

BIULETYN INFORMACYJNY
INSTYTUTU TECHNIKI CIEPLNEJ
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

WARSZAWA

TEL. 21007 w. 1232 i 1248

NOWOWIEJSKA 25

Nr 16/K.S.S.P i L. 3

styczeń 1969

Dr inż. Andrzej Kowalewicz
Katedra Silników Spalinowych Przemysłowych i Lotniczych
Politechniki Warszawskiej

Instytut Lotnictwa

DYNAMIKA ZAPŁONU ISKROWEGO MIESZANEK PALNYCH
CZĘŚĆ I: BADANIA EKSPERYMENTALNE

* 1. Wstęp

Przedmiotem tej pracy jest zapłon iskrowy mieszanek dwufazowych, w których paliwo występuje w zasadzie wyłącznie w postaci kropeł, o wymiarach tworzących ciągle widmo rozpylenia.

Pomimo powszechnego zastosowania zapłonu iskrowego w lotniczych silnikach przepływowych (w warunkach rozruchu) i w silnikach tłokowych, mechanizm zapłonu nie jest w pełni wyjaśniony i w konsekwencji tego teoria zapłonu mieszanek dwufazowych o małym stopniu odparowania (udział fazy gazowej poniżej ubożej granicy rozprzestrzeniania się płomienia) nie istnieje. Istniejące teorie zapłonu iskrowego ograniczają się wyłącznie do mieszanek gazowych. Ich przegląd podał autor w pracy [1]. Brak również danych eksperymentalnych dotyczących energii potrzebnej do zapłonu - tego tradycyjnie przyjmowanego, jako decydującego o zapłonie parametru, zmierzonego i zbadanego

w przypadku wielu mieszanek gazowych w warunkach przepływu. Trudności techniczne pomiaru energii mieszanek dwufazowych, polegające na ustaleniu korelacji pomiędzy mierzonymi wielkościami i uzyskaniu ich powtarzalności, m.in. wobec osadzania się fazy ciekłej na elektrodach umieszczonych w strumieniu mieszanki są dodatkowo większe - w porównaniu z pomiarami w przypadku mieszanek gazowych - wskutek faktu, że zapłon iskrowy mieszanki dwufazowej jest z natury zjawiskiem probabilistycznym. Ten charakter zapłonu wynika z niejednorodności struktury ośrodka mieszanki oraz impulsowego doprowadzenia energii do tego ośrodka w procesie wyładowania iskrowego. Stwierdził go autor w sposób eksperymentalny, prowadząc prace nad optymalizacją zapłonu w komorze spalania turbinowego silnika lotniczego [2].

Zagadnienie zapłonu, a zwłaszcza jego optymalizacji (ze względu na minimum energii potrzebnej do zapłonu) oraz oceny prawdopodobieństwa jego pojawienia się w wyniku wyładowania iskrowego ma istotne znaczenie techniczne, zwłaszcza w zastosowaniu do lotniczych silników przepływowych, gdzie energia potrzebna do zapłonu jest stosunkowo duża, ciężar i wymiary układu zapłonowego (decydujące o jego pojemności elektrycznej) - z reguły kondensatorowego - powinny być jak najmniejsze, a zapłon w warunkach startu lub na wysokości - niezawodny.

Celem tej pracy jest - z jednej strony - eksperymentalne kompleksowe zbadanie procesu zapłonu mieszanki dwufazowej, a w szczególności pomiar energii i prawdopodobieństwa zapłonu i ocena wpływu na nie podstawowych parametrów mieszanki oraz - z drugiej strony - opracowanie teorii zapłonu, uwzględniającej dynamikę tego procesu i jego probabilistyczny charakter. Teorii tej postawiono dodatkowe wymagania, a mianowicie, żeby umożliwiała obliczenie energii zapłonu mieszanki dwufazowej przy znanych parametrach tej mieszanki i iskry zapłonowej.

Większa część niniejszej pracy została opublikowana w miarę jej wykonywania: część eksperymentalna - w artykułach [3] i [4] oraz zreferowana na V Sympozjum Termodynamiki w Wiśle (1968 r.), mechanizm zapłonu w artykule [5], zaś teoria zapłonu została zreferowana na VIII Międzynarodowym Sympozjum Mechaniki Płynów w Tardze (1967 r.) [6]. Jednakże teoria za-

płonu i analiza jego mechanizmu zostały w niniejszej pracy rozwinięte w stosunku do [5] i [6].

Układ pracy nie jest przypadkowy, eksperyment bowiem - którego początkowym zamierzeniem był pomiar energii zapłonu i określenie wpływu podstawowych parametrów mieszanki na tę energię, a dalsze zadania nasunęły się w toku jego realizacji - inspirował analizę teoretyczną mechanizmu zapłonu (uzupełnioną z kolei eksperymentem) i opracowanie teorii zapłonu mieszanek dwufazowych.

