 kg/m^3 powoduje stosunkowo łagodne przejście do spalania detonacyjnego, ze słabo widocznymi falami retonacyjnymi. Zwiększenie koncentracji cząstek powyżej 2 kg/m^3 powoduje zmniejszenie prędkości płomienia i zapobiega przejściu do spalania detonacyjnego.

Rysunek 9 przedstawia wpływ cząstek obojętnych na przejście do spalania detonacyjnego dla stechiometrycznych mieszanin

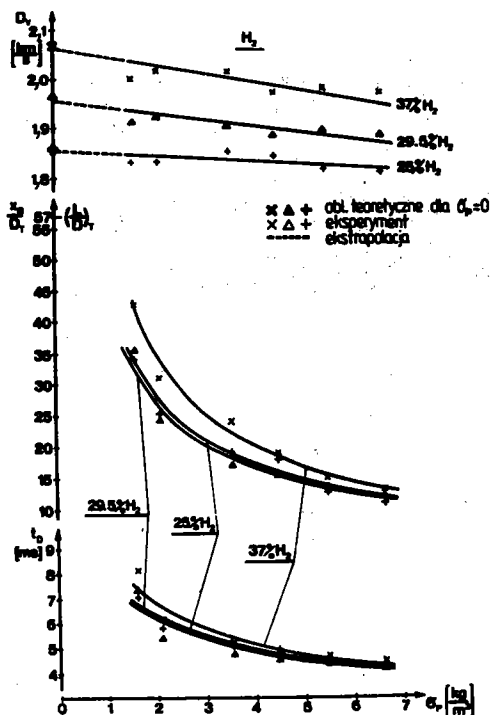


Rys.9. Bezpośrednie rozwinięcia czasowe procesu przyspieszania płomienia w stechiometrycznej mieszaninie metanu z powietrzem wzbogaconym do 40% tlenu: A) bez cząstek, B) $\sigma_p = 0,71 \text{ kg/m}^3$

metanu z powietrzem wzbogaconym w tlen. Badanie wstępne mieszaniny metan-powietrze wykazało, że cząstki obojętne tłumią spalanie w takich mieszaninach. Wzbogacenie mieszaniny do 30% tlenu w powietrzu spowodowało pulsacyjne przyspieszanie płomienia w mieszaninie bez cząstek obojętnych, zaś dodatek do takiej mieszaniny cząstek o koncentracji do 1 kg/m^3 prowadził do jednostajnego przyspieszania płomienia, jednak bez przejścia do detonacji. Dalsze zwiększanie koncentracji cząstek powyżej 1 kg/m^3 powodowało wyłącznie tłumienie płomienia. Wzbogacenie mieszaniny do 40% tlenu w powietrzu spowodowało gwałtowne przejście do spalania detonacyjnego już w mieszaninie bez cząstek obojętnych. Dodatek cząstek do takiej miesza-

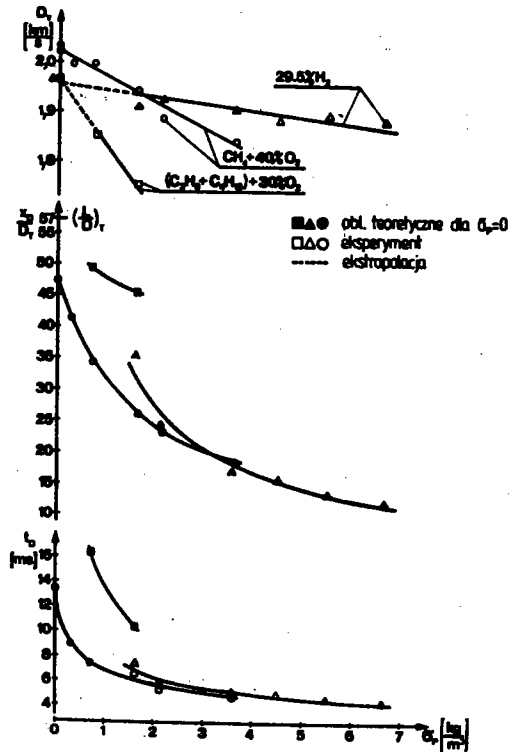
niny prowadził do skracania czasu potrzebnego na przejście do detonacji i osłabienia siły tego procesu (zmiany charakteru procesu w kierunku przejść coraz łagodniejszych). Zwiększenie koncentracji cząstek powyżej 4 kg/m^3 prowadziło do stłumienia płomienia.

