

BIULETYN INFORMACYJNY
INSTYTUTU TECHNIKI CIEPLNEJ
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

WARSZAWA

TEL. 21007 w. 1232 i 1248

NOWOWIEJSKA 25

Nr 13/K.S.S.P.1 L. 2

styczeń 1968

Mgr inż. Cezary Bocheński
Katedra Silników Spalinowych, Przemysłowych i Lotniczych

**O PEWNEJ PRZYBLIŻONEJ METODZIE EKSPERYMENTALNEJ
BADANIA WYMIANY CZYNNIKA W SILNIKACH DWUSUWOWYCH**

W przypadkach, kiedy analiza złożonych zjawisk na drodze analitycznej następuje na wiele trudności lub nie da się w ogóle wykonać, posługujemy się metodami eksperymentalnymi. Przy eksperymentowaniu dążyć należy do zachowania podobieństwa zjawiska w modelu i obiekcie rzeczywistym. W dziedzinie silników spalinowych jednym ze zjawisk, które trudno ująć w wystarczająco dokładną formę matematyczną jest wymiana czynnika w cylindrze. Do badania tego procesu stosuje się często układy modelowe, a uzyskane wyniki traktować należy jako wskazówki przy projektowaniu układu rozrządu.

**1. Przegląd niektórych prac badawczych dotyczących
przepłukania cylindra silnika dwusuwowego**

Jedną z pierwszych prac dotyczących przepłukania w cylindrze silnika dwusuwowego przeprowadził w Laboratorium Badawczym firmy General Motors Corporation badacz amerykański W.H.Percival. Badał on charakter przepływu powietrza przez cy-

linder z unieruchomionymi tłokami, umieszczonymi w taki sposób, że kanały rozrządu były całkowicie odsłonięte. Rozkład prędkości powietrza płuczącego w cylindrze zależy od układu i kształtu szczelin pozwala określić najlepsze rozwiązanie systemu rozrządu. Przy pewnym ustawieniu szczelin stwierdził Percilval istnienie w cylindrze przepływu ujemnego, który formuje się w osi cylindra lub wzdłuż jego ścianek. Poza tym badacz ten uważa, że ciśnienie powietrza płuczącego jest najważniejszym parametrem określającym wielkość szczelin wlotowych.

Wprowadzone przez Percilvala określenie "syntetycznej sprawności przepłukania" pozwala się zorientować w jakości przepłukania cylindra.

Podobne badania przeprowadził J. Sobel na Uniwersytecie Pensylwańskim. W pracach jego zaobserwować można jednak wprowadzenie pewnych nowych elementów dotyczących zagadnienia przepłukania.

Inną metodę doświadczalną znaleźć można w pracy profesora Schweitzera "Scavenging of Two-Stroke Cycle Engines". Model silnika wypełniony zostaje mieszaniną powietrza i dwutlenku węgla o określonym procencie, po czym zrealizowany jest jeden cykl wymiany przy napełnianiu czystym powietrzem, sprężonym do określonego ciśnienia.

Po zakończonej wymianie dokonuje się analizy zawartości cylindra i ustala się procent zawartości dwutlenku węgla w przestrzeni cylindra. Sprawność wymiany określa

$$\eta_w = 1 - \frac{C}{M},$$

gdzie: C - procent dwutlenku węgla po wymianie,

M - procent dwutlenku węgla w mieszaninie przed wymianą.

Konieczność prowadzenia tego typu badań, w związku z rozwojem przemysłu silnikowego; istnieje również i w Polsce. Badaniami wymiany czynnika w cylindrze silnika dwusuwowego zajmowano się między innymi w Instytucie Aerodynamiki, w Zakładzie Urządzeń Ciepłych AGH w Krakowie i w Katedrze Silników Spalinowych, Przemysłowych i Lotniczych Politechniki Warszawskiej.

Celem badań przeprowadzonych w AGH przez H. Dziewanowskiego było otrzymanie danych odnośnie przebiegu procesu przepłukania w silniku dwusuwowym z zapłonem samoczynnym o wzdluznej wymianie czynnika, z wlotem czynnika pluczacego przez szczeliny w tulei cylindrowej a wylotem przez zawory umieszczone w glowicy silnika.