2. Badania ogólne zapłonu

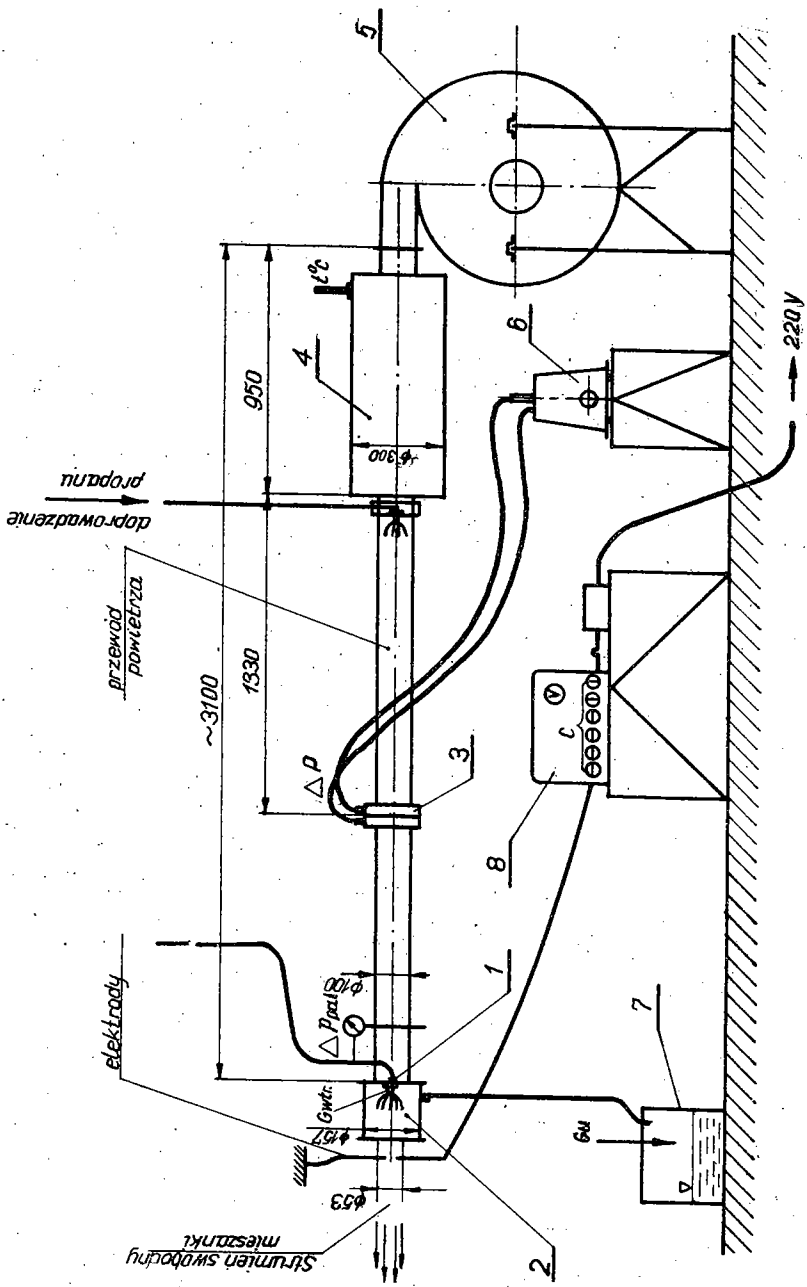
Tradycyjnie przyjmowaną wielkością, która decyduje o zapłonie iskrowym jest energia doprowadzona do mieszanki. Dla wielu jednorodnych mieszanek gazowych wartości energii zapłonu zostały określone eksperymentalnie [7]. Były one wyznaczone w przypadku iskry kondensatorowej, w której wydzielenie energii zachodzi w b. krótkim czasie, rzędu 10^{-5} s. Jak zostanie wykazane w części teoretycznej tej pracy, o zapłonie decyduje nie tylko wielkość energii, ale przebieg i czas jej doprowadzenia do mieszanki (ściśle: przebieg mocy iskry w czasie). Wobec tego jednak, że czas i przebieg wydzielenia energii w iskrach powstałych przy rozładowaniu kondensatorowych układów zapłonowych jest podobny, konkretną wielkością, którą łatwo operować i wyznaczać, jest energia wyładowania iskrowego. Tę wielkość przyjął autor niniejszej pracy jako charakterystyczną również i dla zapłonu mieszanek dwufazowych.

Do chwili obecnej brak danych dotyczących wartości energii zapłonu mieszanek dwufazowych oraz wpływu na tę energię parametrów mieszanki. Istniejące dane dotyczą przedziałów zapłonu ze względu na koncentrację paliwa i wpływu na nie średnicy kropeł paliwa oraz prędkości rozprzestrzeniania się płomienia i wpływu na nią parametrów mieszanki. Badania spalania mieszanek dwufazowych przeprowadzone przez Burgoyne'a i Cohena [8], Tichomirowa [9] i Gołowiń [10] wykazały, że granice rozprzestrzeniania się płomienia ze względu na koncentrację paliwa w mieszance są przesunięte w stosunku do granic, w przypadku mieszanek jednorodnych (gazowych) w kierunku składu uboż-

szego w paliwo. Przesunięcie to zależy od średnicy kropeł mieszanek o stałej średnicy kropeł w ten sposób, że rośnie ze wzrostem średnicy. Wyniki badań zebrane w pracy [11] wykazały, że prędkość spalania zależy zasadniczo od średnicy kropeł i ciśnienia. Mechanizm spalania mieszanek dwufazowych był przedmiotem badań eksperymentalnych Mizutaniego i Ogasawary [12]. Stwierdzili oni, że w mieszanekach o jednorodnych kroplach w przypadku średnicy kropeł $d < 20 \mu\text{m}$ płomień rozprzestrzenia się w sposób analogiczny jak w mieszaneczce gazowej (homogeneous transfer), a w przypadku, gdy średnica kropeł $d > 40 \mu\text{m}$, krople palą się indywidualnie (relay transfer). W warunkach pośrednich ($20 \mu\text{m} < d < 40 \mu\text{m}$) mechanizm spalania jest pośredni. Krople o średnicy $d < 10 \mu\text{m}$ odparowują przed przejściem przez czoło płomienia. Pewne wyniki własnych badań wstępnych nad określeniem wpływu parametrów mieszanki dwufazowej na energię zapłonu i pomiaru tej energii podał autor w [1].

Zamierzeniem eksperymentów opisanych w tym podrozdziale było opracowanie metody pomiaru energii zapłonu iskrowego mieszanek dwufazowych i pomiar tej energii oraz określenie wpływu parametrów mieszanki (o b. niskim udziale fazy odparowanej), głównie: prędkość przepływu, koncentracji paliwa oraz średniej średnicy kropeł, tworzących ciągle widmo rozpylenia, na tę energię. W toku eksperymentów uzyskano dodatkowe informacje, które nie były pierwotnie planowane, a mianowicie informacje o postaciach rozprzestrzeniania się płomienia od iskry na strumień mieszanki, o probabilistycznym charakterze zapłonu oraz granicach rozprzestrzeniania się płomienia.

Badania przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na rys. 1. Zapłon realizowano w swobodnym strumieniu mieszanki, w przekroju oddalonym o 50 mm od wylotu komory mieszania za pomocą wyładowania iskrowego pomiędzy stożkowo zakończonymi elektrodami $\varnothing 6 \text{ mm}$, umieszczonymi w strumieniu w płaszczyźnie poziomej. Elektrody podłączone były do układu zapłonowego o regulowanej energii w zakresie od ok. 0,005 J do 1,0 J przez włączenie (wyłączenie) do obwodu równolegle podłączonych kondensatorów. Stopień pełności wyładowania energii w iskrze η , będący funkcją napięcia V i pojemności C , został określony



1 - wttryskiwacz, 2 - komora mieszania, 3 - zwięzka, 4 - zbiornik wyrównawczy, 5 - wentylator, 6 - mikromanometr, 7 - zbiornik paliwa upustowego, 8 - układ zapłonowy wysokiej energii

Rys. 1

w wyniku pomiarów przeprowadzonych w Instytucie Elektrotechniki w postaci zależności funkcyjnej $\eta = \eta(C, U)$ [13].