Zarejestrowane w trakcie badań rozwinięcia czasowe procesu przyspieszania płomienia w poszczególnych mieszaninach pozwoliły na określenie w każdym przypadku prędkości detonacji lub maksymalnej prędkości przyspieszającego w rurze płomienia (dla danego składu mieszaniny i koncentracji cząstek obojętnych) oraz zmierzenie czasu t_D od momentu zapłonu do momentu przejścia do detonacji i odległości x_D od miejsca za-



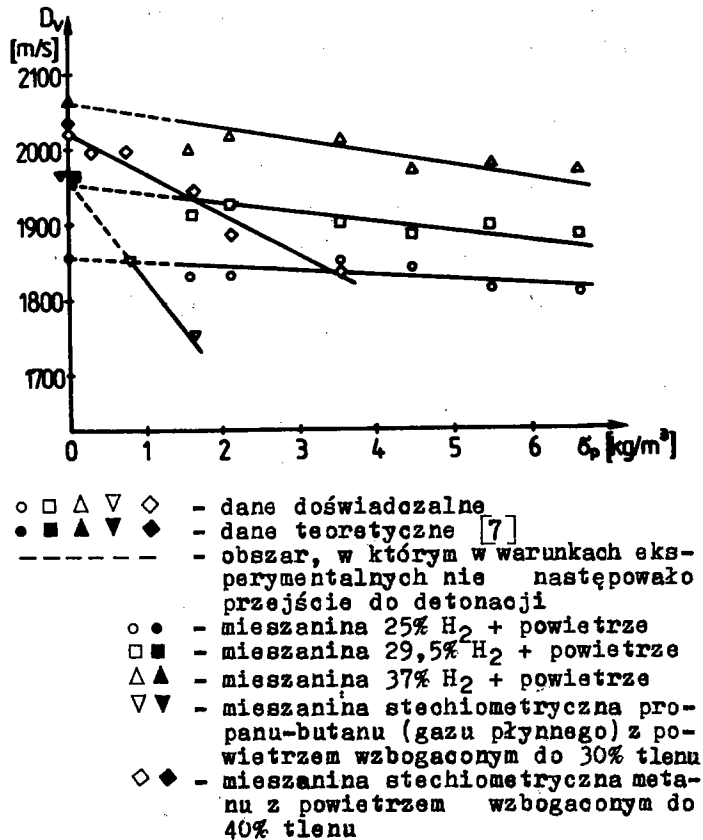
Rys.10. Wpływ stężenia cząstek obojętnych na prędkość detonacji D_v , odległość przejścia do detonacji x_D oraz czas przejścia do detonacji t_D dla mieszanin wodorowo-powietrznych. Dane teoretyczne dla $\sigma_p = 0$ [7]

płonu do miejsca przejścia do detonacji. Wyniki te zostały przedstawione w formie wykresów na rys.10-12.



Rys.11. Wpływ stężenia cząstek obojętnych na prędkość detonacji D_p , odległość przejścia do detonacji x_D oraz czas przejścia do detonacji t_D dla mieszanin stechiometrycznych: propanu-butanu z powietrzem wzbogaconym do 30% tlenu, metanu z powietrzem wzbogaconym do 40% tlenu i dla porównania - wodoru z powietrzem. Dane teoretyczne dla $\sigma_p = 0$ [7]

Z przedstawionych wykresów wynika, że we wszystkich badanych przypadkach rezultat oddziaływania cząstek obojętnych na proces przejścia do spalania detonacyjnego mieszanin gazowych ma podobny charakter: czas od momentu zapłonu do momentu przejścia do detonacji oraz odległość od miejsca zapłonu do miejsca przejścia do detonacji maleją jak funkcje potęgowe



