

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

87

WARSZAWA - POZNAŃ 1984

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with/special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA - EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK · KAZIMIERZ STELLER
ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY - CHAIRMAN) · JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1984

Printed in Poland

ISBN 83-01-05677-0

ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 300 + 90 egz.	Oddano do składania 30 XI 1983 r.
Ark. wyd. 10,25. druk. 9,5	Podpisano do druku 3 IX 1984 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g, 70×100	Druk ukończono we wrześniu 1984 r.
Cena zł 120,-. A-12/542.	Zamówienie nr 160/36.

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

ADAM GOLISZEK*, DANUTA WERSZKO*

Wrocław

Wpływ stopnia wymieszania strumieni gazu w komorze mieszania strumienicy poddźwiękowej na wskaźniki pracy dyfuzora

Przeanalizowano mechanizm strat zachodzących podczas sprężania strumienia gazu w dyfuzorze jednofazowej strumienicy poddźwiękowej. Droga doświadczalną wyznaczono wskaźniki pracy i wysokość strat w dyfuzorze przy różnych parametrach geometrycznych i aerodynamicznych strumienicy. Podano zależności wyrażające wpływ stopnia wymieszania strumieni powietrza w komorze mieszania strumienicy na przebieg sprężania w dyfuzorze. Wykazano, że dokładniejsze wymieszanie strumieni w komorze zwiększa skuteczność pracy dyfuzora, co wyraża się wzrostem wszystkich jego wskaźników pracy.

Wykaz oznaczeń

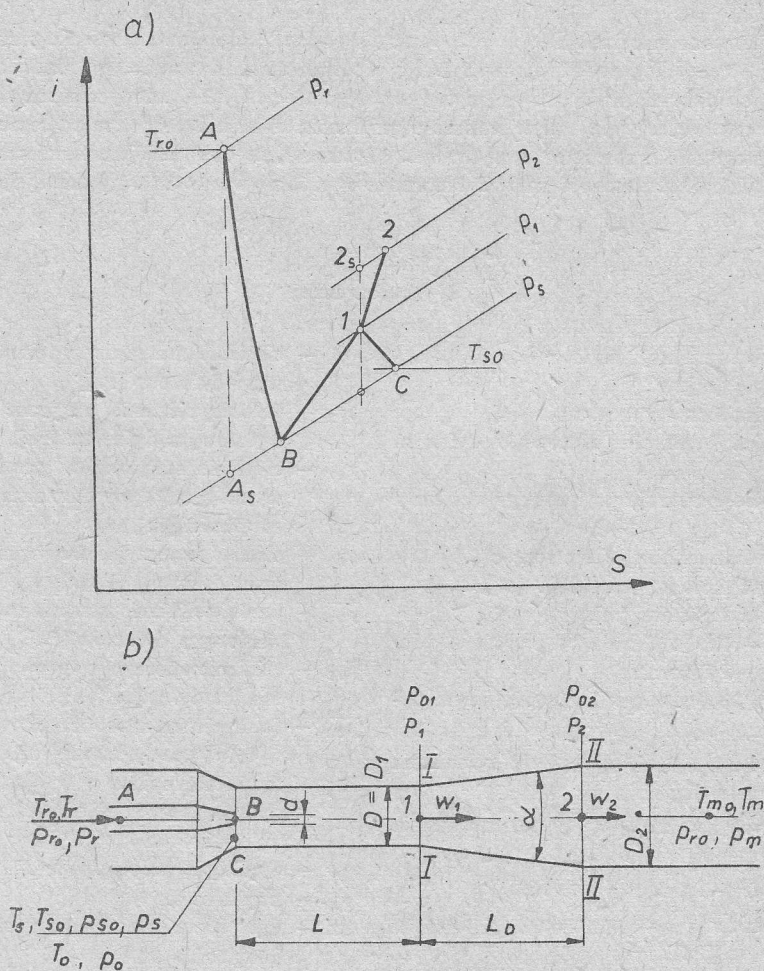
- | | |
|---|---|
| d – średnica przekroju wylotowego dyszy napędowej [m], | p_2 – ciśnienie statyczne w przekroju wylotowym dyfuzora [Pa], |
| D – średnica komory mieszania [m], | $\bar{p}_2$ – średnie ciśnienie statyczne w przekroju wylotowym dyfuzora [Pa], |
| D_1 – średnica przekroju wlotowego dyfuzora [m], | p_{2T} – ciśnienie statyczne w przekroju wylotowym dyfuzora w warunkach teoretycznego sprężania [Pa], |
| D_2 – średnica przekroju wylotowego dyfuzora [m], | p_{01} – ciśnienie spoczynkowe w przekroju wlotowym dyfuzora [Pa], |
| k – wykładnik adiabaty (izentropy), | $\overline{p_{01}}$ – średnie ciśnienie spoczynkowe w przekroju wlotowym dyfuzora [Pa], |
| L – długość komory mieszania [m], | p_{02} – ciśnienie spoczynkowe w przekroju wylotowym dyfuzora [Pa], |
| L_D – długość dyfuzora [m], | $\overline{p_{02}}$ – średnie ciśnienie spoczynkowe w przekroju wylotowym dyfuzora [Pa], |
| $La_1 = w/w_{kr}$ – liczba Laval'a w przekroju wlotowym dyfuzora, | Re_1 – liczba Reynoldsa w przekroju wlotowym dyfuzora, |
| M_1 – liczba Macha w przekroju wlotowym dyfuzora, | $u = \dot{m}_s/\dot{m}_r$ – stosunek ejekcji, |
| $\dot{m}_r$ – masowe natężenie przepływu strumienia roboczego [kg/s], | w – prędkość przepływu [m/s], |
| $\dot{m}_s$ – masowe natężenie przepływu strumienia zasysanego [kg/s], | w_{kr} – prędkość krytyczna [m/s], |
| $n = (D_2/D_1)^2$ – moduł dyfuzora, | α – kąt rozwarcia (rozbieżności) dyfuzora [stopień], |
| p_1 – ciśnienie statyczne w przekroju wlotowym dyfuzora [Pa], | ρ – gęstość gazu [kg/m ³], |
| $\bar{p}_1$ – średnie ciśnienie statyczne w przekroju wlotowym dyfuzora [Pa], | $\Phi = (D/d)^2$ – moduł strumienicy. |

* Instytut Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej.

1. Wstęp

Ważnym elementem strumienicy jest poddźwiękowy dyfuzor, w którym następuje sprężanie wymieszanego w komorze mieszania strumienia gazu, czemu towarzyszy wzrost ciśnienia statycznego. Skuteczność pracy dyfuzora rzutuje w sposób istotny na efektywność pracy strumienicy. Przy niedostatecznym wymieszaniu strumieni gazu przed dyfuzorem proces mieszania przenosi się również do dyfuzora zakłócając mechanizm sprężania. Dyfuzory strumienic pracują w specyficznych warunkach i ważnym zagadnieniem jest określenie dla nich wpływu stopnia wymieszania strumieni gazu w komorze mieszania strumienicy na efektywność ich pracy, co było celem przeprowadzonych badań.

