

BIULETYN INFORMACYJNY INSTYTUTU TECHNIKI CIEPLNEJ POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

WARSZAWA

TEL. 215021 w. 32 i 48

NOWOWIEJSKA 25

Nr 6 / K.S.S.P.i L.1

czerwiec 1966

Mgr inż. Rudin Saragih

Katedra Silników Spalinowych Przemysłowych i Lotniczych

MODELOWE BADANIA WYMIANY CZYNNIKA W SILNIKU DWUSUWOWYM Z TŁOKAMI PRZECIWBIEŻNYMI

1. Wstęp

W dwusuwowym silniku wysokoprężnym z dwoma tłokami przeciwbieżnymi w jednym cylindrze - zrealizowana jest przelotowa (wzdłużna) wymiana czynnika gazowego. Jeden tłok steruje otwarciem szczelin wlotowych, a drugi - szczelin wylotowych. Tego typu wymiana powinna zapewnić wysoką jej sprawność, co oznacza, że przy niedużym nadmiarze objętości wprowadzonego powietrza w stosunku do objętości cylindra można dokładnie usunąć spaliny, pozostałe z poprzedniego obiegu pracy w cylindrze i wypełnić go jedynie czystym powietrzem. Przebieg wymiany czynnika można podzielić na 3 podstawowe okresy:

- 1) wylot wstępny - otwierane są tylko szczeliny wylotowe przy zamkniętych jeszcze szczelinach wlotowych, w chwili gdy w cylindrze panuje nadal stosunkowo wysokie ciśnienie rzędu 2,5 - 4,0 atn,
- 2) okres przepłukania - otwarte są jednocześnie szczeliny wylotowe i wlotowe i zachodzi właściwa wymiana czynnika,
- 3) okres dopełnienia - otwarte są jeszcze szczeliny wlotowe przy zamkniętych już szczelinach wylotowych, dzięki czemu

następuje doprowadzenie ciśnienia wewnątrz cylindra do ciśnienia powietrza za sprężarką, a nawet powyżej, jeżeli występuje dynamiczne oddziaływanie prądu powietrza.

Uzyskanie prawidłowej wymiany czynnika (całkowite usunięcie spalin) w silniku dwusuwowym z tłokami przeciwbieżnymi wymaga przede wszystkim doboru odpowiedniej geometrii kształtu i ustawienia szczelin wlotowych, które można sprawdzić i skorygować po przeprowadzeniu odpowiednich badań na drodze doświadczalnej (często na specjalnych modelach przy zachowaniu podobieństwa geometrycznego).

W Katedrze Silników Spalinowych Przemysłowych i Lotniczych został zaprojektowany i wykonany doświadczalny silnik wahaczowy z tłokami przeciwbieżnymi oznaczony jako typ 2-P-12. Podstawowe wymiary silnika są następujące: średnica cylindra $d_0 = 125$ mm, skok tłoków $s = 160 \times 2$ mm, obroty nominalne $n_s = 1800$ obr/min, moc nominalna $N_e = 100$ KM/cyl.

Podstawowe wielkości szczelin wlotowych i wylotowych (wysokość i szerokość) opracowano wstępnie opierając się na danych istniejących już konstrukcji silników przeciwbieżnych. Wybrane przykłady podano w tabl. I.

Tablica I

Silniki	Jun- kers Yumo 4	Fair- banks Morse	Clark Dako	Sul- zer 2z69	Com- mer TS3	Ley- land NATO	2-P-12
Średn. cylindra d_0 (mm)	120	205	105	90	82	117	125
Skok - s (mm)	2x210	2x253	2x133	2x120	2 x 101,6	2x146	2x160
Obroty - n (obr/min)	1700	720	1500	1000	2400	2400	1800
N_e cylindra (KM/cyl)	120	160	41,7	19,7	35	112	100
Szer. szczelin wlotowych w % obw. cylindra	60	69,7	61,6	72	-	-	73,2
Szer. szczelin wyl. w % obw. cyl.	60	50,6	61,6	65	50,4	-	62
Wys. szczelin wlot. w % skoku	24,8	15	17,8	10,8	13,8	15,5	20
Wys. szczelin wyl. w % skoku	30,5	18,1	18,4	11,7	18	16,8	22

W czasie dokonywania pierwszych prób na stanowisku dynamometrycznym nie uzyskano bezdymnej pracy silnika przy jego pełnym obciążeniu. Aby stwierdzić, czy proces usuwania spalin i napełniania czystym powietrzem występuje prawidłowo przy przyjętych szczelinach, przystąpiono do dokonania prób modelowych nad jakością wymiany czynnika. Pierwsze próby przeprowadzono na stanowisku modelowym płaskim, będącym podłużnym wycinkiem leżącego cylindra. Na tym urządzeniu można było zmieniać następujące parametry:

1. Kąt γ ustawienia szczelin wlotowych i kąta α szczelin wylotowych; oba kąty mierzone są względem osi cylindra; ustawienie pionowe - przyjęto jako zerowe, kąty mierzone w prawo uznano jako dodatnie, zaś w lewo - jako ujemne.

2. Położenie tłoka względem szczelin, które określa ich wielkość otwarcia; aby uniezależnić się od wymiarów otwarcia szczelin wyznaczone zostało w % całkowitego otwarcia.

3. Wysokość szczelin h (przyjęto w badaniach $h_w = 34$ mm, $h_{wy} = 51$ mm, przez analogię do wymiarów geometrycznych rzeczywistego cylindra),

4. Kształty geometryczne szczelin (a więc np. zaokrąglenia krawędzi),

5. Kształty dna tłoka.

Praca niniejsza obejmuje wyniki prób wykonanych na tym stanowisku, ograniczone na razie do określenia wpływu zmiany kątów α i γ przy jednoczesnym uwzględnieniu różnych otwarć szczelin wlotowych.

