

ANDRZEJ WITKOWSKI

Katedra Kotłów i Maszyn Ciepłych

BADANIA AERODYNAMICZNE OSIOWEGO WIENCA SPRĘŻAJĄCEGO Z MERYDIONALNYM PRZYŚPIESZENIEM STRUMIENIA

Streszczenie. Praca poświęcona jest badaniom aerodynamicznym osiowego wieńca sprężającego z merydionalnym przyspieszeniem strumienia, konstrukcję którego przedstawiono w pracy [10]. Wyniki sondowania przepływu w układzie bezwzględny, w przekroju wlotowym i wylotowym wirnika, posłużyły do wyznaczenia charakterystyk aerodynamicznych badanego wieńca i rozkładu parametrów przepływu przy różnych kątach napływu czynnika i zmiennej liczbie obrotów.

Analiza wyników badań wykazała dobre własności aerodynamiczne wieńca oraz słuszność zastosowanej metody obliczeń przepływowych.

1. Wstęp

W dostępnej literaturze przedmiotu brak jest opracowań, które zawierałyby wyczerpujące dane dotyczące geometrii i własności aerodynamicznych wieńców sprężających z merydionalnym przyspieszeniem strumienia. Znane publikacje [1], [2], [3], nie podają dostatecznie dokładnego opisu stanowiska badawczego, sposobu przeprowadzenia badań, jak również kształtu części przepływowej i geometrii łopatek wirnika. Nie znaleziono również danych, dotyczących rozkładu parametrów przepływu w płaszczyźnie krawędzi wlotowej i wylotowej łopatek wirnika, których znajomość jest nieodzowna dla oceny własności aerodynamicznych wieńców sprężających i wyodrębnienia wniosków dotyczących sposobu projektowania.

Wymienione niedostatki informacji skłoniły autora do opracowania i przebadania nowej konstrukcji wirnika, która by możliwie najpełniej uwzględniała charakterystyczne cechy wieńców badanego typu.

2. Przedmiot i cel badań

2.1. Badany model

Przedmiotem badań jest osiowy wieńiec sprężający z płaszczyzną tworzącą krzywoliniową, przestrzennie ukształtowanymi łopatkami i cylindryczną osłoną zewnętrzną.

W celu spotęgowania naturalnej własności badanej konstrukcji wieńca, umożliwiającej uzyskiwanie wysokich wartości wskaźnika sprężu, przyjęto stosunek średnic w przekroju wylotowym $v_2 = 0.75$. Zważywszy, że rozpatry-

wany model stanowi pod względem przepływowym konstrukcję pośrednią między wieńcami z ukośnym kierunkiem przepływu a osiowymi, założono znacznie większą gęstość ułopatkowania t/l niżby to wynikało z zaleceń dla wieńców czyste osiowych. Zgodnie z tym gęstość ułopatkowania przy płaszcie w przekroju wylotowym wirnika wynosi 0,435.

Zagadnienie doboru gęstości ułopatkowania wieńców sprzężających z merydionalnym przyspieszeniem strumienia nie jest opracowane. Spotykane są zarówno konstrukcje o dużej liczbie długich łopatek w wykonaniu firmy Stork [8], jak również o małej liczbie stosunkowo krótkich łopatek w wykonaniu CAGI [1] lub firmy Butter Werke oraz konstrukcje pośrednie między wymienionymi, opracowane przez Eeka lub typu "Schicht".

Kąty łopatkowe β_1 , β_2 oraz kształt szkieletowych łopatek wyznaczono na ośmiu osiowo symetrycznych powierzchniach prądu w oparciu o zasadę stałego wiru. Przy ocenie kąta odchylenia strugi w przekroju wylotowym wirnika posłużono się znanymi metodami stosowanymi w konstrukcji sprzężarek osiowych i promieniowych. Najbardziej miarodajną dla przyjętej konstrukcji wieńca sprzężającego wydaje się być metoda Pfleiderera [7] oparta na hipotezie stałego spadku ciśnienia na jednostkę długości linii prądu.

Zważywszy, że przy występowaniu składowej promieniowej prędkości, dodatkowy niekorzystny wpływ na wielkość odchylenia strugi ma składowa obwodowa siła Coriolisa, wirnik zaprojektowano tak, by spływ czynnika z łopatek wirnika odbywał się w przybliżeniu wzdłuż cylindrycznych powierzchni prądu.

Sugeruje to możliwość przybliżonej oceny kąta odchylenia strugi w przekroju wylotowym również przy wykorzystaniu metod stosowanych w obliczeniach palisad płaskich.

Dostosowana odpowiednio metoda Howella dała wyniki różniące się od użytych metodą Pfleiderera od $1,5^\circ$ przy osłonie do $3,5^\circ$ przy płaszcie wirnika.

Bardziej zbliżoną do rzeczywistości ocenę kąta odchylenia można będzie przeprowadzić na drodze porównania wyników teoretycznych i badań aerodynamicznych.

Wybrane parametry geometryczne i kinematyczne wieńca przedstawiono w tablicy 1.

Szczegółowe dane dotyczące parametrów geometrycznych, kinematycznych oraz zastosowanej metody obliczeń badanego wieńca, przedstawiono w pracach autora [10], [11].