Na rysunku 1 pokazano dyfuzor jako element składowy strumienicy z wprowadzonymi oznaczeniami oraz interpretację przebiegu procesów zachodzących w strumienicy

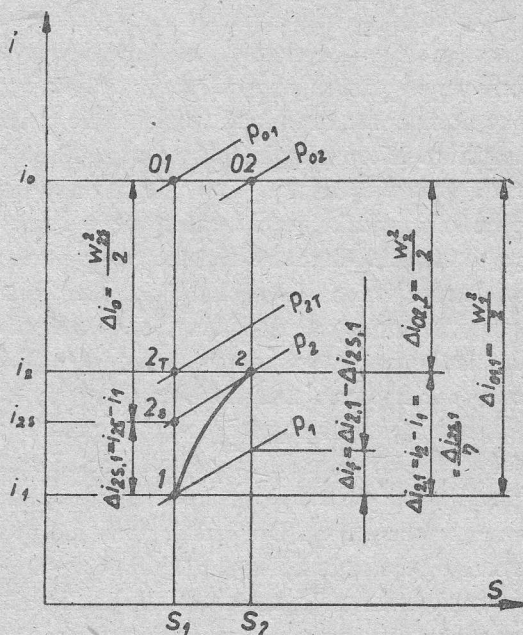


Rys. 1. Przebieg procesów zachodzących w strumienicy; a) interpretacja procesów na wykresie $i-s$, b) schemat strumienicy z oznaczeniami stosowanymi w tekście

na wykresie $i-s$ (i – entalpia, s – entropia). W poddźwiękowym dyfuzorze rozszerzającym się następuje zamiana energii kinetycznej (prędkości) przepływającego gazu w energię potencjalną (ciśnienia). Przebieg tego procesu w dyfuzorze strumienicy pokazano schematycznie w układzie współrzędnych $i-s$ na rysunku 2 [5]. Wraz ze spadkiem prędkości zmniejsza się wielkość liczby Reynoldsa, a więc zwiększa się grubość warstwy przyściennej.

Rys. 2. Proces hamowania gazu w dyfuzorze w układzie współrzędnych $i-s$

1 – stan powietrza przed dyfuzorem, 2 – stan powietrza za dyfuzorem, 01 – punkt określony parametrami spiętrzania (pełnego hamowania) powietrza przed dyfuzorem, 02 – parametry pełnego hamowania za dyfuzorem, 2s, 2T – stan powietrza za dyfuzorem w przypadku teoretycznego hamowania izentropowego, $\Delta i_{01,1}$ – energia kinetyczna na wlocie, $\Delta i_{02,2}$ – energia kinetyczna na wylocie, $\Delta i_{2,1}$ – przyrost energii potencjalnej (spręż) równy teoretycznemu spadkowi energii kinetycznej, $\Delta i_{2,1}$ – rzeczywisty spadek energii kinetycznej, Δi_f – straty energii w dyfuzorze



W warstwie tej szybciej maleje energia kinetyczna niż w rdzeniu płynu, co sprzyja odrywaniu strumienia od ścianki. Wzrost turbulencji i odrywanie są przyczyną zawirowań i strat energetycznych powodujących zamianę energii w ciepło. Największe straty energetyczne występują przy trwałym oderwaniu strumienia, na co wpływa szereg czynników, m. in. burzliwość strumienia na wlocie do dyfuzora, co wiąże się z wyrównaniem pola prędkości w komorze mieszania. W praktyce, w większości przypadków, zwłaszcza w dyfuzorach strumienicy, następuje odrywanie strumienia.

Obliczanie dyfuzorów na podstawie rozważań teoretycznych nie jest możliwe, gdyż oparte one są na teorii warstwy przyściennej, przydatnej jedynie w przypadkach dyfuzorów, w których nie występuje zjawisko odrywania strumienia, charakteryzujących się małym kątem rozwarcia. Najczęściej obliczenia prowadzi się na podstawie jednowymiarowego modelu ruchu z wykorzystaniem danych eksperymentalnych w postaci wskaźników pracy [2, 3, 6, 9].

Metoda taka wymaga jednak weryfikacji tych wskaźników, szczególnie w przypadku dyfuzorów pracujących w warunkach nietypowych, jak dyfuzory strumienicy. Literatura zawiera zbyt mało danych odnośnie do dyfuzorów strumienicy, nie ma również jednoznacznych ustaleń odnośnie do podstawowych parametrów strumienicy i dyfuzora, stąd wiele

badan jest nieporównywalnych i nie można ich wykorzystać w odniesieniu do innych układów. W tej sytuacji podjęcie badań doświadczalnych służących pogłębieniu wiedzy o pracy dyfuzora w strumienicy wydawało się celowe i uzasadnione.

2. Wpływ długości komory mieszania strumienicy na straty w dyfuzorze

W komorze mieszania strumienicy następuje wzajemne oddziaływanie strumienia zasilającego i zasysanego. Mieszanie polega na wyrównywaniu się wszystkich parametrów w poprzecznym przekroju strumienia przepływającego przez komorę. Proces powinien przebiegać wzdłuż komory aż do ustalenia się profilu prędkości charakteryzującego przepływ burzliwy. Nierównomierność pola prędkości w przekroju wlotowym dyfuzora rzutuje na ruch gazu w dyfuzorze [8]. W strumienicy istnieją warunki sprzyjające deformacji profilu prędkości, wynikające z łączenia się w komorze mieszania strumieni o wyrażnie różnych prędkościach. Nierównomierność pola prędkości na końcu komory mieszania jest funkcją wielu czynników, takich jak współczynnik ejection (u), moduł strumienicy (Φ), jednak w decydującym stopniu zależy od długości komory mieszania (L lub względnej długości L/D). Zbyt krótka komora nie pozwala na osiągnięcie profilu charakteryzującego przepływ burzliwy, co sprzyja odrywaniu strumienia od ściany dyfuzora i obniża jego sprawność [9]. Zbyt długa komora mieszania powoduje z kolei wzrost oporów tarcia, obniżając efekt działania układu. Określenie drogi, na której w komorze mieszania ulega stabilizacji profil prędkości można przeprowadzić na podstawie stosunku prędkości maksymalnej w osi do prędkości średniej przepływu $w_{\max}/w_{\text{sr}}$. Uniwersalny rozkład prędkości przy przepływie burzliwym w prostej rurze o przekroju kołowym [1] ujemuje wartości $w_{\max}/w_{\text{sr}}$ rozwinętego profilu burzliwego w funkcji liczby Re , które dla zakresu liczb Re na wlocie dyfuzora $Re_1 = (0,32 \div 0,61) \cdot 10^6$ osiąganych w trakcie pomiarów zawierają się w granicach $w_{\max}/w_{\text{sr}} = 1,16 \div 1,15$.

Wpływ nierównomierności strumienia [11] na charakterystyki dyfuzorów wyraża się wieloma współczynnikami (nierównomierności prędkości, ilości ruchu, energii kinetycznej), które nawet razem wzięte nie charakteryzują jeszcze w pełni przepływu w przekroju wlotowym, nie uwzględniają bowiem kształtu profilu prędkości.

Obecne dane literaturowe nie pozwalają na pełne scharakteryzowanie procesu sprężania gazu w dyfuzorze, bowiem wpływ warunków wlotowych wyrażonych nierównomiernościami parametrów termodynamicznych gazu, (Re_1 , La_1 (M_1)), wielkości charakterystycznych strumienicy (Φ , L/D , u) oraz innych czynników oddziałujących na wskaźniki pracy dyfuzora, rozpatrywano najczęściej oddzielnie, na podstawie różnych wskaźników i metod, często nieporównywalnych między sobą. Brak takich danych przyczynił się do podjęcia tego zagadnienia przy okazji badań procesu mieszania w komorze mieszania strumienicy.

