

A 34311

**Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej
i Aparatury Przemysłowej**

Nr 3

Seria: Monografie

Nr 2

Krystyna Jeżowiecka-Kabsch

**Wpływ kształtów dyfuzorów
na wysokość strat hydraulicznych**

Wrocław 1971

Spis rzeczy

Oznaczenia	3
Wstęp	6
Część konstrukcyjna	11
Sposób wykonywania pomiarów	21
Analiza wyników przeprowadzonych badań	22
Analiza dokładności przeprowadzonych badań	42
Porównanie wyników badań własnych z dotychczasowymi	46
Wnioski	48

Prace Naukowe
Instytutu Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej
Politechniki Wrocławskiej

Nr 3

Monografie 2

Krystyna Jeżowiecka-Kabsch

Wpływ kształtów dyfuzorów na wysokość strat hydraulicznych

Wrocław 1971

Prace Naukowe
Politechniki Wrocławskiej

Redaktor naukowy
Gerard Konieczny

Okładkę projektował
Jacek Sikorski

Redakcja Wydawnictw Politechniki Wrocławskiej
Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27

Państwowe Wydawnictwo Naukowe — Wrocław 1971
Nakład 340+80 egz. Ark. wyd. 4; druk. 3,25. Papier druk. sat. kl. V, 70 g, 70×100.
Nr zam. 135/71 — Wrocławska Drukarnia Naukowa — C-5. Cena zł 10, —

Wpływ kształtów dyfuzorów na wysokość strat hydraulicznych

Krystyna Jeżowiecka-Kabsch, dr inż., adiunkt Instytutu Techniki Ciepłej
i Aparatury Przemysłowej Politechniki Wrocławskiej

W pracy omówiono badanie strat ciśnienia przy przepływie wody przez dyfuzory stożkowe i o tworzących krzywoliniowych, których krzywizna jest określona warunkami $dp/ds = \text{const}$ i $dv/ds = \text{const}$. Na podstawie badań stwierdzono, że przy określonym kształcie dyfuzora współczynnik strat hydraulicznych ζ_D jest funkcją stosunku średnicy wypływowej do dopływowej (d_2/d_1) i liczby Reynoldsa w obszarze $Re < 2,7 \cdot 10^5$, zaś w obszarze $Re > 2,7 \cdot 10^5$ jest wyłączną funkcją d_2/d_1 . Wykazano również, że współczynnik ζ_D jest funkcją chropowatości. Dla dyfuzorów stożkowych i dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych o różnych chropowatościach wyprowadzono formuły empiryczne, określające współczynnik strat hydraulicznych w dyfuzorach ζ_D jako funkcję d_2/d_1 .

OZNACZENIA

- $d = d_r$ - średnica rury
- d_1 - średnica dopływowa dyfuzora
- d_2 - średnica wypływowa dyfuzora
- e - błąd bezwzględny
- g - przyspieszenie ziemskie
- h - wysokość ciśnienia
- Δh - przyrost wysokości ciśnienia w dyfuzorze
- Δh_m - mierniczy spadek wysokości ciśnienia
- Δh_D - wysokość trwałej straty ciśnienia w dyfuzorze
- Δh_{fr} - wysokość trwałej straty ciśnienia wywołanej tarciem
- Δh_q - wysokość trwałej straty ciśnienia spowodowana zmianą ilości ruchu
- k - chropowatość bezwzględna
- l - długość odcinka dyfuzora

*) Do dnia 1 IX 1970 r. nazwa Instytutu brzmiała: Instytut Maszyn i Urządzeń Hydraulicznych oraz Aparatury Przemysłowej (I - 17).

- l_s - długość rurociągu ssawnego
- l_p - długość rurociągu pomiarowego
- n - stosunek pola przekroju wypływu do pola przekroju dopływu
- p - ciśnienie
- p_{st} - ciśnienie statyczne
- p_{dyn} - ciśnienie dynamiczne
- Δp - mierzony przyrost ciśnienia w dyfuzorze
- Δp_D - trwała strata ciśnienia w dyfuzorze
- r - promień
- s - droga, współrzędna liniowa
- v - prędkość średnia
- z - wysokość położenia
- Δz - wysokość słupa cieczy manometrycznej
- F - pole, przekrój
- H - wysokość hydrauliczna
- L - całkowita długość dyfuzora
- Q - objętościowe natężenie przepływu
- R_h - promień hydrauliczny
- T - temperatura
- U - obwód zwilżony
- V - objętość
- Re - liczba Reynoldsa
- Re_1 - liczba Reynoldsa (w dowolnym przekroju dyfuzora odległym o 1 od przekroju dopływowego)
- Re_1 - liczba Reynoldsa, odniesiona do parametrów przepływu w przekroju dopływowym dyfuzora
- α - współczynnik przepływu przez dyfuzor
- γ - ciężar właściwy
- ε - błąd względny
- ζ_D - współczynnik straty hydraulicznej w dyfuzorze
- λ - współczynnik oporu liniowego
- ν - lepkość kinematyczna
- π - ludolfina
- σ - średnica otworka piezometrycznego
- τ - czas
- η - sprawność
- Δ - przyrost, różnica
- Σ - suma

INDEKSY (wskaźniki dolne)

cl	- czterochlorek węgla
or	- krytyczny
D	- dyfuzor
fr	- tarczowy
gr	- graniczny
h	- hydrauliczny, poziomy
m	- mierniczy
max	- maksymalny
min	- minimalny
q	- ilość ruchu
r	- rzeczywisty
p	- pomiarowy
rt	- rtęć
s	- ssawny
śr	- średni
t	- tłoczny
th	- teoretyczny
w	- wpływowy
wn	- woda w warunkach normalnych

WSTĘP

Przy hydraulicznym obliczaniu przewodów urządzeń pompowych, siłowni ciepłych oraz wszystkich układów hydraulicznych należy oprócz strat liniowych uwzględniać także miejscowe straty hydrauliczne. Występują one przy zmianie przekroju lub zmianie kierunku przepływu oraz w miejscach wbudowania różnych urządzeń regulacyjnych i pomiarowych.

W bilansie strat energetycznych duży procent stanowią straty spowodowane zmianami przekroju. Przeważają tutaj straty wywołane zawiroowaniem; mniejszą natomiast rolę odgrywają straty spowodowane tarcie. Powszechnie stosowanym elementem łączącym odcinki rurociągu o mniejszej i większej średnicy jest dyfuzor, stąd właściwy dobór dyfuzorów ma duży wpływ na wielkość strat hydraulicznych.

Teoretyczne ujęcie zjawisk przepływu płynów przez dyfuzor

Elementarny spadek ciśnienia w przewodzie o przekroju poprzecznym zmieniającym się w sposób ciągły wzdłuż osi, możemy określić formułą N. Baashuusa

$$\Delta p = \gamma \lambda \int_1^{l_2} \frac{dl}{2r} \frac{v^2}{2g} \quad (1a)$$

Uwzględniając zależność (rys. 1)

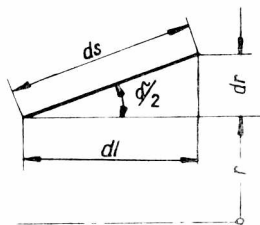
$$dl = \frac{dr}{\operatorname{tg}(\delta/2)} \quad (2)$$

otrzymamy

$$\Delta p = \lambda \frac{\lambda}{4g} \frac{1}{\operatorname{tg}(\delta/2)} \int_{r_1}^{r_2} \frac{v^2}{r} dr. \quad (1b)$$

Jednakże dla dyfuzora, w którym następuje przemiana energii prędkości w energię ciśnienia, okazało się, że rzeczywista wysokość strat różni się od strat obliczonych z równania (1). Wypływa stąd wniosek, że charakter przepływu w dyfuzorze jest bardziej złożony i różny od przepływu w rurociągach prostych.

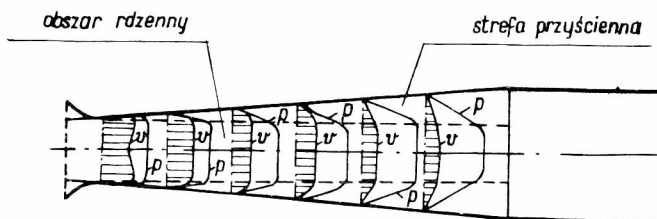
Strumień cieczy przepływającej przez dyfuzor można podzielić na dwa obszary: rdzenny i przyścienny (rys. 2). Przy przepływie cieczy przez dyfuzor miejscowe prędkości i ciśnienia w określonym przekroju poprzecznym strefy rdzen-



Rys. 1. Element liniowy dyfuzora o długości dl i początkowym promieniu r

Fig. 1. Linear element of a diffuser of length dl and inlet radius r

nej są w przybliżeniu jednakowe, w strefie przyściennej natomiast zmniejszają się w kierunku wewnętrznej poboczniczy przewodu.



Rys. 2. Krzywe rozkładu prędkości i ciśnienia statycznego w różnych przekrojach dyfuzora wg Riffarta

Fig. 2. Velocity and pressure distribution curves at different cross sections of a diffuser by Riffart

Gdy w warstwie przyściennej energia ciśnienia w kierunku przepływu wyczerpuje się, cząstki cieczy przejawiają tendencję do ruchu powrotnego, co powoduje oderwanie się strumienia cieczy od ściany przewodu.

Wzdłuż powierzchni oddzielającej obszar rdzenny od obszaru przyściennego występuje zjawisko porywania cząstek cieczy z obszaru przyściennego przez szybciej płynące cząstki cieczy obszaru rdzennego. Przy przepływie uwarstwionym zjawisko to wywołane jest wyłącznie siłami tarcia wewnętrznego, a przy przepływie burzliwym również i drgającymi ruchami pobocznymi, które powodują przenoszenie ilości ruchu z obszaru rdzennego do obszaru przyściennego.

Podczas przepływu przez dyfuzor, stosunek sił bezwładności do sił tarcia wewnętrznego, wyrażony liczbą Reynoldsa R , zmienia się w kierunku przepływu od przekroju do przekroju, a jego wartość decyduje o położeniu przekroju, w którym następuje oderwanie się strumienia cieczy.

Wyniki doświadczalne odnosimy do wartości umownej liczby Reynoldsa R , obliczonej dla przekroju dopływowego dyfuzora. Również rodzaj materiału, z którego wykonany jest dyfuzor ma istotny wpływ na położenie obwodu oderwania. W dyfuzorach ohrpomatych oderwanie występuje znacznie później niż w dyfuzorach gładkich.

Reasumując można stwierdzić, że położenie przekroju oderwania strumienia podczas ruchu opóźnionego przez dyfuzor zależy od:

- a) kąta rozwarcia dyfuzora,
- b) wartości liczby Reynoldsa,
- c) grubości warstwy przyściennej,
- d) chropowatości ścian dyfuzora,
- e) gradientu ciśnienia w kierunku ruchu dp/ds ,
- f) gradientu prędkości w kierunku ruchu dv/ds .

Niebezpieczeństwo oderwania się strumienia jest tym mniejsze, im mniejszy jest spadek gradientu prędkości i wzrost gradientu ciśnienia w dyfuzorze. W przypadkach, gdy występują duże spadki gradientu prędkości i duży wzrost gradientu ciśnienia na całej długości prostki rozbieżnej korzystniejsze okazało się takie dobranie kształtu dyfuzora, aby następował równomierny wzrost gradientu ciśnienia wzdłuż dyfuzora lub równomierny spadek prędkości. Wówczas cały zasób energii "napędzającej" jest równomiernie rozłożony wzdłuż długości, co powoduje znaczne wydłużenie odcinka między przekrojem dopływowym a przekrojem oderwania. Wywołuje to znaczne zmniejszenie strat hydraulicznych w dyfuzorze.

Z powyższych rozważań wynika, że podczas przepływu cieczy przez dyfuzor oprócz oporów, jakie występują przy przepływie przez przewody prostoosiowe o niezmiennym przekroju, występują dodatkowe opory spowodowane zaburzeniami strumienia. Straty hydrauliczne w dyfuzorze stączkowym są sumą strat wywołanych tarciem Δh_{fr} i strat spowodowanych zmianą ilości ruchu Δh_q w kierunku przepływu.

Rozpatrzmy element powierzchni dyfuzora o długości ds (rys. 1)
Straty spowodowane tarciem na długości wydzielonego elementu

$$\Delta h_{fr} = \lambda \frac{ds}{2r} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Uwzględniając zależność

$$ds = \frac{dr}{\sin(\delta/2)} \quad (4)$$

otrzymamy

$$\Delta h_{fr} = \frac{\lambda dr}{2r \sin(\delta/2)} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Podstawiając wartość $v = v_1 (r_1/r)^2$ (6)
w równanie (5) otrzymamy

$$\Delta h_{fr} = \frac{\lambda r_1^4}{2 \sin(\delta/2)} \cdot \frac{v_1^2}{2g} \frac{dr}{r^5} \quad (7)$$

Całkując to wyrażenie w granicach od r_1 do r_2 otrzymamy

$$\begin{aligned}\Delta h_{fr} &= \frac{\lambda r_1^4}{2 \sin(\delta/2)} \cdot \frac{v_1^2}{2g} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^5} = \\ &= \frac{\lambda r_1^4}{2 \sin(\delta/2)} \cdot \frac{v_1^2}{2g} \left(-\frac{1}{4r_2^4} + \frac{1}{4r_1^4} \right) = \\ &= \frac{\lambda r_1^4}{8 \sin(\delta/2)} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^4 \right] \frac{v_1^2}{2g}.\end{aligned}\quad (8)$$

Ponieważ

$$\left(\frac{r_1}{r_2} \right)^4 = \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 = \frac{1}{n^2},$$

więc

$$\Delta h_{fr} = \frac{\lambda}{8 \sin \delta/2} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \frac{v_1^2}{2g}.\quad (9)$$

Straty ciśnienia spowodowane zmianą ilości ruchu przy przepływie przez stopniowo rozszerzający się przewód są znacznie mniejsze od strat występujących przy nagłym rozszerzeniu przewodu (straty Bordy). Wprowadzając współczynnik przepływu α , będący funkcją kąta rozwarcia δ , stratę ciśnienia wywołaną zmniejszeniem się ilości ruchu, możemy wyznaczyć ze wzoru:

$$\begin{aligned}\Delta h_q &= \alpha \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = \alpha \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \\ &= \alpha \left(1 - \frac{1}{n} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g}.\end{aligned}\quad (10)$$

Całkowita strata hydrauliczna w dyfuzorze wynosi więc

$$\begin{aligned}\Delta h_D &= \Delta h_{fr} + \Delta h_q = \left[\frac{\lambda}{8 \sin(\delta/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \alpha \left(1 - \frac{1}{n} \right)^2 \right] \frac{v_1^2}{2g}\end{aligned}$$

stąd współczynnik oporów miejscowych dyfuzora:

$$\zeta_D = \frac{\lambda}{8 \sin(\delta/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) + \alpha \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2. \quad (11)$$

W dostępnej literaturze nie mamy podanych doświadczalnych wartości współczynnika ζ_D dla większych kątów rozwarcia ($\delta > 14^\circ$). Dlatego też ilościowe określenie strat hydraulicznych przy przepływie przez dyfuzory sprowadza się do doświadczalnego wyznaczenia współczynnika strat hydraulicznych ζ_D , wywołanych wbudowaniem dyfuzora w przewód, w zależności od kąta rozwarcia dyfuzora, zarysu wzdłużnego ścianek, chropowatości i liczby Reynoldsa.