Tablica 1

Średnica zewnętrzna	0,6
Stosunek średnic na wlocie	0,46
Stosunek średnic na wylocie	0,75
Liczba łopatek	12
Obliczeniowy wskaźnik przepływu ^{x)}	0,3
Obliczeniowy wskaźnik sprężu	0,9
Obliczeniowa sprawność przepływowa wieńca	0,9

x) wskaźnik przepływu obliczono z zależności:
$$\varphi = \frac{4\dot{V}}{\pi d_2^2 u_2}$$

2.2. Program badań

Program badań aerodynamicznych przewidywał:

1) Wyznaczenie wielkości charakterystycznych wieńca sprężającego:

- w układzie wymiarowym w funkcji przepływu \dot{V} ,

przyrost ciśnienia całkowitego

$$\Delta P_{01-2} = f(\dot{V})$$

moc przekazywana czynnikowi

$$N_u = f(\dot{V})$$

sprawność przepływowa wirnika

$$\eta_{p1-2} = f(\dot{V})$$

- w układzie bezwymiarowym w funkcji wskaźnika przepływu,

wskaźnik spiętrzenia całkowitego

$$\psi_{01-2} = f(\varphi)$$

wskaźnik napędu

$$\psi_u = f(\varphi)$$

sprawność przepływowa

$$\eta_{p1-2} = f(\varphi)$$

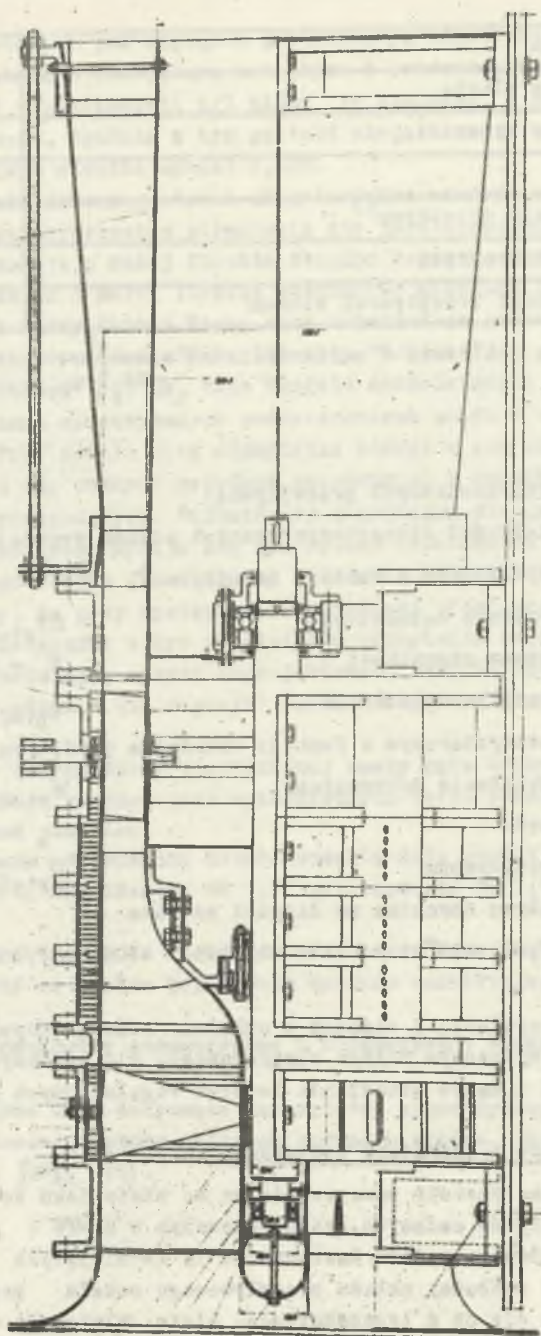
przy kącie napływu czynnika na łopatki robocze

$\alpha = -20^\circ, -10^\circ, 0, +10^\circ$ i liczbie obrotów 1500 obr/min i 2000 obr/min.

2) Badanie pola prędkości i ciśnień w układzie bezwzględny, w przekroju wlotowym i wylotowym wieńca sprężającego, dla wybranych wskaźników wydajności i kątów ustawienia łopatek regulacyjnych na wlocie.

3. Stanowisko badawcze i aparatura pomiarowa

Prace doświadczalne zostały przeprowadzone na stanowisku do badań aerodynamicznych wentylatorów osiowych, zainstalowanym w ZKMPW w Gliwicach. Układ przepływowy badanego modelu dostosowano do istniejących elementów stanowiska. Przekrój podłużny układu przepływowego modelu przedstawiono na rysunku 1. Składa się on z lemniskatowego wlotu, wlotowego aparatu regulacyjnego o dwunastu łopatkach, badanego wieńca wirnikowego, układu kie-



Rys. 1. Układ przepływowy wentylatora modelowego

rownicy tylnej oraz dyfuzora wylotowego. Wstępna kierownica regulacyjna umieszczona jest w odległości równej połowie długości średniej ościwy i profilu łopatki przed wirnikiem. Kierownica tylna znajduje się w odległości 0,15 l za wirnikiem. Odległości te mogą być zmieniane przez osiowe przemieszczanie zarówno wirnika zamocowanego na wale przy pomocy stożków zaciskowych, jak również segmentów nośnych kierownicy tylnej i przedniej, dzięki zastosowaniu wymiennych pierścieni dystansowych w obudowie zewnętrznej modelu. Segmenty osłony wirnika posiadają otwory, wywiercone wzdłuż tworzących rozstawionych po obwodzie o 120° , umożliwiające sondowanie przepływu w szeregu przekrojów prostopadłych do osi przed i za wirnikiem.