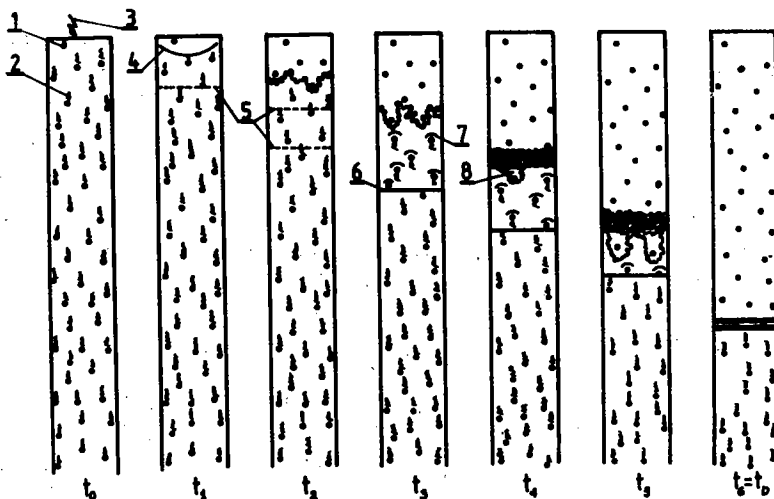
Rys.12. Wpływ stężenia cząstek obojętnych na prędkość detonacji w badanych mieszaninach

wraz ze wzrostem koncentracji cząstek obojętnych, natomiast prędkość detonacji maleje liniowo ze wzrostem koncentracji cząstek. Wpływ koncentracji cząstek na prędkość detonacji jest najsilniejszy w przypadku mieszaniny propanu-butanu z powietrzem wzbogaconym do 30% tlenu, nieco słabszy w przypadku mieszaniny metanu z powietrzem wzbogaconym do 40% tlenu - a więc dla stosunkowo słabo reagujących mieszanin, najsłabszy jest natomiast w przypadku mieszanin wodorowo-powietrznych, charakteryzujących się najmniejszym ze wszystkich badanych mieszanin wymiarem komórki detonacji [8].

3. MODEL FIZYCZNY PROCESÓW DETONACYJNYCH W GAZACH Z CZĄSTKAMI OBOJĘTNYMI

Biorąc pod uwagę rezultaty zebrane w trakcie przeprowadzonych badań, można w sposób następujący opisać mechanizmy rządzące wpływem cząstek obojętnych na procesy detonacyjne w mieszaninach gazowych: cząstki obojętne opadające w rurze przed zainicjowaniem zapłonu mieszaniny gazowej zwiększają wstępnie jej turbulencję tak, że po zapłonie płomień przemieszcza się już w środowisku sturbulizowanym. Poziom turbulencji wzrasta wraz ze wzrostem koncentracji cząstek. Ponieważ z kolei prędkość spalania rośnie ze wzrostem stopnia sturbulizowania mieszaniny, więc dla większych koncentracji cząstek obojętnych płomień przyspiesza coraz bardziej. Wskutek intensywnego przyspieszania płomienia już w początkowym etapie procesu cząstki przebywają we froncie płomienia tak krótko, że nie następuje jego stłumienie wskutek strat ciepła odbieranego od gazu przez cząstki. Jednocześnie tego typu płomień staje się źródłem kolejnych fal ciśnieniowych, które go poprzedzają i przemieszczają się z coraz większą prędkością, gdyż każda następną z nich porusza się w mieszaninie o parametrach zmienionych wskutek działania każdej poprzedniej. Te elementarne fale ciśnieniowe doganiają się i tworzą w rezultacie falę uderzeniową przemieszczającą się przed aktualnym czołem płomienia. Fala ta z kolei przyspiesza przepływ mieszaniny przed czołem płomienia, wymuszony przez rozprężające się spaliny. Ponieważ cząstki mają stosunkowo dużą masę, są przyspieszane znacznie słabiej niż mieszanina gazowa. Po stosunkowo krótkim czasie prędkość gazu znacznie przewyższa prędkość ruchu cząstek i można je wtedy traktować jak nieruchome względem przepływającego gazu przeszkody jeszcze silniej turbulizujące gaz i zwiększające stopień przyspieszania płomienia. Wskutek oddziaływania fali uderzeniowej z cząstkami, bądź ich grupami, powstają przycząstkowe odsunięte fale uderzeniowe. Fale te powodują dodatkowe sprężenie i podgrzanie mieszaniny gazowej w stosunku do parametrów w przepływie za padającą falą uderzeniową, sprzyjając zapłonowi. Dopóki czas opóźnienia zapłonu w okolicy cząstek jest zbyt długi, płomień przyspiesza

