

BIULETYN INFORMACYJNY

INSTYTUTU TECHNIKI CIEPLNEJ

POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

WARSZAWA

TEL. 21007 w. 1232 i 1248

NOWOWIEJSKA 25

Nr 23/K.S.S.P. i L. 6

sierpień 1969

Dr inż. Janusz Czesław Wiśniewski
Katedra Silników Spalinowych Przemysłowych i Lotniczych
Politechniki Warszawskiej

TERMODYNAMICZNA METODA OBLICZANIA OBJĘTOŚCI KOMORY SPALANIA
SILNIKA RAKIETOWEGO *)
ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

7. Stoisko doświadczalne

Stoisko doświadczalne (rys. 1) **) było wyposażone w mikroskop ogrzewczy (fot. 1) Leitza z rejestracją fotograficzną i transformatorami regulacyjnymi (1), butle ze sprężonym azotem (2), tlenem, powietrzem, uzbrojone w zawory redukcyjne (3) i manometry (4), gazomierz laboratoryjny, kamerę filmową AK 16, wagę miligramową pierwszej klasy dokładności z kompletem odważników, dwa chronometry (5), dwa termometry rtęciowe, barometr, włókno kwarcowe, drut miedziany, silikonowy, chromoniklowy, płytki ceramiczne i drobne narzędzia pomocnicze. Mikroskop ogrzewczy Leitza składa się (rys. 2) **) z prowadnicy pryzmatycznej

*) Praca obejmuje wybrane problemy teoretyczne (nr 22 B.I. ITC), analizę wyników badań i wnioski z całości pracy, obejmującej 285 stron maszynopisu oraz liczne wykresy i fotografie.

**) Rys. 1, 2 znajdują się na 23 str. Biuletynu.

(1), pieca (2), tubusu mikroskopu z obiektywem (3), aparatu fotograficznego Leica (4), lampy (5), przyrządu do wzorcowania (6) i odczytywania temperatur mierzonych termoparą (9). Czynniki gazowy może wpływać (7) i wypływać (8) z pieca (2) po ogrzaniu kropli. Siatka kontrolna okularu tubusa umożliwia odczytywanie wymiarów fotograficznych obrazów przy pięciokrotnym powiększeniu. Odczyt temperatury umożliwia miliwoltomierz ($^{\circ}\text{C}$) o klasie dokładności 0,5, wyrobu Hardtmána i Brauna. Dokładność frekwencji klatek kamery filmowej, użytej do mierzenia czasu, była 5%. Gazomierz laboratoryjny umożliwia odczytywanie objętości i natężenia przepływającego gazu z dokładnością $\pm 1\%$. Czasy parowania w niskich temperaturach określano przy użyciu 2 chronometrów (10) UMF o skali minutowej, sekundowej i setnej z dokładnością odczytu 0,1 s. Do ważenia kropli służyła waga 1 klasy dokładności, wyrobu ZMP, o wskazaniach optycznych do 0,01 mg. Krople cieczy: wody, alkoholu, nafty (PN 58/C-96037), oleju opałowego nr 3, benzyny (PN-66/C-96025), mazutu 12 (GOST 1585-63), były owiewane przez azot, powietrze, tlen, w komorze pieca uprzednio stabilizowanego. Gaz ogrzewał się od ceramicznej rurki (11) komory pieca przez opływanie jej ścianek oraz przejmowanie jej ciepła promieniowania. Płytki ceramiczne (12), na których zawieszano kroplę, były stabilizowane (temperatura i wilgotność). Nadmiar masy, potrzebny na pokrycie tej części kropli, która parowała podczas przenoszenia jej do pieca, był wyskalowany przez badanie parowania kropli na wolnym powietrzu w temperaturze 20°C i uwzględniany przy ważeniu kropli dla alkoholu i benzyny. Inne ciecze zbyt wolno parowały i nie zachodziła potrzeba uwzględniania nadmiaru masy. Zawieszenie kuliste kropli było podstawowe.

8. Analiza wyników badań

W temperaturach strumieni beztlenowych lub powietrza, bliskich temperaturze wrzenia cieczy, znaczne ilości masy kropli oleju i mazutu ulegają zwęgleniu, tworząc porowatą substancję o powiększonej objętości i różnych kształtach (rys. 3)*). Wzrost

*). Rys. 3 znajduje się na 23 str. Biuletynu.

temperatury powoduje, prawie że liniowe, malenie masy porowatej (olej - 25% dla 365°C i 1% przy 650°C; mazut - 21% dla 430°C i 1% przy 750°C). Gęstość tej substancji jest 15 do 20 razy mniejsza niż kropli, a czas jej sublimacji przeciętnie 25 razy dłuższy od czasu parowania. Grubsze warstwy tej substancji wykazują tendencję do gwałtownego rozpadu pod postacią sadzy. Istnieje niebezpieczeństwo wybuchów w przestrzeniach, umożliwiających osadzanie się substancji, np. w urządzeniach kotłowych (rys. 4) *). Podczas wrzenia kropeł węglowodorowych występowała sadza, towarzysząca pękaniu pęcherzy parowych kropli, a także rozrywanie otoczki przez pary. Zmiana prędkości strumienia gazu nie wpływała w sposób widoczny na zmniejszenie ilości powstającej sadzy. Łączna ilość węgla, występująca pod postacią sadzy i substancji suchej, była wyższa dla nafty i mazutu niż dla benzyny. Obserwowano krakowanie węglowodorów podczas parowania kropeł, zmianę lokalnej gęstości, drgania oraz falowanie powierzchni kropli. Wewnątrz kropli, na różnej głębokości, powstawały liczne ośrodki wrzenia, otoczone (rys. 4) warstwami cieczy. Na powierzchni kropli tworzyły się małe i wielkie pęcherze, które rosły do granic wytrzymałości ich błonki, a następnie pękały. Powierzchnia kropli zapadała się, aby w chwilę później znów podnieść się. Powstawał ustawicznie zmienny układ prądów dyfundujących: tlenu, produktów krakowania, spalania, par cieczy, które wzajemnie na siebie oddziaływały. Temperatura kropli ustawicznie rosła aż do stanu wrzenia, kropla puchła, zwiększając wielokrotnie objętość (olej, mazut). Wielka częstotliwość zmian napięć powierzchniowych, przy dużych gradientach temperaturowych na powierzchni ścianki, duża prędkość parowania, duża względna prędkość opływu kropli oraz drgania akustyczne, przy wirowym ruchu we wnętrzu kropli, prowadzą do jej rozpadu na mikrokropelki. Im większa masa kropli, tym niższa temperatura rozpadu kropli nawet przy nieco zmniejszonej prędkości strugi gazu omywającego kroplę. Można wyznaczyć wyraźne przedziały temperatur strugi w funkcji masy kropli, w których następuje ich rozpad. Na ogół rozpad ten poprzedza stan wrzenia. Objętość kropeł oleju wzrasta 6-

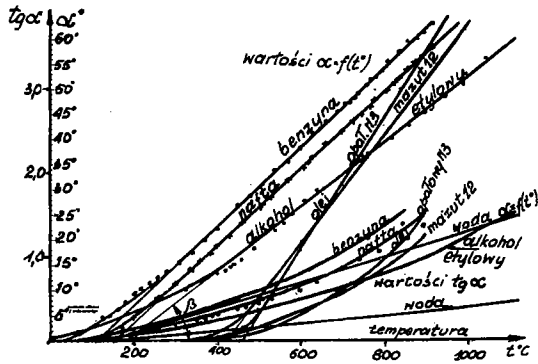
*) Rys. 4 znajduje się na 23 str. Biuletynu.