Zasadniczym celem podjętych badań doświadczalnych było więc porównanie teoretycznych i eksperymentalnych danych literaturowych z efektami pracy dyfuzora strumienicy doświadczalnej. Wskaźniki pracy i wysokość strat w dyfuzorze wyznaczono doświadczalnie na podstawie pomiarów rozkładów prędkości, ciśnień całkowitych i statycznych w przekrojach poprzecznych komory mieszania przed dyfuzorem i rurociągu odpływowego za dyfuzorem, dla strumienicy o różnych modułach Φ , przy różnych stosunkach prędkości strumieni (wtórnego do zasilającego) na wlocie do komory (w_s/w_r), różnych stosunkach ejection $u = \dot{m}_s/\dot{m}_r$, przy różnych względnych długościach komór mieszania L/D .

3. Stanowisko badawcze i zakres badań

Dyfuzor będący przedmiotem rozważań był elementem strumienicy doświadczalnej wmontowanej w stanowisko badawcze służące do określenia długości drogi mieszania strumieni gazu (powietrza) dla różnych parametrów (czynniki) geometrycznych i termodynamicznych. Strumienica doświadczalna była strumienicą gazową poddźwiękową ze zbieżną dyszą roboczą, której płaszczyzna wypływu pokrywała się z płaszczyzną wlotu do cylindrycznej komory mieszania o stałym przekroju. Strumień główny przyspieszany w dyszach stożkowo-cylindrycznych zasysał strumień wtórny dopływający do komory poprzez dyszę pierścieniową typu Witoszyńskiego, przy stosunkach ciśnień obu strumieni w granicach $1,8 \div 2$ w szerokim zakresie zmian ich stosunków prędkości. Stosunek sprężania (ciśnienie strumienia wymieszanego za dyfuzorem do ciśnienia strumienia zasysanego) strumienicy zawierał się w granicach $1,08 \div 1,30$. Cylindryczna komora mieszania o stałej średnicy $D=41,5$ mm oraz zastosowane dysze robocze o średnicach $d=17,5, 22,0$ i $26,0$ mm pozwalały na uzyskanie modułu strumienicy (pole przekroju poprzecznego komory mieszania do pola przekroju wylotu dyszy napędowej) o wartościach $\Phi=5,63, 3,56$ i $2,55$.

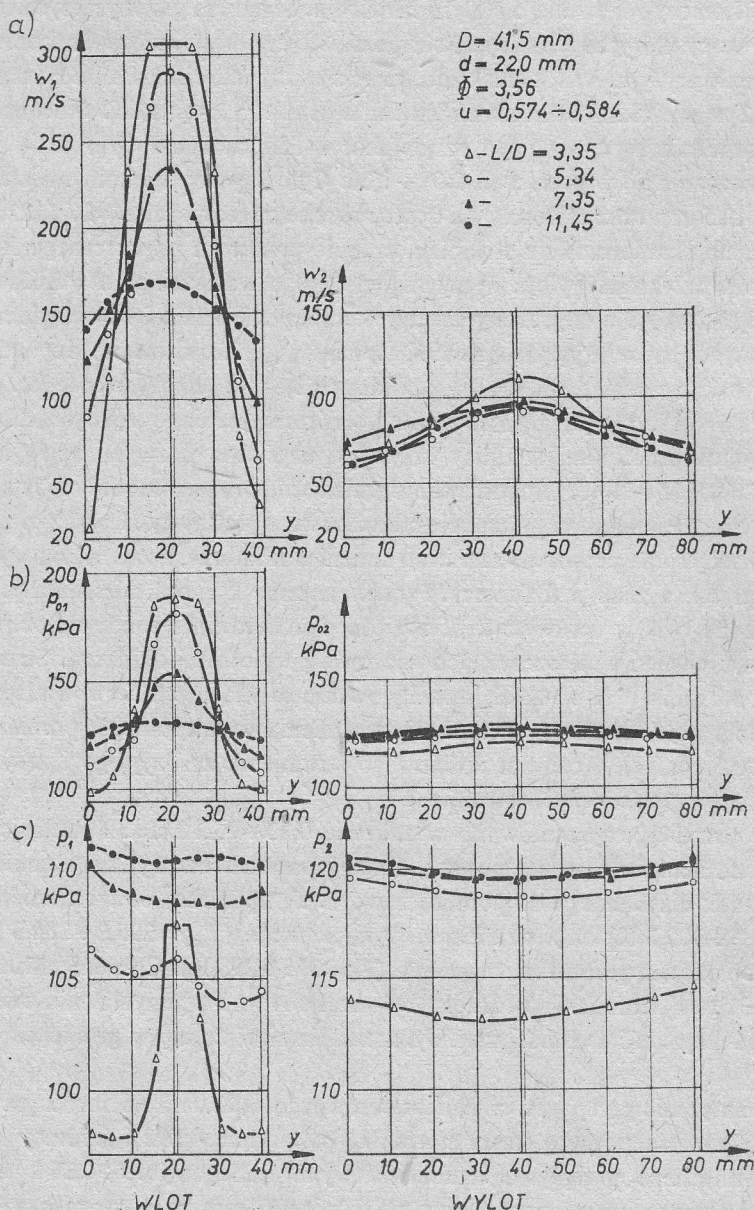
Badany dyfuzor był umieszczony między komorą mieszania i rurociągiem o średnicy $D_2=81,0$ mm, odprowadzającym strumień wymieszany. Zastosowano do badań dyfuzor (optymalny) o kącie rozwarcia $\alpha=8^\circ$, module $n=3,81$ ($n=D_2^2/D_1^2$) oraz bezwymiarowej długości $L_D/D=6,87$. Dzięki zastosowaniu komór mieszania o różnych długościach L (będących wielokrotnościami średnicy komory), uzyskano bezwymiarowe ich długości $L/D=3,35, 5,34, 7,35$ i $11,45$. Długości komór mieszania oraz ich moduły były parametrami geometrycznymi zmienianymi w trakcie pomiarów, wpływającymi wraz z parametrami termodynamicznymi na proces mieszania strumieni w komorze, a zatem i na wysokość strat w procesie sprężania gazu w dyfuzorze. Prostka za oraz komora mieszania przed dyfuzorem zaopatrzone były w otwory z króćcami do wprowadzania sondy umożliwiającej pomiary rozkładu ciśnień w płaszczyznach wlotowej i wylotowej dyfuzora. Strumienica badawcza wmontowana była w układ rurociągów umożliwiających doprowadzenie zasilającego strumienia powietrza i odprowadzenie strumienia wymieszanego, pomiary natężenia ich przepływu, regulację stosunku ilościowego strumienia zasilającego i zasysanego, pomiary parametrów termicznych strumieni.

Ciśnienie przed dyszą regulowano w zakresie $0,13 \div 0,21$ MPa. Regulację stosunków masowych strumieni uzyskiwano poprzez zmianę parametrów wyjścia strumienia wymieszanego wskutek dławienia go za pomocą zaworu. Temperatury obu strumieni (roboczego $T_{r0}=293,5 \div 300,3$ K) oraz strumienia wymieszanego ($T_{m0}=295,2 \div 300,3$ K) w czasie badań były bliskie temperaturom otoczenia ($T_0=295 \div 298$ K). Ciśnienie strumienia zasysanego przed dyszą strumienia wtórnego było stałe, równe w przybliżeniu ciśnieniu barometrycznemu. Prędkość średnia przed dyfuzorem zmieniała się w granicach $w_{1sr}=107 \div 252$ m/s.

Masowe natężenie przepływu strumienia głównego mierzono na rurociągu dolotowym o średnicy 52 mm za pomocą kryzy normalnej o module 0,592 i średnicy $d_{z1}=40$ mm.