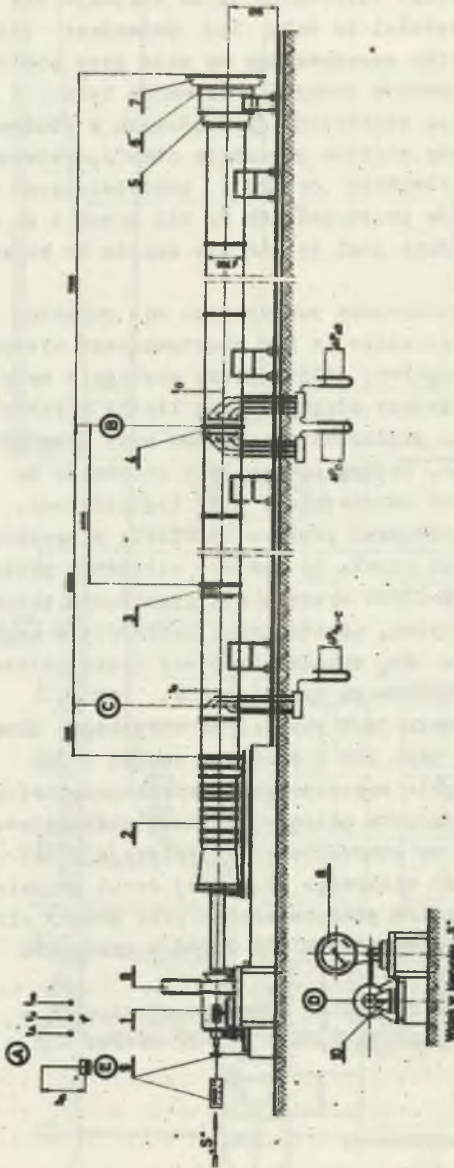
Modelowy wentylator połączony jest po stronie ssania do rurociągu pomiarowego (rys. 2).

Podstawowymi elementami stanowiska pomiarowego są: rurociąg pomiarowy wyrównujący przepływ, z zamontowanymi w nim prostownicami ulowymi i dyszą ISA do pomiaru natężenia przepływu, silnik prądu stałego o mocy 60 kW zabudowany w kołysce i umożliwiający ciągłą zmianę liczby obrotów do 3000 obr/min, aparatura do pomiaru prędkości obrotowych oraz urządzenie wagowe do pomiaru momentu obrotowego. Dopływ powietrza z otoczenia do rurociągu pomiarowego odbywa się poprzez dwustopniowy wlot lemniskatowy.

Zmianę ilości czynnika uzyskiwano poprzez dławienie w przekroju wlotowym siatkami o różnej gęstości oczek. Do pomiaru natężenia przepływu przewidziano obłożoną wg PN 65/M-53950 dyszę z wielopunktowym poborem ciśnień impulsowych przed i za dyszą, uśrednianych następnie w komorach wyrównawczych. Spadek ciśnienia Δp_{Π} wywoływany przez dyszę mierzono przy pomocy mikromanometru kompensacyjnego typu Askania.

Sondowanie przepływu w przekrojach przed i za wirnikiem przeprowadzono przy pomocy sond kulowych typu Skk o średnicy oszułki 5 mm, zamocowanych wraz z uchwytem na statywie zapewniającym promieniowe ustawienie sondy oraz zmianę położenia w kierunku osiowym. Impulsy ciśnieniowe przekazywane przez sondy odczytywano na mikromanometrze bateryjnym Mb7 wypełnionym spirytusem skażonym. Sondy cechowano po każdej serii pomiarów w tunelu TCS-2. Pomiar liczby obrotów przeprowadzono przy pomocy elektronicznego licznika impulsów o błędzie mniejszym niż 0,04% w wykonaniu Instytutu Lotnictwa.

Urządzenie wagowe pozwalało na pomiar momentów obrotowych w zakresie: I zakres - 0 ± 150 Nm z dokładnością 0,0873 Nm, II zakres - 0 ± 220 Nm z dokładnością 0,1746 Nm.



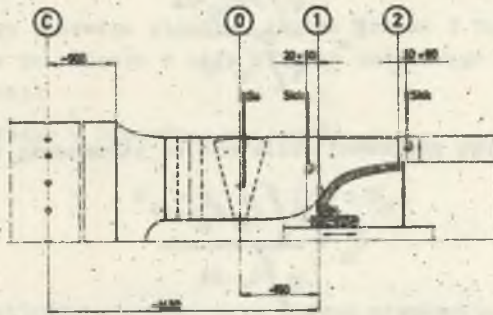
R. 2. Stawowisko do badań aerodynamicznych wentylatorów osiowych: 1 - silnik prądu stałego, 2 - wentylator modelowy, 3 - ulowa prostownica przepływu, 4 - dysza do pomiaru natężenia przepływu, 5 - wlot lemniskatowy, 6 - kieszeń siatek działających, 7 - wlot lemniskatowy, 8 - waga do pomiaru momentu obrotowego, 9 - aparatura do pomiaru liczby obrotów, 10 - kołyszka do pomiaru mocy

4. Metoda badań

4.1. Wyznaczenie charakterystyk wieńca sprężającego

Charakterystyki wieńca sprężającego wyznaczono przy osiowym napływie czynnika oraz przy współbieżnym i przeciwbieżnym zawirowaniu wstępnym. Kierunek zawirowania ustalano przy pomocy odpowiedniego ustawienia kierownicy wlotowych.