-krotnie przy 470°C , a mazutu 3-krotnie przy 380°C . Dalsze zwiększanie temperatury strumienia powoduje spadek objętości kropli oleju i wzrost prawie do 6-krotnej wartości początkowej dla mazutu przy 520 do 530°C . W strumieniu swobodnym maleją krople benzyn, spirytusu, maleje również ich wzajemna odległość oraz ich przyspieszenie; objętość kropel oleju i mazutu wzrasta w strumieniu, zmniejszając wzajemne odległości do wymiarów, w których obszary dyfuzji tlenu wokół każdej kropli zachodzą na siebie, co powoduje powstawanie produktów niepełnego utleniania w przypadku zapłonu par paliwa. Spalenie takiej mieszanki wymaga dłuższej drogi jej w komorze, a gdy jest ona zbyt krótka obserwujemy dopalanie się mieszanki za dyszą. W badanych kroplach powstawał intensywny ruch wirowy, rosnący przy powiększaniu temperatury strumienia. Powstanie ośrodków wrzenia wywołuje zmniejszenie się prędkości wirowania cieczy aż do całkowitego uspokojenia się, najczęściej po wahadłowym ruchu mas wokół środka kropli. W chwilę potem następuje ogólne wrzenie cieczy. W kroplach oleju występowało wyraźne przemieszczanie się pojedynczych ośrodków wrzenia pod wpływem ruchu wirowego (rys. 5) *). W kroplach nafty intensywny ruch wirowy towarzyszył kołowo przemieszczającemu się ośrodkowi wrzenia, do którego wpływała ciecz z obszarów granicznych, dając wyraźne smugi kołowe (rys. 5). W kroplach spirytusu, benzyny i wody tworzące się pęcherzyki na druciku zawieszenia kropli były porywane przez wirującą ciecz i podążały ku centrum kropli. Wprowadzenie zanieczyszczeń oraz cienkich nici do wnętrza kropli wody wykazało istnienie intensywnego ruchu wirowego w czasie parowania kropli. Badania kropel wody w wysokich temperaturach strumienia potwierdziły hipotezę, że podobnie do kropel węglowodorowych ulegają one ogólnemu stanowi wrzenia i rozpadają się. Procesy parowania kropel węglowodorowych i wody wykazały liniową zależność kąta pochylenia prostych, przedstawiających masową prędkość parowania $w^+ = f(m_k)$ od temperatury strumienia $t^{\circ}\text{C}$ gazu, krople omywających, wyższej od temperatury wrzenia cieczy przeciętnie o 100°C (dla mazutu) do 200°C (dla benzyny). Przy mniejszych temperaturach nie ma zależności linio-

*) Rys. 5 znajduje się na 23 str. Biuletynu.

wej dla żadnej z badanych cieczy węglowodorowych. Jednakże dla wody, alkoholu, benzyny i nafty można przeprowadzić proste, których wartości będą

bardzo zbliżone do otrzymanych w doświadczeniach. Proste $\alpha = f(t^0)$ wskazują, że prędkość narastania kąta α jest stała w pewnym przedziale temperatur strumienia i inna dla każdego paliwa, a kąt β pochylenia tych prostych charakteryzuje przyrost masowej prędkości parowania ze wzrostem temperatury strumienia. Największy kąt β ma prosta oleju opał., zaś najmniejszy - woda (rys. 6). Możemy napisać



Rys. 6

Możemy napisać

$$\alpha^{\circ} = U_{\beta} (\Delta t^0), \quad (1)$$

gdzie: $U_{\beta} = \varphi \operatorname{tg} \beta = \text{const}$;

$\operatorname{tg} \beta$ - parametr charakterystyczny,

φ - zamiennik skali wykresu; $\Delta t^0 = t^0 - t'_0$,

t^0 - temperatura bieżąca;

t'_0 lub t''_0 temperatura wyznaczona na osi temperatur przez proste $\alpha^{\circ} = f(t^0)$.

Dla alkoholu, benzyny, nafty oraz wody otrzymaliśmy dwie liniowe zależności - jedną (") dla temperatur strumienia bliskich temperaturze wrzenia cieczy badanych, drugą - dla zakresu temperatur wyższych co najmniej o 100°C od tej temperatury (') (tabela 1).

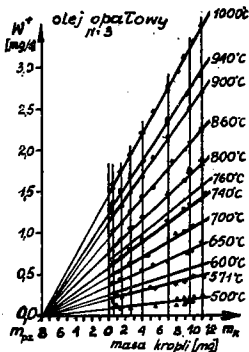
Masowa prędkość parowania kropeł oleju (rys. 7), mazutu (rys. 8), nafty (rys. 9), benzyny, alkoholu etylowego i wody wykazuje zależność liniową w funkcji badanej masy kropli dla określonej temperatury strumienia gazu, kroplę omywającego, którą wyrazimy

$$w^+ = 0,1(m_k + m_{pz}) \operatorname{tg} \alpha = 0,1(m_k + m_{pz}) \cdot \operatorname{tg} [U_{\beta} (\Delta t^0)] \quad [\text{mg/s}], \quad (2)$$

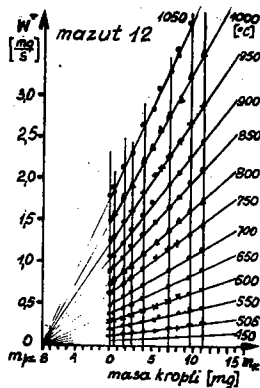
gdzie: m_k - masa kropli,
 m_{pz} - masa pozorną.

Tabela 1

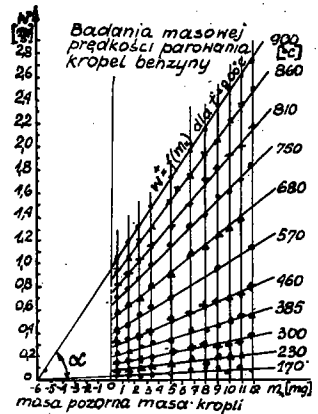
Nazwa	t'_0	$tg \beta'$	U'_β	t''_0	$tg \beta''$	U''_β	Uwagi
Olej nr 3 opałowy	458	$t > 496$ 1,55844	0,12917	-	-	-	jedna zależność
Mazut 12	420	$t > 480$ 1,290324	0,107527	-	-	-	jedna zależność
Nafta	152	0,91254	0,76045	120	$0,723$ $t''_0 < t < 300$	0,06025	dwie zależności
Benzyna	110	0,94116	0,07843	50	$0,72$ $t''_0 < t < 300$	0,060	dwie zależności
Alkohol etylowy	180	$t > 390$ 0,761904	0,063492	40	$0,3363$ $t''_0 < t < 300$	0,040356	dwie zależności
Woda	134	$t > 360$ 0,301512	0,025126	50	$t''_0 < t < 360$ 0,1690	0,014084	dwie zależności



Rys. 7



Rys. 8



Rys. 9

Dla wybranego zakresu temperatur i przyjętej zależności liniowej z tabeli 1 należy w (2) stosować U' lub U'' , a m_{pz} z tabeli 2.