w dalszym ciągu stopniowo, napotykając na swej drodze obszary mieszaniny gazowej bardziej podatne na zapłon, co prowadzi do wzrostu prędkości spalania. Gdy wraz ze wzrostem energii fali uderzeniowej czas opóźnienia zapłonu mieszaniny zmaleje na tyle, że może nastąpić zapłon mieszaniny pomiędzy falą a czołem płomienia, każda z cząstek znajdujących się w tym obszarze staje się punktowym źródłem zapłonu. Im większa jest koncentracja cząstek, tym więcej pojawia się takich źródeł i tym szybciej może nastąpić zapłon mieszaniny za falą uderzeniową. Następuje wtedy nagły wzrost prędkości płomienia, płomień dogania falę uderzeniową i następuje przejście do detonacji. Charakter tego przejścia zależy jest od koncentracji cząstek - im większa jest koncentracja cząstek (a więc im większa jest ilość źródeł zapłonu przed czołem płomienia), tym płynniej następuje zapłon całej objętości mieszaniny między falą uderzeniową i czołem płomienia, a proces przejścia do spalania detonacyjnego jest stopniowy. Przebieg opisanych zjawisk został przedstawiony schematycznie na rys.13. Dalsze



Rys.13. Poszczególne fazy przejścia spalania w rurze w detonację w mieszaninie gazowej z cząstkami obojętnymi; 1 - cząstka obojętna, 2 - obszar turbulentny, 3 - zapłon, 4 - płomień, 5 - fala ciśnieniowa, 6 - fala uderzeniowa, 7 - przycząstkowa odsunięta fala uderzeniowa, 8 - zapłon w pobliżu cząstki

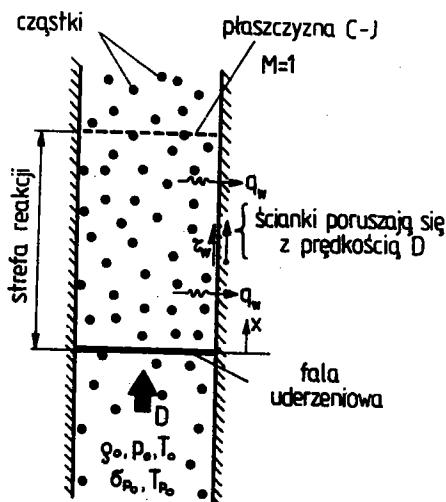
rozprzestrzenianie się fali detonacyjnej również podlega wpływowi obecności cząstek obojętnych. Cząstki znajdujące się w mieszaninie modyfikują warunki przepływu w strefie reakcji fali detonacyjnej - im większa koncentracja cząstek, tym mniejsza jest odległość między poszczególnymi cząstkami. Rosną w związku z tym opory przepływu w strefie reakcji, pojawiają się znaczne straty pędu mieszaniny gazowej (wskutek przekazywania pędu do cząstek), w wyniku czego prędkość detonacji jest mniejsza od prędkości, z jaką może przemieszczać się fala detonacyjna w mieszaninie bez cząstek.

4. MODEL MATEMATYCZNY DETONACJI W MIESZANINIE GAZOWEJ Z CZĄSTKAMI OBOJĘTNYMI [9]

Opracowany model opisuje strefę reakcji chemicznej w fali detonacyjnej (rys.14). Przyjęto tu układ współrzędnych związany z falą uderzeniową: w układzie tym fala jest nieruchoma, natomiast napływa na nią świeża mieszanina z cząstkami, z prędkością równą prędkości fali detonacyjnej D . Z taką samą prędkością poruszają się również ścianki rury.

Przy opracowywaniu modelu przyjęto następujące uproszczenia:

- proces jest jednowymiarowy i ustalony,
- cząstki obojętne traktuje się jako sferyczne i monodispersyjne,
- pomijany jest udział objętości cząstek w mieszaninie,



Rys.14. Schemat strefy reakcji w fali detonacyjnej w mieszaninie gazowej z cząstkami obojętnymi

- pomijane są straty ciepła wynikające z promieniowania,
- wykorzystuje się empiryczną zależność opisującą wydzielanie ciepła we frontie detonacji.