Natężenie przepływu czynnika obliczono zgodnie z Polską Normą PN/M-53950. Jako wartość spiętrzenia całkowitego ΔP_{01-2} w wieńcu sprężającym przyjęto przyrost ciśnienia na drodze od przekroju kontrolnego 1 leżącego w płaszczyźnie krawędzi wlotowej łopatek wirnika do przekroju kontrolnego 2 leżącego w płaszczyźnie krawędzi wylotowej łopatek wirnika (rys. 3). Względy konstrukcyjne oraz przepływowe sprawiły, że rzeczywiste płaszczyzny sondowania przebiegały w pewnej odległości od krawędzi łopatek.



Rys. 3. Przekroje pomiarowe do badań aerodynamicznych wieńca

Pomiar ciśnień przed wirnikiem. Przy osiowym napływie czynnika prowadzony był poprzez sondowanie przepływu sondą ciśnienia statycznego w przekroju pomiarowym 0, oddalonym o około 150 mm od krawędzi wlotowej wirnika. Upřednio zdemontowano łopatki kierownicy regulacyjnej i zaślepieno pozostałe w obwodzie otwory. Przyjmując tak odległą płaszczyznę pomiarową, starano się uniknąć niekorzystnego wpływu zawirowań, wywołanych wstecznym oddziaływaniem wirnika, na dokładność pomiaru ciśnienia. Zważywszy, że przepływ na odcinku 0 - 1 jest przepływem przyspieszonym uznano straty energii na tym odcinku za pomijalnie małe.

Przy różnym od osiowego napływie czynnika na łopatki wirnika, pomiar ciśnienia prowadzony był na szeregu promieniach, przy pomocy sondy kierunkowej kulowej, w przekroju pomiarowym odległym od krawędzi wlotowej łopatek roboczych o 54 mm. Odległość tę dobrano na drodze prób, porównując wydajności uzyskane z sondowania z wydajnością obliczoną z pomiarów dyszą. Dodatkowe sprawdzenie dokładności pomiarów stanowiło porównanie ciśnień

całkowitych wyznaczonych w wybranym przekroju i obliczonych z pomiarów prowadzonych w przekrojach O i C, dla zerowego kąta napływu czynnika na łopatkę robocze wirnika.

Pomiar ciśnienia na wylocie z koła wirnikowego dokonano poprzez sondowanie przepływu przy pomocy sondy kierunkowej kulowej, w odległości około 20 mm od krawędzi wylotowych łopatek.

Dobór najważniejszej, z punktu widzenia dokładności pomiarów, płaszczyzny sondowania przeprowadzony był podobnie jak dla wlotu. Z uwagi na silnie zróżnicowane pole parametrów przepływu wzdłuż wysokości kanału, zarówno w przekroju pomiarowym 1 jak i 2, do obliczeń przyjmowano parametry uśrednione, określone zgodnie z zasadami podanymi w pracach [4], [6] i obliczone z zależności:

- średnia wartość ciśnienia statycznego przy założeniu stałości gęstości czynnika w przekroju kontrolnym:

$$\bar{P}_s = \frac{\varrho \int_A P \cdot C_m' \cdot dA}{\varrho \int_A C_m' \cdot dA}$$

- uśrednione składowe prędkości obliczone ze strumienia impulsów

$$\bar{C}_m = \frac{\varrho \int_A C_m' \cdot C_m' \cdot dA}{\varrho \int_A C_m' \cdot dA}$$

$$\bar{C}_\theta = \frac{\varrho \int_A C_\theta' \cdot C_\theta' \cdot dA}{\varrho \int_A C_m' \cdot dA}$$

- średnią wartość ciśnienia całkowitego

$$\bar{P}_0 = \bar{P}_s + \varrho \frac{\bar{v}^2}{2},$$

gdzie:

C_m, C_θ - składowe prędkości, merydionalna i obwodowa,

() - oznacza lokalne wartości parametrów przepływu,

dA - element powierzchni przekroju pomiarowego.

Sondowanie ciśnień i prędkości przeprowadzono na piętnastu promieniach, przy obliczeniowych parametrach pracy wieńca oraz na siedmiu, dla pozostałych punktów charakterystyki. Porównanie ciśnień uśrednionych z pomiarów w piętnastu i siedmiu punktach przekroju pomiarowego, dało zgodność wyników w granicach dokładności pomiaru. Powtarzalność wyników badań sprawdzono ponadto przez trzykrotne powtórzenie sondowania przepływu w obliczeniowym punkcie pracy wieńca, dla czterech kątów ustawienia kierownicy regulacyjnej na wlocie.

Moc przekazywana czynnikowi N_u wyznaczono jako różnicę

$$N_u = N_s - \Delta N,$$

gdzie:

N_s - moc silnika

ΔN - moc biegu jałowego silnika, tarcia łożysk i brodzenia piasty, wyznaczona po zdjęciu z wału wirnika modelowego i założeniu tarczy zastępczej.

Moc silnika mierzono w oparciu o zależność

$$N_s = M_s \cdot \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_s,$$

gdzie:

M_s - moment silnika mierzony przy pomocy urządzenia wagowego

n - liczba obrotów.