Tabela 2

Nazwa ciecchy	Olej opałowy	Mazut 12	Nafta	Benzyna	Alkohol	Woda
m_{pz}	8,0	6,0	6,3	8,0	7,5	9,5

Ponieważ krzywe $w^+ = f(m_k)$ powstały z podzielenia masy odparowanej kropli przez czas jej życia, odczyty dają wartości średnie w^+ masowej prędkości parowania. Dla określonej masy kropli czas życia jest

$$t_p = m_k / w^+ = \frac{m_k}{0,1(m_k + m_{pz}) \operatorname{tg}[U_\beta(\Delta t^0)]} = \frac{10}{(1 + \xi) \operatorname{tg} \alpha} \quad [S]. \quad (3)$$

gdzie $m_{pz}/m_k = \xi$.

W rzeczywistych warunkach kropla paruje w zmiennej temperaturze strumienia i wartość $\operatorname{tg} \alpha$ należy wyliczyć przez planimetrywanie pola pod krzywą $\operatorname{tg} \alpha$ i podzielenie go przez odcinek wyrażający na wykresie zakres temperatur strumienia omywającego kroplę, a następnie odczytanie wartości średniej $\operatorname{tg} \alpha$ na skali rys. 6. Tak otrzymane wartości określają czas średni parowania

$$t_{p\text{sr}} = \frac{10}{(1 + \xi) \operatorname{tg}_{\text{sr}} \alpha} \quad [S]. \quad (4)$$

Z (3) można wyliczyć czasy życia kropeł o różnych masach w granicznych stanach temperaturowych strumienia gazów. Wykorzystując (4) otrzymujemy wyrażenie na długość charakterystyczną

$$L^+ = \frac{23,36 (RT_1)^{1/2}}{(1 + \xi) \operatorname{tg}_{\text{sr}} \alpha}. \quad (5)$$

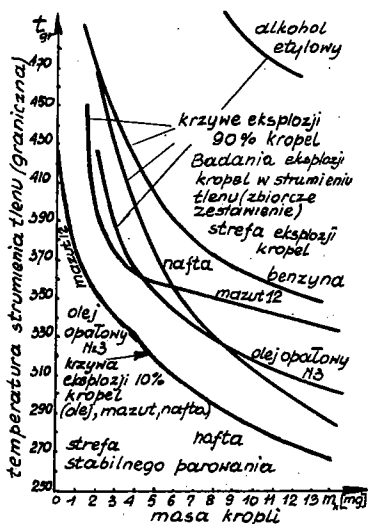
Obierając przedział temperatur strumienia, nawet wkraczający w obszar samozapłonó par, otrzymamy wartość średnią $\operatorname{tg} \alpha$, a znając dla badanego paliwa R, T_1 , $\operatorname{tg} \beta$ możemy w tej metodzie uważać długość charakterystyczną L^+ za funkcję jednej niewiadomej, jaką jest stosunek pozornej masy paliwa do masy

kropki reprezentatywnej, tj. charakteryzującej strumień w korce, czyli zależności

$$L^+ = U_{gr} f \left(\frac{1}{1 + \xi} \right), \quad (6)$$

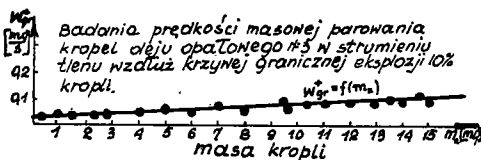
gdzie U_{gr} - stała uzyskana przez włączenie $\text{tg} \beta$; T_1 ; R ; 23,36; $\text{tg} \beta_{gr} \alpha$.

W zależności od potrzeb możemy wykonać wykresy L^+ w zależności od mas kropli dla różnych paliw i porównując wybrać najlepsze.

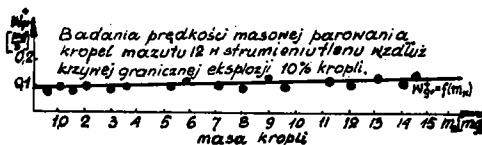


Rys. 10

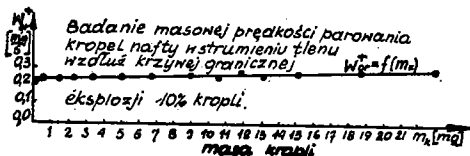
Podkreślamy, że rys. 6. nie zależy od mas kropli, lecz tylko od właściwości cieczy i temperatury strumienia omywającego kroplę. Sporządzony wykres zbiorczy wyników badań eksplozji kropli (rys. 10) węglowodorowych wskazuje, że należy jej spodziewać się na początku komory spalania, kiedy krople są największe, przy niskich temperaturach strumienia tlenu, przyspieszającego proces parowania kropli węglowodorowych na skutek spalania w samej cieczy kropli i szybkiego wzrostu jej temperatury. Prawie 6-krotny wzrost masowej prędkości parowania powoduje zmniejszenie L^+ . Na rys. 11, 12, 13,



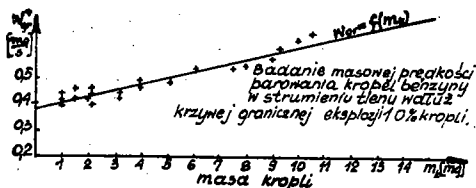
Rys. 11



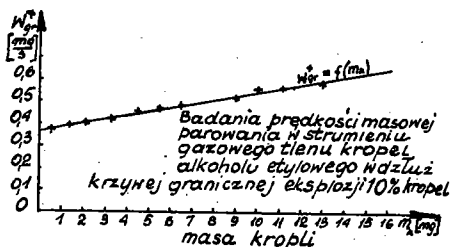
Rys. 12



Rys. 13



Rys. 14



Rys. 15

14, 15 mamy naniesione wyniki badań granicznych masowych prędkości parowania w funkcji masy kropli badanej, które wskazują na liniową zależność tej prędkości od masy kropli. Proste tych zależności odcinają na osi w^+ masowe prędkości graniczne "zerowe" odpowiadające masom nieskończenie bliskim zeru. Można więc napisać

$$w_{gr}^+ = w_{gro}^+ + a m_k \quad [\text{mg/s}], \quad (7)$$

gdzie: w_{gro}^+ - graniczna masowa prędkość parowania zerowa,
 a - współczynnik kierunkowy prostych tej zależności po uwzględnieniu skali wykresu (tabela 3).

Z tabeli 3 wynika, że alkohol etylowy jest najbezpieczniej-
 szym paliwem i jego graniczna masowa prędkość parowania jest
 7-krotnie wyższa niż dla oleju i 4,46-krotnie niż dla mazutu.