Współczynnik strat hydraulicznych oblicza się ze wzoru

$$\zeta_D = \frac{\Delta h_D}{v^2/2g}. \quad (12)$$

CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest badanie strat ciśnienia przy przepływie wody przez dyfuzory stożkowe (I) oraz dyfuzory o ściankach krzywoliniowych, których krzywizna jest określona warunkami:

$$(II) \frac{dp}{ds} = \text{const} \text{ oraz } (III) \frac{dv}{ds} = \text{const},$$

a w szczególności sprawdzenie i uogólnienie teorii przepływu przez dyfuzory.

Bezpośrednim zadaniem pracy jest:

1. Wyprowadzenie równań tworzących dyfuzorów o równomiernym spadku ciśnienia i prędkości wzdłuż osi dyfuzora.
2. Określenie i porównanie wartości współczynnika strat ciśnienia ζ_D w dyfuzorach stożkowych oraz krzywoliniowych przy kątach rozwarcia $\delta = 8^\circ, 14^\circ, 17^\circ$ i 20° dla dyfuzorów chropowatych (odlew) i gładkich (pomalowanych dwukrotnie olejem bitumicznym)..
3. Określenie wartości liczby Reynoldsa, po przekroczeniu której współczynnik straty hydraulicznej dyfuzora jest wyłączną funkcją chropowatości i kształtu, a nie zależy od R .
4. Podanie zaleceń wyboru kształtu dyfuzora w zależności od kąta rozwarcia, chropowatości i stosunku średnicy wypływowej do dopływowej.
5. Wyprowadzenie empirycznych formuł określających zależność współczynnika strat ciśnienia w dyfuzorze od liczby Reynoldsa, stosunku średnicy wypływowej do dopływowej i chropowatości bezwzględnej ścian.

CZĘŚĆ KONSTRUKCYJNA

Założenia

Przedmiotem badań są dyfuzory I - stożkowe, II - krzywoliniowe o stałym gradientcie ciśnienia $dp/ds = \text{const}$, III - krzywoliniowe o stałym gradientcie prędkości $dv/ds = \text{const}$ w kierunku przepływu.

P a r a m e t r y

Przyjęto trzy wielkości średnicy dopływowej $d_1 = 65 \text{ mm}, 80 \text{ mm}, 100 \text{ mm}$. Ponieważ najkorzystniejsze pod względem hydraulicznym są dyfuzory o smukłości (stosunku długości do średnicy dopływowej) $L/d_1 = 5 - 7$, założono dla wszystkich elementów stały stosunek $L/d_1 = 6$. Przyjęto następujące kąty rozwarcia dyfuzorów stożkowych: $\delta = 8^\circ$ - przy którym w dyfuzorach chropowatych nie występuje jeszcze oderwanie, $\delta = 14^\circ$ - maksymalny kąt graniczny oraz $\delta = 17^\circ$ i 20° kąty, przy których w dyfuzorze zachodzi przepływ z oderwaniem i zawiroowaniem. Ponieważ długości badanych dyfuzorów spełniają warunek $L = 6 d_1$, przeto dyfuzory o tych samych kątach rozwarcia i tych samych kształtach (ściślej tej samej linii tworzącej) są do siebie geometrycznie podobne. Nieznaczne odstępstwa od geometrycznego podobieństwa występują jedynie wskutek chropowatości ścian. W oparciu o przyjęte parametry zaprojektowano 12 sztuk dyfuzorów stożkowych, które następnie odlano z żeliwa. Tę serię dyfuzorów o ściankach chropowatych oznaczono symbolami:

I - 65 - 8	I - 65 - 14	I - 65 - 17	I - 65 - 20
I - 80 - 8	I - 80 - 14	I - 80 - 17	I - 80 - 20
I - 100 - 8	I - 100 - 14	I - 100 - 17	I - 100 - 20

W symbolach tych pierwsza cyfra oznacza przynależność do serii, druga - średnicę dopływową, a trzecia - kąt rozwarcia.

Po zbadaniu elementów chropowatych (naturalny odlew) były one wewnątrz malowane dwukrotnie olejem bitumicznym; serię tą nazwano dyfuzorami stożkowymi gładkimi.

Ogółem więc do badań przygotowano 24 dyfuzory stożkowe (rys.3).

Wyprowadzenie równań tworzących dyfuzorów krzywoliniowych

W celu sprawdzenia wpływu kształtu dyfuzora na wartość współczynnika strat hydraulicznych zaprojektowano elementy o ściankach krzywo-

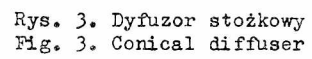
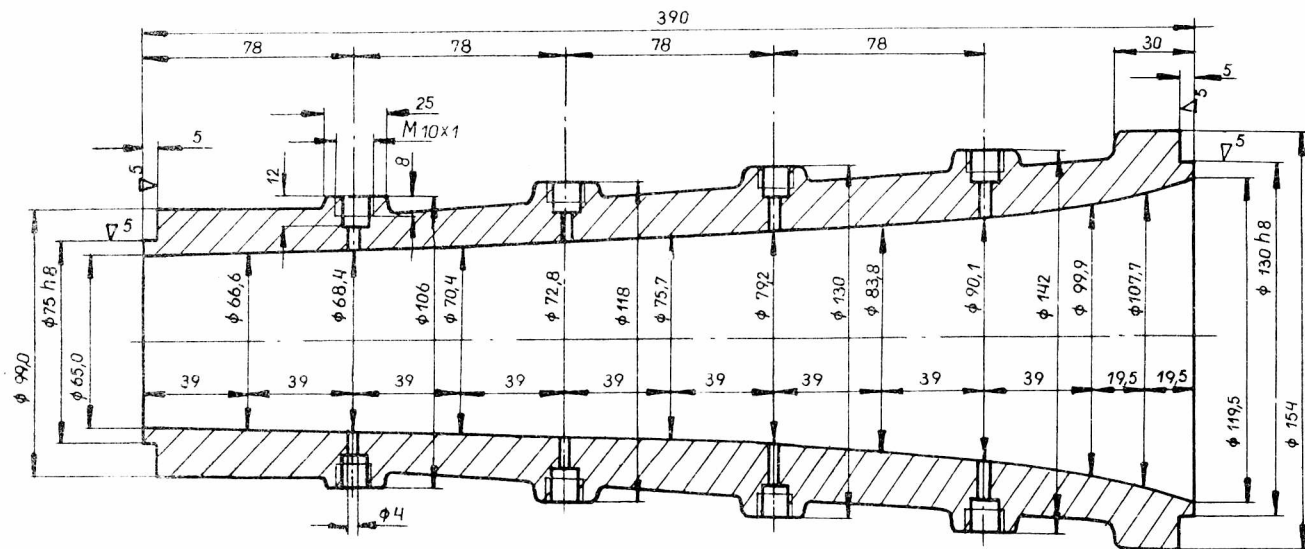


Fig. 3. Conical diffuser



Rys. 4. Dyfuzor o równomiernym spadku ciśnienia dynamicznego ($dp/ds = \text{const}$)
Fig. 4. Diffuser of uniform dynamic pressure drop ($dp/ds = \text{const}$)

Fig. 4. Diffuser of uniform dynamic pressure drop ($dp/ds = \text{const}$)

liniowych, których tworzące są określone równaniami $dp/ds = \text{const}$ i $dv/ds = \text{const}$.

W dyfuzorach o stałym gradiencie ciśnienia $dp/ds = \text{const}$ (rys.4) średnice dopływowe, kąt rozwarcia i długość odpowiadają wymiarom serii I, tylko profil wzdłużny ścianek jest krzywoliniowy.

Kątem rozwarcia dyfuzora o zarysie krzywoliniowym nazywamy kąt określony wzorem

$$\text{tg } \frac{\delta}{2} = \frac{r_2 - r_1}{L}.$$

Średnice obliczono w oparciu o założenia równomiernego spadku wysokości prędkości wzdłuż osi dyfuzora.

$$\frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} = \Delta h \quad (13)$$

Ponieważ

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} \quad \text{ i } \quad v_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2}$$

więc

$$\left(\frac{4Q}{\pi d_1^2} \right)^2 - \left(\frac{4Q}{\pi d_2^2} \right)^2 = 2g\Delta h,$$

$$\frac{16Q^2}{\pi^2 d_1^4} - \frac{16Q^2}{\pi^2 d_2^4} = 2g\Delta h,$$

$$\pi^2 d_2^4 \left(\frac{16Q^2 - 2g\Delta h \pi^2 d_1^4}{\pi^2 d_1^4} \right) = 16Q^2.$$

Stąd

$$d_2 = d_1 \sqrt[4]{\frac{8Q^2}{8Q^2 - g\Delta h \pi^2 d_1^4}} = \quad (14)$$

$$= d_1 \sqrt[4]{\frac{1}{1 - \frac{g\Delta h \pi^2 d_1^4}{8Q^2}}}.$$

Zakładając

$$\frac{g\Delta h \pi^2 d_1^4}{8Q^2} = A \quad (15)$$

i uwzględniając

$$2g\Delta h = \frac{16Q^2}{\pi^2} \left(\frac{1}{d_1^4} - \frac{1}{d_2^4} \right)$$

otrzymamy wzór określający średnicę dyfuzora w odległości 1 od przekroju dopływowego

$$d_1 = d_1 \sqrt[4]{\frac{1}{1 - \frac{1}{L} A}}, \quad (16)$$

w którym

$$A = 1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4.$$

Według wzoru (16) obliczono średnice dyfuzorów oznaczonych symbolami:

II - 65 - 8 II - 65 - 14 II - 65 - 17 II - 65 - 20

II - 80 - 8 II - 80 - 14 II - 80 - 17 II - 80 - 20

II - 100 - 8 II - 100 - 14 II - 100 - 17 II - 100 - 20

Na podstawie rysunków roboczych wykonano odlewy żeliwne tych dyfuzorów.

Dyfuzory serii III o stałym gradencie prędkości $dv/ds = \text{const}$ wzdłuż osi dyfuzorów (rys. 5) różnią się tylko kształtem ścianek od odpowiednich dyfuzorów serii I.

Poszczególne średnice obliczono wychodząc z założenia, iż spadek prędkości wzdłuż osi dyfuzora jest stały.

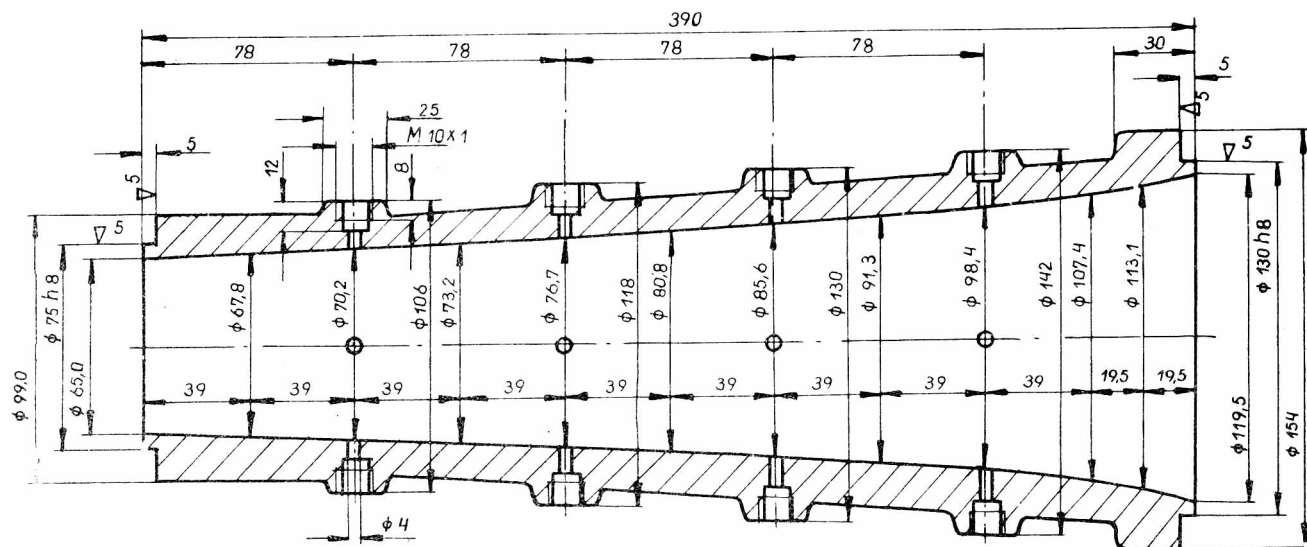
$$v_1 - v_2 = \Delta v. \quad (17)$$

Ponieważ

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} \quad \text{i} \quad v_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2},$$

$$\frac{4Q}{\pi d_1^2} - \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \Delta v,$$

$$\pi d_2^2 \left(\frac{4Q}{\pi d_1^2} - \Delta v \right) = 4Q,$$



Rys. 5. Dyfuzor o równomiernym spadku prędkości ($dv/ds = \text{const}$)
 Fig. 5. Diffuser of uniform velocity drop ($dv/ds = \text{const}$)

$$d_2^2 = \frac{4Q}{\pi \left(\frac{4Q}{\pi d_1^2} - \Delta v \right)} = d_1^2 \frac{1}{1 - \pi d_1^2 \frac{\Delta v}{4Q}} ;$$

stąd

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{1}{1 - \pi d_1^2 \frac{\Delta v}{4Q}}} \quad (18)$$

Zakładając

$$\pi d_1^2 \frac{\Delta v}{4Q} = B \quad (19)$$

i uwzględniając

$$\Delta v = \frac{4Q}{\pi} \left(\frac{1}{d_1^2} - \frac{1}{d_2^2} \right)$$

otrzymamy wzór określający średnicę dyfuzora w odległości l od przekroju dopływowego.

$$d_l = d_1 \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{l}{L} B}} \quad (20)$$

w którym

$$B = 1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

Na podstawie wzoru (20) obliczono wszystkie średnice dyfuzorów o kształcie $dv/ds = \text{const.}$

III - 65 - 8 III - 65 - 14 III - 65 - 17 III - 65 - 20

III - 80 - 8 III - 80 - 14 III - 80 - 17 III - 80 - 20

III - 100 - 8 III - 100 - 14 III - 100 - 17 III - 100 - 20

Przygotowano do badań 24 sztuki dyfuzorów krzywoliniowych o stałym gradientie prędkości wzdłuż osi.