Mieszanke o określonym składzie, średnicy kropeł i prędkości uzyskiwano przez rozpylenie nafty za pomocą wtryskiwacza wirowego w strumieniu powietrza, wytwarzanym przez wentylator. Wtrysk paliwa odbywał się do komory mieszania, skąd część paliwa odprowadzana była następnie do zbiornika, a pozostała część w postaci kropeł rozpylonych w strumieniu powietrza wypływała otworem \varnothing 50 mm na zewnątrz.

Mierzono następujące wielkości:

- natężenie przepływu,
- natężenie przepływu paliwa, jako różnicę natężenia przepływu paliwa przez wtryskiwacz i paliwa ściekającego po ściankach komory mieszania,
- lokalne rozkłady prędkości powietrza i wydatku paliwa w przekroju pomiarowym,
- poziom turbulencji strumienia powietrza,
- średnice kropeł rozpylonych w powietrzu, wg metody opisanej w [14],
- napięcie w czasie przeskoku iskry i pojemność naładowanych kondensatorów,
- przebieg wydzielania się energii w czasie, na podstawie którego określono "czas trwania" iskry i całkowitą ilość energii doprowadzoną do gazu [13]. Czas ten w pełnym zakresie zmian energii iskry był w przybliżeniu stały i wynosił kilka mikrosekund.

Przy próbach, w których używano paliwa w fazie gazowej, mierzono dodatkowo natężenie przepływu.

Uzyskano zmienność parametrów mieszanki w następujących granicach:

- średni współczynnik nadmiaru powietrza dla całego strumienia mieszanki $\bar{\alpha} = 0,4$ do ok. 10,0,
 - lokalny współczynnik nadmiaru powietrza $\alpha_0 = 0,25 \div 3,0$,
 - średnia wg Sautera średnica kropeł $d_s = 35 \div 160 \mu\text{m}$ (najczęściej 50 + 100 μm),
 - prędkość strumienia swobodnego w osi $V_0 = 3,6 \div 9,2$ m/s.
- Parametry: $\bar{\alpha}$ i V_0 mogły być zmienne całkowicie niezależnie.

Szerszy opis eksperymentów podano w [4] i [15].

Uzyskano następujące wyniki badań.

1. Stwierdzono, że w pewnych warunkach określonych parametrami mieszanki zapłon ma charakter probabilistyczny. Przy kilkukrotnym powtarzaniu serii wyładowań iskrowych w niezmiennych warunkach zapłonu ilość zapłonów mieszanki w każdej serii nieznacznie oscylowała wokół średniej ze wszystkich serii. Z tego względu za kryterium zapłonu przyjęto serię kolejno następujących po sobie zapłonów. Liczebność serii zapłonów jako kryterium zapłonu przyjmowano następująco:

a) 3 kolejne zapłony w przypadku zapłonu całego strumienia i ustatecznienia się strumienia w komorze,

b) 10 kolejnych zapłonów w przypadku, gdy zapłon obejmował tylko wydłużony obszar mieszanki w śladzie iskry i płomień nie przenosił się do granic swobodnego strumienia w kierunku bocznym oraz był następnie zdmuchiwany (nie ustateczniał się w komorze) lub gdy obejmował cały strumień w kierunku bocznym, ale na b. krótkim odcinku w otoczeniu świecy.

2. Rozróżniano trzy następujące postacie rozwoju zapłonu od iskry zapłonowej na strumień mieszanki:

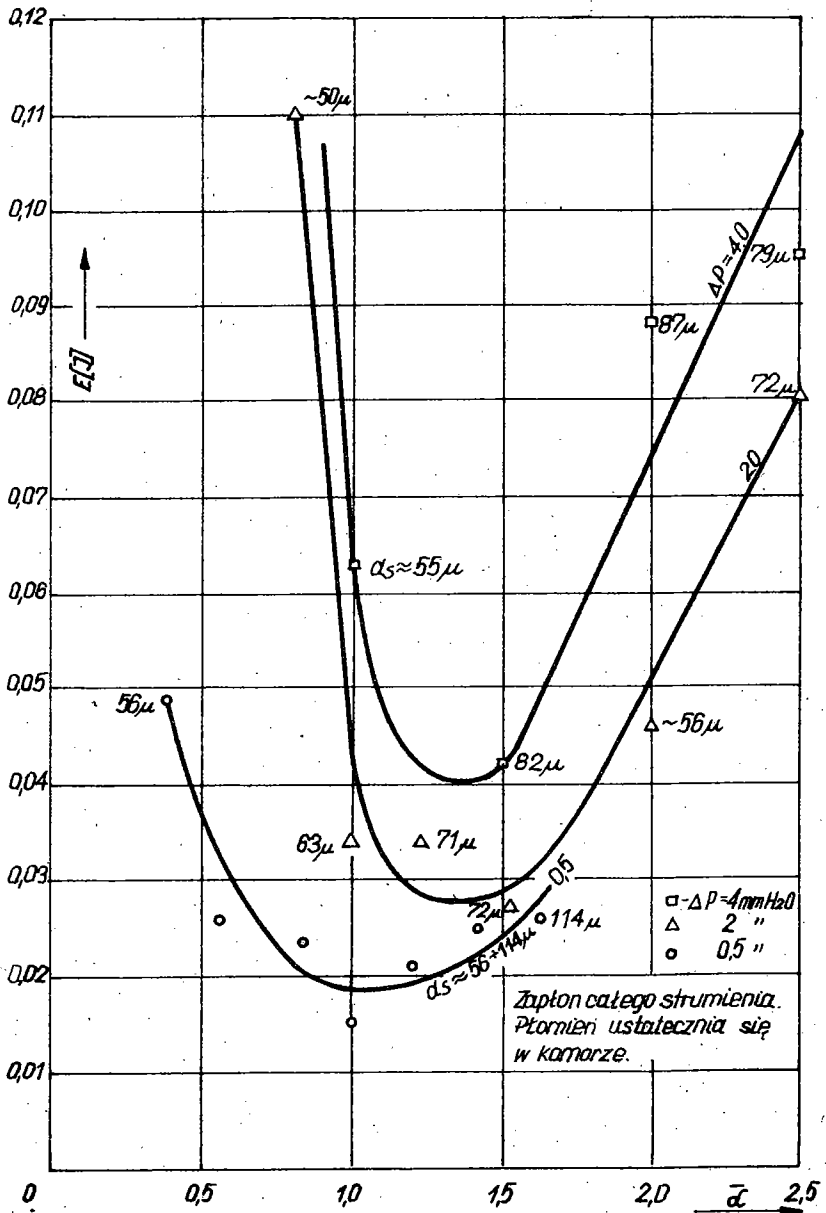
a. Płomień rozprzestrzenia się na cały strumień mieszanki w sposób nagły, niedostrzegalny gołym okiem i ustatecznia się w komorze mieszania.

b. Płomień rozprzestrzenia się tylko na obszar mieszanki w śladzie iskry, ale na dużej długości strumienia. Rozwój zapłonu od iskry jest widoczny gołym okiem. Przy niskich prędkościach ($\Delta P = 0,5 \div 1,0 \text{ mm H}_2\text{O}$) strumienia mieszanki ustatecznia się w pewnej odległości od przekroju pomiarowego, gdzie prędkość spalania równa się prędkości strumienia swobodnego, przy większych - nie ustatecznia się i gaśnie.