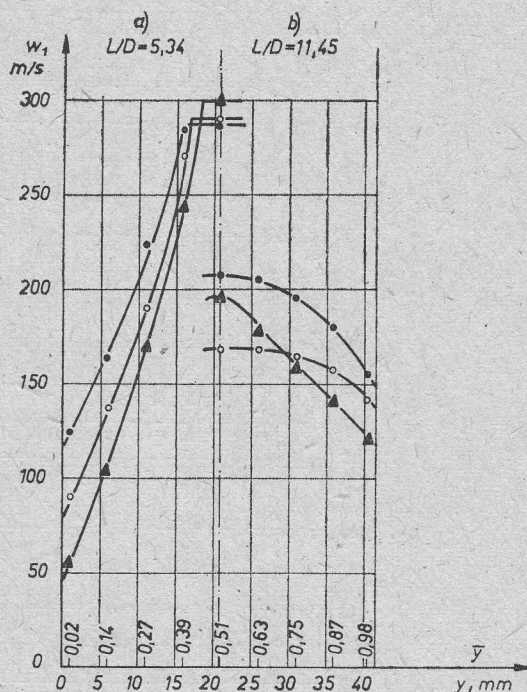
Masowe natężenie przepływu strumienia wymieszanego ($0,19 \div 0,36$ kg/s) mierzono na rurociągu wylotowym ze strumienicy o średnicy 81 mm za pomocą kryzy normalnej o module 0,381 i średnicy $d_{z2}=50$ mm. Pomiary temperatur i ciśnień statycznych przepro-

wadżono dla strumienia roboczego przed wlotem do dyszy roboczej (T_r, p_r), dla strumienia zasysanego w komorze podchwytyjącej (T_s, p_s) i dla strumienia wymieszanego za dyfuzorem (T_m, p_m). Do pomiaru temperatury stosowano termoelementy NiCr–Ni, ciśnienie natomiast mierzono za pomocą manometrów U-rurkowych wypełnionych CHBr_3 lub rtęcią, w zależności od wielkości mierzonego ciśnienia. Rozkłady ciśnień statycznych i całkowitych (spoczynkowych) mierzono za pomocą sondy Prandtla o średnicy 2 mm, którą



Rys. 3. Rozkład w osi płaszczyzny wlotowej i wylotowej dyfuzora; a) prędkości, b) ciśnień całkowitych, c) ciśnień statycznych

	a)		b)	
Φ	Re	u	Re	u
$\blacktriangle=5,62$	$4,30 \cdot 10^5$	1,409	$4,46 \cdot 10^5$	1,467
$\circ=3,56$	$4,31 \cdot 10^5$	0,574	$4,29 \cdot 10^5$	0,574
$\bullet=2,55$	$5,10 \cdot 10^5$	0,356	$5,22 \cdot 10^5$	0,386
	$w_{j1}=160 \div 180 \text{ m/s}$		$w_{j2}=150 \div 180 \text{ m/s}$	

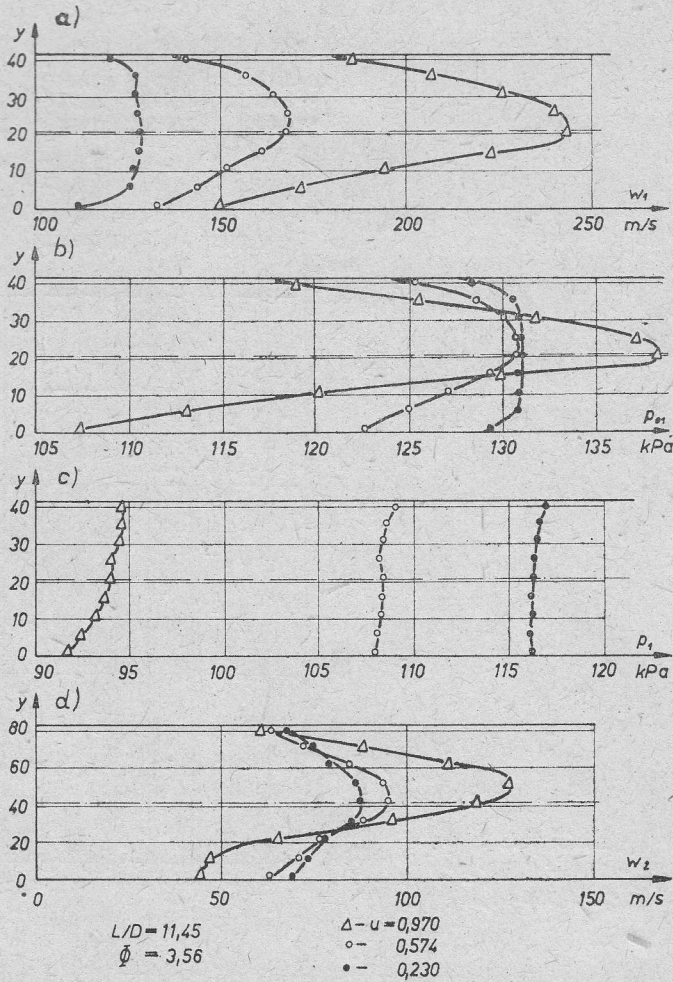


Rys. 4. Rozkład prędkości dla $\Phi = 2,55 \div 5,62$, $Re_1 = (0,43 \div 0,52) \cdot 10^6$, $w_{1st} = 150 \div 180 \text{ m/s}$, $u = 0,356 \div 1,467$

wprowadzano przez specjalne otwory z króćcami do mocowania sondy. Przyjęto, że mierzone ciśnienie całkowite jest równoznaczne z ciśnieniem spoczynkowym, ponieważ dla badanych przepływów błąd wynikający z tego założenia nie przekracza 1% [4]. Pomiar rozkładów parametrów strumieni przed i za dyfuzorem przeprowadzano w odległości x od płaszczyzny wlotowej dyfuzora, co odpowiadało bezwymiarowym odległościom od wlotu $\bar{x} = x/L_D = -0,18$ przed dyfuzorem i $\bar{x} = 1,02$ za dyfuzorem. Parametry te mierzono wzdłuż średnicy w odległości y od ścianki komory mieszania i rurociągu za dyfuzorem, uzyskując dla obu przekrojów wlotowego i wylotowego dyfuzora po 9 punktów pomiarowych.

4. Omówienie wyników badań

Ze względu na dużą liczbę wskaźników pracy dyfuzora podawaną w literaturze przedmiotu, zdecydowano się na wybór najbardziej uniwersalnych i najpełniej charakteryzujących proces sprężania. Dla badanej strumienicy najbardziej przejrzystym wskaźnikiem jest udział strat w dyfuzorze zdefiniowany współczynnikami:



Rys. 5. Rozkład parametrów w osi przekroju wlotowego dla komory; a) prędkości, b) ciśnienia całkowitego, c) ciśnienia statycznego, d) prędkości w przekroju wylotowym

– współczynnikiem strat ciśnienia [2, 6, 12]