4.2. Badanie pola parametrów przepływu w przekroju wylotowym wirnika

Badanie pola parametrów przepływu przeprowadzono przy pomocy sond kulowych na promieniach określonych przez teoretycznie wyznaczony rozkład linii prądu [10]. W wyniku sondowania uzyskano rozkłady prędkości oraz ciśnień całkowitych i statycznych w bezwzględny układzie współrzędnych. Kierunki prędkości określono w dwóch płaszczyznach, prostopadłej do promienia oraz merydionalnej. Dokładność pomiaru pola prędkości oceniono przez porównanie objętościowego natężenia przepływu czynnika określonego na podstawie wyników sondowania, ze zredukowanym natężeniem przepływu określonym przy pomocy dyszy. Porównano również moc przekazywaną czynnikowi przez wirnik, obliczoną z pomiaru momentu silnika napędowego z mocą określoną z podstawowego równania maszyn przepływowych:

$$N_u^* = M_u \cdot \omega = \left(\int_0^{\dot{m}} r_2^2 \cdot c_{2\theta}^2 \, d\dot{m} - \int_0^{\dot{m}} r_1^2 \cdot c_{1\theta}^2 \cdot d\dot{m} \right) \cdot \omega.$$

W trakcie sondowania przepływu prowadzono stałe pomiar wydatku i liczby obrotów, co umożliwiło korekcję obliczanego rozkładu prędkości.

5. Opracowanie wyników badań

5.1. Redukcja parametrów przepływu

Wielkości charakterystyczne pracy wieńca sprężającego określone w p. 2.2. redukowano na średnią gęstość $\bar{\rho} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ i na stałe obroty, odpowiednio 1500 i 2000 obr/min, zgodnie z prawami podobieństwa przepływu:

$$\frac{\Delta \bar{P}}{\Delta P} = \frac{\rho_0}{\rho_s} \left(\frac{\bar{n}}{n} \right)^2$$

$$\frac{\bar{m}}{m} = \frac{\rho_0}{\rho_s} \cdot \frac{\bar{n}}{n}$$

$$\frac{\bar{N}_u}{N_u} = \frac{\rho_0}{\rho_s} \left(\frac{\bar{n}}{n} \right)^3,$$

gdzie:

$\Delta \bar{P}, \bar{\rho}, \bar{n}, \bar{m}, \bar{N}_u$ - wielkości zredukowane,

$\rho_s = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ - gęstość średnia w wirniku.

W czasie pomiaru danego punktu charakterystyki występowały wahania wydajności i liczby obrotów. Wymagało to redukcji parametrów przepływu, uzyskanych z sondowania w każdym punkcie przekroju pomiarowego, na przyjętą wydajność i liczbę obrotów. Z warunku podobieństwa kinematycznego przepływu wynikają zależności:

$$\frac{\rho_0'}{\rho_0} = \frac{\bar{v}}{v} \cdot \frac{\bar{m}}{m}$$

$$\frac{\rho_0'}{\rho_0} = \frac{\rho_0}{\rho_0} \left(\frac{\bar{v}}{v} \right)^2 \left(\frac{\bar{n}}{n} \right)^2$$

podobnie

$$\frac{\bar{m}}{m} = \frac{\rho_0}{\rho_0} \left(\frac{\bar{v}}{v} \right)^2 \left(\frac{\bar{n}}{n} \right)^2,$$

gdzie:

\bar{c} , \bar{P} - lokalne, zredukowane wartości prędkości i ciśnienia
 c , P - zmierzone lokalne wartości prędkości i ciśnienia.

5.2. Wskaźniki bezwymiarowe

Zdefiniowano następująco:

wskaźnik przepływu

$$\varphi = \frac{4 \cdot \bar{V}}{\pi \cdot d_2^2 \cdot u_2}$$

wskaźnik sprężu

$$\psi = \frac{\Delta \bar{P}}{\bar{\rho} \cdot \bar{u}_2^2 / 2}$$

wskaźnik napędu

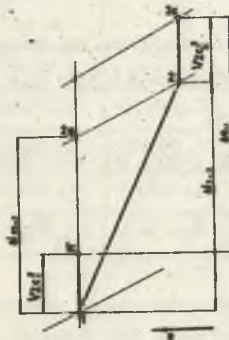
$$\psi_u = \frac{\Delta \bar{e}_u}{\bar{u}_2^2 / 2} = \frac{2 \cdot \bar{N}_u}{\bar{u}_2^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_2^2}$$

gdzie:

$\Delta e_u = \frac{N_u}{\dot{m}}$ - energia jednostkowa przekazana czynnikowi.

Sprawność przepływowa wieńca sprężającego [9], (rys. 4)

$$\eta_{p1-2} = \frac{\Delta i_{s1-2} + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2)}{\Delta e_u},$$



Rys. 4. Wykres przemiany energii czynnika w wieńcu sprężającym

gdzie:

$$\Delta i_{s1-2} = \frac{\kappa}{\kappa-1} P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right].$$

Po podstawieniu $\Delta P_{s1-2} = P_2 - P_1$, rozwinięciu w szereg i pominięciu wyrazów wyższych rzędów

$$\Delta i_{s1-2} = \frac{\Delta P_{s1-2}}{\rho_1} \left(1 - \frac{1}{2\kappa} - \frac{\Delta P_{s1-2}}{P_1} \right),$$

gdzie:

Δi_{s1-2} - izentropowy przyrost entalpii powietrza sprężanego od stanu 1 do stanu 2s (rys. 4),

ΔP_{s1-2} - przyrost ciśnienia statycznego.

5.3. Ocena błędów

Błąd wyników pomiarów pośrednich określono jako funkcję błędów wielkości mierzonych bezpośrednio. Błędy pomiarów bezpośrednich wynikały z dokładności użytych przyrządów pomiarowych.