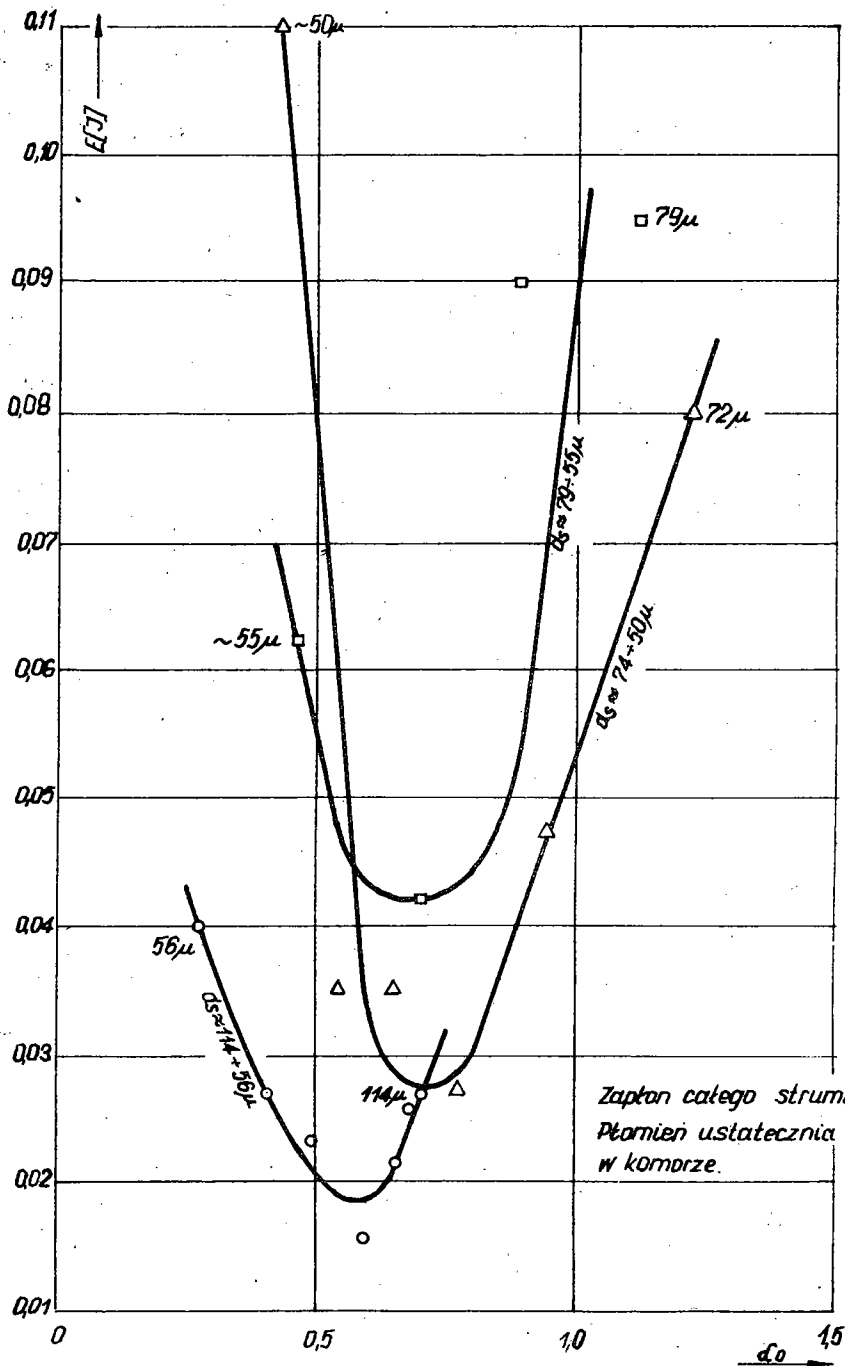
c. Płomień obejmuje tylko obszar w otoczeniu iskry zapłonowej.

Możliwe są także postacie pośrednie.

Pierwsza postać zapłonu i druga w przypadku ustateczniania się płomienia nie mogą być kwestionowane jako zapłon strumienia - pozostałe są umowne. Zapłon całego strumienia występuje w przypadku mieszanek dostatecznie bogatych: $\bar{\alpha} = 0,4 \div 2,5$ i $\alpha_0 \approx 0,25 \div 1,6$, w zakresie prędkości, w jakim przeprowadzono pomiary energii ($3,6 \div 9,2 \text{ m/s}$) i średniej średnicy kropel



Rys. 2



Rys. 3

w przedziale 50 - 110 μm . Druga postać zapłonu jest charakterystyczna dla mieszanek ubogich: $\bar{\alpha} = 3 \div 8,5$ i $\alpha_0 = 1,5 \div 2,6$ w rozpatrywanym zakresie prędkości i średniej średnicy kropeł w przedziale 40 - 160 μm . Trzecia postać zapłonu występuje w przypadku mieszanek o parametrach zbliżonych do tych, jakie charakteryzują drugą postać, lecz o jeszcze uboższym składzie i przy dużych energiach iskry, ok. 0,4 J. Teoretyczną interpretację wymienionych postaci zapłonu podano w rozdziale 2 części II tej pracy.