Zestawienie badanych dyfuzorów

Lp.	Symbol dyfuzora	d_1	d_2	δ	d_2/d_1	L
		(mm)		1°	-	(mm)
1	I - 65 - 8	65	119,5	8	1,84	390
2	II - 65 - 8	65	119,5	8	1,84	390
3	III - 65 - 8	65	119,5	8	1,84	390
4	I - 65 - 14	65	160,8	14	2,47	390
5	II - 65 - 14	65	160,8	14	2,47	390
6	III - 65 - 14	65	160,8	14	2,47	390
7	I - 65 - 17	65	181,6	17	2,79	390
8	II - 65 - 17	65	181,6	17	2,79	390
9	III - 65 - 17	65	181,6	17	2,79	390
10	I - 65 - 20	65	202,5	20	3,12	390
11	II - 65 - 20	65	202,5	20	3,12	390
12	III - 65 - 20	65	202,5	20	3,12	390
13	I - 80 - 8	80	147,1	8	1,84	480
14	II - 80 - 8	80	147,1	8	1,84	480
15	III - 80 - 8	80	147,1	8	1,84	480
16	I - 80 - 14	80	197,9	14	2,47	480
17	II - 80 - 14	80	197,9	14	2,47	480
18	III - 80 - 14	80	197,9	14	2,47	480
19	I - 80 - 17	80	223,5	17	2,79	480
20	II - 80 - 17	80	223,5	17	2,79	480
21	III - 80 - 17	80	223,5	17	2,79	480
22	I - 80 - 20	80	202,5	20	3,12	480
23	II - 80 - 20	80	202,5	20	3,12	480
24	III - 80 - 20	80	202,5	20	3,12	480
25	I - 100 - 8	100	183,9	8	1,84	600
26	II - 100 - 8	100	183,9	8	1,84	600
27	III - 100 - 8	100	183,9	8	1,84	600
28	I - 100 - 14	100	247,4	14	2,47	600
29	II - 100 - 14	100	247,4	14	2,47	600
30	III - 100 - 14	100	247,4	14	2,47	600
31	I - 100 - 17	100	279,4	17	2,79	600
32	II - 100 - 17	100	279,4	17	2,79	600
33	III - 100 - 17	100	279,4	17	2,79	600
34	I - 100 - 20	100	311,6	20	3,12	600
35	II - 100 - 20	100	311,6	20	3,12	600
36	III - 100 - 20	100	311,6	20	3,12	600

Przeznaczone do badania dyfuzory wykonano w postaci odlewu nieobrabianego (chropowatego), a następnie malowano je dwukrotnie lakierem bitumicznym (gładkie).

Wykonanie badanych elementów

Badane dyfuzory zostały odlane z żeliwa. Masę formierską dobrano w ten sposób, aby chropowatość bezwzględna k ścianek wewnętrznych dyfuzora odpowiadała chropowatości kształtek wodociągowych nieobrabianych.

Modele dyfuzorów i skrzynie rdzeniowe wykonano na podstawie rysunków roboczych dyfuzorów.

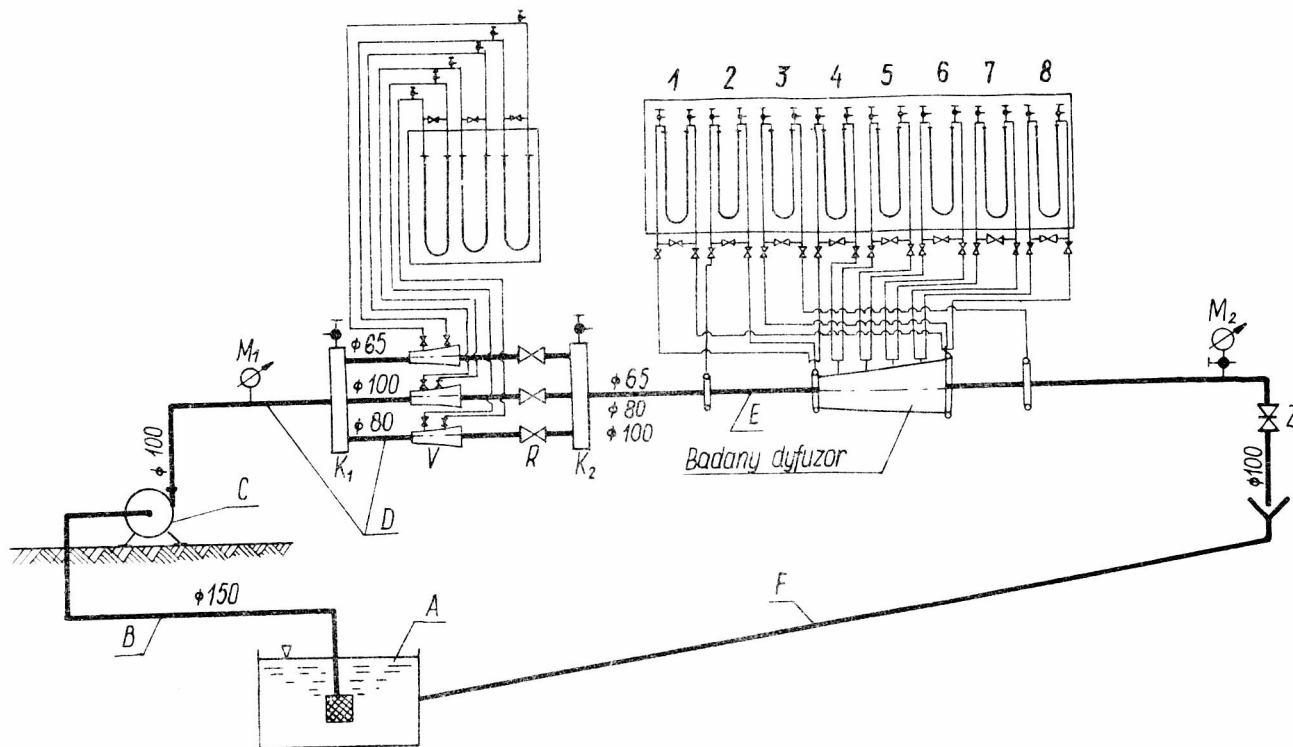
Aby zbadać zmiany ciśnień statycznych wzdłuż osi dyfuzora wykonano otworki piezometryczne o średnicy $\sigma = 4$ mm w czterech płaszczyznach pionowych prostopadłych do osi rurociągu. Płaszczyzny te dzieliły dyfuzor na pięć równych części o długości l . W każdej płaszczyźnie rozmieszczono symetrycznie na obwodzie po cztery otworki piezometryczne łączące obszar przepływu cieczy z elastycznymi obwodowymi komorami ciśnienia. Umożliwiło to odbiór ciśnienia średniego w danym przekroju rury.

Budowa stanowiska pomiarowego

Badania dyfuzorów przeprowadzono na stanowisku pomiarowym zbudowanym w Laboratorium Hydromechanicznym Zakładu Hydro- i Aeromechaniki Instytutu Maszyn i Urządzeń Hydraulicznych oraz Aparatury Przemysłowej. Układ mierniczy (schemat, rys. 6) był układem zamkniętym o stałym obiegu wody, wywołanym pompą i regulowanym zaworami.

Układ składał się z:

- A - zbiornika dolnego o objętości $V \approx 4 \text{ m}^3$,
- B - odcinka rurociągu ssawnego o średnicy $d_s = 150 \text{ mm}$,
- C - pompy odśrodkowej typu 100 N 210 o parametrach $Q = 1500 \text{ l/min}$, $H = 52 \text{ m}$ H_2O , $n = 3000 \text{ obr/min}$ z zainstalowanym na króćcu tłocznym manometrem prężnym M_1 ,
- D - odcinka tłocznego stałego złożonego z 3 równoległych rurociągów o średnicach $d_r = 60, 80 \text{ i } 100 \text{ mm}$ z wbudowanymi zwężkami mierniczymi Venturiego V i zaworami regulacyjnymi R ,
- E - odcinka tłocznego wymiennego, czyli odcinka pomiarowego z wbudowaną na końcu zasuwą regulującą Z ,



Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego

A - zbiornik dolny, B - rurociąg ssawny, C - pompa odśrodkowa typu 100 N 210, D - odcinek tłoczny stały, E - odcinek tłoczny wymienny (pomiarowy), F - grawitacyjne odprowadzenie do zbiornika

Fig. 6. Testing stand

A - lower tank, B - suction pipe, C - centrifugal pump, type 100 N 210, D - fixed delivery pipe, E - removable delivery pipe, F - stand pipe carrying water to lower sump

F - grawitacyjnego odprowadzenia do zbiornika A.

Ponieważ trudno określić ilościowo chropowatość, otrzymane wyniki pomiarów nie mogą stanowić miary chropowatości, niemniej jednak odzwierciedlają jej charakter.

SPOSÓB WYKONYWANIA POMIARÓW

Metoda pomiarów

W celu określenia zależności współczynnika strat dyfuzora od parametrów R , δ , k i kształtu przeprowadzono szereg badań wykonanych dyfuzorów. Badania laboratoryjne polegały na:

1. Wyznaczeniu rzeczywistego natężenia przepływu Q_r przez pomiar spadku ciśnienia mierniczego w jednej z trzech zwężek Venturiego i odpowiednim jego przeliczeniu.

2. Wyznaczeniu za pomocą manometrów różnicowych przyrostu ciśnienia statycznego w całym badanym dyfuzorze oraz w poszczególnych odciśkach dyfuzora.

Technika pomiarów

Po wmontowaniu badanego dyfuzora uruchamiano obieg wody w układzie. Stwierdzono na podstawie próbnych pomiarów, że czas ustalenia się równomiernej temperatury układu wynosi 1,5 godziny. W tym czasie przy maksymalnym przepływie wody odpowietrzano układ pomiarowy i manometry. Następnie dławiono przepływ do wartości minimalnej i rozpoczynano właściwe badania.

Poprzez odpowiednią regulację przepływu zaworami na początku i na końcu rurociągu pomiarowego ustalono natężenie przepływu. Równocześnie z odczytem mierniczego spadku ciśnienia w zwężce odczytywano wysokości słupów cieczy manometrycznej na tablicy manometrów nad dyfuzorem. Po wyznaczeniu tych odczytów zmieniano natężenie przepływu od wartości najmniejszej do największej i na odwrót, utrzymując jednak stałe ciśnienie w rurociągu pomiarowym $p_p \approx 1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. W ten sposób eliminowano błędy przypadkowe. Po wykonaniu trzech serii pomiarów instalowano kolejny dyfuzor, dla którego przeprowadzano opisane powyżej czynności.

Sposób wykonywania obliczeń

Wszystkie obliczenia przeprowadzono w układzie SI. Polegały one na:

1. Obliczeniu średniego natężenia przepływu na podstawie pomiaru mierniczego spadku ciśnienia Δh_m z wzoru

$$Q = C\sqrt{\Delta h_m}. \quad (21)$$

2. Wyznaczeniu średniej prędkości przepływu wody w poszczególnych przekrojach mierniczych dyfuzora z zależności

$$v_{sr} = \frac{4Q}{\pi d^2}. \quad (22)$$

3. Określeniu kinematycznego współczynnika lepkości wody z tablicy w zależności od temperatury

$$\nu = f(t). \quad (23)$$

4. Obliczeniu liczby Reynoldsa z wzoru

$$Re = \frac{4Q}{\pi d \nu}. \quad (24)$$

5. Obliczeniu przyrostu ciśnienia statycznego w badanym dyfuzorze jako różnicy ciśnień między przekrojami hydrometrycznymi za i przed dyfuzorem oraz w pięciu przekrojach dyfuzora

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\gamma} = h_2 - h_1. \quad (25)$$

6. Obliczeniu teoretycznej wartości przyrostu ciśnienia w dyfuzorze

$$\Delta h_{th} = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}. \quad (26)$$

7. Obliczeniu całkowitej straty wysokości ciśnienia w dyfuzorze

$$\Delta h_D = \Delta h_{th} - \Delta h = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} - \frac{\Delta p}{\gamma}. \quad (27)$$

8. Obliczeniu współczynnika strat ciśnienia w dyfuzorze

$$\zeta_D = \frac{\Delta h_D}{v_1^2/2g}. \quad (28)$$

ANALIZA WYNIKÓW PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Analiza otrzymanych wyników doświadczalnych obejmuje:

1. Zależność wartości współczynnika strat hydraulicznych w dyfuzorze ζ_D od liczby Reynoldsa i kąta rozwarcia 8 dyfuzorów stożkowych

przy różnych chropowatościach bezwzględnych.

2. Zależność współczynnika ζ_D od liczby Reynoldsa i kąta rozwarcia dyfuzorów o tworzących określonych równaniami $dp/ds = \text{const}$ i $dv/ds = \text{const}$ przy różnych chropowatościach bezwzględnych.

3. Ustalenie minimalnej wartości liczby Reynoldsa R_{gr} , po przekroczeniu której współczynnik strat hydraulicznych ζ_D jest wyłączną funkcją chropowatości, kąta rozwarcia i kształtu, a nie zależy od R .

4. Wyznaczenie optymalnego kształtu dyfuzora przy określonym kącie rozwarcia i chropowatości bezwzględnej.

5. Zależność współczynnika strat hydraulicznych ζ_D od charakteru krzywej określającej stosunek liczb Reynoldsa zależnie od długości dyfuzora $R/R_1 = f(l/L)$.

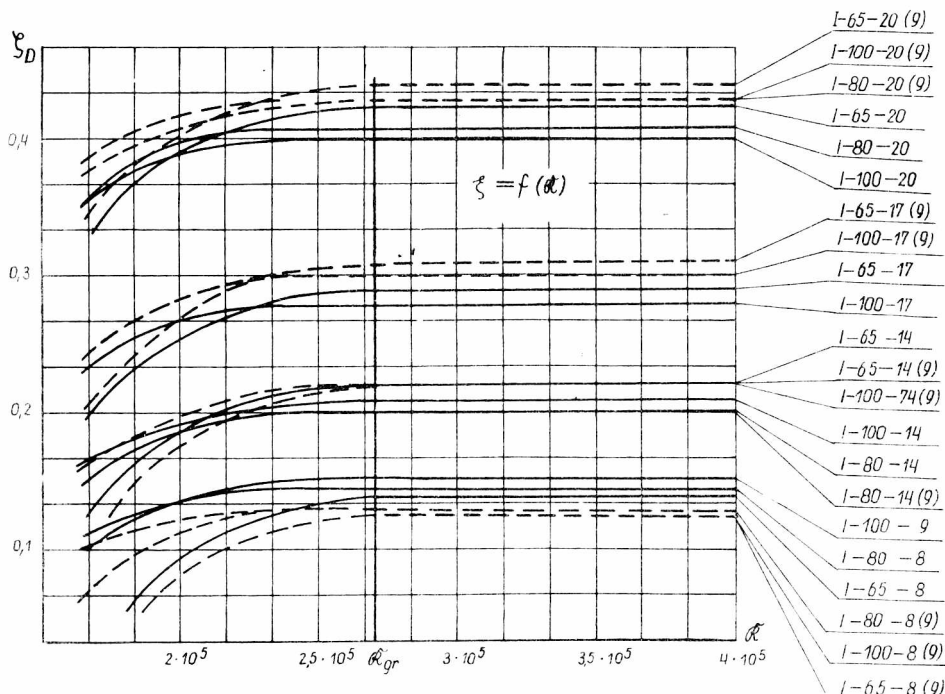
6. Zależność strat hydraulicznych w dyfuzorze Δh_D od charakteru krzywej zmiany wysokości ciśnienia statycznego i wysokości prędkości dyfuzora.