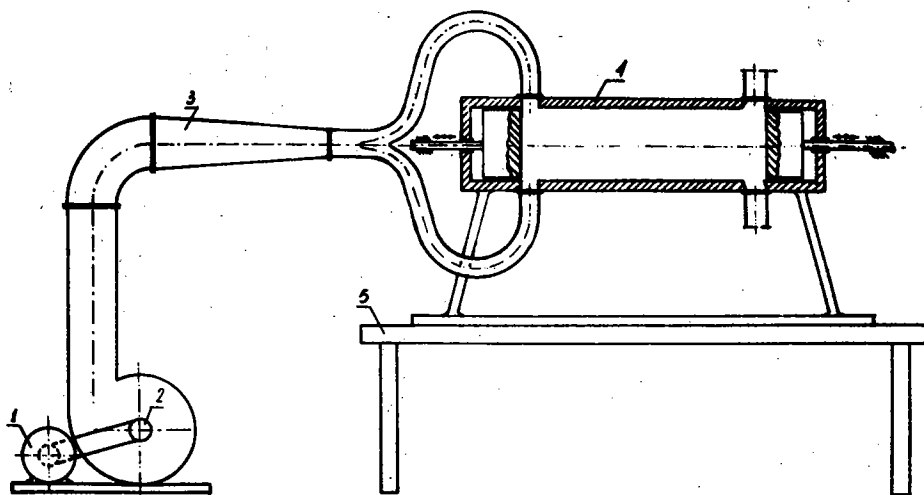
2. Opis stanowiska i opis przyrządu

A. Opis stanowiska

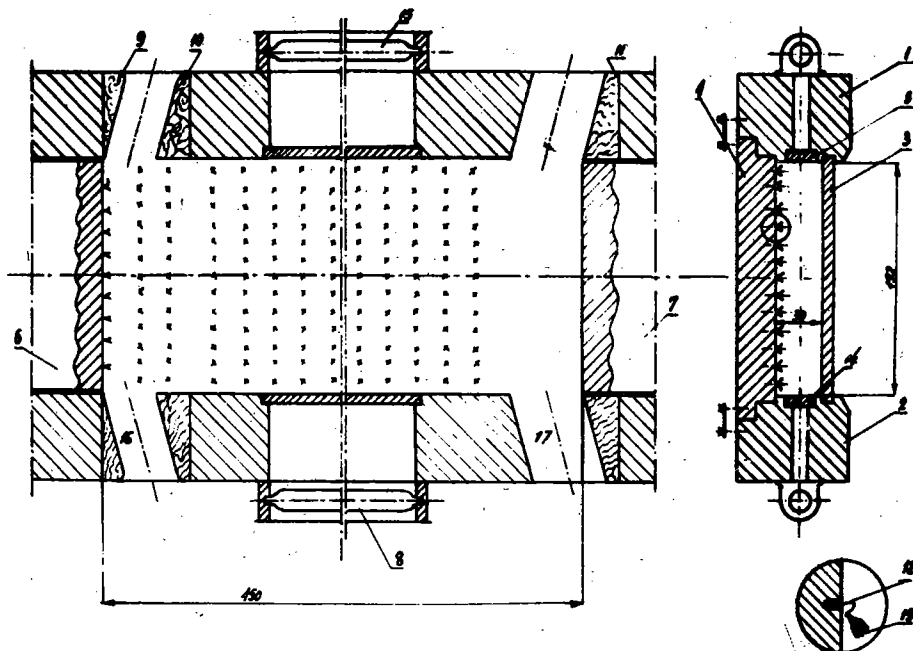
Stanowisko (rys. 1) składa się z silnika elektrycznego (1) napędzającego dmuchawę (2), która dostarcza przewodem (3) powietrze do przyrządu (4). Ciśnienie całkowite p_c powietrza w czasie przeprowadzonych prób wynosiło $p_c = p_{st} + p_d = 1,05$ atm, gdzie p_{st} - ciśnienie statyczne
 p_d - ciśnienie dynamiczne.

B. Opis przyrządu

Przestrzeń pomiarowa przyrządu (rys.2) ograniczona jest ściankami: górną (1) i dolną (2), w których umieszczone są