Graniczny błąd względny pomiaru wydajności obliczono wg wzoru podanego w PN-65/M-53950.

W celu szacowania błędów parametrów wyznaczonych z sondowania przepływu posłużono się teorią błędów maksymalnego [5].

Maksymalny błąd bezwzględny wartości z określa się z wyrażenia:

$$z = \pm \left[\left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_k} \Delta x_k \right| \right]$$

$z = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ - wielkość określona na podstawie bezpośrednio zmierzonych wielkości $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$

Δz - błąd bezwzględny wielkości z .

W przypadku, gdy zależność z od x_1, x_2, x_3, \dots była iloczynem o postaci:

$$z = A_1 \cdot x_1^{a_1} \cdot A_2 \cdot x_2^{a_2} \cdot \dots$$

maksymalny błąd względny wartości z obliczono z równania:

$$\frac{\Delta z}{z} = \pm \left[\left| a_1 \frac{\Delta x_1}{x_1} \right| + \left| a_2 \frac{\Delta x_2}{x_2} \right| \dots \left| a_k \frac{\Delta x_k}{x_k} \right| \right]$$

Zw względu na dużą liczbę badanych punktów charakterystyki, ocenę błędów przeprowadzono szczegółowo dla obliczeniowego punktu pracy wieńca, przy kącie ustawienia kierownicy regulacyjnej na wlocie $\varphi = -10^\circ$. Wyniki obliczeń maksymalnych błędów względnych dla najważniejszych wielkości wynoszą:

Natężenie przepływu	\dot{V}	1,972%
spiętrzenie całkowite	ΔP_{01-2}	2,25%
spiętrzenie statyczne	ΔP_{s1-2}	6,6%
moc przekazywana czynnikowi	N_u	0,669%
sprawność przepływowa	η_{p1-2}	6,911%
wskaźnik przepływu	ϕ	2,012%
wskaźnik sprężu	ψ	2,5%
wskaźnik napędu	ψ_u	2,888%