Do badan tych zastosowano urzadzenie modelowe skladajace sie ze szklanego cylindra, ruchomego tloka z wymiennym denkiem o roznych profilach, zaworow z regulowanym otwarciem, kierownic powietrza z mozlivoscia zmiany ich polozenia oraz urzadzen pomocniczych, jak dmuchawa, wytwornica iskier itp.

Wykonywano pomiary rozkladu prędkosci w zaleznosci od kata nachylenia lopatek kierujacych powietrze wlotowe oraz od ksztaltu denka tloka i jego polozenia. Do obserwacji tych stosowano poczatkowo dymy i dmuchany ryz, ale najlepsze wyniki osiagnieto metoda wprowadzenia do wlatujacego do cylindra powietrza rozzarzonych czasteczek węgla drzewnego.

Oprócz torów i kierunku przepływu, można było ocenić zdlugosci fotografowanych strug przy jednakowym czasie naswietlania - szybkość przepływu.

Do wyznaczenia kierunku strug i wielkości prędkości w określonych miejscach w cylindrze stosowano rurkę Pitota.

Wyniki badań podano na wykresach zbiorczych w zaleznosci od zmienianych parametrów. Wprowadzona zostala w tej pracy wielkosc charakteryzujaca doskonalkosc przepłukania nazwana sprawnoscia przepłukania cylindra.

Do okreslenia wplywu poszczegolnych parametrów na zaburzenia w przeplywach strug czynnika pluczacego, zbudowano dodatkowo urzadzenie skladajace sie z plaskiego wycinka cylindra ograniczonego przezroczystymi scianami, przy czym w jednej z nich wykonano duza ilosc rurek polaczonych z naczyniem wypeinionym roztworem nigrozyny. Wewnatrz tego urzadzenia znajdowal sie ruchomy plaski tlók z wymiennym denkiem oraz wkładki, ktorzych wymiana pozwala zbadać wplyw ich ksztaltu i pochylenie na przeplyw czynnika. Poza tym urzadzenie to wyposazone bylo w pompe wodna, zasuw, przewody itp.

Przeplywajaca pod cisnieniem woda, zabarwiona strugami nigrozyny pozwalala okreslic charakter przeplywu w plaskim wycinku cylindra.

W Katedrze Silników Spalinowych, Przemysłowych i Lotniczych Politechniki Warszawskiej przeprowadzono badania przepływu na płaskim modelu podobnym do poprzednio opisanego, które to badania służyć miały do projektowania rozrządu doświadczalnego silnika wahaczowego z tłokami przeciwbieżnymi. W urządzeniu tym zamiast wody tłoczonej przez pompę odśrodkową, zastosowano powietrze doprowadzone przy pomocy dmuchawy, a w jednej ze ścianek zamocowano lekki element (piórka), których usytuowanie wskazywało na jakość przepłukania. Urządzenie modelowe wykonano z ruchomym tłokiem o zmiennej kształcie denka i zmiennym położeniu kanałów doprowadzających czynnik. W chwili obecnej prowadzone są w Katedrze badania na modelu przestrzennym, służące do usprawnienia rozrządu wymienionego wyżej silnika.

Przedstawione tu pokrótce niektóre sposoby badań modelowych stosowanych do analizy zjawiska przepłukania silnika świadczą o przyjęciu ich do wstępnych badań przy projektowaniu układu rozrządu silnika. Każde jednak z tych urządzeń nie jest w stanie ująć zmienności nawet większości badanych parametrów.

W związku z tym, wyniki uzyskane w ten sposób, są wynikami jakościowymi; należy je traktować jako pogładowe, wnioski opracowane na ich podstawie jako luźno wiążące i sygnalizujące tylko wpływ poszczególnych czynników na przebieg przepłukania.

Ostateczne badania co do doboru kształtu i usytuowania kanałów sterujących jak i kształtu tłoka wykonać należy na pracującym silniku prototypowym.

W przedstawionym poniżej sposobie badania modelowego płaskiego przepływu, zaproponowano bardzo proste i tanie urządzenie pozwalające w ogólny sposób ustalić wpływ poszczególnych parametrów na swobodny przepływ czynnika. Uzyskane bardzo czytelne wyniki można rejestrować przy pomocy fotografii. Przy projektowanym modelu starano się zachować podobieństwo zjawiska w modelu i w obiekcie rzeczywistym wprowadzając odpowiednie kryteria podobieństwa, wyprowadzane bądź z równań różniczkowych opisujących zjawisko przepływu, bądź za pomocą analizy wymiarowej, gdy równania takie są nieznanne.