Tabela 3

Ciecz	Olej opał.	Mazut 12	Nafta	Benzyna	Alkohol etylowy
a	0,0509	0,0024	0,003234	0,0231	0,0180
w_{gro}^+	0,0165	0,0807	0,23875	0,372	0,36
w_{gr}^+ ($d_k = 0,2$)	0,0511	0,08078	0,23876	0,37201	0,3601
najniższa temperatura graniczna strumienia dla $d_k = 0,2$ mm [°C]	410	420	430	520	650

Benzyna wprawdzie ma jeszcze wyższą w_{gr}^+ , lecz znacznie niższą graniczną temperaturę strumienia, w której zachodzi 10% udział kropeł eksplodujących. Związek między temperaturą graniczną t_{gr} strumienia tlenu a masą graniczną (m_{gr}) eksplodującą w tym strumieniu można przedstawić w postaci następującej

$$(m_{gr} + m_{pz}) = U_5 T_s^{A'/t_{gr}} \text{ [mg]}, \quad (8)$$

gdzie: U_5 i A' stałe,

T_s - temperatura spalania,

$m_{pz} = 7,16$ jest średnią arytmetyczną mas pozornych paliw badanych,

$A' \text{ [1/deg]} = 3 R_z$ (R_z - średnia arytmetyczna zastępczych stałych gazowych spalin paliw badanych),

$T_s = 3163 \text{ [°K]}$ jest średnią arytmetyczną temperatur spalania paliw badanych w gazowym tlenie przy $p = 20$ ata,

$U_5 = 1,0 \text{ [mg/deg]}$.

Dolna krzywa graniczna 10% eksplozji kropeł badanych, przedstawiona na rys. 14 spełnia równanie

$$(m_{gr} + 7,16) = 3163^{100/t_{gr}} \text{ [mg]}. \quad (9)$$

Należy stosować taki układ wtryskiwaczy, aby w strefie temperatur granicznych t_{gr}^0 nie występowały graniczne masy kropeł m_{gr} . Zestawienie wyników badań z rys. 11-15 w bezwymiaro-

wych wielkościach wskazuje, że w miarę zwiększania bezwymiarowej masy ξ kropeł (rys. 16) oleju następuje znaczne zwiększenie granicznej bezwymiarowej masowej prędkości parowania ψ , czego nie obserwujemy u mazutu, nafty, benzyny i alkoholu etylowego. Zależność ψ od ξ ma postać

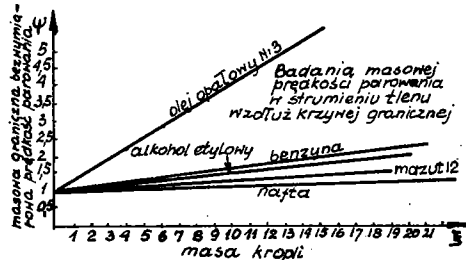
$$\psi = 1 + U_6 \xi, \quad (10)$$

gdzie: $\psi = w_{gr}^+ / w_{gro}^+$,
 U_6 - stała.

Tabela 4

Ciecz	Olej opał.nr 3	Mazut 12	Nafta	Benzyna	Alkohol etyl.
U_6	0,3	0,029411	0,013158	0,0625	0,051272

Wyliczając z (8) m_{gr} dla temperatury strumienia tlenu w strefie formowania się kropeł w komorze po wtrysku (t_{gr}^+) znajdujemy z (7) w_{gr}^+ i dzieląc m_{gr} na w_{gr}^+ otrzymujemy graniczny czas t_{pgr} parowania. Dane te można, dla paliw węglowodorowych, znaleźć z wykresów przytoczonych w tej pracy lub otrzymanych z badań nowego paliwa, na aparacie Leitza. Stąd długość charakterystyczna powinna być większa od granicznej długości charakterystycznej komory, zawierającej τ_{pgr} , czyli musi być spełniona zależność



Rys. 16

$$L^+ > L_{gr}^+ = 2,336 (RT_1)^{1/2} \cdot t_{pgr}. \quad (11)$$

Wyniki badań temperatury eksplozji wskazują, że przekracza 1700°C, natomiast prędkość przemieszczania się mas po przejściu fali eksplozji jest mała. Obserwacja wizualna parujących kropeł oleju i mazutu wykazała występowanie podobnych zjawisk w szerokim zakresie temperatur strumienia dla obydwu cieczy.

Kropłe początkowo zwiększają objętość pod wpływem ciepła a następnie objętość ich osiąga minimum. W kropli istnieje ruch wirowy cieczy, który wywołuje przemieszczanie się powstających ośrodków wrzenia, koloru jasnożółtego. W ośrodkach tych, co pewien czas powstają fale, skierowane wypukłością w kierunku ich ruchu od jednej krawędzi, otaczającej ośrodek, ku drugiej. Najwyraźniej masa z dolnej krawędzi wpływa do ośrodka wrzenia, a odrywające się pęcherzyki z tych krawędzi wędrują ku środkowej jego części, gdzie zanikają. Pojawia się coraz więcej nowych ośrodków wrzenia, symetrycznie na ogół rozmieszczonych wokół środka kropli. Z tą chwilą ruch wirowy cieczy maleje i stopniowo przechodzi w ruch wahadłowy, tak jakby siły wywołujące ten ruch miały charakter przemienny. Wreszcie ustaje. Kropla osiąga minimum objętości przy wygasających ośrodkach wrzenia, które albo giną zupełnie i kropla staje się nieprzejrzystą falującą masą, podobną do gotującej się lawy lub pozostaje jeden centralny mały punkcik w przypadku kropel oleju. Od tej chwili kropla puchnie. Wrzenie obejmuje całą masę kropli, poczynając od jej górnej części. Liczne ośrodki wrzenia są otoczone cienkimi warstwami cieczy, a powierzchnia kropli okrywa się pęcherzami, które rosną, pękają i na nowo powstają. Z powierzchni kropli sypie się sadza, zdmuchiwana przez strumień; jest jej coraz więcej w miarę jak wciąż rosnąca objętość kropli pokrywa się olbrzymimi pęcherzami; masa kropli wciąż maleje. Gwałtownemu falowaniu powierzchni kropli towarzyszy zmiana jej barwy. Początkowo ciemna kropla oleju i prawie czarna barwa kropli mazutu zmienia się na brunatną z jasnymi plamami żółtymi i przezroczystymi pęcherzami przechodząc w barwę brązową i jasnobrązową. Kropla osiąga objętość maksymalną. Sadza nadal sypie się obficie. Jest jej znacznie więcej przy parowaniu kropel mazutu niż oleju, co utrudnia obserwację. W miarę postępującego procesu parowania znikają jedne po drugich żółte plamy, kropla ciemnieje, przybiera barwę czerwono-brunatną, a na jej powierzchni tworzy się czarna warstwa struktury węglowej, otaczająca resztę cieczy. Warstwa ta ulega rozsadzeniu przez pary cieczy, powstaje dużo sadzy a widoczność kropli prawie zupełnie ustaje. Gdy strumień usunie sadzę, widzimy gąbczastą strukturę węglową, zawierającą w jej prze-