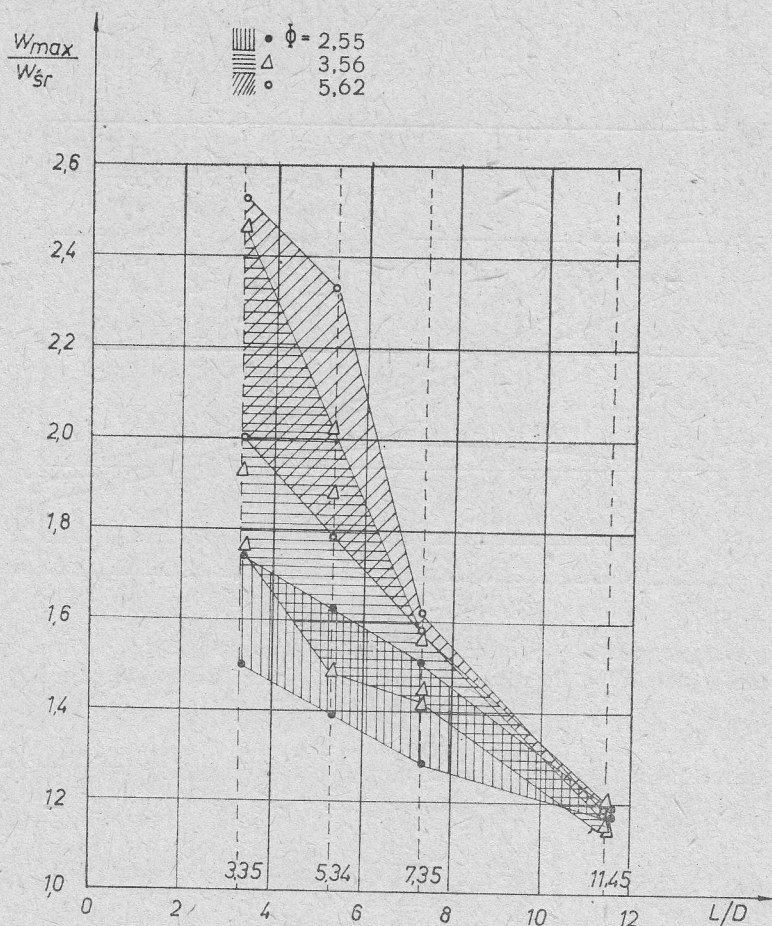
$$\delta_d = \frac{\bar{p}_{02}}{\bar{p}_{01}} \quad (1)$$

– względnym spadkiem ciśnienia (całkowitego) [2, 6]

$$\frac{\Delta p_0}{\bar{p}_{01}}, \quad (2)$$

gdzie $\bar{p}_{01}$, $\bar{p}_{02}$ – średnie wartości ciśnień spoczynkowych w przekroju wlotowym i wylotowym; $\Delta p_0 = \bar{p}_{01} - \bar{p}_{02}$.

Z zależności (2) można wyznaczyć współczynnik strat dyfuzora ζ dla różnych prędkości



Rys. 6. Wpływ długości komory mieszania $L/D=3,35 \div 11,45$ i jej modułu $\Phi=2,55 \div 6,62$ na profil prędkości w przekroju wlotowym dyfuzora (stosunek prędkości maksymalnej do średniej)

wlotowych (La_1) w zakresie przepływów poddźwiękowych na podstawie znanych związków [2, 7]

$$\frac{\Delta p_0}{p_{01}} = \frac{k}{k+1} La_1^2 \cdot \zeta = \frac{k \cdot M_1^2}{2 + (k-1)M_1^2} \cdot \zeta. \quad (3)$$

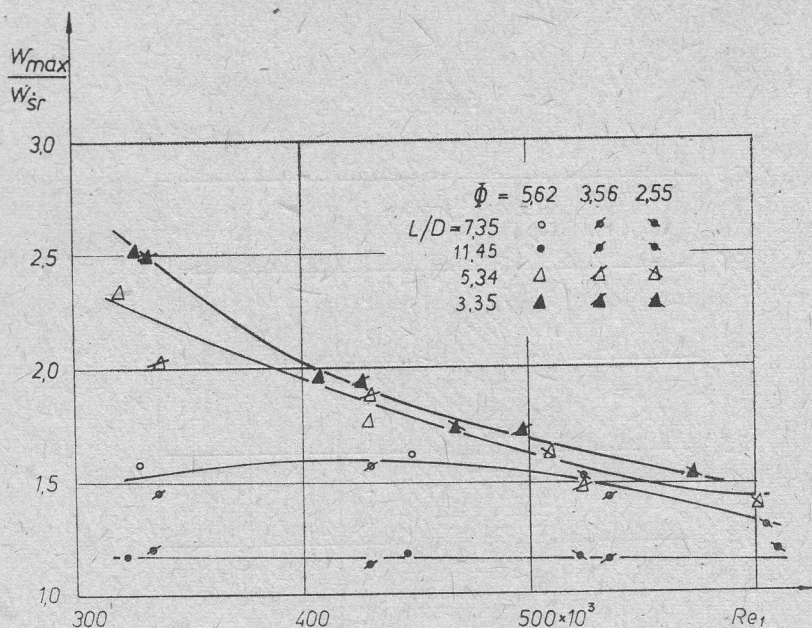
Skuteczność procesu sprężania w dyfuzorze określono współczynnikiem przyrostu ciśnienia (sprężu) [2, 4, 9]

$$\delta = \frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1}, \quad (4)$$

gdzie $\bar{p}_1$, $\bar{p}_2$ – średnie wartości ciśnienia statycznego w przekroju wlotowym i wylotowym.

Współczynnik ten dla procesu sprężania bez udziału strat energii ($p_{02}=p_{01}$) osiąga wartości maksymalne określone zależnością (dla dyfuzorów końcowych $p_2 \approx p_{02}$) [4]

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{k-1}{2} M_1^2 + 1 \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (5)$$



Rys. 7. Wpływ charakteru przepływu strumienia powietrza w przekroju wlotowym dyfuzora (Re_1) na profil prędkości wlotowej (w_{max}/w_{sr}) przy komorach mieszania o różnej długości $L/D=3,35 \div 11,45$ i module $\Phi=2,55 \div 5,62$

Podaną wyżej zależność (5) można porównać z wynikami badań wykorzystując współczynniki $\delta(4)$ i $\delta_d(1)$ [2]

$$\frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1} \cdot \frac{\bar{p}_{01}}{\bar{p}_{02}} = \frac{\bar{p}_{02}}{\bar{p}_{01}} = \frac{\delta}{\delta_d} \approx \frac{p_2 T}{p_1} \quad (6)$$

dla $\rho = \text{const}$ można przyjąć

$$\frac{p_2 T}{p_1} = \frac{p_2 + \Delta p_0}{p_1} \quad (7)$$

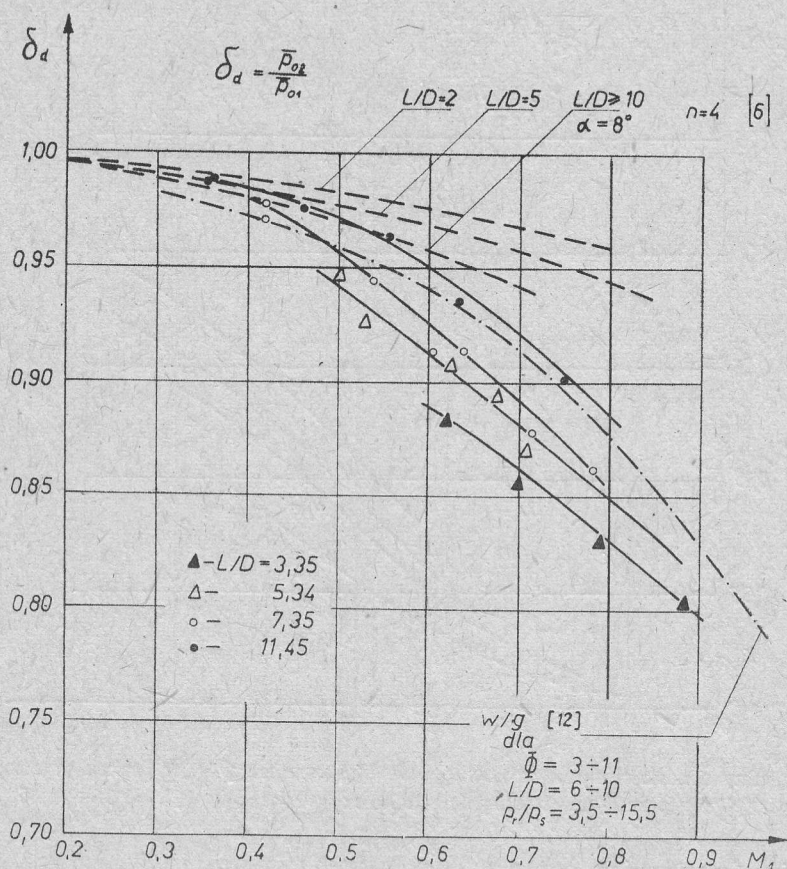
Często stosowaną, lecz niezbyt przejrzystą charakterystyką wykorzystywaną do określenia przyrostu ciśnienia statycznego w dyfuzorze