Rys. 1. Stanowisko modelowe

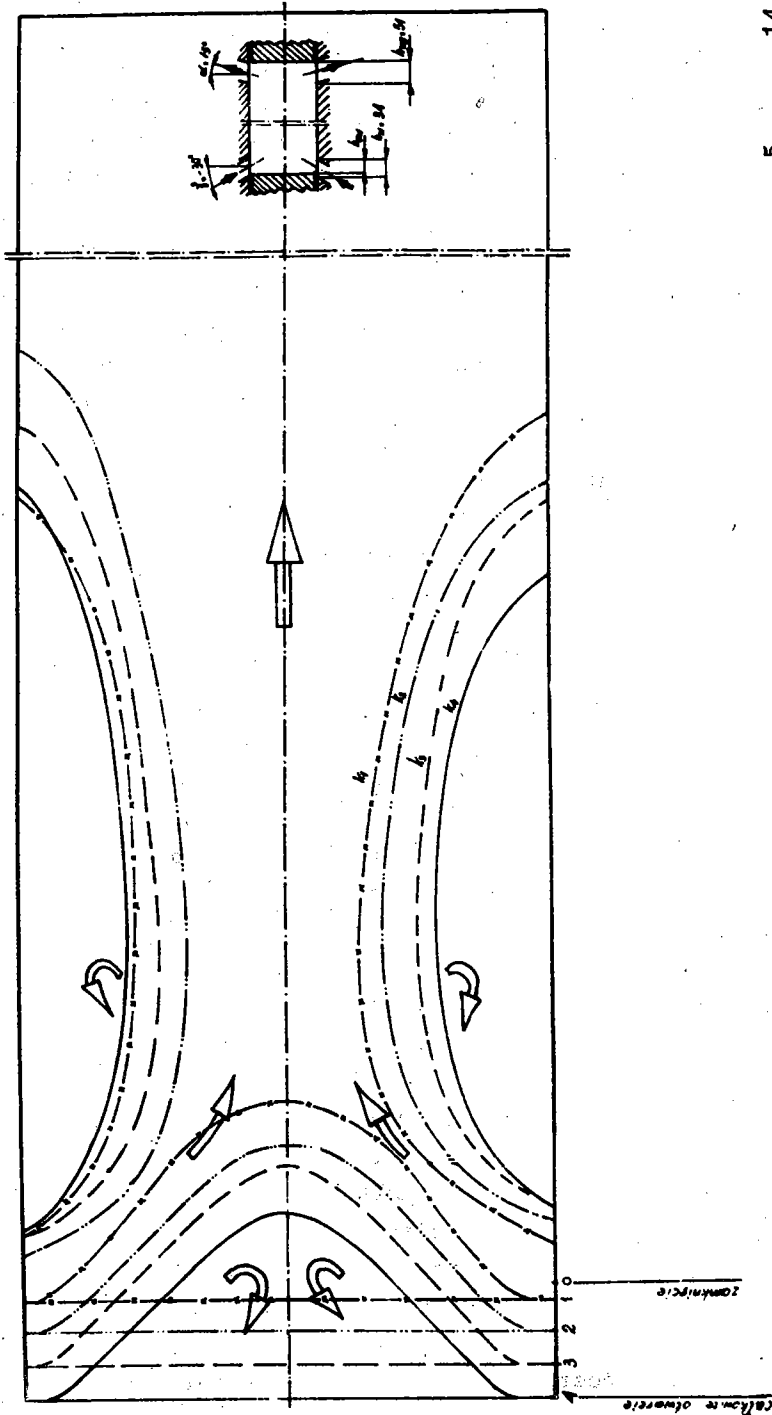


Rys. 2. Przyrząd

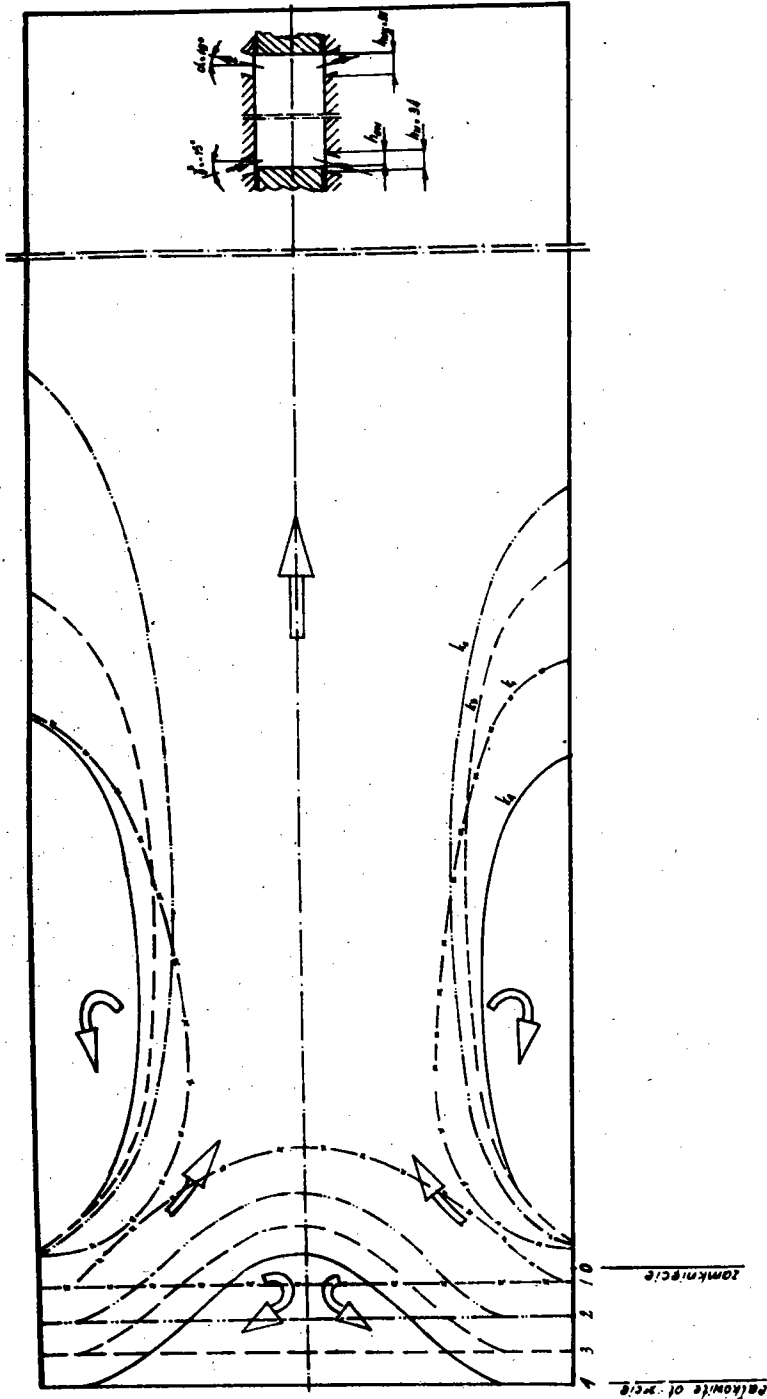
szczeliny wlotowe (16) i wylotowe (17) oraz płytki ze szkła organicznego (5 i 14) umożliwiające oświetlenie przestrzeni pomiarowej podłużnymi żarówkami 40 W (8 i 15). Odejmwana ścianka tylna (4) wykonana jest z bakelitu; w ścianie tej wykonano małe otwory dla osadzenia b. lekkich piórek w postaci pęczków (13) przytwierdzonych przy pomocy cienkich nitok nylonowych (12). Piórka nawet w słabym prądzie powietrza uchylają się i umożliwiają dobrą wizualizację przepływu powietrza w przestrzeni pomiarowej. Przez ściankę przednią (3), wykonaną również ze szkła organicznego, można obserwować zachowanie się pęczków piórek w strumieniu powietrza w całym obszarze pomiarowym. Ruchome ścianki boczne odwzorowują tłoki; krawędzie tłoków sterują otwarciem szczelin wlotowych (6) i wylotowych (7). Na tłoku sterującym otwarcie szczelin wlotowych zamocowane są dodatkowo pęczki piórek podobnie jak na ścianie tylnej modelu. W ten sposób cała przestrzeń modelowa mogła być poddana obserwacji i ocenie dokonywanego się przepływu. Ustalanie kątów szczelin i ich kształtów polegało na wstawieniu odpowiednich wkładek wymiennych, zaś otwarcie szczelin - przez przesuwanie tłoków.