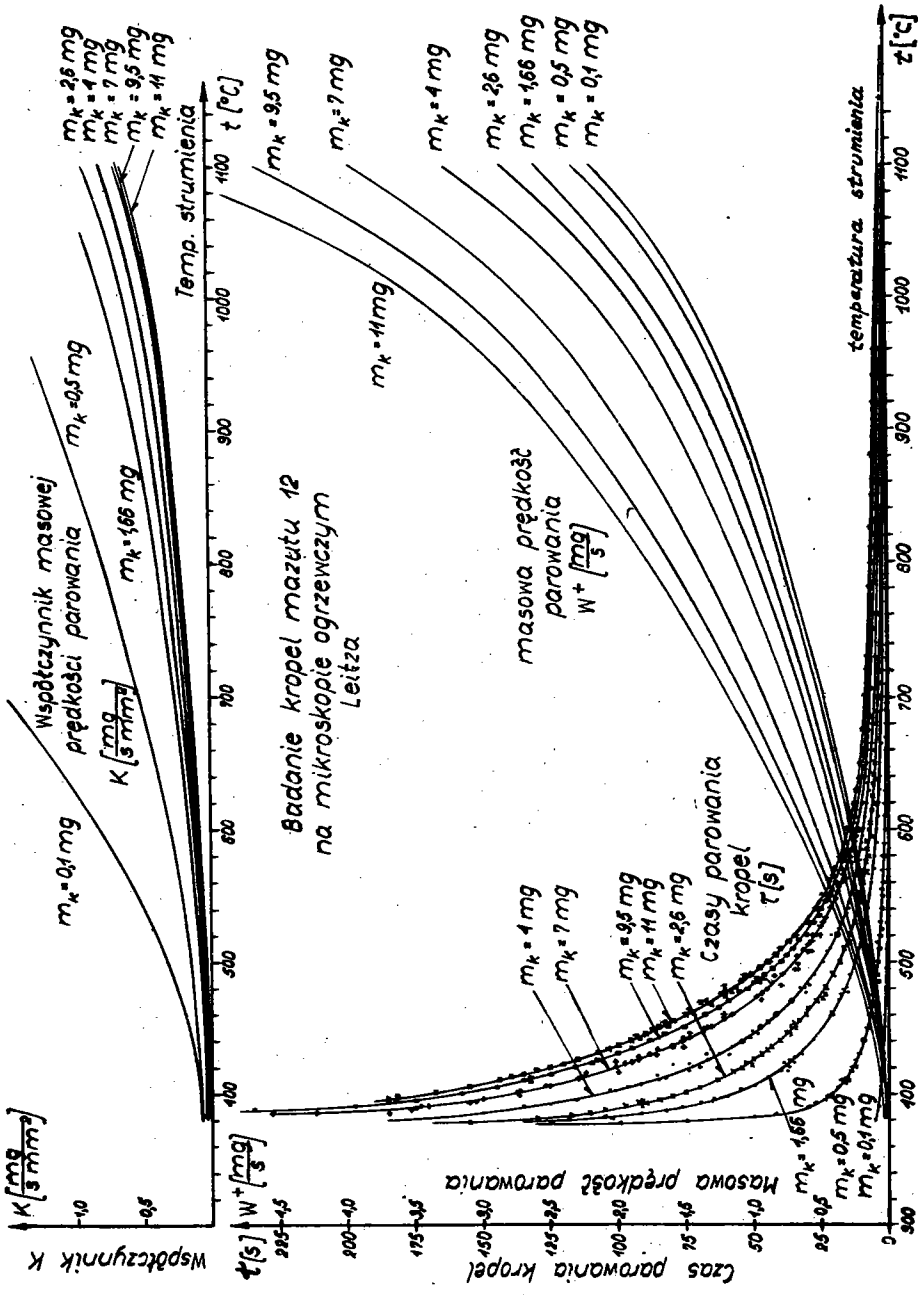
strzeniach wrzące resztki ciężkich węglowodorów, które szybko wyparowują. Temperatura początkowa cieczy badanych była 18°C , wrzenia mazutu $+430^{\circ}\text{C}$, oleju $+475^{\circ}\text{C}$. Okres zwiększonej objętości kropli w fazie parowania był siedmiokrotnie dłuższy niż okres jej malenia dla 440°C - 470°C . Ten stosunek malał w temperaturach wyższych. Przy 900 do 950°C powietrza krople mazutu i oleju płonęły i rozpadały się. Obserwacja wizualna parowania kropel benzyny i nafty w strumieniu gorącego powietrza i azotu wykazała, że przebieg zjawisk jest dla obydwu cieczy prawie jednakowy i następujący: kropla cieczy zawieszona posiada centralny punkt świetlny, który po pewnym czasie ogrzewania kropli przez strumień gazu rozszerza się w wąską plamę świetlną, wędrującą po kropli podobnie jak to robi światło latarni morskiej. Jej ośrodkiem obrotu jest środek kropli (rys. 17) ^{*)}. Ruch wirowy narasta w cieczy wraz z rosnącą jej temperaturą, porywa pęcherzyki, tworzące się przy druciku zawieszenia kropli, które wędrują ku środkowi kropli, gdzie zanikają. W końcowym etapie ruchu plama świetlna zatrzymuje się w górnej części kropli i stopniowo rozszerza się obejmując większą część jej powierzchni, w końcu prawie całą (rys. 18) ^{*)}. Ciecz jest w stanie pęcherzyków. Widać najmniejsze zanieczyszczenia. Następnie kropla ciemnieje tak, iż pozostaje jeden centralny punkt świetlny. Z tego punktu wychodzi fala, przemieszczająca się promieniowo ku drucikowi. Wirująca ciecz zagarnia z ciemnymi zimniejszych obszarów ciecz do jasnożółtego obszaru ośrodka wrzenia. W pewnej chwili ta fala osiąga drucik zawieszenia i powstała z resztek cieczy kropli bardzo cienka przejrzysta błona, rozpięta na druciku, pęka. Resztki cieczy spływają w dół zawieszenia kropli. Proces parowania zakończony. W temperaturach 500°C (rys. 18) kropla nafty była prawie całkowicie przezroczysta. Podczas przemieszczania się promieniowego fali ośrodka wrzenia towarzyszyło intensywne wydzielanie się par nafty, zaciemniających obraz i utrudniających zdjęcia. Niektóre krople zapalały się. Powyżej 600°C w kropli powstawały liczne ośrodki wrzenia prawie jednocześnie. W ośrodkach tych (rys. 19) ^{*)}, podobnie jak w mazucie i oleju, przebiegały

^{*)} Rys. 17, 18, 19 znajdują się na 23 str. Biuletynu.

co pewien okres fale ugięte na brzegach; krople o masach 9-11 mg rozpadały się, inne wrzały w całej masie, zwłaszcza przy $t = 800^{\circ}\text{C}$ dla nafty i 575°C dla benzyny strumienia powietrza, krople omywającego. Powyżej 900°C krople benzyny i nafty eksplodowały w powietrzu, a w azocie rozpadały się wybuchowo. W temperaturze 380°C strumienia powietrza powstaje z kropel benzyny mgła mikrokropelek w postaci białego dymu, który odbijał światło lampy mikroskopu. Powyżej 525°C kolor dymu był szary. Zjawiska świetlne, obserwowane w azocie i powietrzu, powtarzały się w niskich temperaturach strumienia tlenu, bez względu na rodzaj zawieszenia kropli (na kulce lub pętli kołowej). We wszystkich gazach krople benzyny, alkoholu, wody wykazywały ciągle zmniejszanie się ich objętości podczas parowania. Krople nafty podczas wrzenia zwiększały swoją objętość.