W przypadku przepływu czynnika kryteria podobieństwa ustalić można z równania różniczkowego przepływu płynu lepkiego z

uwzględnieniem ściśliwości i sił masowych oraz sił wywołanych różnicą ciśnień, który to przepływ opisuje równanie Naviera-Stokesa.

Przepływ będzie wtedy dynamicznie podobny, jeżeli zostaną zachowane następujące stałe współczynniki:

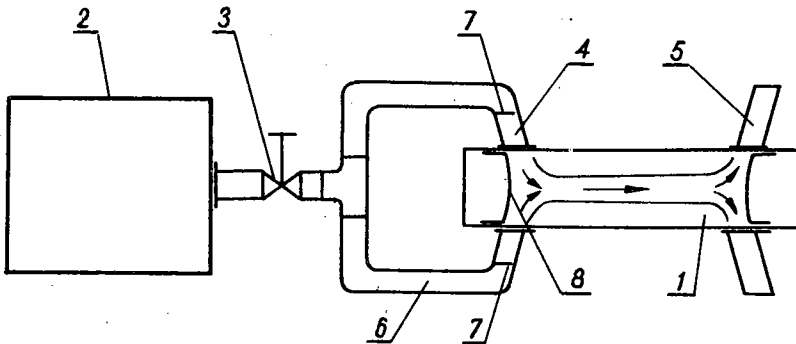
- St - liczba Strouhala będąca kryterium podobieństwa w warunkach ruchu nieustalonego,
- Fr - liczba Froude'a, kryterium podobieństwa uwzględniające siły bezwładności i grawitacji,
- Eu - liczba Eulera, kryterium podobieństwa oznaczające stosunek sił wywołanych różnicą ciśnień do sił dynamicznych,
- Re - liczba Reynoldsa, kryterium podobieństwa oznaczające stosunek sił dynamicznych do sił tarcia.

Równoczesne spełnienie wszystkich kryteriów podobieństwa jest na ogół niemożliwe. Istnieją również przypadki, że spełnienie jednego wyklucza zachowanie drugiego. Przy założeniu ruchu ustalonego w czasie, gdy badania prowadzone są przy tłokach nieruchomych, przy przepływie poziomym czynnika, gdzie wpływ sił ciężkości jest pomijany, można w rozważaniach pominąć liczbę Strouhala i Froude'a. Z wyliczeń rachunkowych wynika również, że ze względów technicznych nie można uzyskać równości liczb Eulera i Reynoldsa. W powyższym urządzeniu zachowano więc jedynie podobieństwo geometryczne, nie można było natomiast zachować podobieństwa przepływu. Uzyskane wyniki mają więc charakter poglądowy, należy je traktować jako jakościowe, pozwalające zbadać wpływ na przebieg procesu w urządzeniu modelowym takich czynników jak kształt i usytuowanie okien oraz kształt denka tłoka.

2. Opis stanowiska

Stanowisko badawcze (rys.1) składa się z następujących zespołów: kanału modelowego (1), zbiornika cieczy (2), zaworu odcinającego (3), wymiennych kanałów wlotowych (4), wylotowych (5), przewodów łączących (6), zasuwek dławiących (7) oraz wymiennych tłoków (8). Kanał modelowy wykonany został o wymiarach cylindra silnika badanego. Dzięki zastosowaniu zbiornika

cieczy (20 litrów pojemności), zaworu odcinającego, który jest jednocześnie zaworem dławiąco regulacyjnym oraz dzięki możliwości zmiany wysokości położenia zbiornika względem kanału mo-



Rys.1

delowego można uzyskać różne szybkości przepływu cieczy. Wy-
mienność kanałów wlotowych i wylotowych pozwala na realizowa-
nie różnych możliwości ustawienia kanałów.

Pierwsze próby badania przepływu przeprowadzono używając
jako czynnika wody o zmiennej szybkości przepływu. Obraz otrzy-
many był jednak nieczytelny. Po przeprowadzeniu całego szeregu
różnych prób ustalono, że najkorzystniejszym czynnikiem do ba-
dania przepływu w przedstawionym modelu jest mieszanina oleju
napędowego i proszku aluminiowego. Na podstawie obserwacji i
wykonanych zdjęć ustalono wpływ poszczególnych parametrów, jak
usytuowanie kanałów, kształt tłoka i jego położenia, na prze-
pływ w modelu.