3. Przebieg badania

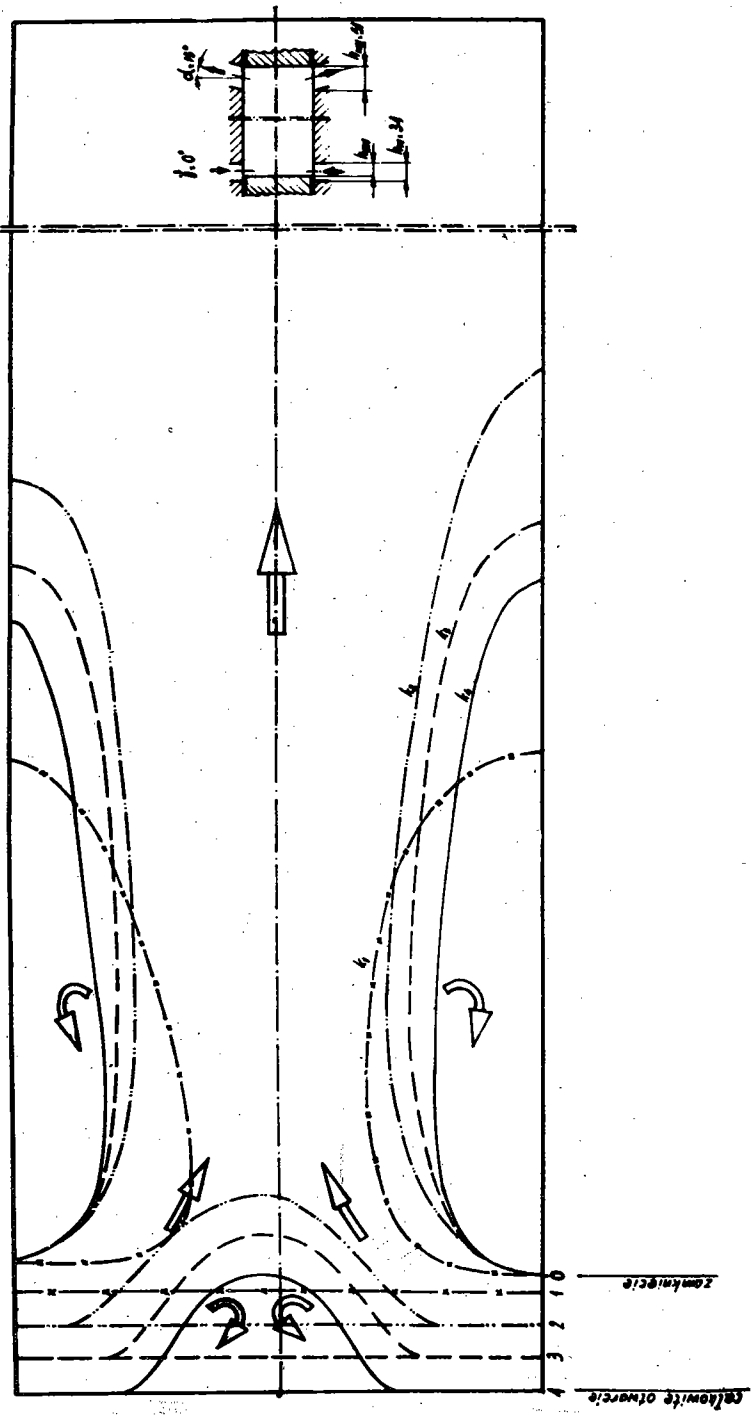
Po włączeniu silnika elektrycznego napędzającego dmuchawę i po powstaniu różnicy ciśnień w przestrzeni modelowej cylindra następuje przepływ powietrza przez szczeliny wlotowe, przez przestrzeń modelową przedstawiającą płaski wycinek cylindra i w końcu przez szczeliny wylotowe. Jak stwierdzono podczas obserwacji przepływ ten nie jest jednorodny; istnieją pasma tej przestrzeni, w których piórka mają niezmiennie pochylenie, świadczące o jednostajnym przepływie i o ściśle ustalonym kierunku, ale istnieją również miejsca, gdzie przepływ jest nieregularny z licznymi miejscowymi zaburzeniami o charakterze wirów. Ujawnia się to "trzeptaniem" wiązki piórek. Pierwszym celem badania było ustalenie linii rozgraniczającej obszar przepływu bez zawirowań, świadczący o prawidłowo przebiegającej wymianie czynnika, od obszaru, w którym zawirowania występują i powodują zakłócenia w tej wymianie. Można nawet założyć,



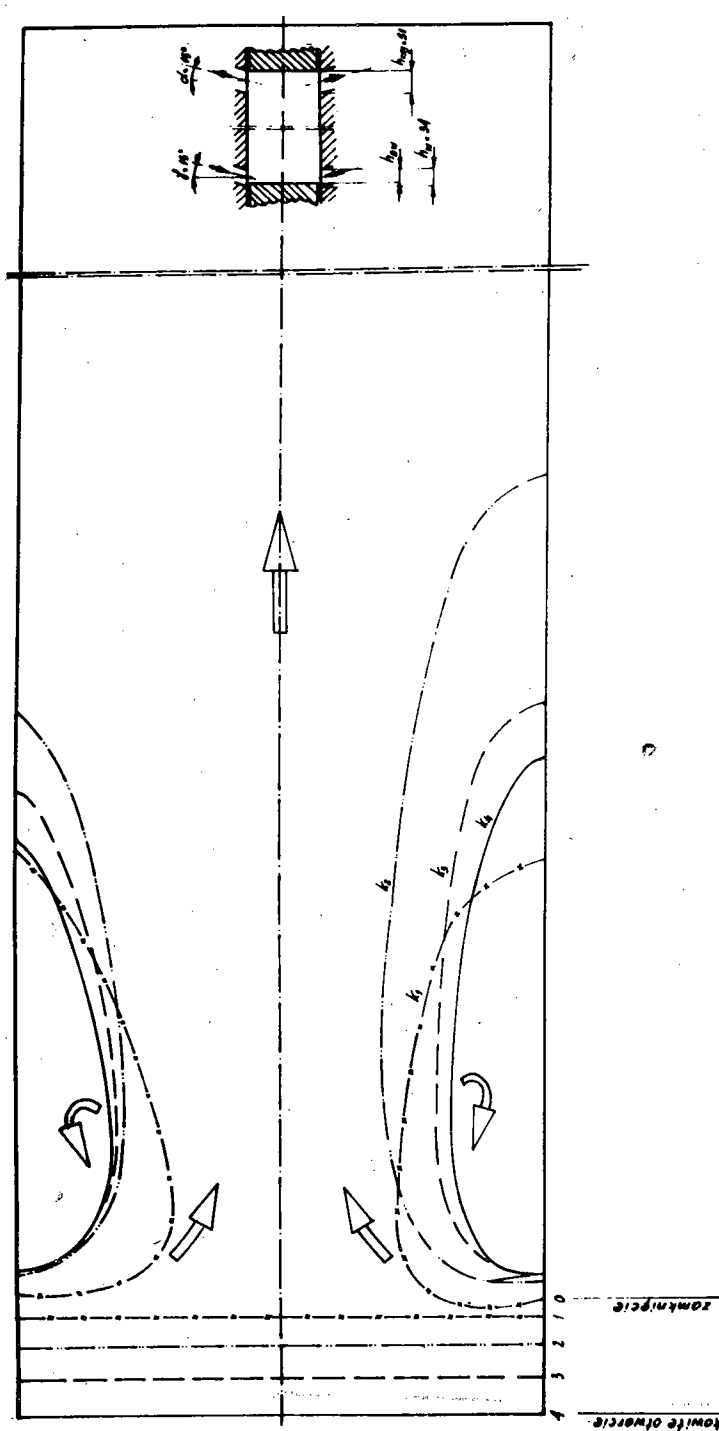
Rys. 3. Linie graniczne przepływu burzliwego przy zmiennym otwarciu kanału $k_1 = \frac{5}{34} \cdot k_2 = \frac{14}{34}$, $k_3 = \frac{24}{34} \cdot k_4 = \frac{34}{34}$; a) ostre krawędzie tloka, b) kąt wlotowy $\gamma = - 30^\circ$, c) krawędzie kanałów wlotowych - ostre