W kroplach alkoholu etylowego występują opisane dla benzyny zjawiska świetlne w niższych temperaturach zarówno w azocie, powietrzu jak i tlenie, a ich rozpad rozpoczyna się już w 470°C , często pod koniec okresu odparowania; okres indukcji szybko maleje ze wzrostem temperatury. Część masy kropli po jej rozpadzie pozostawała na druciku i wrzała. Krople wody wrzały i pękały powyżej 730°C , wirowanie cieczy było doskonale widoczne. Krzywe czasów parowania badanych cieczy gwałtownie rosną dla temperatur strumieni mniejszych od podwojonej ich temperatury wrzenia. Krzywe te dla oleju i mazutu (rys. 20) są prawie jednakowe, a dla benzyny i wody są łagodniejsze niż dla oleju i mazutu.

Krzywe masowej prędkości parowania w funkcji temperatury strumienia niewiele różnią się od linii prostych dla wszystkich cieczy badanych aż do 950°C . Ich różnica w wartości dla kropelek 600 do 60 mikronów nie przekrocza 3% w dość szerokim zakresie temperatur strumienia (380° - 1100°C dla oleju, 100° - 1100°C dla wody, 100° - 1000°C dla benzyny, 380° - 1100°C dla mazutu, 75° - 1100°C dla nafty). Praktycznie umożliwia to stosowanie jednej masowej prędkości parowania, uśrednionej dla zakresu tych średnic, dla każdego paliwa innej, bez obawy o poczynienie dużych błędów w obliczeniach. Krzywe współczynnika masowej prędkości parowania $K = f(t^{\circ})$ przedstawiają o 27% zwiększone masowe natężenie parowania, odniesione do jednostki po-

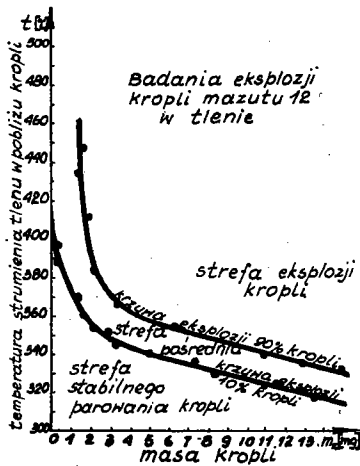


Rys. 2.0

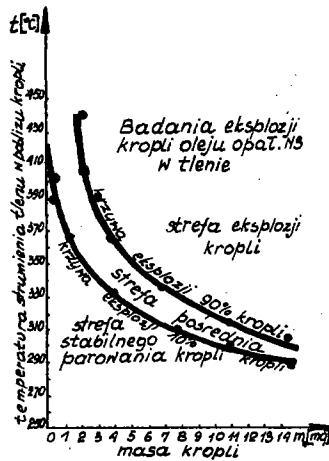
wierzchni kropli, posiadającej wymiary początkowe. Krople duże o masach 6-11 mg mają K dla zakresu temperatur strumienia 190°C do 1000°C różniące się zaledwie o 0,5 do 8%. K dla nafty osiąga wartości wyższe niż dla oleju i mazutu przy $t = 130^{\circ}\text{C}$ do 750°C strumienia. Im wyższa prędkość parowania cieczy, tym wyższe wartości osiąga K dla niskich temperatur strumienia. Krople alkoholu mają K niższe niż krople benzyny w tych samych warunkach. Krople wody dają w^+ i K przeciętnie dwa razy mniejszej wartości niż dla mazutu 12. Wszystkie badane ciecze wykazują szybkie narastanie K dla kropeł o masach poniżej 0,5 mg. Zebrane wartości K dla badanych cieczy obrazują narastanie masy odparowanej w miarę zmniejszania się średnicy kropeł cieczy jednorodnych takich jak: alkohol, woda, benzyna, których ciągłość malenia średnic jest zbadana.

Krople oleju opałowego N3 o masach 11, 9, 6 mg ulegały rozpadowi w strumieniu azotu w miarę narastającej temperatury strumienia począwszy od 800°C (10%) aż do 1250°C (100%). Zmniejszenie mas kropeł wymagało wyższej temperatury rozpadu, np. 0,5 mg - 1050°C. Rozpadowi towarzyszył ogólny stan wrzenia cieczy kropli i słabo słyszalny dźwięk. Zwiększając udział tlenu do 21% uzyskujemy rozpad kropli 11, 9, 8 mg już przy 800°C i znaczne wzmocnienie dźwięku. Część masy pozostawała na druciku i płonęła. Krople o $m_k = 0,5$ mg rozpadały się już w 1000°C, a o $m_k = 7$ mg w 950°C (10%). Przy 1250°C masy kropeł 11, 10, 9 mg eksplodowały w 60%, 45% i 32%. Zawieszenie ulegało zniszczeniu przy błysku światła, huku i dużej ilości prawie czarnego dymu. Termopara rejestrowała znaczny skok temperatury w pobliżu kropli. W czystym tlenie o temperaturach dwukrotnie większych niż graniczne następował gwałtowny wzrost masowej prędkości parowania, a okres indukcji malał do 1% wartości granicznej. Eksplozji zawsze towarzyszyła zmiana barwy kropli, wzrost ciśnienia w komorze i temperatury oraz błysk światła i huk. Natężenie cieplne było tak wielkie, że drucik chromonikielinowy ulegał stopnieniu w ułamku sekundy. W porównaniu z parowaniem w azocie prędkość masowa wzrastała 4-6 razy. Masa przereagowana ulegała promieniowemu rozproszeniu, a w pobliżu powierzchni kropli przed eksplozją obserwowano powstawanie aureoli o jasnozielonkawym kolorze. Kropla oleju 8,02 mg miała

okres indukcji 12,54 s w czystym tlenie o $t^0 = 460^{\circ}\text{C}$ (rys. 21)*). Zwiększenie masy kropli do 10,5 mg i temperatury do 570°C zmniejszyło okres indukcji do 1,96 s (rys. 22)*). Związek między t_{gr}^0 a m_{gr} mamy na rys. 23. Badania mazutu 12 w azocie wykazały 100% rozpad kropeł 11 mg w 1200°C i początek rozpadu kropeł 0,1 mg w 1100°C . Rozpad kropli poprzedzało wrzenie cieczy. W powietrzu krople 1,5, 1, 0,5 mg eksplodowały w 1050° , 1100° , 1150°C przy towarzyszącym zjawisku błysku światła, huk, wzroście ciśnienia i temperatury. W czystym tlenie w⁺ była 6-krotnie większa niż w azocie. Krople 1,66, 0,5 mg eksplodowały w 370° i 389°C , a o masie 2 mg osiągały 90% eksplozji po przekroczeniu 412°C przez strumień tlenu (rys. 24). Kropla o