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \eta_d \cdot (w_1^2 - w_2^2) \quad \text{dla } \rho = \text{const} [10], \quad (8)$$

jest sprawność dyfuzora, którą zdefiniowano

$$\eta_d = \frac{\bar{p}_2 - \bar{p}_1}{(\bar{p}_{01} - \bar{p}_1) + (\bar{p}_{02} - \bar{p}_2)} = \frac{\Delta p}{\Delta p + \Delta p_0} \quad (9)$$

Zależność ta jest słuszna głównie dla $\rho = \text{const}$ zatem sporządzono ją i wykorzystano jedynie dla celów poglądowych. Dla czynnika ściśliwego należy uwzględnić zmianę gęstości co jest szczególnie ważne dla wyższych wartości M_1 (La_1). Dla dyfuzorów końcowych

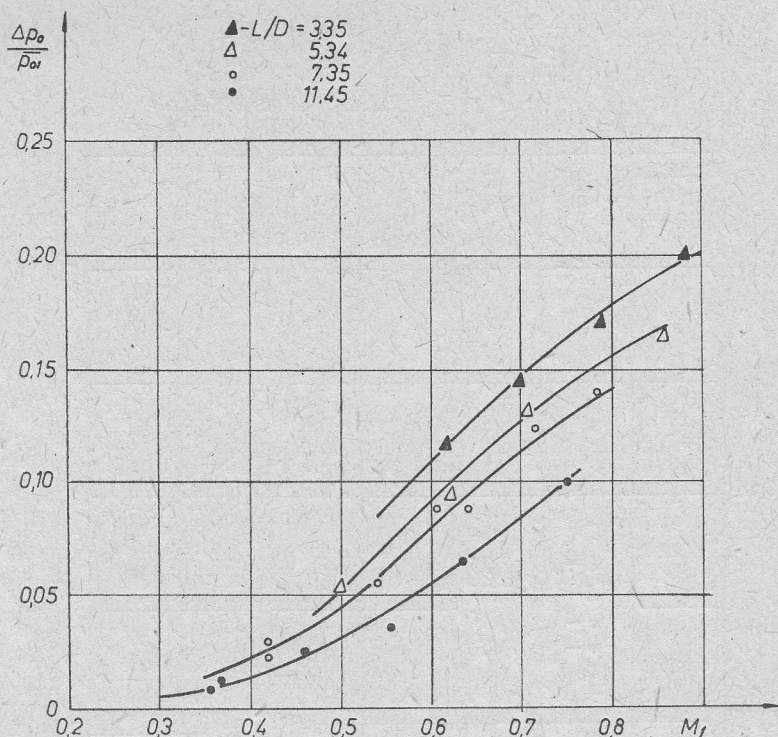


Rys. 8. Przebieg zmian współczynnika strat ciśnienia $\delta_d = \bar{p}_{02}/\bar{p}_{01}$ w funkcji prędkości wlotowej $M_1(La_1)$ dla komór mieszania o różnych długościach $L/D = 3,35 \div 11,45$

($p_2 \approx p_{02}$) sprawność można obliczyć [9] z wzoru

$$\eta_d = 1 - \frac{2}{k-1} \frac{1}{M_1^2} \left[\left(\frac{p_{01}}{p_{02}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = 1 - \frac{\left(\frac{p_{01}}{p_{02}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\left(\frac{p_{01}}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \quad (10)$$

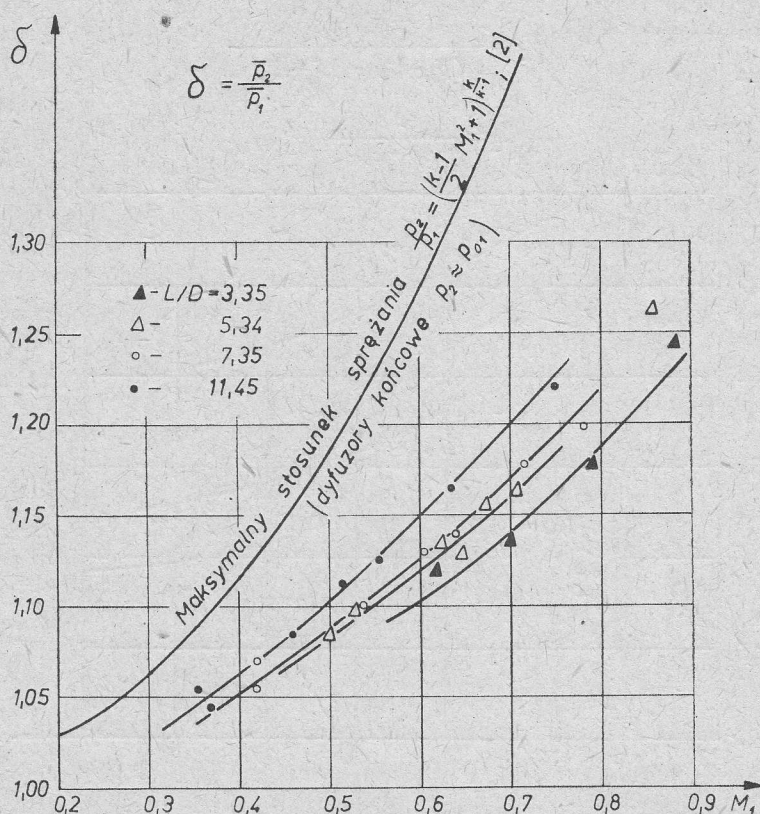
Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w postaci graficznej określając w przekrojach poprzecznych komór mieszania przed dyfuzorem i rurociągu odpływowego za dyfuzorem, prostopadłych do kierunku przepływu, rozkłady prędkości, ciśnień całkowitych i statycznych dla wszystkich badanych komór mieszania. Średnie wartości ciśnień w przekrojach wlotowych i wylotowych dyfuzora uzyskano przez całkowanie (planimetrowanie) profili rozkładów ciśnień w przekrojach pomiarowych. Na rysunku 3 pokazano rozkład



Rys. 9. Względny spadek ciśnienia całkowitego w dyfuzorze ($\Delta p/\bar{p}_{01}$) w funkcji prędkości wlotowej $M_1(La_1)$ przy różnych długościach komory mieszania $L/D=3,35 \div 11,45$

w przekroju wlotowym i wylotowym dyfuzora prędkości i ciśnienia dla jednej z komór mieszania o module $\Phi=3,56$, przy prawie stałym stosunku ejectivej $u=0,574 \div 0,584$.