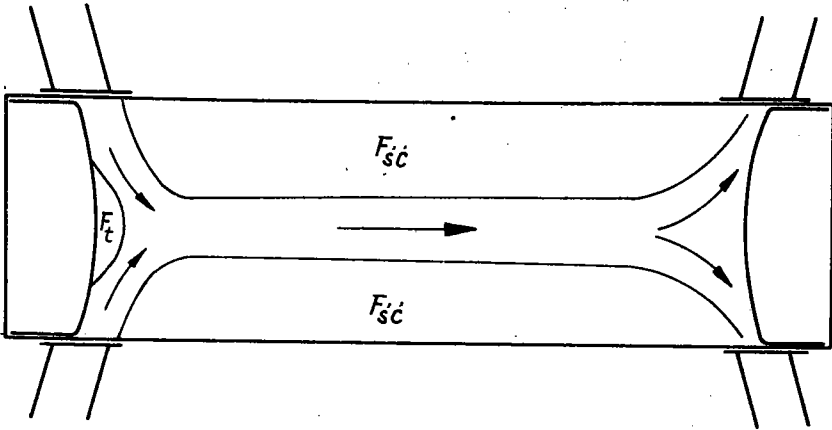
Miara jakości przepływu jest współczynnik

$$\eta_F = \frac{F_t + F_{ść}}{F_k} < 1,$$

gdzie: $F_t + F_{ść}$ - suma zaburzonych pól przy denku tłoka i przy ściankach,

F_k - całkowite pole kanału ograniczone tłokami.

Poszczególne pola mierzona były przy pomocy planimetru. Zdjęcie przepływu z odpowiednimi polami zaburzeń przedstawia rys.2.



Rys.2

Przy założeniu, że przepływ płaski można traktować jako osiowo symetryczny, określić można objętościowy współczynnik jakości przepływu jako

$$\eta_V = \frac{V_t + V_{śc}}{V_k} ,$$

przyjmując, że $V_t + V_{śc}$ - jest to objętość zaburzeń powstających w przestrzeni modelowej wyznaczona przy pomocy twierdzenia Gul-dina,

V_k - całkowita objętość cylindra.

Otrzymane wyniki charakteryzują się dużą czytelnością obrazu, odczytać z nich można układanie się strug cieczy oraz rozkład prędkości, który można ustalić z obserwacji w czasie przepływu. Przedstawiono to na rys.3^{*)}. Na zdjęciu zauważyć można charakterystyczne dla przepływu wiry boczne, powstające na skutek zasysania czynnika wpływającego na warstwę przyścienną. Najintensywniejszy ruch wirowy występuje przy strefie otworów wlotowych.

^{*)} Rys.3 znajduje się na końcu Biuletynu.

3. Program i wyniki badań

Przy badaniach mających na celu dobór najlepszych warunków przepływu w przedstawionym urządzeniu modelowym, ustalono, że zmieniane będą przysłonięcia kanałów wlotowych i wylotowych, kąty pochylenia szczelin wlotowych (α) i wylotowych (β) oraz kształty denka tłoka.

Badania odbyły się przy jednym otwarciu zaworu regulacyjnego, przy czterech różnych otwarciach szczelin, wyrażonych w procentach w stosunku do całkowitego otwarcia.

Dla szczelin wlotowych

$$k_1 = \frac{h_{ow}}{h_w} \cdot 100\% ,$$

gdzie: h_{ow} - wielkość otwarcia szczelin wlotowych,
 h_w - wysokość szczeliny wlotowej (32 mm).

Dla szczelin wylotowych

$$k_2 = \frac{h_{owyl.}}{h_{wyl}} \cdot 100\% ,$$

gdzie: h_{owyl} - wielkość otwarcia szczelin wylotowych,
 h_{wyl} - wysokość szczeliny wylotowej (36,5 mm).

Wymiary szczelin w kanale modelowym wykonano na podstawie rysunków konstrukcyjnych tulei cylindra silnika 2P-12. Próby przeprowadzono przy czterech położeniach tłoka, realizując przesłonięcia szczelin wlotowych $k_1 = 25\%$, $k_1 = 50\%$, $k_1 = 75\%$ i $k_1 = 100\%$ oraz dobierając odpowiednie przysłonięcia szczelin wylotowych.