Rys. 23

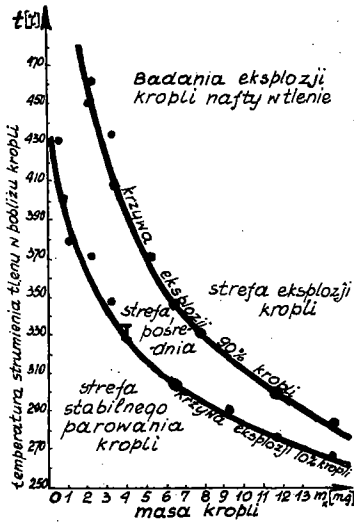


Rys. 24

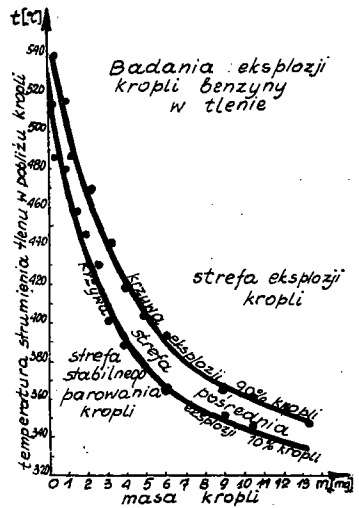
masie 9 mg w strumieniu tlenu $t^0 = 600^{\circ}\text{C}$ eksplodowała po okresie indukcji 1,87 s, zmieniając barwę tuż przed zniknięciem (rys. 25)*). Badania nafty wykazały, że zarówno w azocie, jak i powietrzu rozpad kropeł poprzedzał ogólny stan wrzenia cieczy, który dla kropeł dużych ($m_k > 10$ mg) zaczynał się już przy 780°C w azocie i 700°C w powietrzu. Atmosfera tlenu przyspieszała ponad 6,5-krotnie proces parowania, np. kropla 3,3 mg parowała w azocie o $t^0 = 137^{\circ}\text{C}$ 210 s, a w tlenie 32,4 s w tej

*) Rys. 21, 22, 25 znajdują się na 24 str. Biuletynu.

samej temperaturze. Przy 260°C zaczynał się rozpad kropeł a zawieszenie kropli ulegało zniszczeniu. Wzrost temperatury tlenu do 500°C zmniejszył okres indukcji kropli 9,9 mg do 2,25 s. Początek eksplozji kropeł małych 0,44 mg był w 430°C a 0,06 mg w 460°C. Powyżej 550°C (rys. 26)*) krople małe eksplodowały w 90% (rys. 27). Badania benzyny w czystym gazowym tlenie (rys. 28) wykazały, że przy masach kropeł 0,1 mg począ-



Rys. 27

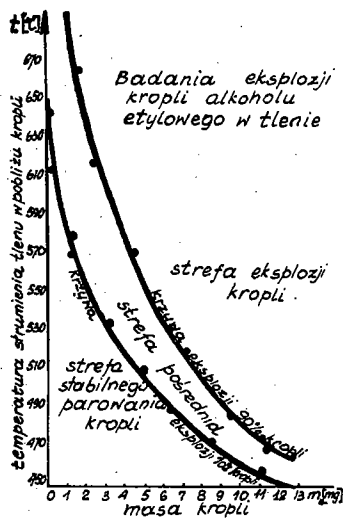


Rys. 28

tek eksplozji był przy 520°C, a rozpad kropeł zarówno w strumieniu azotu jak i powietrza obserwowano w temperaturach od 400 do 500°C. Powstawał strumień mikrokropełek koloru białego. Powyżej 900°C pojawiają się eksplozje kropeł benzyny o $m_k > 10$ mg w strumieniu powietrza. Krople małe (0,5 mg) wymagały jeszcze wyższych temperatur (1100°C). Obecność czystego tlenu przyspieszała proces parowania tylko o 25%, a wzrost temperatury strumienia zmniejszał mniej okres indukcji niż to było przy badaniu mazutu, oleju i nafty, np. kropla (rys. 29)*) 10,6 mg miała go 9,1 s przy 346°C i 3,36 s przy 360°C. Czas rozpadu masy trwał 0,1225 s.

*) Rys. 26, 29 znajdują się na 24 str. Biuletynu.

Badania alkoholu etylowego w strumieniu tlenu (rys. 30) wykazały przyspieszenie procesu parowania zaledwie o 11% i powstawanie połowicznego wybuchu, np. kropla 11,162 mg przy 465°C strumienia po upływie 5,5 s rozpadła się, część jej masy reagowała eksplozyjnie niszcząc zawieszenie. Masa zniknęła po 0,01 s a zawieszenie uległo zniszczeniu po 0,5 s. Fazy stapiania się drucika takiej samej kropli eksplodującej w 600°C widzimy na rys. 31 *) . Dla mas 2,21; 1,4; 0,5; 0,1 mg temperatury początkowe strumienia tlenu, w których występowała ich eksplozja, były następujące: 552°, 580°, 610°, 650°C. Krople 11,162 mg eksplodowały w powietrzu i azocie powyżej 650°C, a ich rozpad na mikrokropelki następował już przy 480°C. Kropla 11,162 mg umieszczona na druciku \varnothing 2,5 mm, owiewana strumieniem powietrza 650°C eksplodowała po powstaniu fali eksplozji w dolnej jej części (rys. 32) *) ; zawieszenie uległo stopieniu po 1 s. Badania wielkości czasu i temperatury eksplozji wykazały, że dla: oleju rozproszenie masy kropli następuje w ciągu 0,04 do 0,29 s, mazutu 12 - około 0,21 s, nafty - od 0,05 do 0,125 s, benzyny - od 0,1225 do 0,207 s, alkoholu etylowego - poniżej 0,04, a temperatura eksplozji przekraczała 2100°K, dla wszystkich badanych paliw.



Rys. 30

9. Wnioski końcowe

1. Dotychczasowe metody obliczania objętości komór spalania są niepraktyczne dla ciężkich paliw węglowodorowych.
2. Proces parowania w czystym gazowym tlenie jest ograniczony przez eksplozję kroleł węglowodorowych.

*) Rys. 31, 32 znajdują się na 24 str. Biuletynu.

3. Wysoka temperatura strumienia omywającego kroplę może wywołać wrzenie i rozpad kropli lecz nie jej eksplozję, do której udział tlenu w ośrodku gazowym jest niezbędny.

4. Współczynnik kierunkowy $tg\beta$ liniowej zależności kąta α pochylenia prostych masowej prędkości parowania w funkcji masy kropli ($w^+ = f(m_k)$) od temperatury strumienia jest charakterystycznym parametrem każdego paliwa węglowodorowego.

5. Istnieje krzywa graniczna eksplozji kropeł węglowodorowych, przedstawiająca zależność masy granicznej kropli do temperatury granicznej strumienia, wyznaczona przez eksplozję kropeł mazutu, oleju, nafty, przy czym większym masom kropeł odpowiadają niższe temperatury.

6. W miejsce kosztownych badań prototypowych szeregu komór zaleca się badanie paliwa raketowego dla uzyskania parametrów charakterystycznych paliwa - masy pozornej, $tg\beta$ oraz masy granicznej, dla założonej temperatury strumienia w pobliżu miejsca formowania się kropeł po wtrysku. Dane te pozwalają na znalezienie średniej masowej prędkości parowania, granicznego czasu parowania i granicznej długości charakterystycznej komory spalania.