Podstawowe równania modelu można zapisać następująco:

- bilans masy mieszaniny gazowej z cząstkami obojętymi

$$\frac{d}{dx} (\varrho u + G_p u_p) = 0 \quad (1)$$

- bilans pędu mieszaniny gazowej z cząstkami obojętymi

$$\frac{d}{dx} (p + \varrho u^2 + G_p u_p^2) = -\frac{4}{D_h} \tau_w \quad (2)$$

- bilans energii mieszaniny gazowej z cząstkami obojętymi

$$\frac{d}{dx} \left[\varrho u \left(h + \frac{1}{2} u^2 \right) + G_p u_p \left(h_p + \frac{1}{2} u_p^2 \right) \right] = q_{cr} - \frac{d}{D_h} q_w \quad (3)$$

- równanie stanu gazu doskonałego

$$p = \varrho RT \quad (4)$$

- równanie ruchu cząstki obojętnej

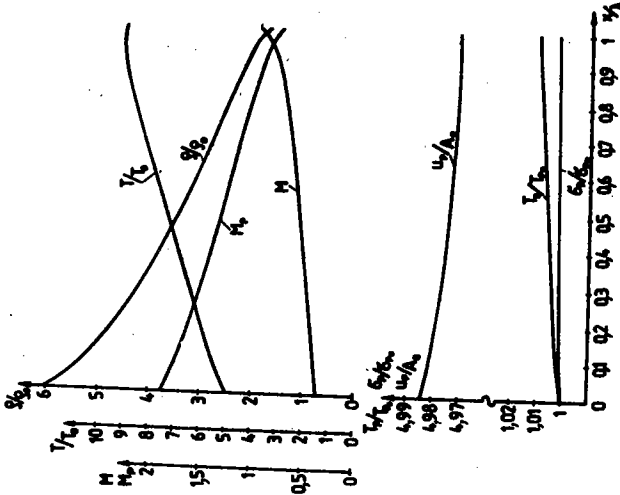
$$u_p \frac{du_p}{dx} = \frac{3}{4} \frac{c_d}{d_p} \frac{\varrho}{\varrho_p} (u - u_p) |u - u_p| \quad (5)$$

- zmiana temperatury cząstki obojętnej

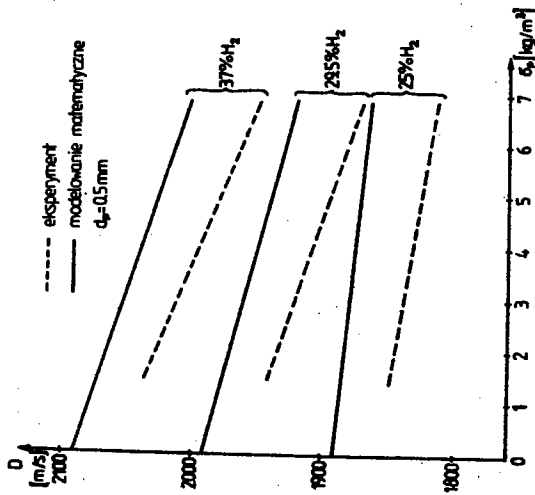
$$\frac{dT_p}{dx} = \frac{\pi d_p \lambda Nu}{m_p c_p u_p} (T - T_p) \quad (6)$$

W celu rozwiązania tych równań zastosowano procedurę numeryczną, analogiczną jak w [10] i [11]: równania (1)-(3) zostały jednokrotnie scałkowane do równań algebraicznych, zaś równania (5) i (6) były całkowane numerycznie przy użyciu metody Rungego-Kutty czwartego rzędu.

W wyniku rozwiązania tego modelu można wyznaczyć prędkość detonacji w mieszaninie gazowej z cząstkami obojętymi oraz określić przebiegi zmian ciśnienia, temperatury, gęstości i prędkości fazy gazowej oraz temperatury, koncentracji i prędko-



Rys. 16. Zmiany parametrów gazu i osadów obojętnych w strefie reakcji dla stechiometrycznej mieszaniny wodoro-wo-powietrznej z cząstkami obojętnej mi o koncentracji $\sigma_p = 1,64 \text{ kg/m}^3$



Rys. 15. Zależność obliczeniowej prędkości detonacji od koncentracji cząstek obojętnych dla mieszanin wodoro-wo-powietrznych

kości cząstek stałych w strefie reakcji. Wyznaczenie prędkości detonacji i przebiegów zmian ciśnienia umożliwiło weryfikację modelu i jego rozwiązań za pomocą danych liczbowych, będących wynikami omówionych wyżej badań. Przykładowe wyniki obliczeń dla mieszania wodorowo-powietrznych zostały przedstawione na kolejnych wykresach. Rysunek 15 przedstawia zależność obliczonej prędkości detonacji od koncentracji cząstek obojętnych; zamieszczono również wykresy obrazujące taką samą zależność określoną eksperymentalnie. Z porównania tych dwu rodzin prostych wynika, że została osiągnięta dobra zgodność pomiędzy wynikami obliczeń i doświadczeń. Obliczone prędkości detonacji D nieznacznie przewyższają wartości uzyskane w wyniku eksperymentu w całym zakresie badanych koncentracji cząstek obojętnych.