7. Wyznaczenie krzywych zależności współczynnika strat hydraulicznych od wartości stosunku średnicy wypływowej do dopływowej $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dyfuzorów stożkowych i dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych w obszarze przepływów $R > R_{gr}$.

8. Wyprowadzenie wzorów empirycznych $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ w obszarze $R > R_{gr}$.

Zależność współczynnika ζ_D od liczby Reynoldsa w dyfuzorach stożkowych i o tworzących krzywoliniowych

W oparciu o przeprowadzone badania stwierdzono, że dla dyfuzorów stożkowych i krzywoliniowych występuje wyraźna zależność $\zeta_D = f(R)$ do wartości granicznej R_{gr} . Powyżej tej wartości ζ_D osiąga w badanym zakresie wartość stałą. Z przebiegu krzywych $\zeta_D = f(R)$ dla dyfuzorów stożkowych (rys. 7) można wnioskować, że najniższe wartości ζ_D posiadają dyfuzory o kącie rozwarcia $\delta = 8^\circ$ i niższej chropowatości ($k \approx 0,1$ mm), najwyższe wartości ζ_D - dyfuzory o kącie rozwarcia $\delta = 20^\circ$ i niższej chropowatości. Również w dyfuzorach o tworzących krzywoliniowych (rys. 8 i 9) w miarę wzrostu kąta δ rosną wartości ζ_D , jednak różnice między maksymalnymi i minimalnymi wartościami ζ_D są mniejsze niż dla dyfuzorów stożkowych. Dyfuzory o gładzszych ścianach mają zawsze niższe wartości ζ_D .



Rys. 7. Krzywa zależności $\zeta_D = f(R)$ dla dyfuzorów stożkowych
($R_{gr} = 2,7 \cdot 10^5$)

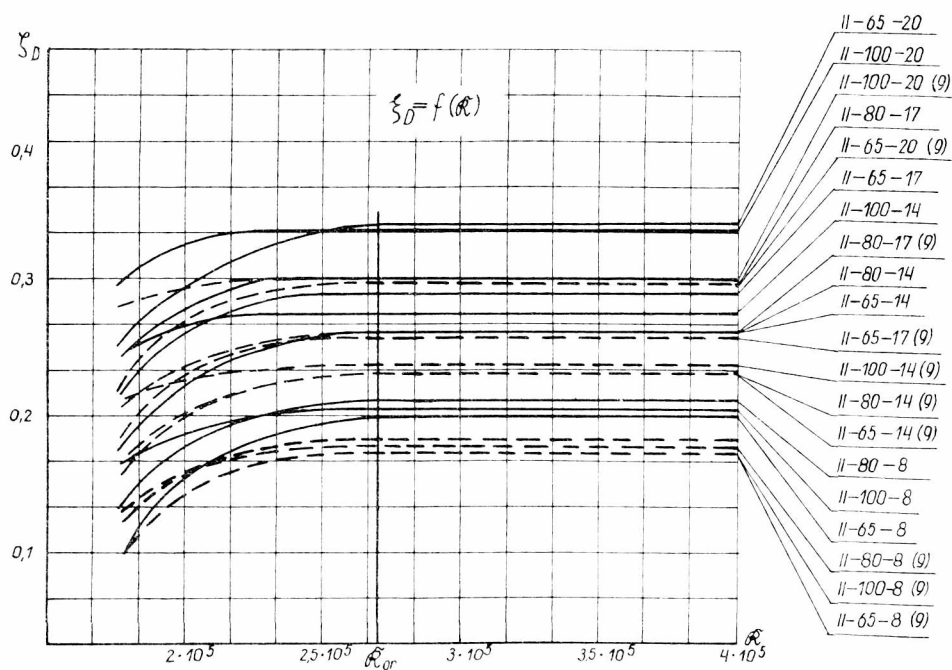
Fig. 7. Curve $\zeta_D = f(R)$ for conical diffusers ($R_{lim} = 2,7 \cdot 10^5$)

W oparciu o wykresy zestawione na podstawie wyników badań własnych ustalono graniczną wartość liczby Reynoldsa $R_{gr} = 2,7 \cdot 10^5$. Powyżej tej wartości współczynnik ζ_D wszystkich badanych dyfuzorów nie zależy od R .

Określenie zależności współczynnika ζ_D od charakteru krzywej zmiany liczby Reynoldsa wzdłuż dyfuzorów

W oparciu o wykresy przedstawiające zmianę liczby Reynoldsa wzdłuż dyfuzorów stożkowych i o tworzących krzywoliniowych o średnicy dopływowej $d_1 = 80$ mm przy kątach rozwarcia $\delta = 8^\circ, 14^\circ, 17^\circ$ i 20° (rys. 10, 11, 12 i 13) można stwierdzić, że w dyfuzorach o większych kątach rozwarcia mniejsza jest wartość stosunku R_2/R_1 .

Z porównania tych wykresów z wykresami poprzednimi można wyciągnąć wniosek, że wysokość strat hydraulicznych w dyfuzorze zależy od charakteru krzywej $R/R_1 = f(l/L)$. Przy określonym kącie rozwarcia, im



Rys.8. Krzywa zależności $\zeta_D = f(R)$ dla dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych
 $dp/ds = \text{const}$ ($R_{gr} = 2,7 \cdot 10^5$)

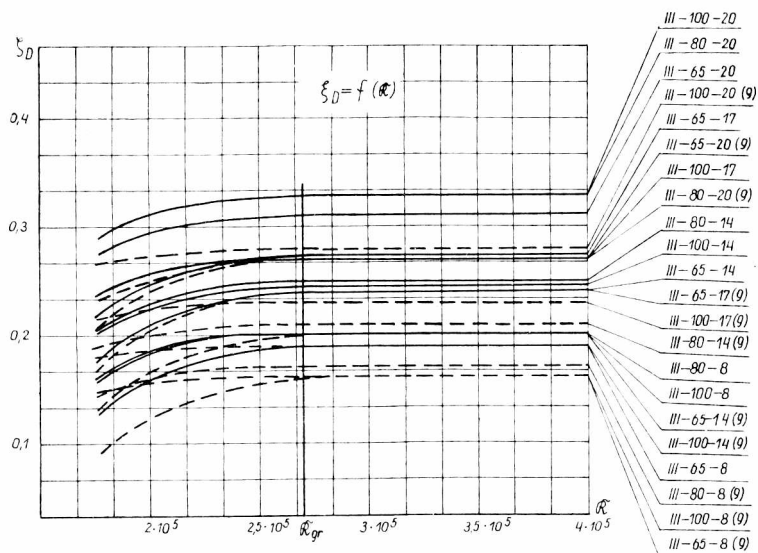
Fig.8. Curve $\zeta_D = f(R)$ for curvilinear diffusers of uniform dynamic pressure
 drop ($dp/ds = \text{const}$) for $R_{lim} = 2,7 \cdot 10^5$

bardziej równomierny jest spadek liczby Reynoldsa, tym mniejsza jest wysokość strat hydraulicznych w dyfuzorze.

Zależność strat hydraulicznych Δh_D od charakteru
 krzywej zmiany wysokości ciśnienia statycznego
 i wysokości prędkości wzdłuż dyfuzora

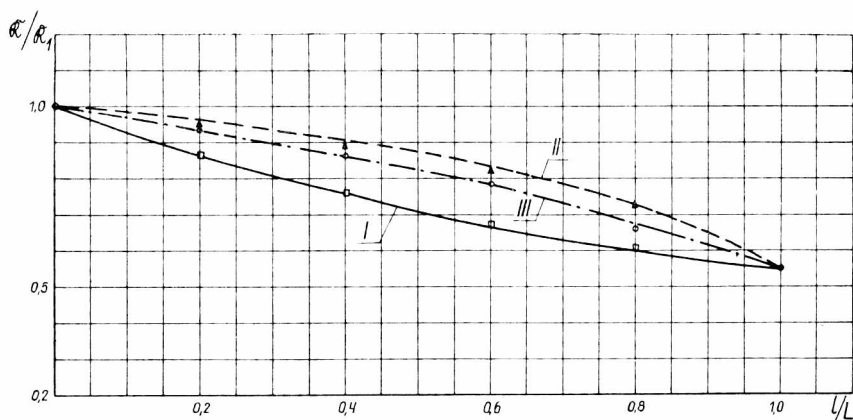
Analizę tej zależności przeprowadzono w oparciu o sporządzone wykresy zmiany wysokości ciśnień w trzech dyfuzorach o różnych kształtach przy maksymalnym natężeniu przepływu (rys. 14, 15 i 16).

W dyfuzorze stożkowym następuje duży spadek wysokości prędkości i duży wzrost ciśnienia statycznego w dopływowym odcinku dyfuzora. Wywołuje to duże straty ciśnienia w tym odcinku, co wpływa na wysokość strat hydraulicznych w dyfuzorze stożkowym. W dyfuzorach o tworzących krzywoliniowych $dp/ds = \text{const}$ ciśnienie statyczne wzdłuż osi dy-



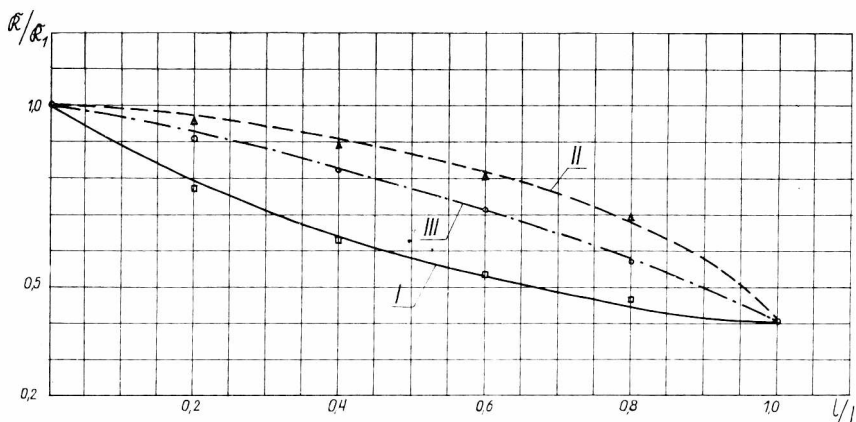
Rys. 9. Krzywe zależności $\zeta_D = f(Re)$ dla dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych

$dw/ds = \text{const}$ ($Re_{lim} = 2,7 \cdot 10^5$)
 Fig. 9. Curve $\zeta_D = f(Re)$ for curvilinear diffusers of uniform velocity drop
 ($dw/ds = \text{const}$) for $Re_{lim} = 2,7 \cdot 10^5$



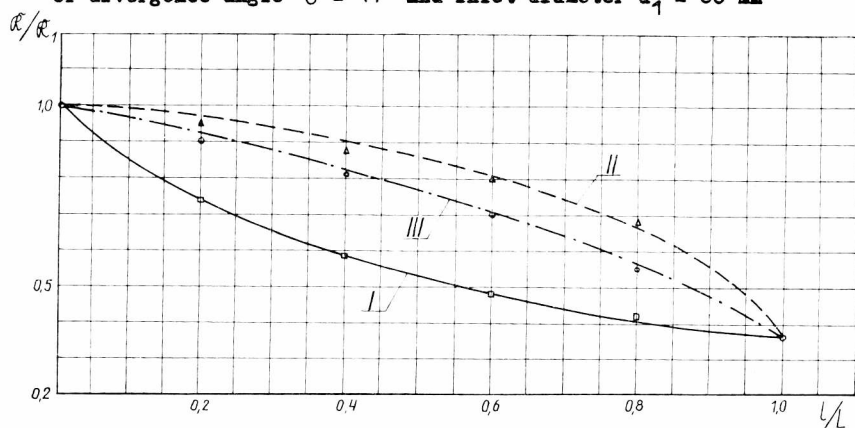
Rys. 10. Krzywe zależności $R/R_1 = f(l/L)$ dla dyfuzorów stożkowych i krzywoliniowych o kącie rozwarcia $\delta = 8^\circ$ i średnicy dopływowej $d_1 = 80 \text{ mm}$

Fig. 10. Curves $R/R_1 = f(l/L)$ for conical and curvilinear diffusers of divergence angle $\delta = 8^\circ$ and inlet diameter $d_1 = 80 \text{ mm}$



Rys. 11. Krzywe zależności $R/R_1 = f(l/L)$ dla dyfuzorów stożkowych i krzywoliniowych o kącie rozwarcia $\delta = 14^\circ$ i średnicy dopływowej $d_1 = 80$ mm

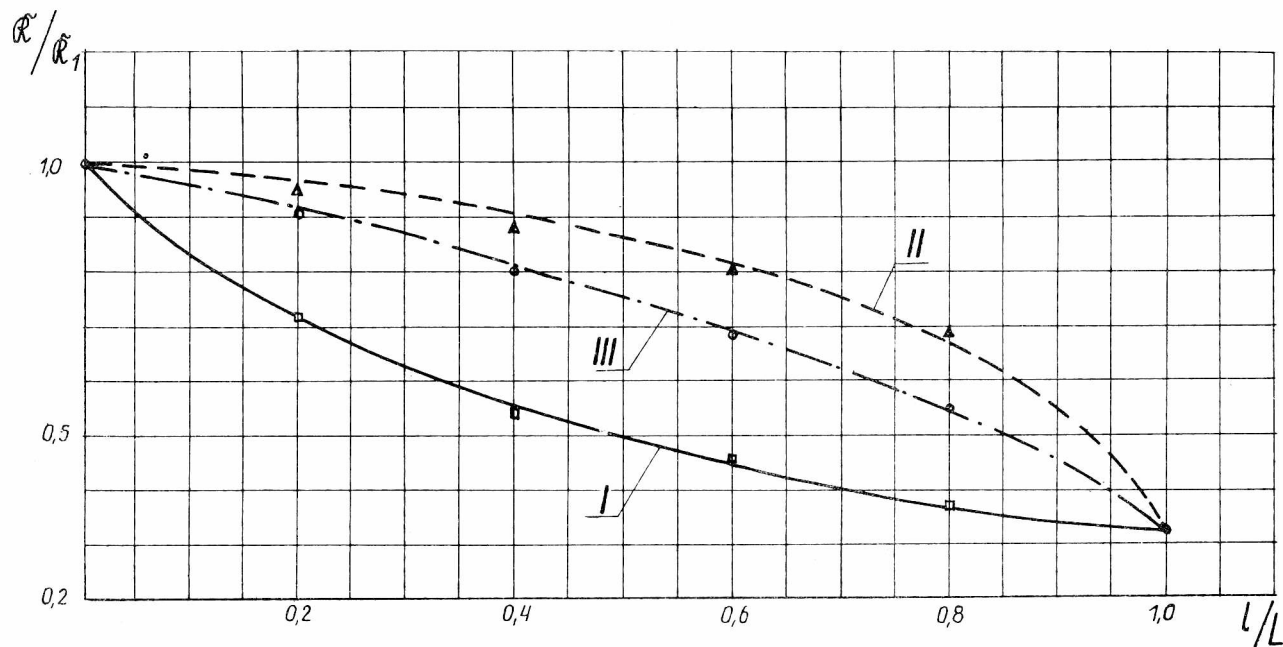
Fig 11. Curves $R/R_1 = f(l/L)$ for conical and curvilinear diffusers of divergence angle $\delta = 14^\circ$ and inlet diameter $d_1 = 80$ mm