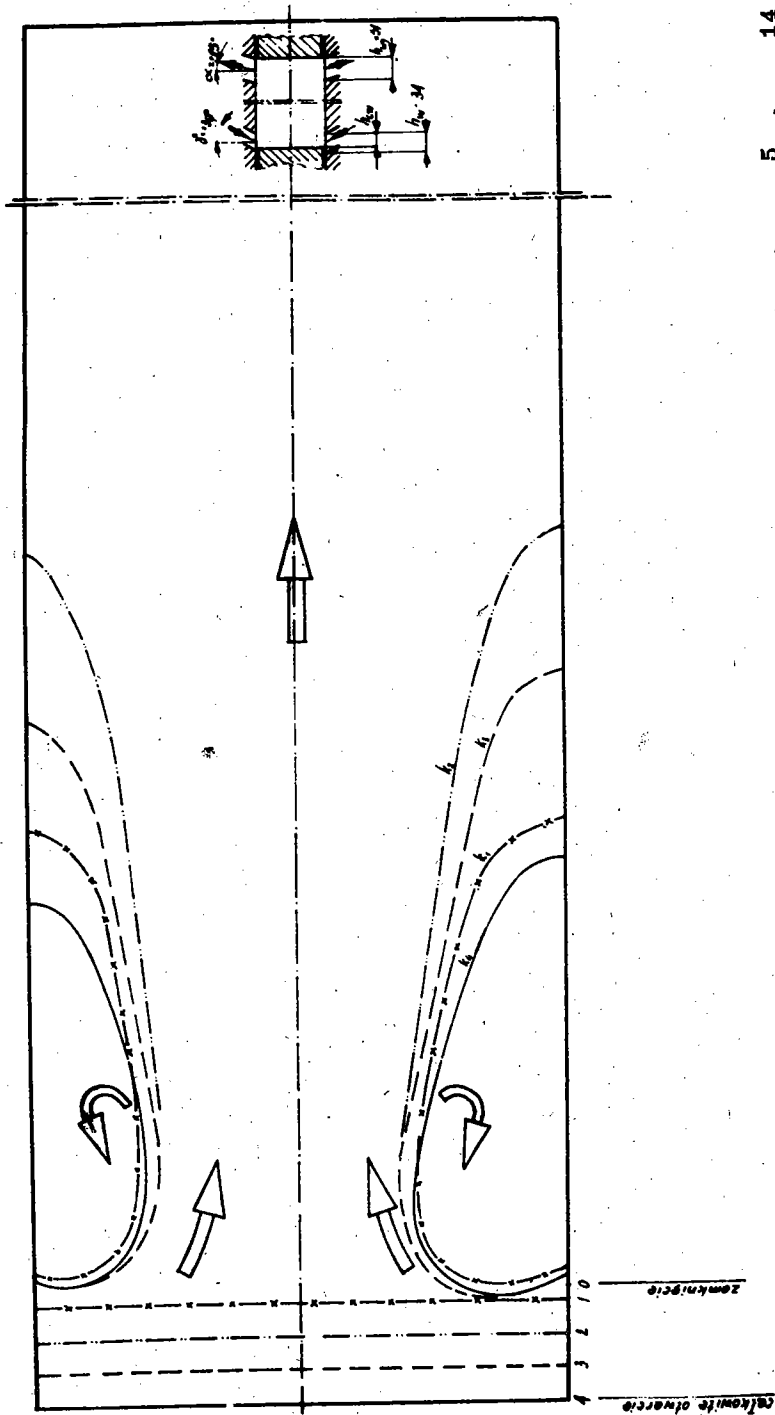
Rys. 4. Linie graniczne przepływu burzliwego przy zmiennym otwarciu kanału $k_1 = \frac{5}{34}$, $k_2 = \frac{14}{34}$, $k_3 = \frac{24}{34}$, $k_4 = \frac{34}{34}$; a) ostre krawędzie tloka, b) kąt wlotowy $\beta = 15^\circ$, c) krawędzie kanałów wlotowych - ostre



Rys. 5. Linie graniczne przepływu burzliwego przy zmiennym otwarciu kanału $k_1 = \frac{5}{34}$, $k_2 = \frac{14}{34}$, $k_3 = \frac{24}{34}$, $k_4 = \frac{34}{34}$; a) ostre krawędzie tloka, b) kąt wlotowy $\beta = 0^\circ$, c) krawędzie kanałów wlotowych - ostre



Rys. 6. Linie graniczne przepływu burzliwego przy zmiennym otwarciu kanału $k_1 = \frac{5}{34}$, $k_2 = \frac{14}{34}$, $k_3 = \frac{24}{34}$, $k_4 = \frac{34}{34}$; a) ostre krawędzie tloka, b) kąt wlotowy $\gamma = 15^\circ$, c) krawędzie kanałów wlotowych - ostre



Rys. 7. Linie graniczne przepływu burzliwego przy zmiennym otwarciu kanału $k_1 = \frac{5}{34}$, $k_2 = \frac{14}{34}$, $k_3 = \frac{24}{34}$, $k_4 = \frac{34}{34}$; a) ostre krawędzie tłołka, b kąt wlotowy $\gamma = + 30^\circ$, c) krawędzie kanałów wlotowych - ostre