Rysunek 16 przedstawia zmiany parametrów mieszaniny gazowej oraz cząstek obojętnych w strefie reakcji dla koncentracji cząstek $\sigma_p = 1,64 \text{ kg/m}^3$. Niezależnie od koncentracji cząstek zawartych w mieszaninie, parametry gazu w strefie reakcji zmieniają się w ten sam sposób, natomiast parametry cząstek nie zmieniają się w strefie reakcji w sposób istotny. Z uwagi na stosunkowo dużą średnicę i masę, a także krótki czas przebywania w strefie reakcji, prędkość cząstek tylko nieznacznie maleje, co pociąga za sobą niewielki wzrost koncentracji cząstek w strefie reakcji. Także z tych samych powodów nieznacznie przyrasta temperatura cząstek.

Jakkolwiek przebywające w strefie reakcji fali detonacyjnej cząstki obojętne nie zmieniają w sposób istotny w tym czasie swoich parametrów, to jednak w znaczący sposób modyfikują warunki gazodynamiczne w tej strefie. Największe znaczenie ma tu wprowadzanie znacznych strat pędu mieszaniny gazowej wskutek przekazywania pędu do cząstek: cząstki i ścianki rury odbierają na drodze konwekcji łącznie nie więcej niż 1% ciepła wydzielanego wskutek spalania, natomiast cząstki o dużej koncentracji odbierają do 2% początkowego pędu mieszaniny gazowej.

5. WNIOSKI

Wnioski z przeprowadzonych badań i studiów teoretycznych można sformułować następująco:

1. Dodatek stosunkowo dużych cząstek obojętnych chemicznie (ziaren piasku) do silnie wybuchowych mieszanin gazowych powoduje w układach rurowych znaczne przyspieszenie procesu przejścia spalania deflagracyjnego do detonacyjnego.

2. Przyspieszenie przejścia do detonacji spowodowane jest wzrostem turbulencji drobnoskalowej (dla małych liczb Macha przepływu generowanego przed frontem płomienia) oraz ułatwianiem zapłonu w falach uderzeniowych powstających w okolicy cząstek (dla dużych liczb Macha przepływu generowanego przed frontem płomienia).

3. Wraz ze wzrostem koncentracji cząstek obojętnych w mieszaninie gazowej obserwowana jest stopniowa zmiana charakteru przejścia do detonacji: od gwałtownego "wybuchu w wybuchu" (podobnie jak w mieszaninach gazowych) do stosunkowo płynnego przejścia (podobnie jak w mieszaninach pyłowo-gazowych).

4. Wzrost koncentracji cząstek obojętnych powoduje liniowy spadek prędkości detonacji. Dla mieszanin o tych samych początkowych wartościach prędkości spalania detonacyjnego, silniejsze oddziaływanie obserwowane jest dla mieszanin charakteryzujących się stosunkowo dużymi wymiarami komórek detonacyjnych (większą szerokością strefy reakcji).

5. Trudnienie przejścia do detonacji cząstek obojętnych w mieszaninach charakteryzujących się stosunkowo dużymi wymiarami komórek detonacyjnych (dużą szerokością strefy reakcji). Dla mieszanin o małych wymiarach komórek (mieszaniny wodoro-powietrzne) oddziaływanie przyspieszające obserwowano w całym możliwym do uzyskania zakresie koncentracji cząstek obojętnych w mieszaninie gazowej.

6. Opracowany model matematyczny procesu rozprzestrzeniania się detonacji w mieszaninach gazowych z cząstkami obojętnymi chemicznie umożliwia obliczanie prędkości detonacji przy znajomości szerokości strefy reakcji chemicznej (wymiaru komórki detonacyjnej).

7. Obliczenia numeryczne wykazały, że w strefie reakcji istotne są tylko oddziaływania gazodynamiczne pomiędzy gazem a cząstkami, natomiast oddziaływania cieplne pomiędzy gazem a cząstkami można dla rozpatrywanego zakresu rozmiarów cząstek pominąć.