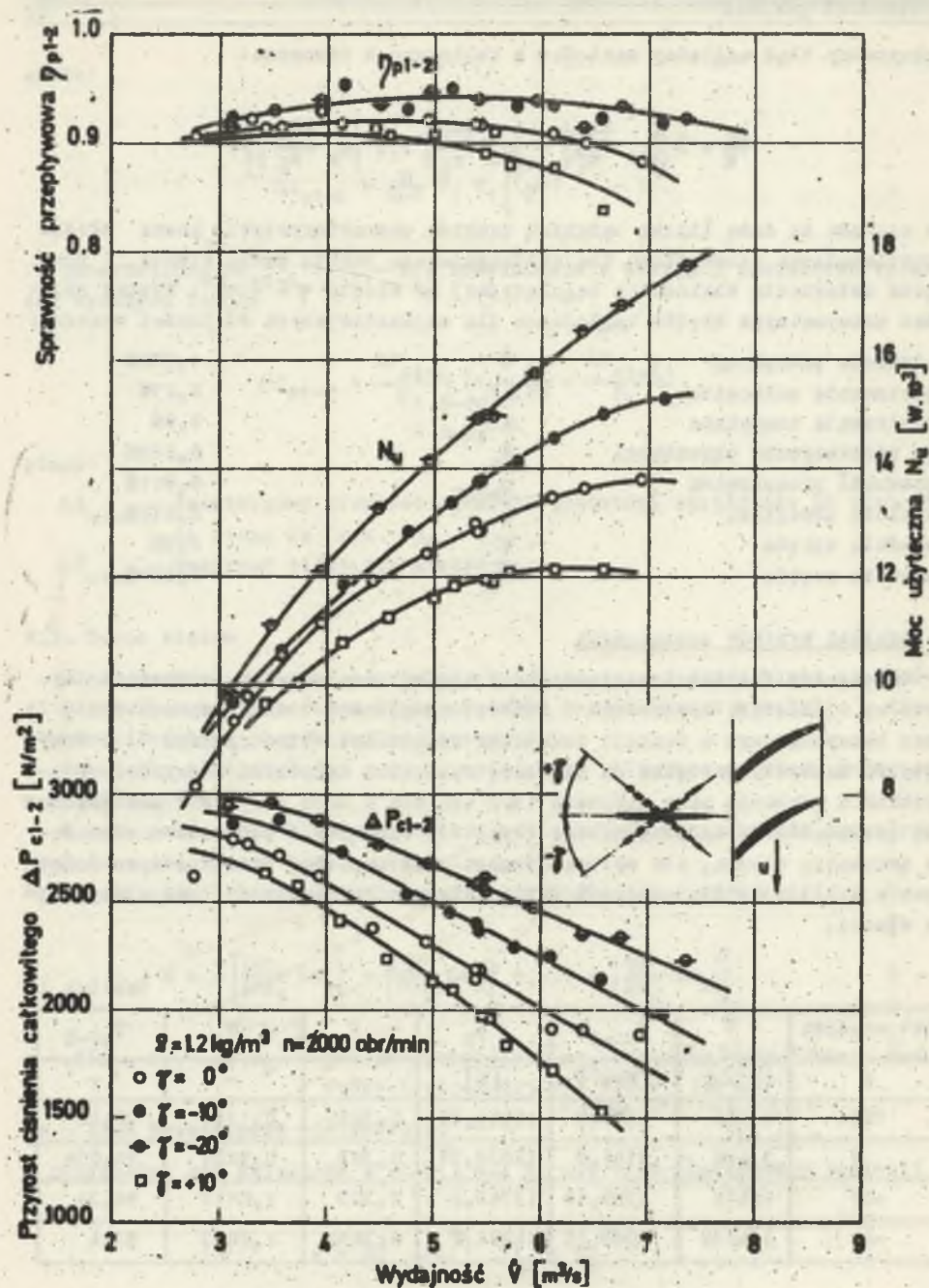
6. Analiza wyników pomiarowych

Zależności charakterystyczne pracy wieńca przedstawiono w postaci wykresów, w układzie wymiarowym w funkcji wydajności \dot{V} na rysunkach 5 i 6 oraz bezwymiarowym w funkcji wskaźnika wydajności ϕ na rysunku 7. Przy osiowym napływie czynnika na wieńiec, obliczono wskaźniki bezwymiarowe uzyskane z pomiarów przy obrotach 1500 obr/min i 2000 obr/min i naniesiono dla porównania na wspólny wykres (rys. 7). Uzyskane z pomiarów zredukowane parametry wieńca, dla obliczeniowego punktu pracy, przedstawiono dodatkowo w tabelicy 2, dla czterech kątów ustawienia kierownicy regulacyjnej na wlocie.

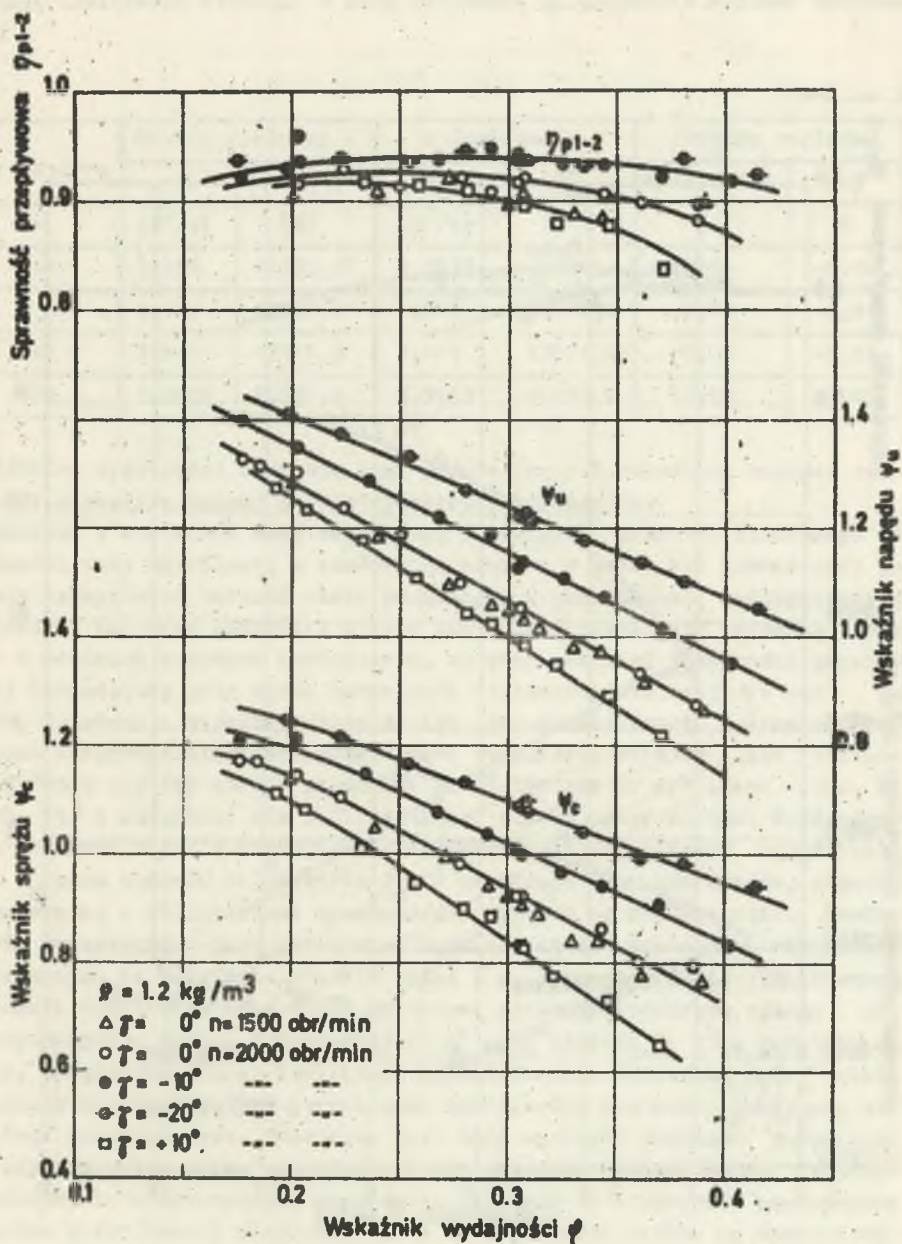
Tabelica 2

Kąt napływu	\dot{V}	P_{01-2}	N_u	ϕ	ψ_0	η_{p1-2}
	$[\text{m}^3/\text{s}]$	$[\text{N}/\text{m}^2]$	$[\text{W}]$	-	-	-
0	5,458	1973,9	11944,76	0,3072	0,1341	90,86
0	5,418	2182,0	12839,77	0,305	0,9221	91,054
-10	5,418	2393,18	13742,2	0,305	1,0113	94,34
-20	5,4258	2576,25	14934,4	0,3054	1,0887	93,4