że w obszarach tych wymiana nie następuje. Linie rozgraniczające, które można dość wyraźnie zaobserwować w czasie przepływu powietrza przez przestrzeń modelową zostały przedstawione na rys. 3,4,5,6,7. Obserwacje te, dotyczące ustalania się linii granicznych, zostały dokonane dla różnych kątów wlotu i wylotu powietrza i przy różnych otwarciach szczelin sterowanych tłokami, bowiem zauważono, że wielkość otwarcia miała również wyraźny wpływ na charakter przepływu. Wykonana seria badań pozwoliła ponadto stwierdzić, że wysokość szczelin wylotowych i kąt ustawienia nie mają decydującego wpływu na położenie linii rozgraniczających, toteż dalsze badania przeprowadzone zostały tylko dla różnych kątów ustawienia szczelin dla wlotu powietrza i przy różnych położeniach tłoka sterującego, a więc dla różnych otwarć szczelin wlotowych; przy każdej serii pomiarowej dany kąt ustawienia wlotu pozostał niezmienny, zaś szczeliny wylotowe były całkowicie otwarte. Została przeprowadzona następująca seria badań:

Tablica II

Seria badań	Parametry zmienne	Parametry stałe
I	$\delta = -30^{\circ}$	wysokość szczelin $h_w = 34$ mm; kolejne
II	$\delta = -15^{\circ}$	otwarcia $h_{ow} = 0; 5; 14; 24; 34$ mm
III	$\delta = 0^{\circ}$	$k = \frac{h_{ow}}{h_w} \% = 0; 14,7; 70,5; 100$
IV	$\delta = +15^{\circ}$	kąt $\alpha = 15^{\circ}$
V	$\delta = 30^{\circ}$	wysokość szczelin $h_{wy} = 51$ mm

Wyniki pomiarów przedstawione są na rys. 3,4,5,6,7; pole obejmujące przepływ wzburzony oznaczone zostały na tych rysunkach strzałkami o kierunku odwrotnym do kierunku wymiany czynnika. Analizując rysunki obrazujące przepływ czynnika w modelach przy różnych kątach wlotu powietrza i przy różnych wysokościach otwarć szczelin wlotowych można również stwierdzić, że przepływ nie jest całkowicie osiowo symetryczny, na co miało wpływ niezbyt dokładne wykonanie obu rozgałęzień doprowadzających powietrze do przyrządu. Aby można było przenieść wyniki doświadczeń z przepływu płaskiego, zrealizowanego w opisanym

wyżej modelu, na układ przestrzenny, przyjęto, że przepływ ten pomimo pewnych zauważonych różnic jest przepływem osiowo symetrycznym i wyznaczone pola na rysunkach 3-7 stanowią osiowe przekroje charakterystycznych obszarów o kształcie brył obrotowych występujących w cylindrze. Bryła wewnętrzna - wypełniona jest czynnikiem o prawidłowo ułożonych strugach, zaś zewnętrzna w skrajnym przypadku czynnikiem nie biorącym udziału w tej wymianie.

Objętości tych brył obliczone zostały znaną metodą, która określa ich wielkość iloczynem pola przekroju pomnożonego przez obwód koła zakreślonego promieniem równym odległości środka ciężkości pola od osi obrotu.

Przy obliczaniu wybrane zostały jako miarodajne:

dla $\gamma = -30^\circ$ i $\gamma = -15^\circ$ - pole zaburzeń powstałe nad osią modelu,
 dla $\gamma = 0$, $\gamma = 15^\circ$ i $\gamma = 30^\circ$ - pole zaburzeń pod osią modelu.

Wyniki pomiarów podane są również w tablicy III i na rys. 8, 9 i 10.

W tablicy III wprowadzono następujące oznaczenia:

- δ - kąt wlotu powietrza do przestrzeni cylindrowej urządzenia modelowego ($^\circ$),
- h_w - wysokość szczelin wlotowych; $h_w = 34$ (mm) - stała,
- h_{ow} - wysokość otwarć szczelin wlotowych (mm) - zmienna,
- α - kąt wylotu powietrza w przestrzeni cylindrowej ($^\circ$),
- h_{wy} - wysokość szczelin wylotowych; $h_{wy} = 51$ (mm) - stała,
- $k = \frac{h_{ow}}{h_w}$ - współczynnik wysokości otwarć szczelin wlotowych; jest to stosunek wysokości danego otwarcia szczeliny wlotowej do jej całkowitej wysokości (%),
- V_t - objętość obszaru zaburzeń nad denkiem tłoka (cm^3);
- $V_{śc}$ - objętość obszaru zaburzeń na obwodzie, przy ściankach cylindra (cm^3),
- $V_z = V_t + V_{śc}$ - suma objętości zaburzeń powstających w przestrzeni modelowej o kształcie brył obrotowych,
- V_m - całkowita wewnętrzna objętość o kształcie cylindrycznym (cm^3),
- $\eta_z = \frac{V_z}{V_m}$ - stosunek sumy objętości obszarów zaburzeń V_z do całkowitej wewnętrznej objętości modelu V_m (%),
- $\eta_w = 100 - \eta_z$ - współczynnik wymiany czynnika (%),
- $\eta_{wśr}$ - średnia wartość współczynnika wymiany (%).

Tablica III

	Lp.	δ ($^{\circ}$)	how (mm)	$k = \frac{how}{hw}$ (%)	V_t (cm^3)	V_{sc} (cm^3)	$V_z = V_t + V_{sc}$ (cm^3)	$\eta_z = \frac{V_z}{V_m}$ (%)	$\eta_w = 100 - \eta_z$ (%)	$\eta_{wsr} = \frac{\sum \eta_w}{5}$ (%)
I	1		0	0	-	-	-	-	0	
	2		5	14,7	348	2069	2417	30,2	69,8	
	3	-30	14	41	303	3222	3525	44,5	55,5	52,3
	4		24	70,5	334	2549	2883	36,3	63,7	
	5		34	100	285	1909	2194	27,6	72,4	
II	1		0	0	-	-	-	-	0	
	2		5	14,7	225	1828	2053	25,8	74,2	
	3	-15	14	41	186	2801	2987	37,6	62,4	58,3
	4		24	70,5	180	1915	2095	26,4	73,6	
	5		34	100	142	1362	1504	18,9	81,1	
III	1		0	0	-	-	-	-	0	
	2		5	14,7	-	2124	2124	26,7	73,2	
	3	0	14	41	79	3146	3225	40,5	59,5	55,3
	4		24	70,5	64	2467	2531	31,8	68,2	
	5		34	100	41	1903	1944	24,4	75,6	
IV	1		0	0	-	-	-	-	0	
	2		5	14,7	-	1542	1542	19,4	81,6	
	3	15	14	41	-	2968	2968	37,4	62,6	61,3
	4		24	70,5	-	1771	1771	22,3	77,7	
	5		34	100	-	1219	1219	15,3	84,7	
V	1		0	0	-	-	-	-	0	
	2		5	14,7	-	1600	1600	20	80,0	
	3	30	14	41	-	2679	2679	33,7	66,3	60
	4		24	70,5	-	2160	2160	21,2	72,8	
	5		34	100	-	1460	1460	18,4	81,6	