Badania przeprowadzone w niniejszej pracy objęły swym zakresem mieszaniny na bazie trzech paliw gazowych o różniących się własnościach. Dla wszystkich tych mieszanin stwierdzono, że wpływ cząstek obojętnych o stosunkowo dużych rozmiarach na proces spalania detonacyjnego ma podobny charakter. Należy przypuszczać, że podobne oddziaływania występować będą dla innych wybuchowych mieszanin gazowych i innych rodzajów cząstek obojętnych. Dokładne określenie zakresu i intensywności tych oddziaływań możliwe będzie dopiero po przeprowadzeniu badań doświadczalnych dla mieszanin gazowych o znacznie różniących się skłonnościach wybuchowych.

LITERATURA

- [1] L a f f i t t e P., B o u c h e t R.: Suppression of Explosion Waves in Gaseous Mixtures by Means of Fine Powders. Seventh Symposium (International) on Combustion, Butterworths, London 1959.
- [2] C y b u l s k i W.: Wybuchy pyłu węglowego i ich zwalczanie. Wyd. Śląsk, Katowice 1973.
- [3] K a u f f m a n C.W., W o l a ń s k i P., A r i - s o y A., A d a m s P.R., M a k e r B.N., and N i c h o l l s 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.
- [4] M e y e r J.W., O p p e n h e i m A.K.: On the Shock-Induced Ignition of Explosive Gases. Proceedings of the Thirteenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh (1978).
- [5] W o l i ń s k i M., W o l a ń s k i P.: Transition into Detonation in the Gaseous Mixtures in the Presence of Inert Particles. First International Colloquium on Explosibility of Industrial Dusts. Baranów 1984. Vol. 2 pp.196-207.
- [6] W o l i ń s k i M., W o l a ń s k i P., M y e r s R.M., K a u f f m a n C.W., S i - c h e l M., and N i c h o l l s J.A.: Influence of Inert Particles on Deflagration-Detonation Transition

- in Gas Mixtures. Ninth International Pyrotechnics Seminar. Colorado Springs 1984.
- [7] S v e h l a R.A., M c B r i d e B.J.: Fortran IV Computer Program Calculation of Thermodynamic and Transport Properties of Complex Chemical Systems, NASA Technical Note D-7056, NASA, Washington D.C., January 1973.
- [8] K n y s t a u t a s R., G u i r a o C., L e e J.H. and S u l m i s t r a s A.: Measurement of Cell Size in Hydrocarbon-Air Mixtures and Predictions of Critical Tube Diameter, Critical Ignition Energy, and Detonability Limits. 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.23-27, AIAA New York, 1984.
- [9] W o l i ń s k i M., W o l a ń s k i P.: Mathematical Model of Detonation in the Gaseous Mixture with Inert Particles. IXth International Symposium on Combustion Processes, Wisła, Poland, 1985.
- [10] W o l a ń s k i P., L e e D., S i c h e l M., K a u f f m a n C.W., and N i c h o l l s J.A.: The Structure of Dust 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.241-263. AIAA New York 1984.
- [11] W o l a ń s k i P., W o l i ń s k i M.: Mathematical Model for Detonation in a Dust-Gas Mixture. VIIth All-Union Heat and Mass Transfer Conference, Mińsk, USSR (1984).

ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ НА ДЕТОНАЦИЮ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

А н н о т а ц и я

В работе приводятся результаты исследований влияния относительно крупных химических инертных частиц, взвешенных в газовой смеси, на процесс перехода горения в детонацию и детонационного горения в трубах. Подтверждается, что такие частицы ускоряют переход дефлаграционного горения в детонацию и снижают скорость распространения детонации. Приводится физическая модель процессов перехода в детонацию и распространения детонации в таких условиях, а также математическая модель, позволяющая определить структуру и скорость распространения детонационной волны.

INERT PARTICLES INFLUENCE ON GASEOUS DETONATION PROCESSES

S u m m a r y

The paper presents results of studies of influence of relatively large chemically inert particles dispersed in a gaseous mixture on transition to detonation processes and on detonation combustion.

It has been found out that these particles cause acceleration of transition from deflagration to detonation, and reduce the detonation velocity.

A physical model of the transition to detonation and propagation of the detonation under such conditions has been presented. Also mathematical model allowing determination of velocity of the detonation wave has been proposed.