3. Energia zapłonu b. silnie zależy od stosunku paliwo/powietrze.

Zależność tę przedstawiono na rys. 2 i 3. Wynika z nich, że:

a) energia zapłonu posiada wyraźne minimum w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza,

b) optymalny średni nadmiar powietrza (odpowiadający minimalnej energii zapłonu) jest zbliżony do stechiometrycznego i przesuwa się w kierunku uboższych mieszanek ze wzrostem prędkości przepływu strumienia,

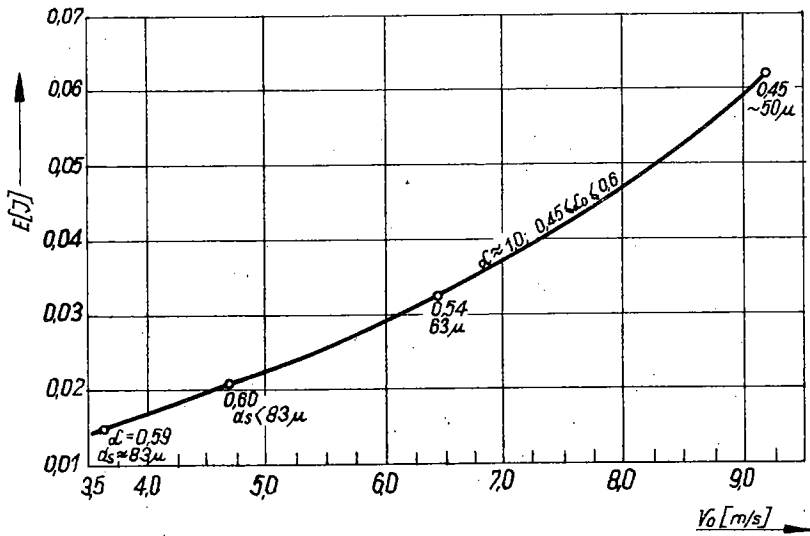
c) wartości energii zapłonu przy optymalnym składzie mieszanki wynoszą kilka m - jouli, tj. są o rząd większe niż dla mieszanek gazowych [1].

4. Zależność energii zapłonu od prędkości przepływu mieszanki przedstawiono na rys. 4. Wynika z niej, że energia zapłonu mieszanek o średnim składzie zbliżonym do stechiometrycznego rośnie ze wzrostem prędkości przepływu.

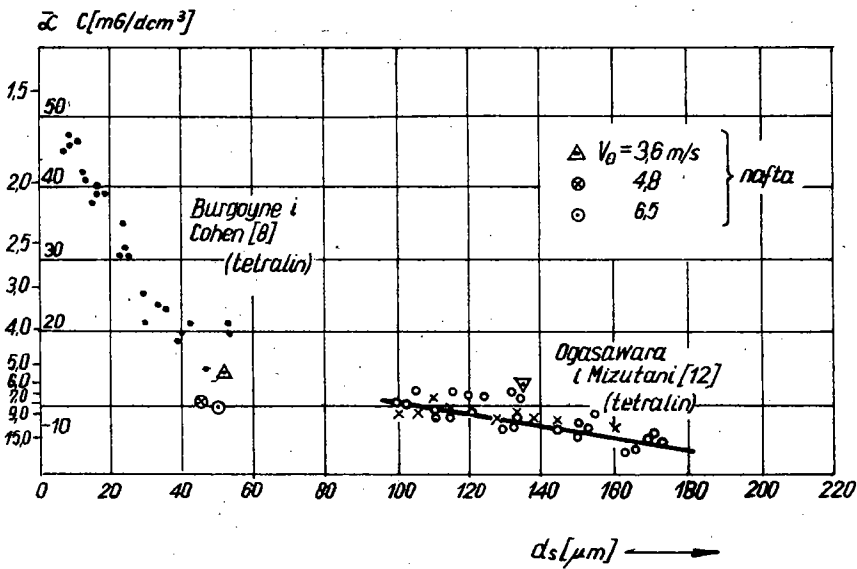
5. Energia zapłonu nie zależy od dodatkowo doprowadzonej do strumienia powietrza fazy gazowej paliwa (propanu), pod warunkiem, że obliczany dla niej współczynnik nadmiaru powietrza spełnia warunek: $\alpha_{\text{prop}} \geq 9,5$.

6. Nie zaobserwowano istotnego wpływu średniej średnicy kropli na energię zapłonu w zakresie $d_s = 40 \div 100 \mu\text{m}$. Natomiast przy dużych średnich średnicach kropeł ($d_s > 150 \mu\text{m}$) energia zapłonu rośnie.

7. Uzyskane wyniki dotyczące $\bar{\alpha}$ i d_s pozostają w dobrej zgodności z wynikami Burgoyne'a i Cohena [8], dotyczącymi dolnej granicy rozprzestrzeniania się płomienia. Wyniki te zostały przedstawione na wykresie, rys. 5, wykonanym (częściowo)



Rys. 4



Rys. 5

wg wykresu zaczerpniętego z [8], na którym zaznaczono wyniki uzyskane przez autora. Jak widać z wykresu, uzyskane dane są przedłużeniem, w kierunku większych średnic i mniejszych koncentracji, wyników Burgoyne'a i Cohena. Wynika stąd ciekawy wniosek, że dolna granica zapłonu nie zależy od tego, czy krople mają stały wymiar (jak w doświadczeniach Burgoyne'a i Cohena), czy średnice tworzą pewne widmo rozpylenia, jakie uzyskuje się za pomocą wtryskiwacza wirowego pod warunkiem, żeby ich średnie (wg Sautera) średnice były równe. Wniosek ten dotyczy mieszanek o średniej średnicy kropeł nie mniejszych niż $40 \mu\text{m}$.

3. Badania prawdopodobieństwa zapłonu

Po raz pierwszy autor tej pracy zetknął się z problemem probabilistycznego charakteru zapłonu kropeł paliwa ciekłego (nafty), rozpylonych w strumieniu powietrza, przy okazji przeprowadzenia prób polepszenia zapłonu komory spalania turbino-
wego silnika odrzutowego [2].

W wyniku tych badań stwierdzono, że przy stałej średniej prędkości przepływu powietrza przez komorę istnieją takie przedziały średniego współczynnika nadmiaru powietrza $\bar{\alpha}$ (określonego jednoznacznie przy $V = \text{const}$ ciśnieniem wtrysku ΔP_{pal}), w których mogą zachodzić następujące trzy przypadki:

- a) zapłon komory następuje w wyniku każdego wyładowania iskrowego,
- b) zapłon komory jest możliwy, ale nie zachodzi za każdym wyładowaniem iskrowym,
- c) zapłon komory w ogóle nie jest możliwy.

W toku badań wpływu parametrów mieszanki dwufazowej na energię zapłonu iskrowego, opisanych wyżej stwierdzono również probabilistyczny charakter zapłonu.