Badania przeprowadzono przy następujących pochyleniach szczelin wlotowych i wylotowych:







$$\begin{array}{cccc} \alpha = +15^{\circ}, & \alpha = -15^{\circ}, & \alpha = 0^{\circ}, & \alpha = -15^{\circ}, \\ \beta = -15^{\circ}, & \beta = -15^{\circ}, & \beta = -15^{\circ}, & \beta = +15^{\circ}, \end{array}$$

gdzie znaki kątów pochylenia szczelin od linii pionowej w prawo oznaczono jako ujemne, a w lewo jako dodatnie.

Zbadano wpływ na charakter przepływu sześciu różnych kształtów tłoka, ustalając je na podstawie podobnych konstrukcji oraz analizy geometrycznej.

Ustalenie wpływu poszczególnych parametrów na charakter przepływu według podanego powyżej programu, wymagało wykonania przeszło 100 zdjęć (z badania niektórych układów zrezygnowano) oraz splanimetrowania pól zaburzeń, dla określenia współczynnika η_F .

Wyniki tych badań podano w tabeli

Kształt tłoka	k_1 %	$\alpha = +15^\circ$ $\beta = -15^\circ$	$\alpha = -15^\circ$ $\beta = -15^\circ$ $\eta_F = \frac{F_t + F_{śc}}{F_k}$	$\alpha = 0^\circ$ $\beta = -15^\circ$	$\alpha = +15^\circ$ $\beta = +15^\circ$
	25 50 75 100	0,68 0,68 0,68 0,66	0,255 0,275 0,245 0,25	0,69 0,65 0,65 0,5	
	25 50 75 100	0,70 0,69 0,62 0,58	0,57 0,41 0,43 0,45	0,45 0,48 0,33 0,32	
	25 50 75 100		0,465 0,155 0,132 0,125		0,63 0,67 0,69 0,72
	25 50 75 100	0,75 0,71 0,69 0,69	0,57 0,46 0,27 0,16	0,49 0,50 0,35 0,35	
	25 50 75 100		0,49 0,47 0,40 0,28	0,42 0,44 0,50 0,51	0,63 0,63 0,65 0,65
	25 50 75 100		0,70 0,58 0,35 0,30		

Na podstawie obserwacji badań i przedstawionej tabeli stwierdzono:

1. Największy wpływ na wielkość pól zaburzeń, a więc w pewnym stopniu i na sprawność wymiany ma kąt pochylenia kanałów wlotowych α . Z przeprowadzonych badań dla $\alpha = -15^{\circ}$, $\alpha = 0^{\circ}$, $\alpha = +15^{\circ}$ wynika, że najkorzystniej jest, gdy strumień skierowany jest w kierunku na tłok; kierując strumień w ten sposób zmniejszamy do minimum wiry nad denkiem tłoka oraz zmniejszamy wielkość wirów przyściennych.

2. Dostrzec można również niewielki wpływ kąta β na charakter przepływu. Najkorzystniejsze jest ustawienie szczelin wylotowych przy $\beta = -15^{\circ}$.

3. Duży wpływ na zmianę sprawności wymiany czynnika ma przysłonięcie szczelin wlotowych. Najlepiej wpływ ten obrazują załączone zdjęcia, wykonane przy kolejnych przysłonięciach szczelin wlotowych.

4. Ustalono, na podstawie przeprowadzonych prób, że wielkość przysłonięcia szczelin wylotowych nie ma widocznego wpływu na charakter przepływu. Minimalne różnice spowodowane są wpływem niedokładnego ustawienia tłoków oraz trudnością zachowania symetrii przepływu.

5. Kształt denka tłoka wpływa również na wielkość pól zaburzeń, ale przede wszystkim na wielkość wirów przy tłoku. Kształt ten wpływa również na zachowanie symetrii przepływu.

6. Prędkość przepływu cieczy przez kanał modelowy wpływa w bardzo dużym stopniu na kształtowanie się prądów cieczy. Przy określonym położeniu tłoka, zwiększając szybkość przepływu czynnika obserwujemy powiększenie wirów przyściennych oraz wzrost prędkości powrotnej przy ścianie kanału.