7. Długość charakterystyczna komory spalania powinna być większa od granicznej, wyliczonej na podstawie parametrów charakterystycznych paliwa - masy granicznej i pozornej oraz $tg\beta$.

8. Bezwymiarowe masowe graniczne prędkości parowania są funkcjami liniowymi.

9. Alkohol etylowy wykazuje największą graniczną masową prędkość parowania i jest najbezpieczniejszy z paliw badanych.

10. Masowe natężenie parowania, odniesione do początkowej powierzchni kropli o masach 6-11 mg, jest dla badanych paliw i wody prawie jednakowe dla danej cieczy.

11. Istnieją graniczne masowe prędkości parowania kropeł węglowodorowych, po których przekroczeniu krople eksplodują.

12. Masowe prędkości parowania w funkcji temperatury strumienia omywającego kroplę, są prawie liniową zależnością w granicach temperatur wrzenia cieczy i 1000°C , a różnica procentowa tych prędkości dla kropeł od 600 do 60 mikronów nie przekracza 3% i praktycznie można stosować jedną uśrednioną

masową prędkość parowania dla zakresu tych średnic, inną dla każdego paliwa i zmienną co do wartości wraz z temperaturą strumienia, bez obawy o poczynienie dużych błędów w obliczeniach. Ten fakt czyni badania niniejsze użytecznymi dla komór spalania o nawet bardzo małych średnicach kropeł np. 100 mikronów.

13. Pomiedzy fazą stabilnego parowania kropeł węglowodorowych a fazą ich eksplozji często w paliwach lekkich, takich jak alkohol, występuje rozpad wybuchowy kropli.

14. W kroplach oleju opałowego, mazutu, alkoholu etylowego i wody, podczas ich parowania powstaje intensywny ruch wirowy, tym szybszy, im większa jest temperatura strumienia omywającego kroplę.

15. Im większy udział tlenu w strumieniu omywającym kroplę, tym mniejsze ilości węgla wydzielają się z kropeł węglowodorowych podczas ich wrzenia.

16. Temperatury eksplozji badanych kropeł węglowodorowych są wyższe od 1700°C.

Резюме

Термодинамический метод исчисления объема камеры сгорания ракетного двигателя. Результаты исследований и предложения

Представленная работа показывает метод исчисления объема камеры сгорания ракетного двигателя на основании предельной длины характерной камеры, найденной благодаря исследованиям процессов испарения и взрыва капель углеродного топлива в потоке (струе) газового кислорода.

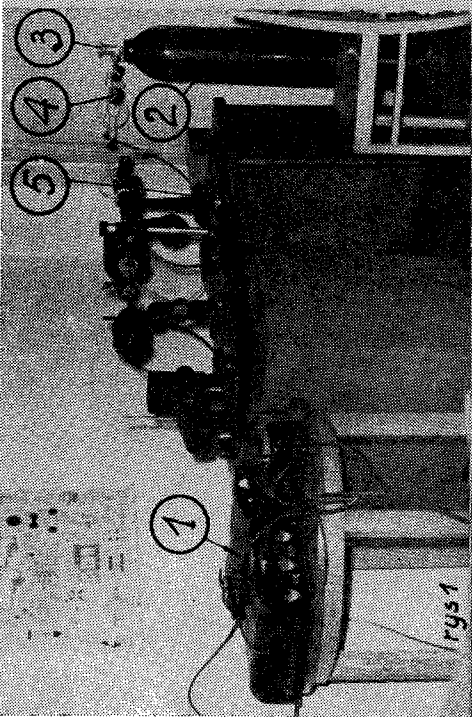
Избранные контрольные параметры были исследованы на станде, которого главную часть составлял нагревательный микроскоп Лейпа. Исследовано капли гарного масла, мазута, керосина (нефти), этилового спирта и воды в потоке воздуха, азота и кислорода. На основании результатов исследования взрывов можно было определить связь между предельной температурой потока кислорода а взрывчатой массой; связь эта позволяет определить для принятых условий предельную массу капли и выбрать правильную систему впрыска.

Summary

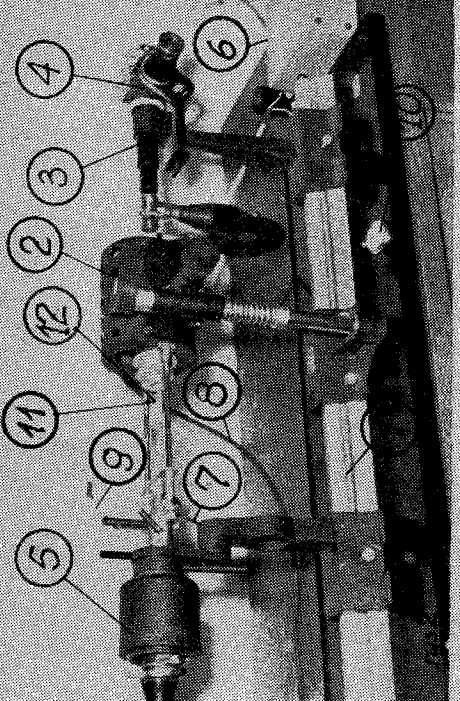
Thermodynamic method of calculation of rocket combustion chamber volume. Experimental results and conclusions

The represented work give a method of the calculation of the volume of rocket combustion chamber on the base of boundary characteristic chamber lenght, discovered through the exploration of the vaporization and explosion process of single drops of hydrocarbon fuel in gaseous oxygen stream.

Selected control parameters were researched on the experimental stand of which the principal part was the heat microscope Leitz. Single drops of furnace oil, mazout, kerosene, benzine, methanol were examined in air, nitrogen and oxygen stream. On the base of experimental results of explosion was established a relation between the boundary temperature of oxygen stream and the explosive mass of the drop for the suppositional conditions in the chamber and to get the correct injection system.



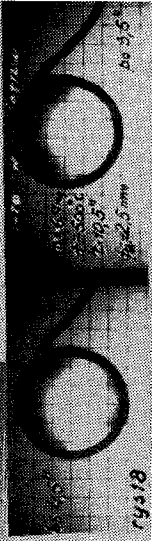
rys 1



rys 2



rys 10



rys 18

21 Olej galony N3 $m_2 = 9,02 \text{ mg}$ $t = 450^\circ\text{C}$

Rus 22 $m_2 = 40,5 \text{ mg}$ temperatura strumienia tlenu 570°C Olej opałowy N3

Rus 25 mazut 12 w strumieniu tlenu $t = 600^\circ\text{C}$ masa kropli $m_2 = 9 \text{ mg}$ okres indukcji 187 s.

Rus 26 nafta w strumieniu tlenu $t = 550^\circ\text{C}$ masa kropli $m_2 = 4,75 \text{ mg}$ okres indukcji 216 s

SS 4

WIELI

WGLA

SIEMER

HEILZ EITEM

329 Benzyna w strumieniu tlenu $t = 450^\circ\text{C}$ masa kropli $m_2 = 10,62 \text{ mg}$ okres indukcji 3 s
 $m_2 = 41,152 \text{ mg}$ temperatura strumienia tlenu 600°C Alkohol etylowy

$m_2 = 41,152 \text{ mg}$ temperatura strumienia tlenu 600°C Alkohol etylowy