h_w (mm) = 34

α ($^{\circ}$) = 15

h_{wy} (mm) = 51

V_m (cm^3) = 7950

4. Wnioski

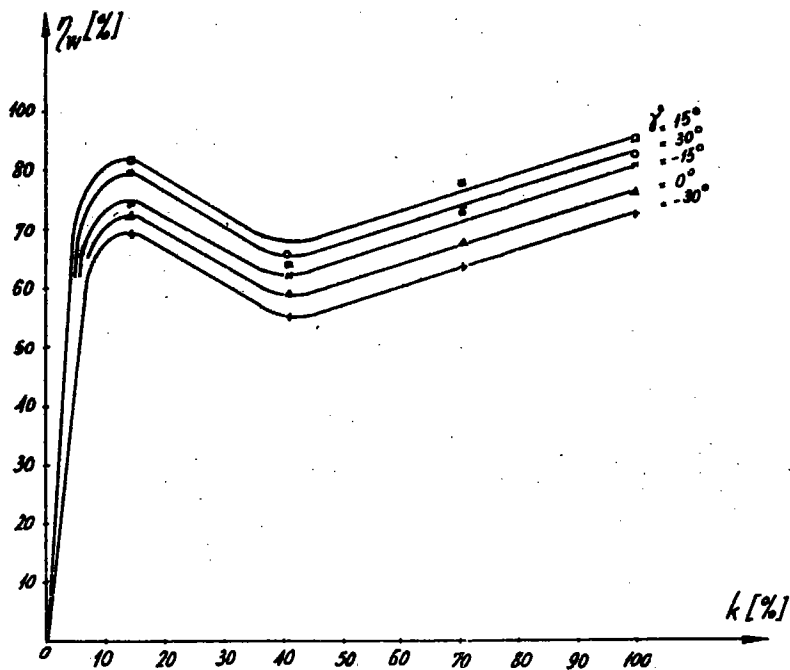
Porównując rys. 3, 4, 5, 6 i 7 można zauważyć, że dla różnych wartości kątów γ wlotu powietrza do przestrzeni modelowej i przy różnych położeniach tłoka, który steruje otwarciem szczelin wlotowych, a więc przy różnych wysokościach otwarć szczelin wlotowych h_{ow} , zawsze występują obszary zaburzeń przy ściankach modelu cylindra. Rozważając to zjawisko można wnioskować, że spaliny pozostałe z poprzedniego obiegu pracy nie są całkowicie usuwane z cylindra, a poważna ich część pozostaje w utworzonym obszarze zawirowań. Jak wiadomo, ma to ujemny wpływ na stopień napełniania cylindra η_v , a w następnej fazie i na przebieg spalania. Oprócz tego z w/w rysunków widać, że przy ujemnych wartościach kąta γ wlotu powietrza do przestrzeni modelowej, lub przy wartości równej zeru, tzn. - kiedy strumień powietrza wpływającego do modelu jest skierowany od tłoka lub prostopadle do głównej osi, to nad denkiem tłoka zawsze występuje dodatkowy obszar zaburzeń. Z tablicy III wynika, że im mniejsze są wartości kąta γ (w zakresie $\gamma = 0$ do $\gamma = -30^\circ$) tym większy jest ten obszar zaburzeń V_t ograniczony odpowiednią linią graniczną, nad denkiem tłoka. Gdy wartość kąta wlotu powietrza γ jest dodatnia, tzn. kiedy strumień powietrza wpływającego do modelu skierowany jest na tłok, to zaburzenia nad denkiem tłoka prawie nie występują. Skierowanie strumienia powietrza na tłok jest zatem korzystniejsze, niż skierowanie strumienia od tłoka, ponieważ zmniejsza się i całkowita objętość, w której występują zaburzenia i nieprawidłowy przepływ.

Na wykresie rys. 8 widzimy, że dla każdego kąta skierowania wlotu strumienia powietrza do modelu ($\gamma = -30^\circ$, $\gamma = -15^\circ$, $\gamma = 0$, $\gamma = 15^\circ$ i $\gamma = 30^\circ$) maksymalna wartość współczynnika wymiany czynnika η_w występuje przy współczynniku otwarcia szczelin $k = 100\%$, tzn. wtedy, gdy szczeliny są całkowicie otwarte. Wartość η_w w funkcji k w zakresie od $k = 0$ do $k = 100\%$ nie zmienia się prostoliniowo. Początkowo wartość η_w gwałtownie wzrasta, po czym wyraźnie opada i następnie ponownie, prawie prostoliniowo i łagodnie wzrasta aż do swojej

wartości maksymalnej (przy $k = 100\%$). Zakres współczynnika k , w obrębie którego η_w ponownie wzrasta, obejmuje około 60% wysokości szczelin wlotowych. Z badań wykonanych na modelu wynika, że wartość współczynnika η_w w zakresie od $k = 0$ do $k = 100\%$ (kiedy tłok porusza się w kierunku ZZP, tzn. kiedy szczeliny są otwierane) pokrywa się z wartością η_w uzyskaną, gdy tłok porusza się w kierunku odwrotnym - do WZP, tzn. kiedy szczeliny są przymykane.