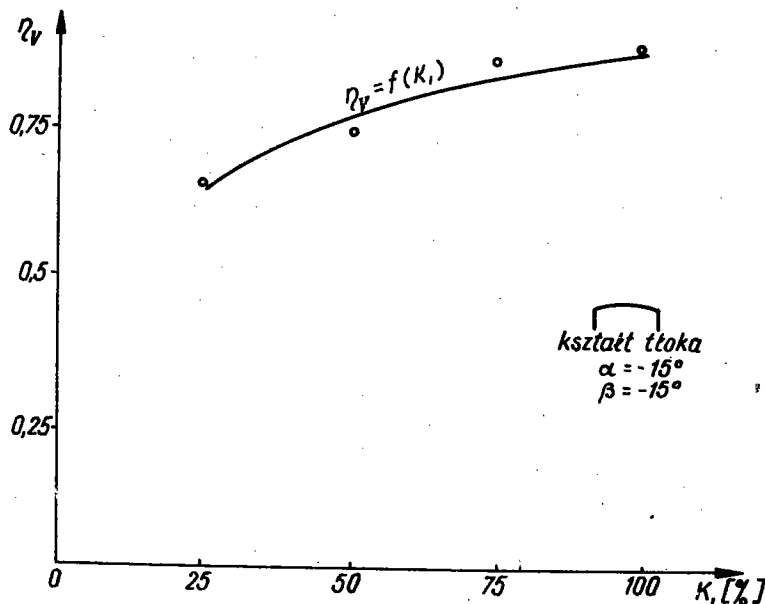
Dalsze powiększenie szybkości prowadzi do zaburzeń przepływu w modelu i nieczytelności obrazu.

Najczytelniejszy obraz uzyskano przy prędkości ok. 1^m /min. Najwyższą wielkość objętościowego współczynnika jakości przepływu η_V uzyskano w urządzeniu modelowym dla tłoka w kształcie wypukłym przy kącie wlotu czynnika $\alpha = -15^{\circ}$ i kącie wylotu czynnika $\beta = -15^{\circ}$, co przedstawiają załączone zdjęcia (rys. 4, 5, 6, 7). Wielkość η_F i η_V w funkcji $k(\%)$ dla tego przypadku podano w poniższej tabeli:

k %	25	50	75	100
η_F	0,57	0,46	0,27	0,16
η_V	0,652	0,742	0,857	0,867

$\eta_{V\text{śr.}} = 0,78$

Wykres $\eta_V = f(k_1)$ przedstawia wpływ przysłonięcia szczelin wlotowych na wielkość objętościowego współczynnika jakości przepływu.



4. Wnioski końcowe

Badanie wymiany czynnika na stanowisku modelowym cieczowym w przepływie płaskim pozwala przy pomocy bardzo prostego urządzenia uzyskać czytelne wyniki wpływu na przebieg przepływu interesujących nas parametrów. Badania na tak prostym urządzeniu można wykonać przy bardzo niewielkich kosztach.

*) Rys. 4, 5, 6, 7 znajdują się na końcu Biuletynu.

Oprócz powyższych zalet urządzenie to posiada jednak zasadniczą wadę, że nie można zachować kryteriów podobieństwa przepływu, czy chociażby kryterium podstawowego, tzn. liczby Reynoldsa (inny rząd wielkości). W modelu tym nie można badać również zmiany szybkości przepływu czynnika, przy zmianie położenia tłoka.

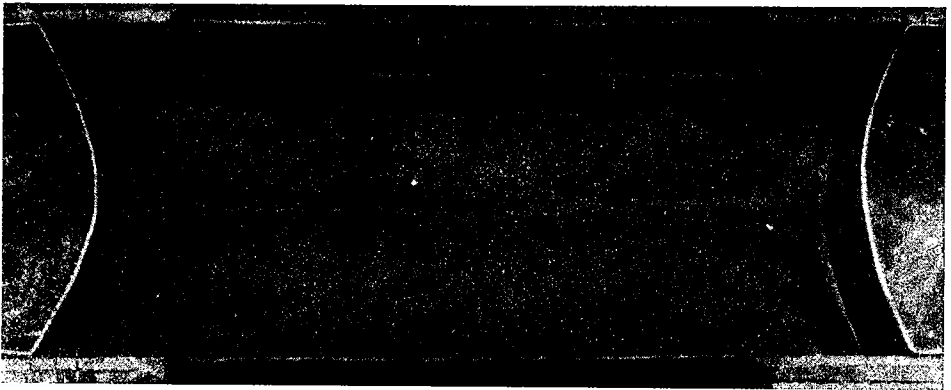
Z powyższych przyczyn otrzymane wyniki nie opisują pełnego procesu wymiany czynnika, należy traktować je jako pogładowe, dające tylko w przybliżony sposób pewne wskazówki przy projektowaniu silnika.