Nierównomierność rozkładu prędkości i ciśnienia przed dyfuzorem uzyskano drogą zastosowania komór mieszania o różnych długościach L/D . Widać, że nierównomierność ta wzrasta ze zmniejszeniem długości komory, przy czym dla bardzo krótkich komór $L/D=3,35$ i $5,34$ wyraźnie zaznacza się jądro strumienia z dużymi prędkościami przepływu i ciśnieniami całkowitymi. Jest to strefa wyraźnie zdominowana przez strumień roboczy, a przepływ jest mocno rozwarstwiony w wyniku niezakończenia procesu mieszania. Dla podanych warunków przepływu nawet komora mieszania o długości $L/D=11,45$ nie daje jeszcze na wlocie do dyfuzora profilu prędkości charakteryzującego przepływ burzliwy. W płaszczyźnie przekroju za dyfuzorem zanika wpływ L/D na profil prędkości i ciśnienia, jedynie dla bardzo krótkich komór zaznacza się jeszcze jądro strumienia. Potwierdza to rysunek 4 sporządzony dla zbliżonych do siebie średnich prędkości przepływu w przekroju wlotowym $w_{1sr}=150 \div 180$ m/s i długości komory mieszania $L/D=5,34$ i $11,45$. Rysunek ten przedstawia rozkład prędkości w przekroju wlotowym dyfuzora dla $\Phi=5,62 \div 2,55$, $Re=(0,43 \div 0,52) \cdot 10^6$ i $u=0,356 \div 1,467$. Dla krótkiej komory profile prędkości są mocno wydłużone, charakterystyczne dla niezakończonego jeszcze procesu mieszania, przy czym profil prędkości wydłuża się ze wzrostem modułu komory Φ i stosunku ejectivej u . Dla komór dłuższych zanika wpływ Φ i u na warunki wlotowe do dyfuzora. Ponieważ trudno z rysunku tego określić

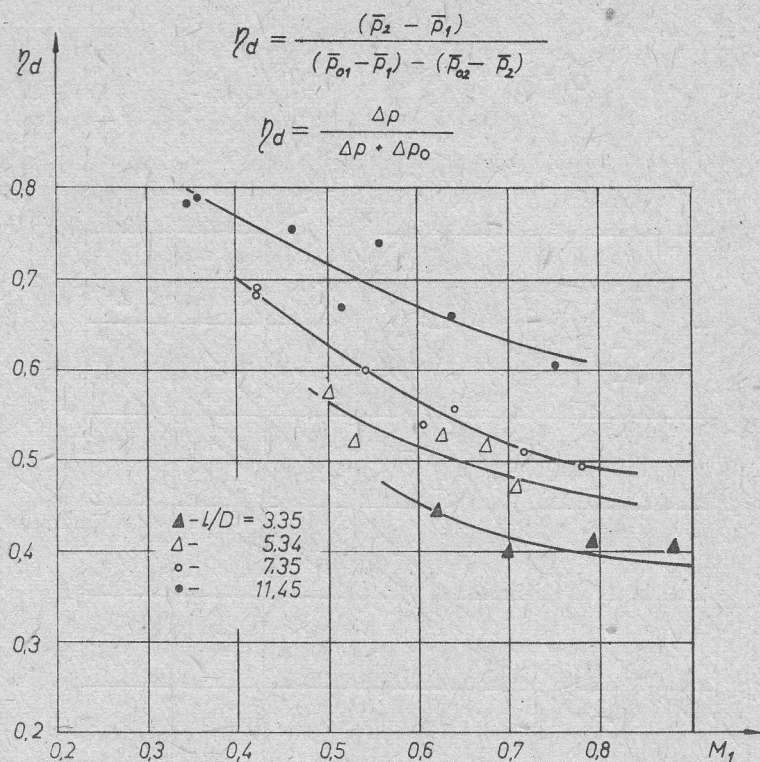


Rys. 10. Przebieg zmian wartości współczynnika przyrostu ciśnienia w dyfuzorze (sprężu) $\delta = \bar{p}_2 / \bar{p}_1$ w funkcji prędkości wlotowej dla komór o różnych długościach $L/D = 3,35 \div 11,45$

oddzielenie wpływu modułu Φ i stosunku ejekcji u wykonano rysunek 5, na którym pokazano rozkład prędkości i ciśnien w przekroju wlotowym dla jednej długości komory $L/D = 11,45$ o module $\Phi = 3,56$, przy stosunkach ejekcji w zakresie $u = 0,23 \div 0,97$. Z analizy rozkładów wynika, że ze wzrostem u rośnie nierównomierność prędkości wlotowej strumienia. Na rysunku 5d pokazano profile prędkości w przekroju wylotowym dyfuzora, które na skutek tarcia i odrywania od ścian ulegają deformacji.

Charakter przepływu strumienia na wlocie do dyfuzora najlepiej charakteryzują wykresy przedstawione na rysunkach 6 i 7. Na rysunku 6 pokazano zależność stosunku prędkości maksymalnej do średniej w przekroju wlotowym, w funkcji długości komory mieszania wyrażonej sympleksem L/D oraz jej modułu Φ , a na rysunku 7 zależność tę w funkcji długości L/D i liczby Reynoldsa Re_1 . Z rysunku 6 wynika jednoznacznie, że profile prędkości wlotowej zależą silnie od modułu Φ i parametru L/D , a tym samym od długości komory.

Wzrost modułu wyraźnie deformuje (wydłuża) profil prędkości (wzrastają wartości $w_{1\max}/w_{1sr}$), przy czym wpływ modułu zanika ze wzrostem długości komory mieszania. Dla długich komór profile są zdecydowanie bardziej równomierne i prawie niezależne od Φ . Rysunek 7 daje możliwość porównania charakteru przepływu z przepływem burzliwym w rurze prostej. Potwierdza on poprzednie spostrzeżenia, że w miarę wydłużania komory



Rys. 11. Sprawność dyfuzora η_d w funkcji prędkości wlotowej $M_1(La_1)$ i długości komory mieszania $L/D=3,35 \div 11,45$

i zwiększania Re_1 wartości $w_{1\max}/w_{1sr}$ maleją, jednak i tak są wyższe niż dla rury prostej [1]. Rysunki 3 ÷ 7 nie charakteryzują jeszcze procesu przemiany energii zachodzącego w dyfuzorze, dają jedynie możliwość określenia wpływu poszczególnych czynników na warunki wlotowe dyfuzora. Wskaźniki pracy dyfuzora przedstawiono w postaci wykresów na rysunkach 8 ÷ 11. Na rysunku 8 pokazano przebieg zmian współczynnika strat ciśnienia $\delta_d = \bar{p}_{02}/\bar{p}_{01}$ w funkcji prędkości wlotowej wyrażonej liczbą M_1 (La_1) dla komór mieszania o różnych długościach. W miarę wzrostu prędkości wlotowej (M_1) rosną straty ciśnienia całkowitego wyrażone spadkiem wartości współczynnika δ_d , przy czym proces utraty energii (ciśnienia) pogłębia się wraz ze zmniejszaniem długości komory. Zaprzeczają temu linia przerywana wrysowane zależności dla $\alpha = 8^\circ$ i $n = 4$ (wg [6]), są one jednak sporządzone dla dyfuzora sieciowego, przy czym L/D oznacza tu długość odcinka wyrównawczego, na początku którego określono parametry wlotowe. Straty na tym odcinku wpływają więc na charakter przebiegu zmian współczynnika δ_d odwrotnie niż wydłużenie komory mieszania w strumienicy. Na rysunku 8 naniesiono również zależność opracowaną przez I. I. Kalmykova [12] dla $\Phi = 3 \div 11$, $L/D = 6 \div 10$ i $p_r/p_s = 3,5 \div 15,5$.