Zamierzeniem eksperymentów opisanych w tym rozdziale było zbadanie wpływu zasadniczych wielkości warunkujących ten zapłon, tj. koncentracji paliwa, średniej średnicy kropeł, energii iskry zapłonowej i udziału paliwa w fazie gazowej na prawdopodobieństwo zapłonu.

Wszystkie eksperymenty przeprowadzono na stanowisku pokazanym na rys. 1 przy stałej prędkości przepływu $V_0 \approx 9,2$ m/s i zmiennym nadmiarze powietrza oraz energii iskry. Średnia średnica kropeł zmieniała się w niewielkim przedziale w sposób niezamierzony i zależała tylko od współczynnika nadmiaru powietrza $\bar{\alpha}$. Większość prób przeprowadzono przy wtryskiwaczu A; celem określenia wpływu średniej średnicy kropeł na prawdopodobieństwo zapłonu użyto wtryskiwacza B, pozwalającego uzyskać mniejsze krople.

Próby z doprowadzeniem propanu przeprowadzono przy stałym stosunku paliwo ciekłe-powietrze ($\bar{\alpha} = 7,9$), przy użyciu wtryskiwacza B, przy trzech wartościach energii iskry i zmiennym udziale propanu w mieszance (tj. zmiennym współczynnikiem nadmiaru powietrza odniesionym tylko do propanu α_{prop}).

Pomiary ilości zapłonów strumienia mieszanki przeprowadzono traktując średni współczynnik nadmiaru powietrza $\bar{\alpha}$ jako zmienną niezależną, a energię iskry zapłonowej jako parametr.

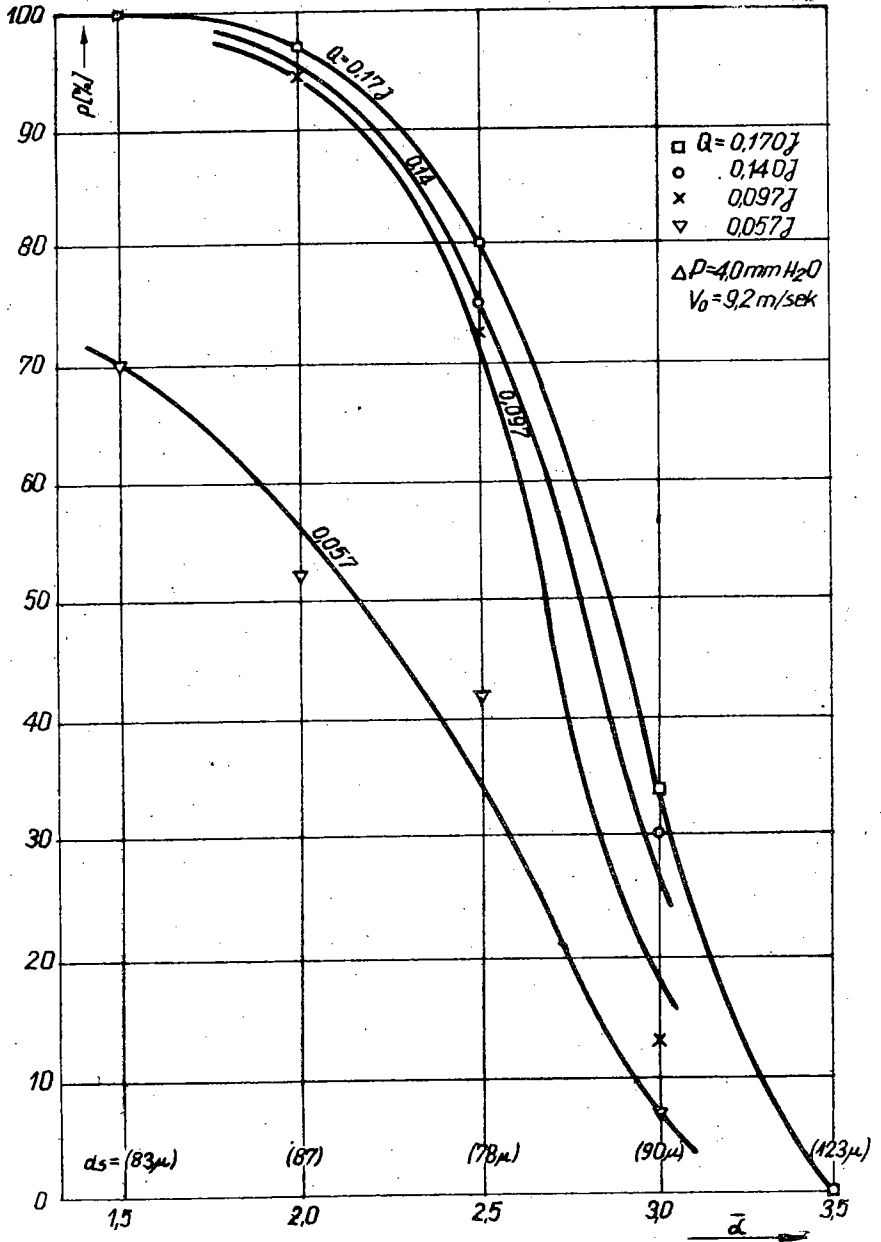
W wyniku wstępnych prób przyjęto jako regułę liczebność pojedynczej serii wyładowań iskrowych za równą 20. Przy takiej liczebności serii wahania liczby zapłonów strumienia mieszanki w każdej kolejnej serii wyładowań różniły się nieznacznie. Każdą serię - przy niezmiennych warunkach zapłonu - powtarzano co najmniej trzykrotnie, jeśli ilość zapłonów w dwu poprzednich różniła się.

Jako wartość prawdopodobieństwa zapłonu przyjmowano średnią arytmetyczną prawdopodobieństwa zapłonu z każdej serii 20-tu wyładowań iskrowych, przeprowadzonych w niezmiennych warunkach. Zmierzone wartości prawdopodobieństwa mieszczą się w 95-procentowym przedziale ufności.