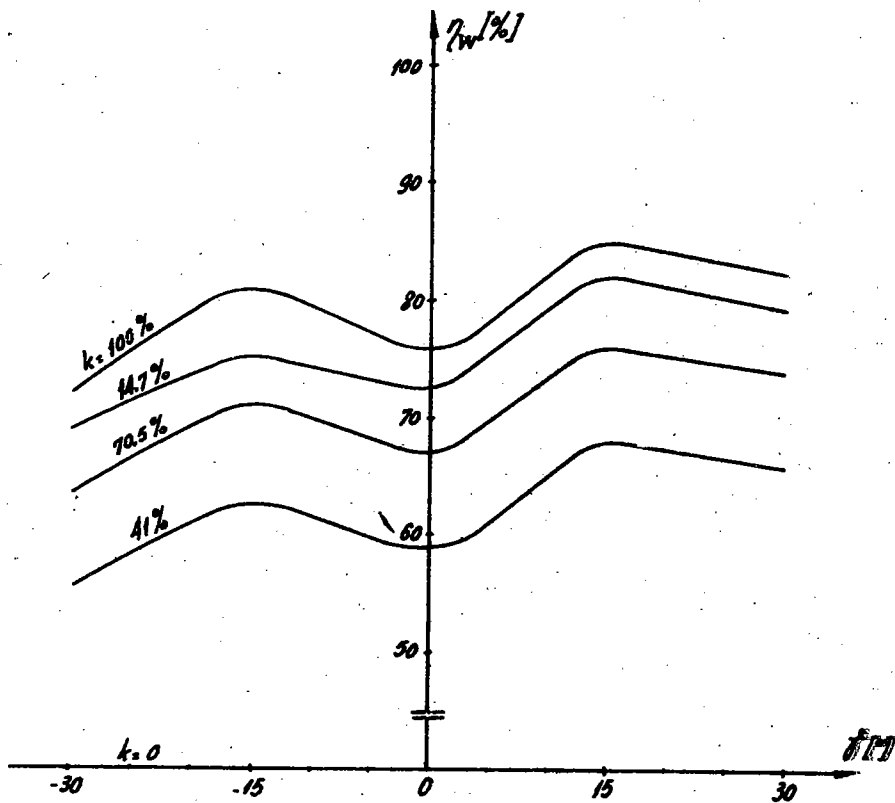
Możemy, opierając się na obliczonych objętościach zaburzeń w czasie wlotu powietrza, określić najkorzystniejszą wartość kąta ustawienia szczelin wlotowych γ , przy której wartość współczynnika η_w byłaby jak największa. W takim przypadku należy się spodziewać, że uzyska się największy stopień napełniania cylindra w silniku (η_v).

Po przekształceniu układu $\eta_w = f(k)$ (rys.8) na układ $\eta_w = f(\gamma)$ (rys.9) otrzymamy współczynnik η_w dla różnych



Rys.8

otwarć szczelin k w funkcji kąta ustawienia szczelin wlotowych γ . Wykres wartości średniej współczynnika wymiany

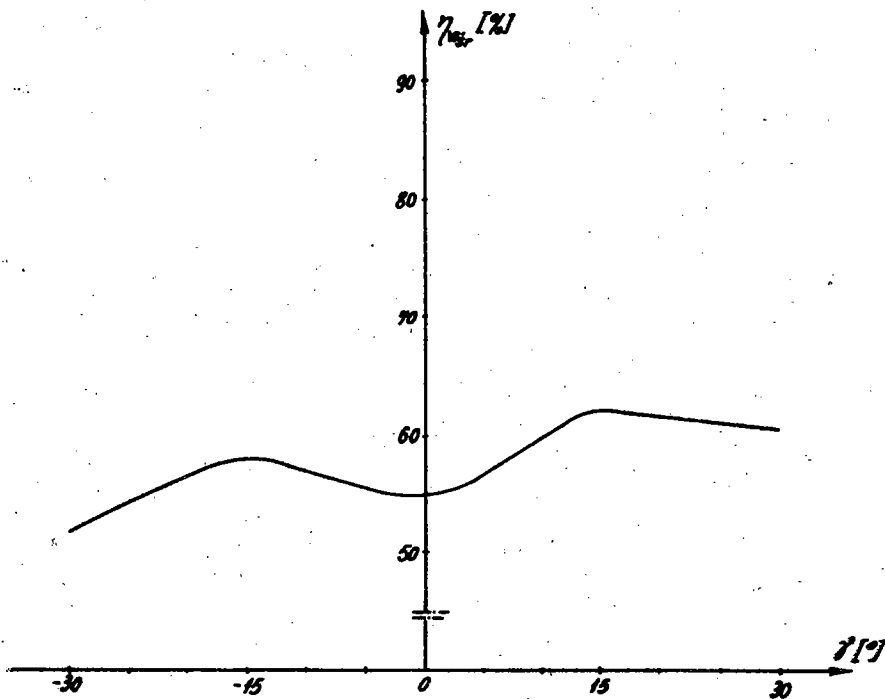


Rys. 9

czynnika w modelu $\eta_{w\text{sr}}$ w zależności od kąta ustawienia szczelin wlotowych γ pokazany jest na rys. 10. Z wykresu tego widać, że wartość współczynnika $\eta_{w\text{sr}}$ osiąga swą maksymalną wartość, gdy kąt γ jest dodatni, a minimalną kiedy kąt γ jest ujemny. Wartość maksymalna współczynnika $\eta_{w\text{sr max}} = 61,3\%$ uzyskana została dla kąta ustawienia szczelin wlotowych $\gamma = 15^\circ$. Należy zwrócić uwagę, że uzyskany współczynnik $\eta_{w\text{sr}}$ jest prawie jednakowy dla $\gamma = 15^\circ$ i $\gamma = 30^\circ$.

Na podstawie wyników badań przeprowadzonych na modelu możemy wyprowadzić następujące wnioski:

1. W przestrzeni pomiarowej modelu zawsze występują zakłócenia, a więc w odniesieniu do konkretnego silnika można również przyjąć, że część spalin z poprzedniego obiegu pracy pozostaje w cylindrze nawet po zakończonej wymianie.



Rys.10

2. Kąt ustawienia szczeliny wlotowych ma duży wpływ na ogólną objętość obszaru zaburzeń, a w odniesieniu do silnika, kąt ustawienia szczelin wlotowych wpływa na stopień napełnienia cylindra czystym czynnikiem η_v .

3. W przypadku, kiedy wlot powietrza do cylindra skierowany jest od tłoka, nad jego denkiem zawsze powstaje obszar zawirowań, kiedy natomiast wlot powietrza skierowany jest na tłok, zawirowanie nad denkiem zanika.

4. Najwyższą wartość współczynnika wymiany czynnika η_w osiągniemy wówczas, gdy wlot powietrza do cylindra będzie skierowany pod kątem $\gamma = 15^\circ$.

Należy zaznaczyć, że w powyższych rozważaniach nie uwzględniono możliwości poprawienia wielkości napełniania cylindra na skutek występowania ruchu wirowego w cylindrze (wokół osi cylindra); ruch ten może wydatnie zmniejszyć przyścienne obszary zaburzeń. W pierwszym etapie przeprowadzonych prób ograniczono się jedynie do przepływu płaskiego - dwuwymiarowego, uważając go jako przypadek przepływu osiowo-symetrycznego.