Rys. 12. Krzywe zależności $R/R_1 = f(l/L)$ dla dyfuzorów stożkowych i krzywoliniowych o kącie rozwarcia $\delta = 17^\circ$ i średnicy dopływowej $d_1 = 80$ mm

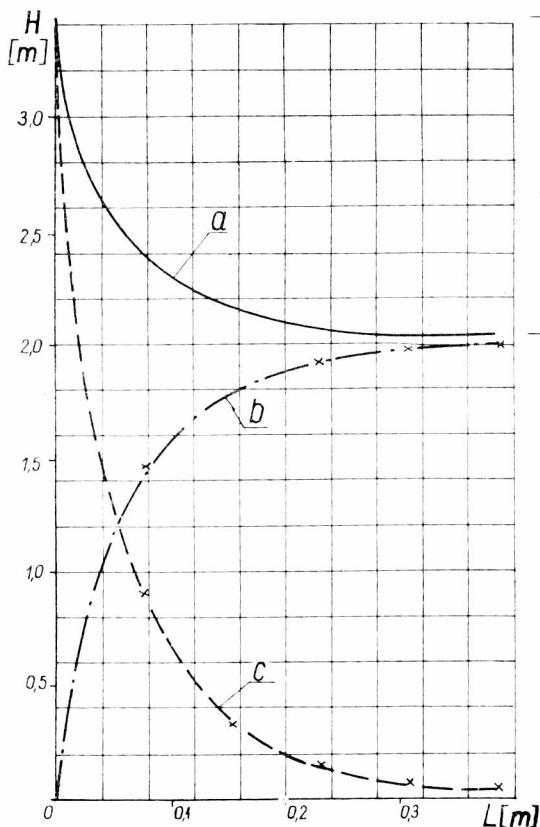
Fig. 12. Curves $R/R_1 = f(l/L)$ for conical and curvilinear diffusers of divergence angle $\delta = 17^\circ$ and inlet diameter $d_1 = 80$ mm

fuzora wzrasta równomiernie i również równomiernie maleje ciśnienie dynamiczne. Równomierny spadek ciśnienia całkowitego powoduje zmniejszenie strat hydraulicznych w stosunku do strat w dyfuzorze stożkowym. W dyfuzorze o profilu ścianek określonym równaniem $dv/ds = \text{const}$ następuje ciągły wzrost ciśnienia statycznego i ciągły spadek wysokości prędkości w dużej części dyfuzora. Wysokość rozporządzalna ciśnienia



Rys. 13. Krzywe zależności $R/R_1 = f(l/L)$ dla dyfuzorów stożkowych i krzywoliniowych o kącie rozwarcia $\delta = 20^\circ$ i średnicy dopływowej $d_1 = 80$ mm

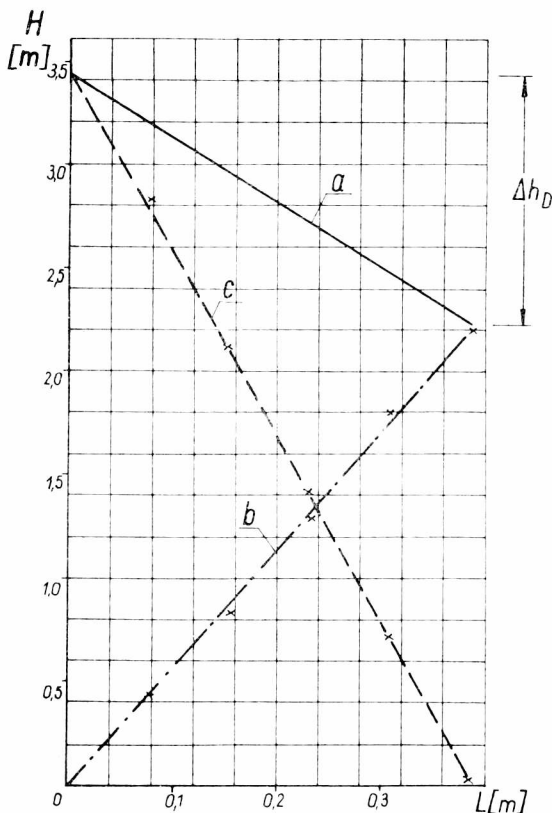
Fig. 13. Curves $R/R_1 = f(l/L)$ for conical and curvilinear diffusers of divergence angle $\delta = 20^\circ$ and inlet diameter $d_1 = 80$ mm



Rys. 14. Zmiana wysokości ciśnień wzdłuż dyfuzora stożkowego I-65-20 o chropowatości $k \approx 0,3$ mm przy maksymalnej prędkości przepływu a - krzywa zmiany wysokości energii całkowitej, b - krzywa zmiany wysokości ciśnienia statycznego, c - krzywa zmiany wysokości prędkości

Fig. 14. Pressure head change in axial direction of conical diffuser type I-65-20 with surface roughness $k \approx 0,3$ mm, at maximal flow velocity

a - curve of change of total energy head, b - curve of change of static pressure head, c - curve of change of velocity head



Rys. 15. Zmiana wysokości ciśnień wzdłuż dyfuzora o tworzących krzywoliniowych $dp/ds = \text{const}$ II-65-20 o chropowatości $k \approx 0,3$ mm przy maksymalnej prędkości przepływu a - krzywa zmiany wysokości energii całkowitej, b - krzywa zmiany wysokości ciśnienia statycznego, c - krzywa zmiany wysokości prędkości

Fig. 15. Pressure head change in axial direction of curvilinear diffuser type II-65-20 ($dp/ds = \text{const}$) with surface roughness $k \approx 0,3$ mm, at maximal flow velocity

a - curve of change of total energy head, b - curve of change of static pressure head, c - curve of change of velocity head

zmniejsza się równomiernie wzdłuż całej długości dyfuzora. Takim charakter krzywych zmiany ciśnienia jest najkorzystniejszy pod względem hydraulicznym.

Wyznaczenie optymalnego kształtu dyfuzora przy określonym kącie rozwarcia i chropowatości bezwzględnej

Z porównania krzywych zależności $\zeta_D = f$ dyfuzorów o różnych kątach rozwarcia, różnych chropowatościach i różnych kształtach w zakresie $R \gg R_{gr}$ (rys. 17 - 22) wypływają następujące wnioski:

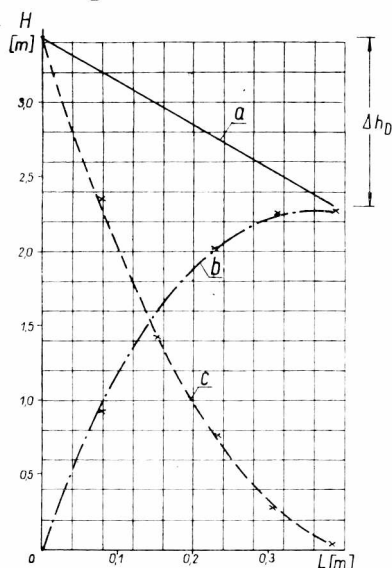
a) przy kącie rozwarcia $\delta = 8^\circ$

najniższa wartość współczynnika $\zeta_D = 0,13$ występuje w dyfuzorach stożkowych o chropowatości $k \approx 0,1$ mm; dyfuzory stożkowe o wyższej chropowatości oraz dyfuzory krzywoliniowe charakteryzują się nieco wyższymi wartościami ζ_D ,

b) przy kącie rozwarcia $\delta = 14^\circ$ najniższą wartość współczynnika $\zeta_D = 0,2$ mają dyfuzory krzywoliniowe $dv/ds = \text{const}$ o chropowatości $k \approx 0,1$ mm; wartości ζ_D w pozostałych dyfuzorach są wyższe,

c) przy kątach rozwarcia $\delta = 17^\circ$ i $\delta = 20^\circ$ również najkorzystniejsze pod względem hydraulicznym są dyfuzory krzywoliniowe $dv/ds = \text{const}$ o chropowatości $k \approx 0,1$ mm.

Na podstawie tych wniosków można zalecić wybór optymalnego kształtu i chropowatości dyfuzora przy założonym kącie rozwarcia. W przypadku konieczności zastosowania dyfuzorów krótkich (o większych kątach rozwarcia) najmniejsze straty hydrauliczne wywołuje wbudowanie dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych $dv/ds = \text{const}$ o możliwie gład-

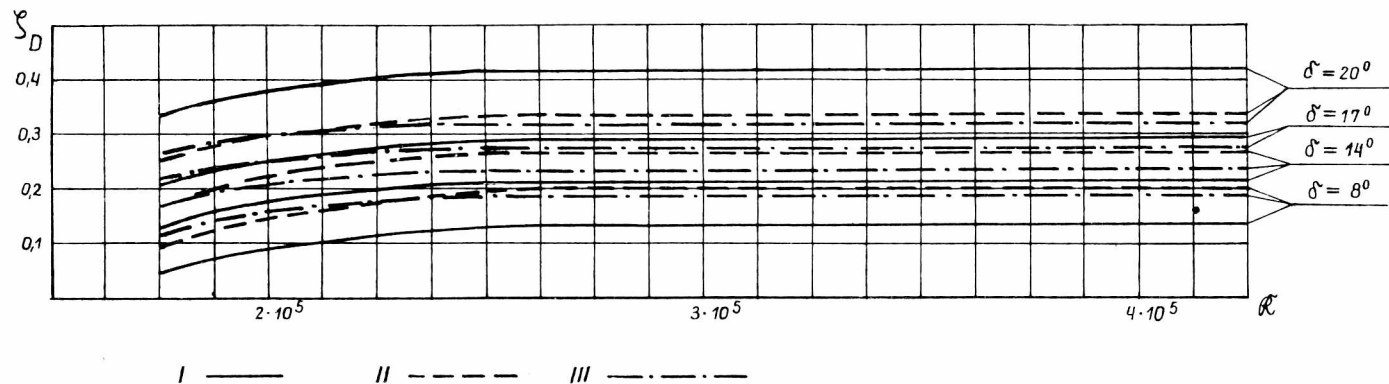


Rys. 16. Zmiana wysokości ciśnień wzdłuż dyfuzora o tworzących krzywoliniowych $dv/ds = \text{const}$ III-65-20 o chropowatości $k \approx 0,3$ mm przy maksymalnej prędkości przepływu

a - krzywa zmiany wysokości energii całkowitej, b - krzywa zmiany wysokości ciśnienia statycznego, c - krzywa zmiany wysokości prędkości

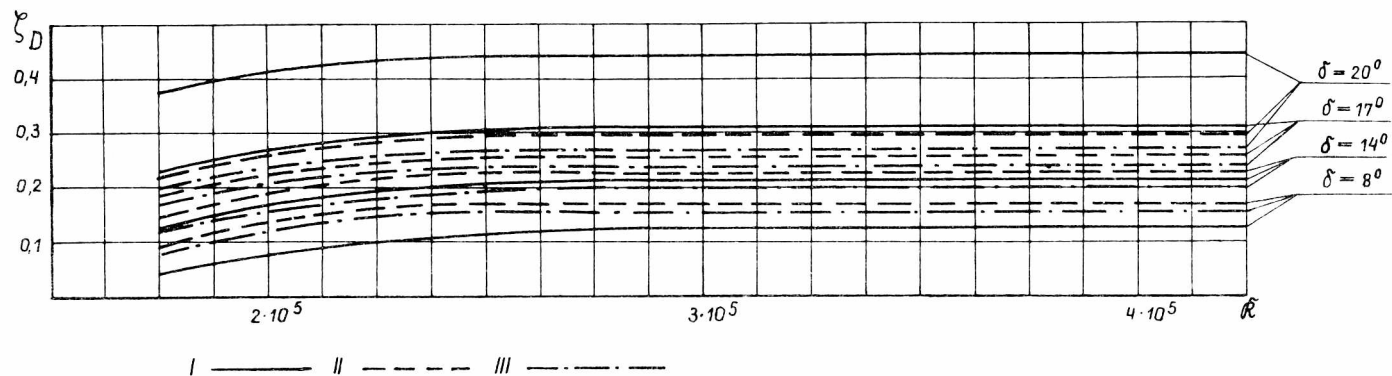
Fig. 16. Pressure head change in axial direction of curvilinear diffuser type III-65-20 $dv/ds = \text{const}$ with surface roughness $k \approx 0,3$ mm, at maximal flow velocity

a - curve of change of total energy head, b - curve of change of static pressure head, c - curve of change of velocity head



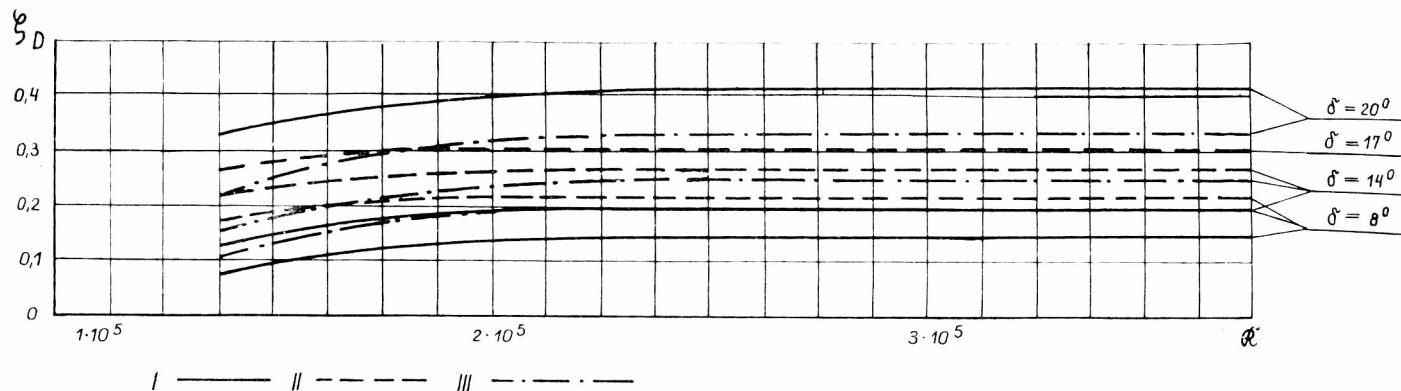
Rys. 17. Porównanie krzywych zależności $\zeta_D = f(R)$ dla dyfuzorów o różnych kształtach i kątach rozwarcia o średnicy wlotowej $d_1 = 65$ mm i chropowatości $k \approx 0,3$ mm

Fig. 17. Comparison of curves $\zeta_D = f(R)$ for diffusers of various shapes and divergence angles, with inlet diameter $d_1 = 65$ mm and surface roughness $k \approx 0,3$ mm