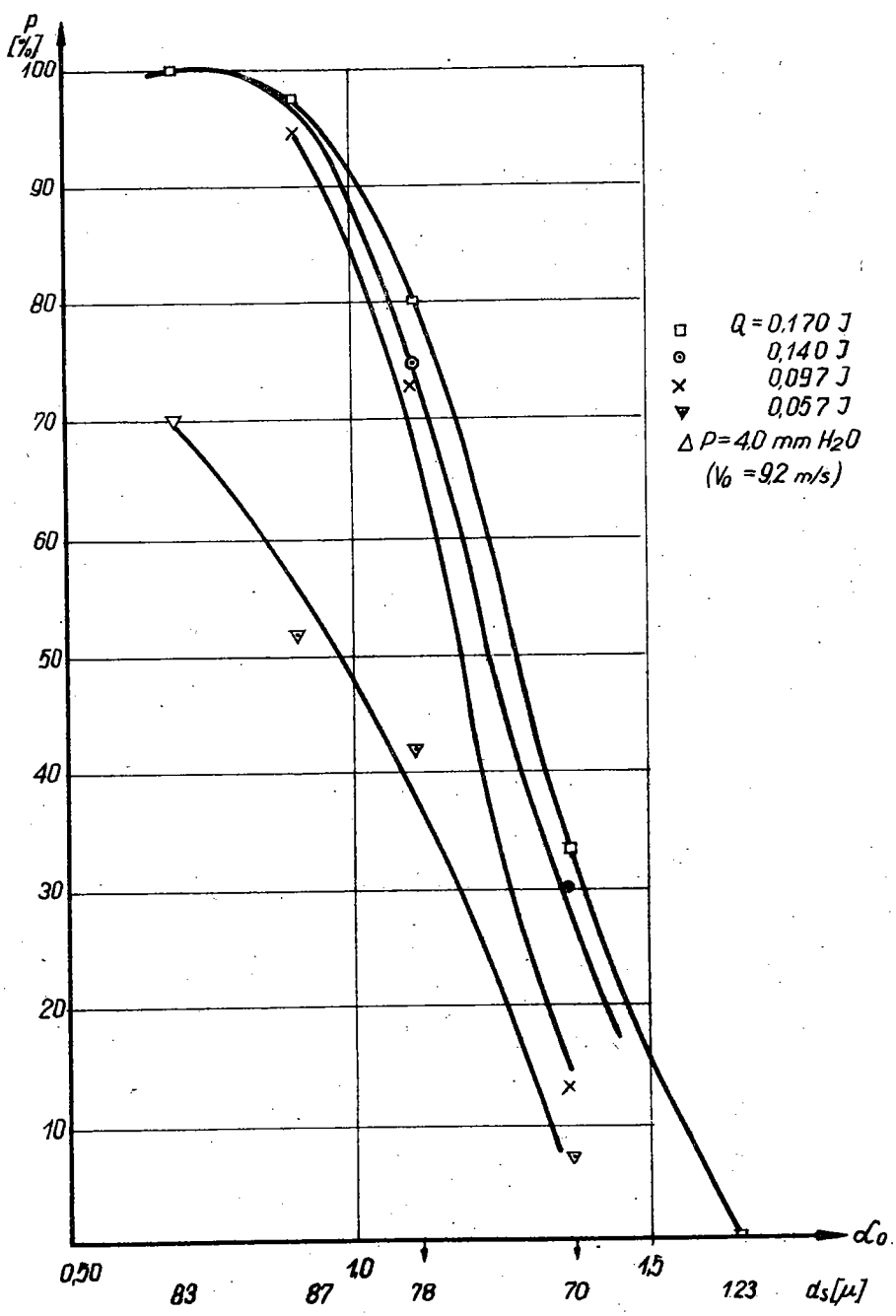
Wyniki prób podano w postaci wykresów na rys. 6-9. Można wyciągnąć z nich następujące wnioski:

1. Przy $Q = \text{const}$ i $d_s \approx \text{const}$ prawdopodobieństwo zapłonu b. silnie maleje ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza. Pewny zapłon ($p^* = 1$) uzyskuje się przy średnim dla całego

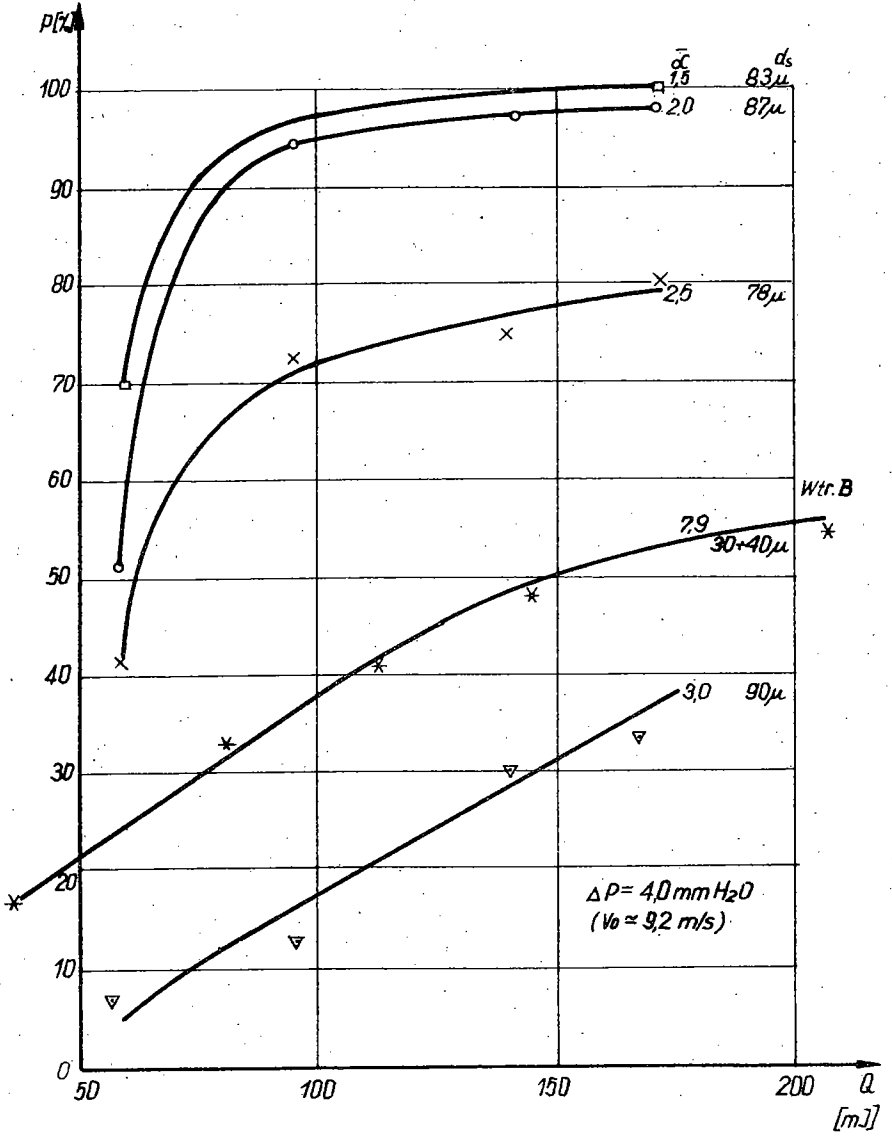
*) Przez p oznaczono prawdopodobieństwo zapłonu strumienia mieszanki; $p = \frac{\text{ilość zapłonów}}{\text{ilość wyładowań iskrowych}}$ w serii.