Rysunek 9 przedstawia względny spadek ciśnienia całkowitego $\Delta p_0/\bar{p}_{01}$ w dyfuzorze, w funkcji prędkości wlotowej M_1 (La_1) i długości komory. Potwierdza on spostrzeżenia

poczynione dla rysunku 8, że pełniejsze wymieszanie strumieni osiągnięte drogą wydłużania komory mieszania poprawia efekty pracy dyfuzora zmniejszając straty ciśnienia w nim występujące.

Na rysunku 10 pokazano przebieg zmian wartości współczynnika przyrostu ciśnienia (sprężu) w dyfuzorze $\delta = \bar{p}_2 / \bar{p}_1$ w funkcji prędkości wlotowej dla komór o różnych długościach. Wynika z niego, że dla prędkości poddźwiękowych spręż dyfuzora rośnie z wartościami M_1 (La_1 , Re_1), jednak w miarę zmniejszania długości komory mieszania zależność ta ze wzrostem M_1 odbiega coraz gwałtowniej od maksymalnego stosunku sprężania dla dyfuzorów idealnych [4]. Dane literaturowe [2] wskazują, że w okolicach prędkości okołodźwiękowych $La_1 = 0,95 \div 1,1$ charakterystyki te gwałtownie opadają. Odzwierciedleniem analizy rysunków 8 ÷ 11 jest wykres sprawności dyfuzora η_d w funkcji prędkości wlotowej dla różnych długości komór mieszania pokazany na rysunku 11. Potwierdza on niskie sprawności dyfuzora, wzrastające jednak w miarę wydłużania drogi mieszania strumieni w komorze mieszania strumienicy.

Na uwagę zasługuje fakt, że sprawność dyfuzora ze spadkiem długości komory mieszania do 3,35 maleje nawet do 0,4, a i dla długich komór waha się od 0,8 do 0,6 przy zmianie M_1 od 0,35 do 0,75.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy wyników potwierdza się teza, że stopień wymieszania gazu w komorze mieszania strumienicy rzutuje na wskaźniki pracy dyfuzora hamującego strumień powietrza przy przepływach poddźwiękowych. Dokładniejsze wymieszanie strumieni w komorze zwiększa skuteczność pracy dyfuzora co wyraża się wzrostem wszystkich jego wskaźników pracy. Na bazie danych doświadczalnych stwierdzić można, że skuteczność dyfuzora zależy od tych samych parametrów (czynników), które wpływają na proces mieszania w komorze, a mianowicie: od bezwymiarowej długości komory L/D , która z kolei zależy od modułu Φ (stosunku przekroju poprzecznego komory do przekroju wylotowego dyszy strumienia głównego) i od współczynnika ejskacji u (stosunku ilościowego strumieni). Zwiększenie długości komory powoduje zmniejszenie strat energetycznych przepływu, przy czym zależności te zmieniają swój charakter w miarę wzrostu prędkości wlotowej; wzrost prędkości M_1 podkreśla dodatni efekt wydłużenia komory mieszania. Jak wynika z rysunków 9 i 11 wzrost względnej długości komory mieszania od 5,3 do 11,4 powoduje obniżenie względnej straty ciśnienia w dyfuzorze o $\sim 5\%$, zaś wzrost sprawności dyfuzora o $\sim 15\%$. Dla strumienic z komorami mieszania o długości $11,45D$ sprawność dyfuzora wynosi $0,6 \div 0,8$ przy liczbach Macha na wlocie do dyfuzora w granicach $M_1 = 0,35 \div 0,8$. Skrócenie zaś komory do $5D$ może spowodować spadek sprawności dyfuzora dla tego samego przedziału M_1 do wartości $0,45 \div 0,6$. Dla bardzo krótkich komór mieszania proces mieszania oddziałuje na pracę dyfuzora, jednocześnie dyfuzor rzutuje na proces mieszania co wyraża się m. in. dużym rozrzutem punktów na wykresach.

Literatura

- [1] C. O. Bennett, J. E. Myers, *Przenoszenie pędu, ciepła i masy*. WNT, Warszawa 1967.
- [2] M. E. Deicz, A. E. Zariankin, *Gazodinamika diffuzorow i wychlophnych patrubkow turbomaszin*, Energija, Moskwa 1970.
- [3] A. S. Dorfman, M. M. Nazarczuk, N. J. Polskij, M. I. Sajkowski, *Aerodinamika diffuzorow i wychlopných patrubkow turbomaszin*, AN USSR, 1960.
- [4] J. A. Goliński, A. T. Troksolański, *Zarys dynamiki gazów*. WPWr, Wrocław 1970.
- [5] J. A. Goliński, A. T. Troksolański, *Strumienie*. WNT, Wrocław 1979.
- [6] I. E. Idelczik, *Sprawocznik po gidrawliczeskim soprotiwlenijam*, Maszynostroyenie, Moskwa 1975.
- [7] I. E. Idelczik, J. L. Ginzburg, *O miechanizmie wlijanija uslowij wchoda na soprotiwlenije diffuzorow*, Inżynierno-Fiziceskij Żurnal, t. XVI, Nr 3, 1969.
- [8] J. Miczka, *Wplyw warunków wlotowych na pracę dyfuzora osiowo-symetrycznego*, Zesz. Nauk. Politechniki Częstochowskiej, 11/36, 1966.
- [9] A. Paliwoda, *Urządzenia chłodnicze strumieniowe*, WNT, Warszawa 1971.
- [10] I. L. Powch, *Tiechnicheskaja gidromiechanika*, Maszynostroyenie, Leningrad 1969.
- [11] E. E. Sołodkin, A. S. Giniewskij, *K woprosu o wlijanie naczalnoj nierawnomiernosti potoka na charakteristiki diffuzorných kanalov*, Promyslennaja erodinamika Nr 12, 1959.
- [12] W. K. Szczunkin, I. I. Kalmykov, *Gazostrujnyje kompriessory*. Maszgiz, Moskwa 1963.

Влияние степени вымешивания потоков газа в камере смешивания дозвукового эжектора на показатели работы диффузора

Резюме

Проанализирован механизм потерь происходящих во время сжатия потока газа в диффузоре однофазного дозвукового эжектора. Экспериментальным путем определены показатели работы и уровень потерь в диффузоре при различных геометрических и аэродинамических параметрах эжектора. Представлены зависимости выражающие влияние степени смешивания потоков воздуха в камере смешивания эжектора на ход сжатия в диффузоре. Доказывается, что более эффективное смешивание потоков в камере увеличивает надежность работы диффузора, что определяется увеличением всех его показателей работы.

The Effect of Quality of Gas Jet Mixing in the Mixing Chamber of a Subsonic Jet Pump on the Diffuser Performance

Summary

The mechanism of losses occurring during compression of a gas jet in the diffuser of a single-phase subsonic jet pump has been analyzed. Factors characterizing the diffuser performance and its losses were determined experimentally for various geometrical and aerodynamic parameters of the jet pump. Formulae relating the process of compression in the diffuser to the quality of mixing of air jets in the jet pump mixing chamber are given. It is shown that better mixing of the jets in the chamber makes the diffuser more efficient, which reflects in increase of all factors characterizing its performance.