Bibliografia

1. Dziewanowski H.: Laboratoryjne wyznaczenie doskonałości płukania cylindrów silników spalinowych dwusuwowych. Zeszyty Naukowe AGH. 1961.
2. Saragih R.: Modelowe badania wymiany czynnika w silniku dwusuwowym z tłokami przeciwbieżnymi. Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej PW, nr 6. 1966.
3. Schweitzer P.H.: Scaventing of Two-Stroke Cycle Diesel Engines 1949 Macmillan Co.

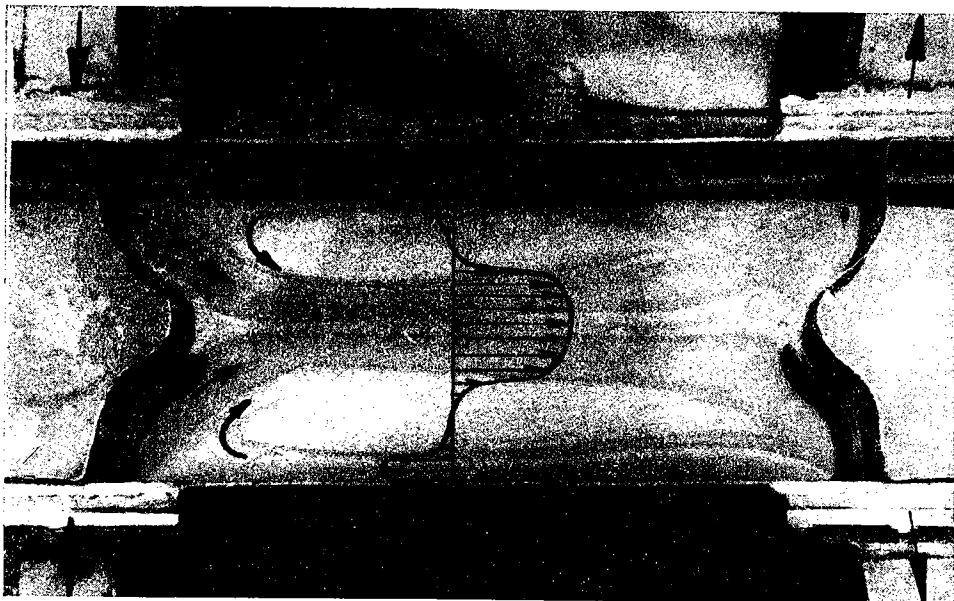


Rys. 5

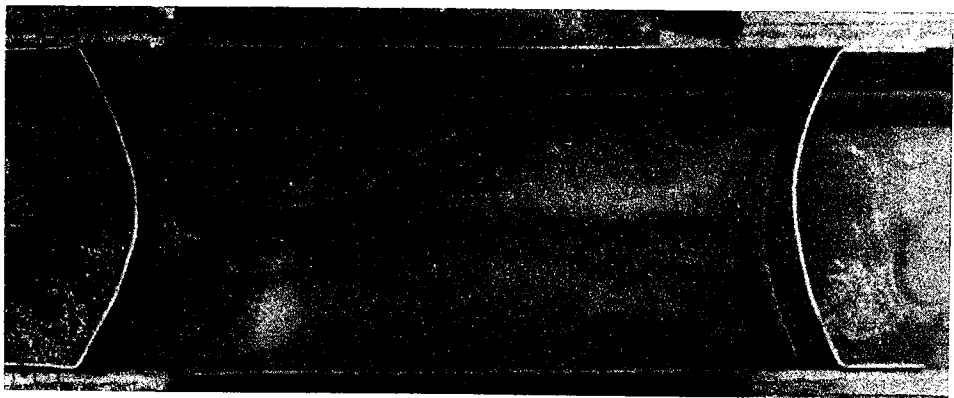


Rys. 6





Rys. 3



Rys. 4