Rys. 6



Rys. 7



Rys. 8

strumienia stosunku powietrze-paliwo większym niż stechiometryczny ($\bar{\alpha} \approx 1,5$) i lokalnym w osi strumienia - niższym stechiometryczny ($\alpha_0 \approx 0,70$).

2. Zakres współczynnika nadmiaru powietrza, w którym zapłon jest możliwy ($0 < p \leq 1$) jest b. szeroki i zależy od średniej średnicy kropeł oraz od energii iskry. Np. przy $80 < d_s < 120 \mu\text{m}$ oraz $Q = 0,17 \text{ J}$ zapłon jest możliwy w zakresie $1,5 \leq \bar{\alpha} \leq 3,5$ oraz $0,7 \leq \alpha_0 \leq 1,66$.

3. Przy $\bar{\alpha} = \text{const}$

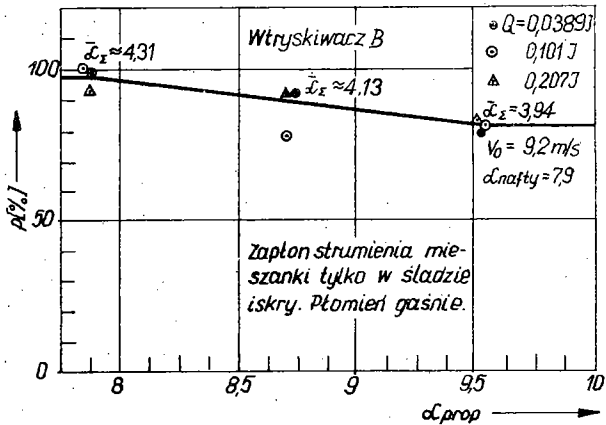
($\alpha_0 = \text{const}$) i $d_s = \text{const}$ prawdopodobieństwo zapłonu rośnie

ze wzrostem energii iskry. Zależność $p(Q)$ dla bogatych mieszanek jest bardziej

stroma ($\bar{\alpha}$ mniejsze) w zakresie małych energii iskry i ma

charakter asymptotyczny względem prostej

$p = 1$ w zakresie większych energii iskry. Dla ubogich mieszanek zależność $p(Q)$ staje się zbliżona do liniowej.



Rys. 9

4. Wpływ średniej średnicy kropeł na prawdopodobieństwo zapłonu jest następujący:

- zmniejszenie średniej średnicy kropeł d_s powoduje przesunięcie dolnej granicy możliwości zapłonu ($0 < p \leq 1$) w kierunku uboższych mieszanek,
- dla małych średnich średnic kropeł ($d_s \approx 30 \div 40$) najmniejsza wartość energii iskry, przy której zapłon jest jeszcze możliwy ($0 < p \leq 1$), jest niższa niż przy większych średnicach.

5. Zależność prawdopodobieństwa zapłonu od udziału paliwa w fazie gazowej jest następująca:

- prawdopodobieństwo zapłonu zależy w przybliżeniu liniowo od udziału propanu w fazie gazowej w przedziale α_{prop}

- podanym na wykresie (rys. 9), natomiast nie zależy od poziomu energii iskry,
- dla małych udziałów paliwa w fazie gazowej ($\alpha_{prop} \geq 10$) nie zaobserwowano jego wpływu na prawdopodobieństwo ani na energię zapłonu,
 - energia iskry nie wpływa na wartość prawdopodobieństwa zapłonu przy $\alpha_{prop} = \text{const}$ w zakresie α_{prop} podanym na rys. 9.

Obecność paliwa w fazie gazowej obok paliwa w fazie ciekłej dla mieszanek ubogich powoduje pewną zmianę rozwoju zapłonu od iskry na strumień mieszanki, polegającą na rozprzeszczeniu się płomienia w kierunku poprzecznym, aż do granicy swobodnego strumienia (nagły rozbłysk).

Bibliografia

1. Kowalewicz A.: Zapłon iskrowy mieszanek palnych. Prace Instytutu Lotnictwa nr 27, 1966.
2. Kowalewicz A.: Badanie zapłonu komory turbinowego silnika odrzutowego. Sprawozdanie I Lot nr Arch. DS: 1.15.14.4, 1962.
3. Kowalewicz A.: Some results of investigation of spark ignition of two-phase mixtures. Archiwum Budowy Maszyn, t. XIV, z. 4, 1967.
4. Kowalewicz A.: Experimental investigation of the probability of spark ignition of fuel droplet suspension in air stream. Archiwum Budowy Maszyn, t. XV, z. 1, 1968.
5. Kowalewicz A.: The probabilistic theory of spark ignition of a fuel droplet suspension in air stream; VIII International Symp. on Fluid Dynamic, Tarda, 1967.
6. Kowalewicz A.: O mechanizmie zapłonu iskrowego kropeł paliwa rozpylonych w powietrzu; Archiwum Budowy Maszyn 4, 1968.
7. Lewis B., Elbe G.: Combustion, flames and explosion of gases. Academic Press Inc. New York 1951.

8. Burgoyne J.H., Cohn L.: The effect of drop size on flame propagation in liquid aerosols. Proc. Roy. Soc. A225, 357-392. 1954.
9. Tichomirow W.G.: Eksperymentalnoje issledowanje gorenija... Trudy A.N. SSSR, 283, 1956.
10. Gołowina E.S.: Gorenje w turbulentnom potokie; Izd. A.N. SSSR, Moskwa 1956.
11. Bachman N.N., Bielajew A.F.: Gorenje heterogennych kondensirowannyh sistem, Izd. Nauka, Moskwa 1967.
12. Mizutani Y., Ogasawara M.: Laminar flame propagation in liquid fuel; Intern. Journ. of Heat and Mass Transfer. Vol. 8, nr 6, 921-935. 1965.
13. Sprawozdanie Instytutu Elektrotechniki nr 94 z XI.1965.
14. May K.R.: The Measurement of airborne droplets by the magnesium oxide method. J.Sci. Instrum., 25, nr 5, 128-130. 1950.
15. Kowalewicz A.: Wpływ parametrów mieszanki dwufazowej na energię zapłonu. Sprawozdanie ILOT, nr arch. DS 8.5.17.