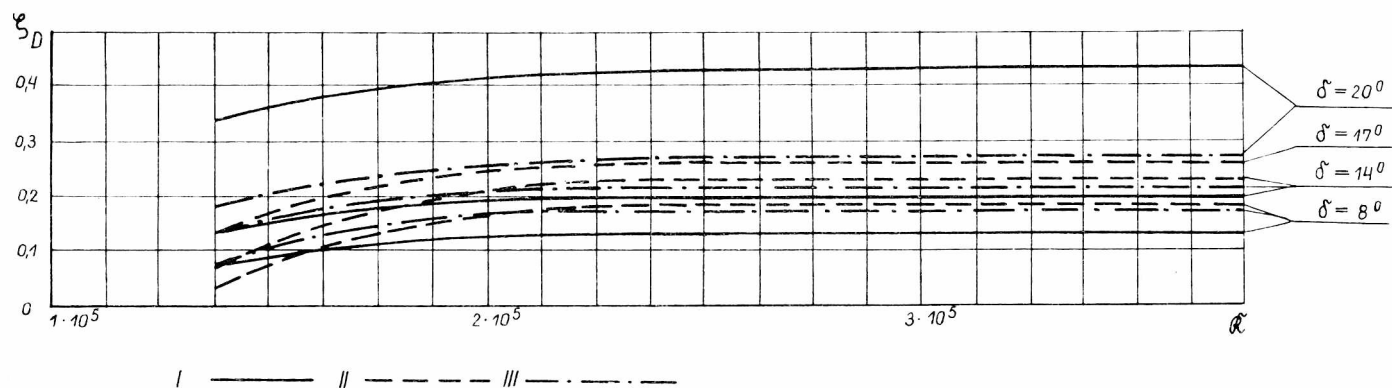
Rys. 18. Porównanie krzywych zależności $\zeta_D = f(R)$ dla dyfuzorów o różnych kształtach i kątach rozwarcia o średnicy dopływowej $d_1 = 65 \text{ mm}$ i chropowatości $k \approx 0,1 \text{ mm}$

Fig. 18. Comparison of curves $\zeta_D = f(R)$ for diffusers of various shapes and divergence angles, with inlet diameter $d_1 = 65 \text{ mm}$ and surface roughness $k \approx 0,1 \text{ mm}$



Rys. 19. Porównanie krzywych zależności $\zeta_D = f(Re)$ dla dyfuzorów o różnych kształtach i kątach rozwarcia o średnicy dopływowej $d_1 = 80$ mm i chropowatości $k \approx 0,3$ mm

Fig. 19. Comparison of curves $\zeta_D = f(Re)$ for diffusers of various shapes and divergence angles, with inlet diameter $d_1 = 80$ mm and surface roughness $k \approx 0,3$ mm



Rys.20. Porównania krzywych zależności $\zeta_D = f(R)$ dla dyfuzorów o różnych kształtach i różnych kątach rozwarcia o średnicy dopływowej $d_1 = 80$ mm i chropowatości $k \approx 0,1$ mm

Fig. 20. Comparison of curves $\zeta_D = f(R)$ for diffusers of various shapes and divergence angles, with inlet diameter $d_1 = 80$ mm and surface roughness $k \approx 0,1$ mm

kiej powierzchni wewnętrznej. Przy kącie rozwarcia $\delta = 14^\circ$ różnica ta jest nieznaczna, dlatego też dogodniejsze jest zastosowanie dyfuzora stożkowego o dość dużej chropowatości ścianek. Przy małych kątach rozwarcia ($\delta < 14^\circ$) należy stosować tylko dyfuzory stożkowe o małej chropowatości ścianek.

Wyznaczenie krzywych zależności $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dyfuzorów stożkowych i o tworzących krzywoliniowych w obszarze przepływów $Re > Re_{gr}$

Krzywe (rys. 23, 24, 25) przedstawiają zależność $\zeta_D = f(d_2/d_1)$, a tym samym od kąta rozwarcia w dyfuzorach stożkowych i o tworzących krzywoliniowych przy różnych chropowatościach bezwzględnych.

Punkty doświadczalne odpowiadają wartościom współczynnika ζ_D wszystkich badanych dyfuzorów w obszarze przepływów $Re > Re_{gr}$.

W przypadku dyfuzorów stożkowych można stwierdzić, że przy $d_2/d_1 < 2,5$, tzn. przy kątach rozwarcia $\delta < 14^\circ$ korzystniejsze pod względem hydraulicznym są dyfuzory o mniejszej chropowatości.

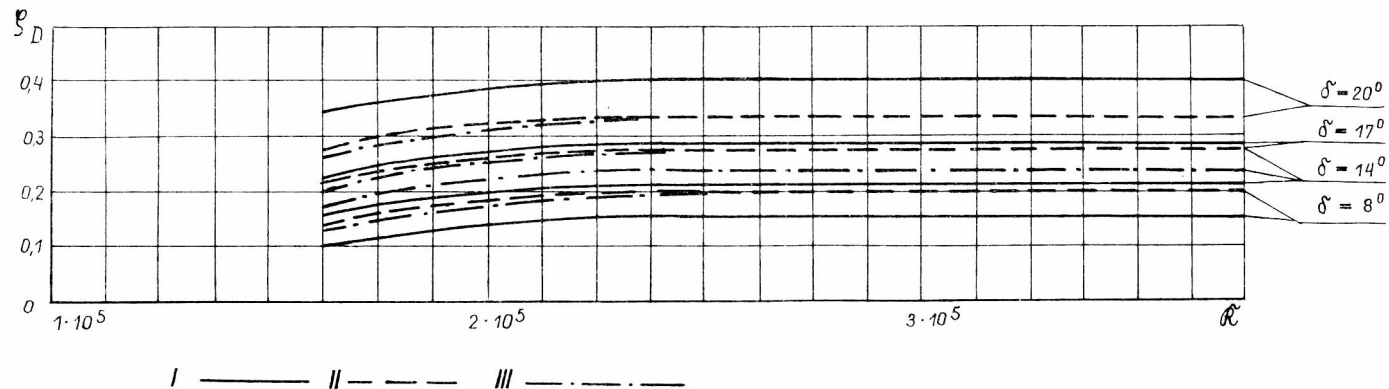
Przy stosunku średnic $d_2/d_1 = 2,5$ ($\delta = 14^\circ$) wartości ζ_D są jednakowe dla dyfuzorów stożkowych o różnych chropowatościach.

Przy $d_2/d_1 > 2,5$ ($\delta > 14^\circ$) wartości ζ_D są wyższe dla dyfuzorów o mniejszej chropowatości. Krzywa $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dla dyfuzorów stożkowych jest parabolą o dość dużym wykładniku; wraz ze wzrostem kąta rozwarcia δ wartości ζ_D rosną dość szybko. Stosowanie więc dyfuzorów stożkowych o kątach rozwarcia $\delta > 20^\circ$ przynosi duże straty wskutek oderwania się strumienia.

W dyfuzorach o tworzących krzywoliniowych wartości ζ_D są zawsze niższe dla dyfuzorów o mniejszych chropowatościach. Krzywe zależności $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dla dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych są parabolami o niższym wykładniku.

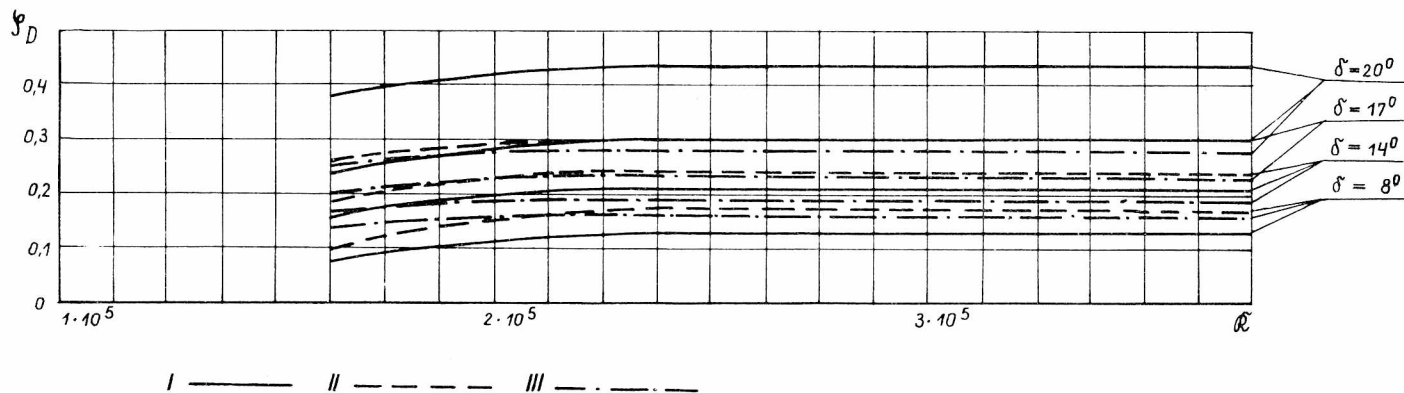
Wyprowadzenie wzorów empirycznych na współczynnik strat hydraulicznych dyfuzora ζ_D

Końcowym celem pracy było ilościowe określenie współczynnika strat hydraulicznych przy przepływie wody przez dyfuzory o smukłości $L/d_1 = 6$. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w obszarze $Re \geq 2,7 \cdot 10^5$ przy określonej chropowatości bezwzględnej i



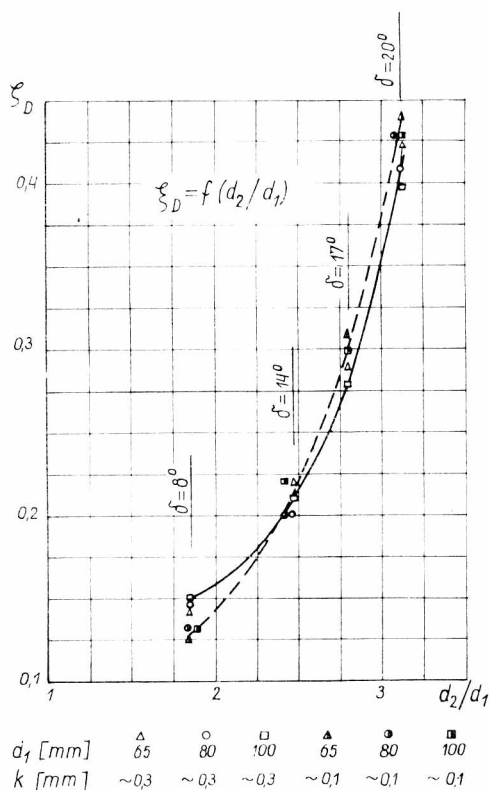
Rys. 21. Porównanie krzywych zależności $\zeta_D = f(R)$ dla dyfuzorów o różnych kształtach i różnych kątach rozwarcia o średnicy dopływowej $d_1 = 100 \text{ mm}$ i chropowatości $k \approx 0,3 \text{ mm}$

Fig. 21. Comparison of curves $\zeta_D = f(R)$ for diffusers of various shapes and divergence angles, with inlet diameter $d_1 = 100 \text{ mm}$ and surface roughness $k \approx 0,3 \text{ mm}$



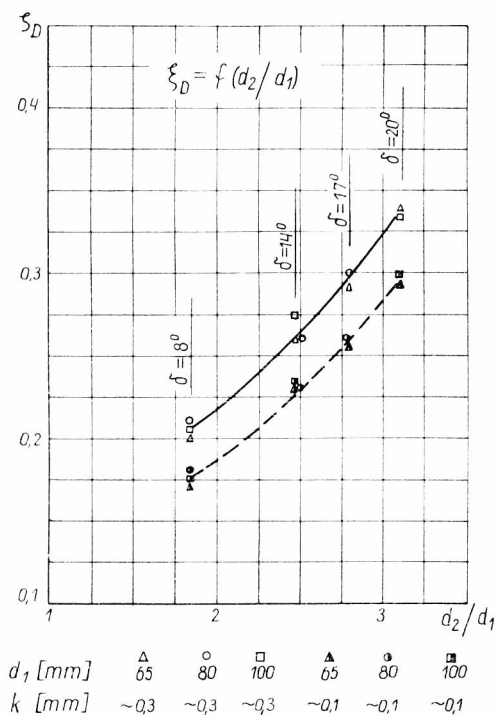
Rys. 22. Porównanie krzywych zależności $\zeta_D = f(R)$ dla dyfuzorów o różnych kształtach i kątach rozwarcia o średnicy deptywowej $d_1 = 100 \text{ mm}$ i chropowatości $k \approx 0,1 \text{ mm}$

Fig 22. Comparison of curves $\zeta_D = f(R)$ for diffusers of various shapes and divergence angles, with inlet diameter $d_1 = 100 \text{ mm}$ and surface roughness $k \approx 0,1 \text{ mm}$



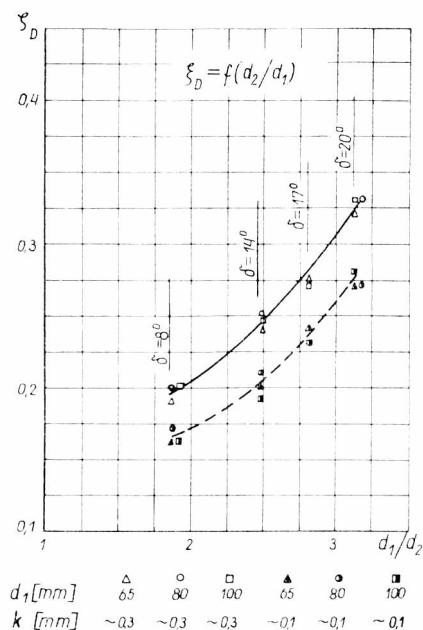
Rys. 23. Krzywe zależności współczynnika strat hydraulicznych ζ_D od stosunku średnicy wypływowej do dopływowej (d_2/d_1) w dyfuzorach stożkowych o smukłości $L/d_1 = 6$ i chropowatości $k \approx 0,3$ mm i $0,1$ mm w zakresie $Re \geq 2,7 \cdot 10^5$.

Fig. 23. Curves representing hydraulic loss coefficient ζ_D as a function of the outlet and inlet diameter ratio (d_2/d_1) in conical diffusers of slenderness ratio $L/d_1 = 6$ and surface roughness $k \approx 0,3$ mm and $0,1$ mm for $Re \geq 2,7 \cdot 10^5$.



Rys. 24. Krzywe zależności współczynnika strat hydraulicznych ζ_D od stosunku średnicy wypływowej do dopływowej (d_2/d_1) w dyfuzorach o tworzących krzywoliniowych $dp/ds = \text{const}$ o smukłości $L/d_1 = 6$ i chropowatości $k \approx 0,3$ mm i $0,1$ mm w zakresie $Re \geq 2,7 \cdot 10^5$.

Fig. 24. Curves representing hydraulic loss coefficient ζ_D as a function of the outlet and inlet diameter ratio (d_2/d_1) in curvilinear diffusers ($dp/ds = \text{const}$) of slenderness ratio $L/d_1 = 6$ and surface roughness $k \approx 0,3$ mm and $0,1$ mm for $Re \geq 2,7 \cdot 10^5$.



Rys. 25. Krzywe zależności współczynnika strat hydraulicznych ζ_D od stosunku średnicy wypływowej do dopływowej (d_2/d_1) w dyfuzorach o tworzących krzywoliniowych $dv/ds = \text{const}$ o smukłości $L/d_1 = 6$ i chropowatości $k \approx 0,3$ i $0,1$ mm w zakresie $R \gg 2,7 \cdot 10^5$

Fig. 25. Curves representing hydraulic loss coefficient ζ_D as a function of the outlet and inlet diameter ratio (d_2/d_1) in curvilinear diffusers ($dv/ds = \text{const}$) of slenderness ratio $L/d_1 = 6$ and surface roughness $k \approx 0,3$ and $0,1$ mm for $R \gg 2,7 \cdot 10^5$

Wstawiając współrzędne punktów skrajnych w równanie liniowe

$$Y = \lg a + b \cdot X \quad (31)$$

obliczono wartości współczynników a i b .

kształcie dyfuzora współczynnik ζ_D jest jednoznacznie funkcją d_2/d_1 .

Formuły empiryczne ustalono w oparciu o metodę Bretsznajdera.

Funkcja $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dla stałej wartości k jest liniowa w logarytmicznym układzie o współrzędnych $X = \lg(d_2/d_1)$ i $Y = \lg(\zeta_D - c)$ i ma ogólną postać $y = c + ax^b$, czyli

$$\zeta_D = c + a(d_2/d_1)^b, \quad (29)$$

przy czym a , b i c są stałymi współczynnikami dla określonej wartości k i określonego kształtu dyfuzora.

Współczynniki te dla poszczególnych sześciu krzywych wyznaczono następująco: na krzywej obrano dwa dowolne punkty o współrzędnych (x_1, y_1) i (x_2, y_2) oraz trzeci punkt o odciętej $x_3 = \sqrt{x_1 \cdot x_2}$ i o rzędnej y_3 . Wówczas współczynnik c równa się.

$$c = \frac{y_1 \cdot y_2 - y_3}{y_1 + y_2 - 2y_3}. \quad (30)$$

Następnie wykreślano poszczególne krzywe w układzie współrzędnych $X = \lg x$ i $Y = \lg(y - c)$, aby sprawdzić, czy w tak dobranym układzie współrzędnych punkty odpowiadające wynikom pomiarów układają się wzdłuż prostej, co świadczy o słuszności przyjętego typu równania.

1. Wyprowadzenie równania krzywej zależności $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dla dyfuzorów stożkowych (kształt I) o chropowatości bezwzględnej $k \approx 0,3$ mm

x_1	2	0,1553
x_2	3	0,35
x_3	2,45	0,204

Stała $c = 0,1305$.

Współrzędne krzywej doświadczalnej

d_2/d_1	1,84	2,47	2,79	3,12
ζ_D	0,147	0,21	0,266	0,41
c	0,1315	0,1315	0,1315	0,1315
$\zeta_D - c$	0,0155	0,0785	0,1455	0,2785

Równanie liniowe $Y = \lg a + b \cdot X$, czyli

$$\left. \begin{aligned} \lg(y - c) &= \lg a + b \lg x \\ \lg 0,0155 &= \lg a + b \lg 1,84 \\ \lg 0,2785 &= \lg a + b \lg 3,12 \end{aligned} \right\} \text{ dla punktów skrajnych}$$

Z tego układu równań wyznaczamy niewiadome a i b : $a = 0,00055$;
 $b = 5,47$.

Równanie krzywej ma zatem ogólną postać:

$$y = 0,1315 + 0,00055 x^{5,47} \quad (32a)$$

czyli

$$\text{Ia} - \boxed{\zeta_D = 0,1315 + 0,00055 (d_2/d_1)^{5,47}} \quad (32b)$$

2. Równanie krzywej zależności $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dla dyfuzorów stożkowych (kształt I) o chropowatości $k \approx 0,1$ mm.

Obliczono następujące wartości współczynników równania (29)
 $c = 0,091$, $a = 0,00251$, $b = 4,3$.

Wzór więc przybiera postać:

$$\text{Ib} - \boxed{\zeta_D = 0,091 + 0,00251 (d_2/d_1)^{4,3}} \quad (33)$$

3. Równanie krzywej zależności $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dla dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych $dp/ds = \text{const}$ (kształt II) o chropowatości $k \approx 0,3$ mm.

Wartości współczynników równania (29) wynoszą: $c = 0,1467$, $a = 0,01497$, $b = 2,23$.

Formuła empiryczna ma więc postać:

$$\text{IIa} - \boxed{\zeta_D = 0,1467 + 0,01497 (d_2/d_1)^{2,23}} \quad (34)$$

4. Równanie krzywej zależności $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dla dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych $dp/ds = \text{const}$ (kształt II) o chropowatości $k \approx 0,1$ mm.

Wartości współczynników równania (29) są następujące: $c = 0,125$, $a = 0,01303$, $b = 2,27$.

Postać formuły empirycznej

$$\text{IIb} - \boxed{\zeta_D = 0,125 + 0,01303 (d_2/d_1)^{2,27}} \quad (35)$$

5. Równanie krzywej zależności $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dla dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych $dv/ds = \text{const}$ (kształt III) o chropowatości $k \approx 0,3$ mm.

Wartości współczynników równania (29) $c = 0,155$, $a = 0,00753$, $b = 2,739$.

Postać formuły empirycznej

$$\text{IIIa} - \boxed{\zeta_D = 0,155 + 0,00753 (d_2/d_1)^{2,739}} \quad (36)$$

6. Równanie krzywej zależności $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dla dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych $dv/ds = \text{const}$ (kształt III) o chropowatości $k \approx 0,1$ mm.

Wartości współczynników równania (29) $c = 0,1345$, $a = 0,003927$, $b = 3,131$.

Postać formuły empirycznej

$$\text{IIIb} - \boxed{\zeta_D = 0,1345 + 0,003927 (d_2/d_1)^{3,131}} \quad (37)$$

Podane formuły empiryczne określające współczynnik strat hydraulicznych wywołanych wbudowaniem w przewód dyfuzorów o różnych kształtach i chropowatościach są ważne tylko dla dyfuzorów o smukłości $L/d_1 = 6$ w zakresie liczb Reynoldsa $Re \geq 2,7 \cdot 10^5$ i przy określonych

chropowatościach. Jako wzory przybliżone można je stosować w obszarze $R > 2,5 \cdot 10^5$ i przy chropowatościach zbliżonych do podanych powyżej.

Otrzymane wzory dosyć dokładnie określają uzyskane z pomiarów zależności współczynnika $\zeta_D = f(d_2/d_1)$. Różnice między wartościami współczynników ζ_D otrzymanymi z krzywej pomiarowej a wartościami tych współczynników obliczonych z wzorów przedstawia poniższe zestawienie:

Wartości	$\frac{d_2}{d_1}$	Kształt I		Kształt II		Kształt III	
		$k \approx 0,3$ mm	$k \approx 0,1$ mm	$k \approx 0,3$ mm	$k \approx 0,1$ mm	$k \approx 0,3$ mm	$k \approx 0,1$ mm
ζ_D z krzywych pomiaro- wych	2	0,1553	0,1375	0,2175	0,186	0,2025	0,1675
	3	0,35	0,37	0,32	0,2825	0,3075	0,2575
ζ_D obliczone	2	0,1559	0,1403	0,2169	0,1878	0,2052	0,1689
	3	0,3665	0,372	0,3202	0,280	0,3075	0,2569
e	2	$\pm 0,0006$	$\pm 0,0028$	$\pm 0,0006$	$\pm 0,0018$	$\pm 0,0027$	$\pm 0,0014$
	3	$\pm 0,0165$	$\pm 0,002$	$\pm 0,0002$	$\pm 0,0025$	$\pm 0,0000$	$\pm 0,0006$
ϵ	2	$\pm 0,38\%$	$\pm 2,04\%$	$\pm 0,27\%$	$\pm 0,97\%$	$\pm 1,33\%$	$\pm 0,83\%$
	3	$\pm 4,7\%$	$\pm 0,54\%$	$\pm 0,062\%$	$\pm 0,88\%$	$\pm 0,0\%$	$\pm 0,23\%$

ANALIZA DOKŁADNOŚCI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Ostatecznym celem przeprowadzonych badań było ilościowe określenie wartości współczynnika strat hydraulicznych ζ_D w zależności od kształtu dyfuzora, kąta rozwarcia i chropowatości. Zadaniem analizy błędów przeprowadzonych badań jest określenie stopnia dokładności wyznaczenia współczynnika ζ_D .

Współczynnik ζ_D wyznaczono sposobem pośrednim, mierząc bezpośrednio następujące wielkości:

- przyrost wysokości ciśnienia statycznego w dyfuzorze Δh ,
- średnie natężenie przepływu Q ,
- średnice dyfuzora: dopływową - d_1 i wypływową - d_2 .

Zatem błąd (rozbieżność średnia) wyznaczenia współczynnika ζ_D będzie zależał od błędów (rozbieżności średnich) pomiarów Δh , Q , d_1 i d_2 .

Analiza błędów wyznaczonych wartości współczynnika ζ_D została przeprowadzona na podstawie wyników pomiarów Δh , Q , d_1 i d_2 dla dyfuzora stożkowego I - 65 - 8 o chropowatości $k \approx 0,1$ mm przy $R = 1,72 \cdot 10^5$. Wybrano do analizy dyfuzor o najmniejszej wartości współczynnika ζ_D , której błąd względny wyznaczenia jest największy.

Błąd pomiaru przyrostu ciśnienia statycznego w dyfuzorze

Wartość Δh była wyznaczona na podstawie odczytów wskazań rtęciowego manometru różnicowego. Średni błąd odczytu określono na podstawie trzech serii pomiarowych. Zakładając normalny rozkład prawdopodobieństwa błędów przypadkowych, błąd średni $e_{\Delta z}$ wyznaczono z zależności

$$e_{\Delta z} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-1} \quad (38)$$

w której e_i - jest odchyłką danego odczytu od wartości średniej n obserwacji.

Względny błąd $\varepsilon_{\Delta h}$ poszczególnego pomiaru Δh wyznaczono z zależności:

$$\varepsilon_{\Delta h} = \frac{e_{\Delta z}}{\Delta z} + \varepsilon - \varepsilon_{\gamma_w}, \quad (39)$$

przy czym: z - jest średnią arytmetyczną szeregu pomiarów.

Na podstawie rozrzutu trzech serii pomiarowych wyznaczono średnią wartość wskazań, obliczono wartość e_i oraz błąd względny odczytu różnicy wskazań. Błąd ten przy wartości $R = 1,72 \cdot 10^5$ (minimalnej w przeprowadzonych badaniach danego dyfuzora) wynosi: $e_i = 0,025$ m, $e_{\Delta z} = 0,0177$ m.

$$\varepsilon_{\Delta z} = \frac{e_{\Delta z} \cdot 100}{\Delta z} = \pm 3,32\%$$

We wzorze (39) uwzględniono również błąd wyznaczenia γ_{rt} i γ_w . Temperaturę otoczenia mierzono przy każdej serii pomiarowej. Wahania

jej w czasie pomiarów każdej serii nie przekraczały $\pm 0,5^\circ$. Ta zmiana temperatury wywołuje zmianę $(\gamma_{rt} - \gamma_w)$ o $0,059 \text{ kN/m}^3$, co dla średniej wartości $(\gamma_{rt} - \gamma_w) = 123,058 \text{ kN/m}^3$ daje błąd względny $\pm 0,04\%$ i zmianę γ_w o $0,05 \text{ kN/m}^3$, co daje błąd względny $\pm 0,51\%$.

Całkowity błąd pomiaru wynosi więc

$$\varepsilon_{\Delta h} = 3,32\% + 0,04\% - 0,51\% = 2,85\%.$$

Błąd pomiaru natężenia przepływu

Do pomiaru natężenia przepływu Q zastosowano trzy różne zwężki miernicze, wbudowane w trzy równoległe rozgałęzienia rurociągu pomiarowego. Wyznaczony na podstawie badań bezpośrednich błąd względny pomiaru przy $Q_{\min} = 0,0115 \text{ m}^3/\text{h}$ - zwężka $\varnothing 65 \text{ mm}$ wynosi $\varepsilon_Q = \pm 0,9\%$.

Błąd pomiaru średnicy dopływowej i wypływowej dyfuzora

Błąd pomiaru średnic d_1 i d_2 określono za pomocą pomiarów bezpośrednich w obu przekrojach. Dokładność pomiaru d_1 i d_2 rury wynosi $\varepsilon_d = \pm 0,5\%$.

Błąd wyznaczenia współczynnika ζ_D

Współczynnik strat hydraulicznych w dyfuzorze ζ_D obliczano z wzoru

$$\zeta_D = \frac{\Delta h_D}{v_1^2 / 2g}, \quad (12)$$

w którym

$$\Delta h_D = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \Delta h. \quad (27)$$

Z równania ciągłości

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2},$$

$$v_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2}.$$

Po podstawieniu do wzoru (12) otrzymamy

$$\zeta_D = 1 - \frac{d_1^4}{d_2^4} - \frac{\pi^2 g \Delta h d_1^4}{8Q^2} \quad (40)$$

Średnią rozbieżność czyli średni bezwzględny błąd kwadratowy współczynnika ζ_D można wyznaczyć ze wzoru:

$$e_{\zeta_D} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \zeta_D}{\partial \Delta h}\right)^2 e_{\Delta h}^2 + \left(\frac{\partial \zeta_D}{\partial Q}\right)^2 e_Q^2 + \left(\frac{\partial \zeta_D}{\partial d_1}\right)^2 e_{d_1}^2 + \left(\frac{\partial \zeta_D}{\partial d_2}\right)^2 e_{d_2}^2} \quad (41)$$

w którym

$\frac{\partial \zeta_D}{\partial \Delta h}$, $\frac{\partial \zeta_D}{\partial Q}$, $\frac{\partial \zeta_D}{\partial d_1}$, $\frac{\partial \zeta_D}{\partial d_2}$ - pochodne cząstkowe współczynnika ζ_D względem wielkości Δh , Q , d_1 i d_2

$e_{\Delta h}$, e_Q , e_{d_1} , i e_{d_2} - średnie bezwzględne błędy wielkości Δh , Q , d_1 i d_2 .

Po obliczeniu pochodnych cząstkowych współczynnika ζ_D względem poszczególnych wielkości i po podstawieniu poszczególnych wartości średni błąd bezwzględny dla minimalnego przepływu wyniesie:

$$\epsilon e_{\zeta_D} = \pm 0,00314.$$

Błąd względny

$$\zeta_D = \frac{e_{\zeta_D}}{\zeta_D} \cdot 100 = \pm 8,23\%.$$

Wynika stąd, iż największy średni błąd pomiarowy przeprowadzonych badań występuje przy najmniejszym natężeniu przepływu.

Podany błąd wyznaczenia współczynnika ζ_D odnosi się do przypadku, gdy ζ_D zmienia się z liczbą Reynoldsa. Natomiast w zakresie dużych liczb Reynoldsa, dla których ζ_D nie zależy od Re błąd wyznaczenia współczynnika ζ_D będzie równy średniemu błędowi średniej arytmetycznej z pomiarów ζ_D przy różnych liczbach Reynoldsa.

Dla średniej wartości liczby Reynoldsa $Re \approx 2,8 \cdot 10^5$ średni błąd względny pomiaru ζ_D obliczony jak poprzednio, wynosi $\epsilon_{\zeta_D} = \pm 3,62\%$,

a graniczny błąd względny wartości średnich błędu współczynnika ζ_D

$$3 \varepsilon_{\zeta_D} = \pm 10,9\%$$

PORÓWNANIE WYNIKÓW BADAŃ WŁASNYCH Z DOTYCHCZASOWYMI

Przeprowadzone badania potwierdzają przyjęte na wstępie założenia, że wartość strat hydraulicznych w dyfuzorze zależy od:

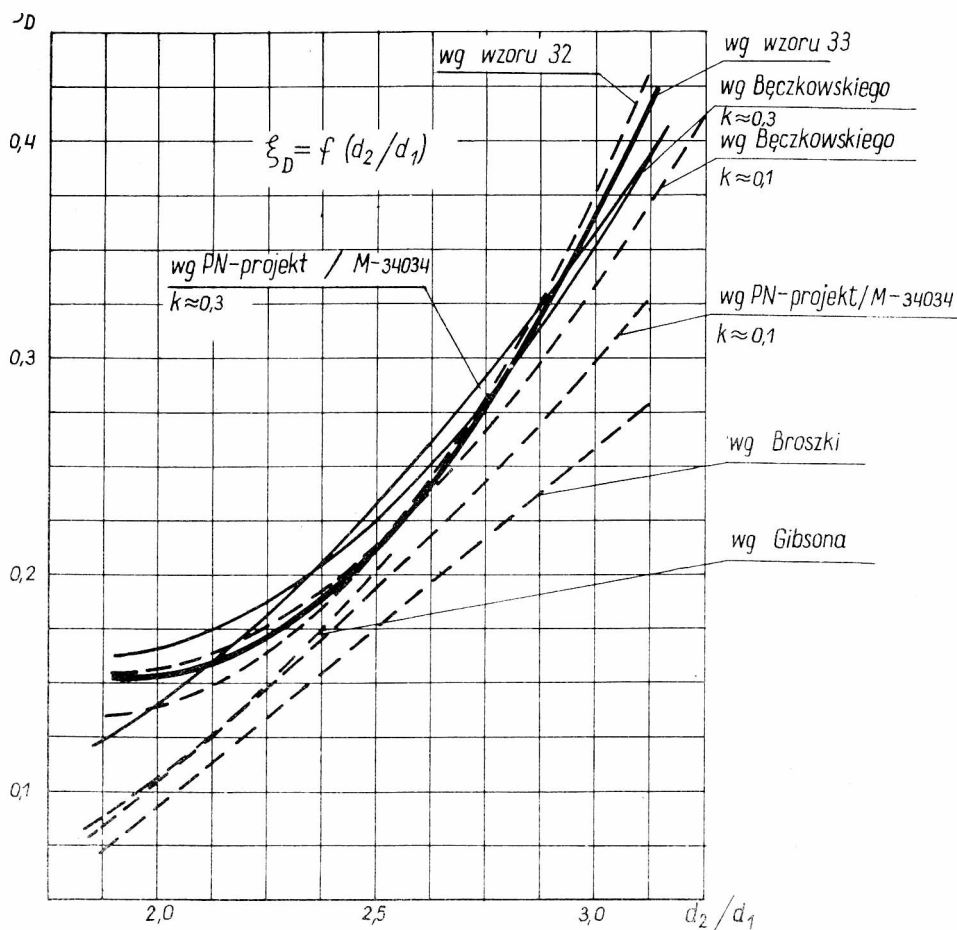
- a) kąta rozwarcia dyfuzora δ ,
- b) wartości umownej liczby Reynoldsa R ,
- c) chropowatości ścian dyfuzora,
- d) gradientu ciśnienia i prędkości w kierunku ruchu.

Przeprowadzone badania potwierdziły wnioski niektórych badaczy, z innymi zaś są trudno porównywalne, ponieważ nie obejmowały dyfuzorów hydrometrycznie gładkich. Wiele formuł empirycznych podanych w literaturze dotyczyło bądź dyfuzorów chropowatych o nieokreślonej ilościowo chropowatości, bądź gładkich i wobec tego nie można ich porównywać z współczynnikami obliczonymi z wyprowadzonych równań empirycznych, które dotyczą dyfuzorów o określonych chropowatościach.

Wykres (rys.26) obrazuje porównanie krzywych funkcji $\zeta_D = f(d_2/d_1)$ dyfuzorów stożkowych obliczonych z wyprowadzonych równań z krzywymi obliczonymi z formuł podanych przez Gibsona, Broszkę, Bęczkowskiego i PN-projekt /M-34034. Formuły empiryczne Gibsona i Broszki dotyczą nieokreślonej chropowatości; z przebiegu krzywych można wnosić, że dotyczą one dyfuzorów gładkich lub o małej chropowatości. Krzywe sporządzone na podstawie formuł empirycznych Bęczkowskiego i podanych w projekcie PN/M-3034 są na ogół zgodne i porównywalne z wynikami niniejszej pracy.

W przypadku dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych nie można przeprowadzić tego typu porównania, ponieważ w dostępnej literaturze nie ma formuł określających wysokości straty w zależności od profilu ścianek i chropowatości.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że krytyczny kąt rozwarcia, przy którym występuje oderwanie się strumienia w dyfuzorach stożkowych, wynosi $\delta_{cr} = 14^\circ$, co potwierdza wyniki uzyskane w Instytucie Lotniczym Politechniki w Stuttgarcie. W niniejszej pracy został też potwierdzony wniosek Petersona, że najwyższy stopień spraw-



Rys. 26. Porównanie krzywych zależności ζ_D od stosunku średnicy wypływowej do dopływowej (d_2/d_1) wyznaczonych z wzorów (32) i (33) z krzywymi wyznaczonymi z wzorów Gibsona, Broszki, Bęczkowskiego i PN - projekt/M-34034

Fig. 26. Comparison of curves representing ζ_D as a function of the outlet and inlet diameter ratio (d_2/d_1) derived from formulae (32) and (33) with curves derived from formulae by Gibson, Broszko, Bęczkowski and Polish Standard M-34034 (draft)

ności dyfuzora stożkowego może być osiągnięty przy kątach rozwarcia $\delta < 14^\circ$.

Zasadniczym celem badań było podanie zalecenia doboru odpowiedniego profilu tworzących dyfuzora celem zmniejszenia strat hydraulicznych w dyfuzorze. Wyniki niniejszej pracy potwierdziły teoretyczne

rozważania Idielczika i Kopyrina. Rezultatem niniejszej pracy jest jednoznaczne określenie krzywej tworzącej dyfuzora, przy której straty są najmniejsze $dv/ds = \text{const}$.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Współczynnik oporu ζ_D wszystkich badanych dyfuzorów o smukłości $L/d_1 = 6$ - jest rosnącą funkcją liczby Reynoldsa aż do granicznej wartości Re_{gr} , powyżej której nie ulega zmianie. Badania wykazały że powyżej $Re_{gr} = 2,7 \cdot 10^5$ wartości współczynnika ζ_D nie zależały od liczby Reynoldsa.

2. Przy określonym kształcie dyfuzora współczynnik ζ_D jest funkcją stosunku średnicy wypływowej do dopływowej (d_2/d_1) i liczby Reynoldsa w obszarze $Re < 2,7 \cdot 10^5$, zaś w obszarze $Re \geq 2,7 \cdot 10^5$ jest wyłączną funkcją d_2/d_1 .

3. Współczynnik ζ_D zależy od chropowatości; przy określaniu strat hydraulicznych dyfuzorów nie można pomijać wpływu chropowatości, gdyż błędy stąd wynikające mogą być bardzo duże.

4. Przy małych kątach rozwarcia ($\delta < 14^\circ$) najmniejsze straty ciśnienia występują w dyfuzorach stożkowych o małej chropowatości ścianek.

5. Przy większych kątach rozwarcia $\delta \geq 14^\circ$ najmniejsze straty hydrauliczne wywołuje wbudowanie dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych określonych równaniem $dv/ds = \text{const}$ o możliwie gładkiej powierzchni wewnętrznej.

6. Wysokość strat hydraulicznych w dyfuzorze zależy od charakteru krzywej spadku liczby Reynoldsa wzdłuż dyfuzora. Przy określonym kącie rozwarcia, im bardziej równomierny jest spadek liczby Reynoldsa wzdłuż osi dyfuzora, tym mniejsza jest wysokość strat hydraulicznych.

7. Wysokość strat hydraulicznych w dyfuzorze zależy od charakteru krzywej zmiany ciśnienia statycznego i dynamicznego wzdłuż osi dyfuzora. Im charakter tych krzywych jest bardziej równomierny, tym wartość wysokości strat hydraulicznych jest mniejsza.

8. Dla dyfuzorów stożkowych i dyfuzorów o tworzących krzywoliniowych o różnych chropowatościach wyprowadzono formuły empiryczne,

określające współczynnik strat hydraulicznych w dyfuzorze ζ_D jako funkcję d_2/d_1 . Współczynniki ζ_D , wyznaczone za pomocą tych formuł, określają z dostateczną dla praktyki dokładnością straty hydrauliczne dyfuzorów w obszarze $Re \geq 2,7 \cdot 10^5$, d_2/d_1 od 1,8 do 3,8 przy najkorzystniejszej smukłości $L/d_1 = 6$ oraz chropowatościach $k \approx 0,1$ i $0,3$ mm

9. Przez praktyczne zastosowanie przedstawionych wyników badań możliwe jest osiągnięcie znacznych korzyści ekonomicznych, wynikających ze zmniejszenia zapotrzebowania energii w tych urządzeniach przepływowych, w których stosuje się dyfuzory. Korzyści te osiągnąć można głównie dzięki zastosowaniu dyfuzorów o odpowiednich kształtach i chropowatościach. Przy tych samych stratach hydraulicznych dyfuzory o tworzących krzywoliniowych mogą być krótsze od stożkowych, co pozwala na znaczne oszczędności materiałowe.

10. Przeprowadzone badania mogą oddać usługi przy projektowaniu kanałów międzystopniowych pomp wirowych, turbin wodnych, strumienic i innych urządzeń i instalacji hydraulicznych.

LITERATURA

- [1] A l t s z u l A.D., Mestnyje gidravličeskie soprotivlenia pri dviženij viazkich židkostej, C.E.U. Moskwa 1962.
- [2] B a a s h u u s N., Druckhöhenverlust in Leitungen mit kontinuierlich veränderlichem Querschnitt, Z.Forschung 1, Berlin 1930.
- [3] B ę c z k o w s k i W., Rurociągi energetyczne, cz. I, Warszawa 1965, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [4] B r e t s z n a j d e r S., Zagadnienia projektowania procesów przemysłu chemicznego, t. I, Warszawa 1956.
- [5] B r o s z k o M., Poradnik techniczny, Mechanik t. I/1, Warszawa 1949, Instytut Wydawniczy SIMP.
- [6] D ö n c h F., Divergente und konvergente turbulente Strömungen mit kleinen Öffnungswinkeln, VDI - Forschungsheft 1926, Nr 282.
- [7] E c k B., Technische Strömungslehre Springer - Verlag, Berlin 7 Aufl. 1966.
- [8] F l i e g n e r A., Versuche über das Ausströmen von Luft durch konisch divergente Rohre, Schweiz. Bauztg. Bd. 31, Bern 1898.
- [9] G i b s o n A.H., On the flow of water through pipes and passages having converging or diverging boundaries, Prov. Roy. Soc. Vol. 83, London 1910.

- [10] I d e l ċ i k J.E., Promyślennaja aerodynamika, Nr 3, 1947.
- [11] J e ż o w i e c k a - K a b s c h K., Wpływ kształtów dyfuzorów na wysokość strat hydraulicznych, Dysert., Wrocław 1970.
- [12] K a m e n e v P.N., Gindroelevatory w stroitelstwie, Moskwa 1964.
- [13] K o p y r i n M.A., Gidravlika i gidravličeskie mašiny, Moskwa 1961.
- [14] M i c z k a J., Z a j d e l J., O niektórych sposobach zmniejszenia strat przepływu w dyfuzorach, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej Nr 27, Mechanika z. 10, 1964.
- [15] N i k u r a d s e J., Untersuchungen über die Strömungen des Wassers in konvergenten und divergenten Kanälen, VDI - Forschungsheft 1929, Nr 289.
- [16] O b a l s k i J., Rachunek błędów, Poradnik techniczny. Mechanik tom I/3, Warszawa 1960, Państwowe Wydawnictwo Techniczne.
- [17] P o h l h a u s e n K., Zur näherungsgleichen Integration der Differentialgleichung der laminaren Reibungsschicht, Za MM I 1921
- [18] P o l z i n A., Strömungsuntersuchungen in einem ebenen Diffusor, Ing. Arch. 1940, II Band, 5. Heft.
- [19] P r a n d t l L., Dynamika przepływów (tłum. z jęz. niemieckiego), Warszawa 1956, Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- [20] R i f f a r t A., Über Versuche mit Verdichtungs düsen. VDI - Forschungsheft 1922, Nr 257.
- [21] R i p p l E., Experimentelle Untersuchungen über Wirkungsgrade und Abreissverhalten von schlanken Kegeldiffusoren. Maschinenbau technik 5/1956.
- [22] T r o s k o l a ŋ s k i A.T., Hydromechanika techniczna, T. II, Warszawa 1954, Państwowe Wydawnictwo Techniczne.
- [23] PN - projekt /M-34034: Rurociągi. Obliczanie strat ciśnienia.

INFLUENCE OF DIFFUSER SHAPE ON HYDRAULIC LOSSES

This paper deals with research of pressure drop arising during flow of water in conic-shaped diffusers as well as in curved diffusers, having the curvature determined by formulae $dp/ds = \text{const}$ and $dv/ds = \text{const}$. On the base of test results has been found, that with the given shape of a diffuser hydraulic losses factor ζ_D is a function of the outflow to inflow dia ratio (d_2/d_1) and the Reynolds constant for $Re \geq 2,7 \cdot 10^5$ and is determined by the d_2/d_1 ratio only for $Re < 2,7 \cdot 10^5$. It has been also proved, that the ζ_D - factor is a function of the surface roughness. For conical-shaped and curved - skaped diffusers of various surface roughness empirical formulas are derived determining the hydraulic losses factor ζ_D as a function of d_2/d_1 ratio.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ДИФфуЗОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Обсуждено исследование потерь давления при протекании воды через конусные диффузоры и диффузоры с криволинейными образующими, которых кривизна определена следующими условиями: $dp/ds = \text{const}$ и $dv/ds = \text{const}$. В результате исследований обнаружено, что при определённой форме диффузора коэффициент гидравлических потерь ζ_D является функцией отношения выходного диаметра к входному (d_2/d_1) и числа Рейнольдса в пространстве $Re < 2,7 \cdot 10^5$, в пространстве же $Re \geq 2,7 \cdot 10^5$ - только функцией d_2/d_1 . Доказано также, что коэффициент ζ_D является функцией шероховатости. Для диффузоров конусных и с криволинейными образующими при различной шероховатости выведены эмпирические формулы, определяющие коэффициент ζ_D гидравлических потерь в диффузорах как функцию d_2/d_1 .

Cena zł 10,—

Pw

Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
ma stale na składzie

Wojewódzka Księgarnia Techniczna
Wrocław, ul. Świdnicka 8

oraz

Księgarnia nr 49
Wybrzeże Wyspiańskiego 27