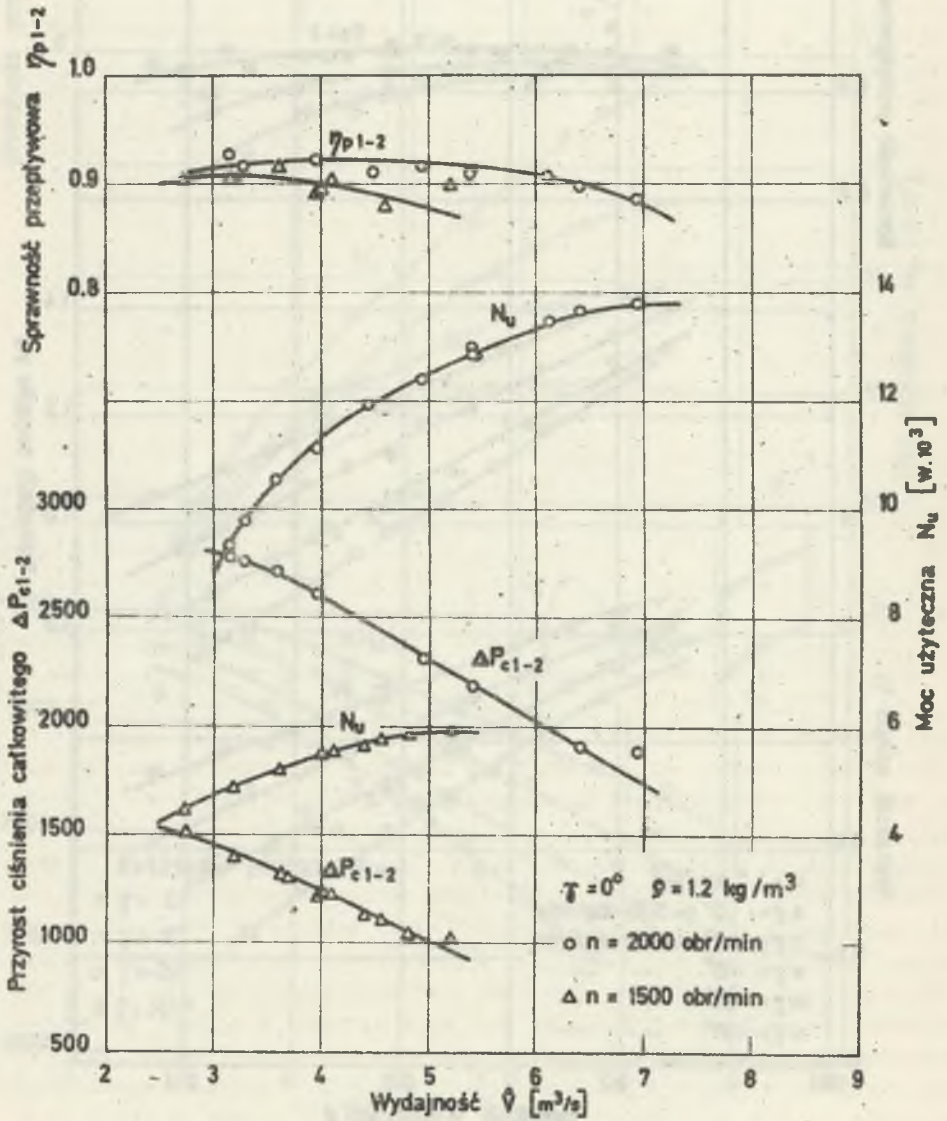
W tabelicy 3 przeprowadzono porównanie wydajności objętościowej obliczonej na podstawie wyników sondowania z obliczoną na podstawie wskazań dy-



Rys. 5. Charakterystyka aerodynamiczna wienca sprężającego dla czterech kątów ustawienia kierownicy regulacyjnej na wlocie



Rys. 6. Bezwymiarowa charakterystyka aerodynamiczna wienca sprężającego określona dla czterech kątów ustawienia kierownicy regulacyjnej na wlocie



Rys. 7. Porównanie charakterystyki aerodynamicznej wieńca sprężającego dla dwóch liczb obrotów

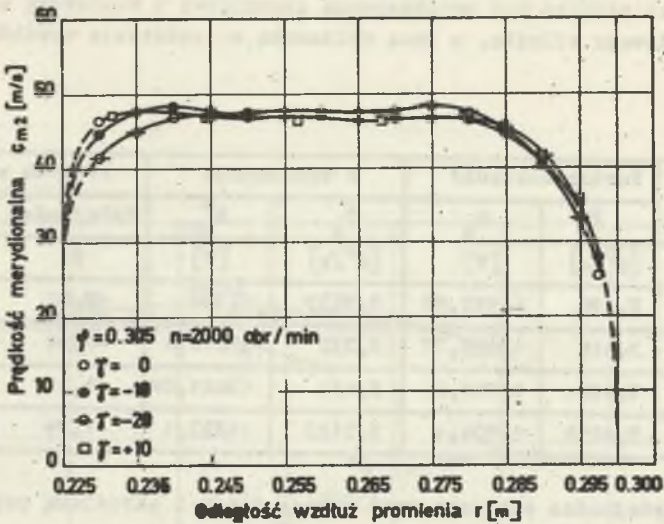
szy. Porównano również moc przekazywaną czynnikowi i obliczoną z pomiaru momentu obrotowego silnika, z mocą obliczoną na podstawie wyników sondowania.

Tablica 3

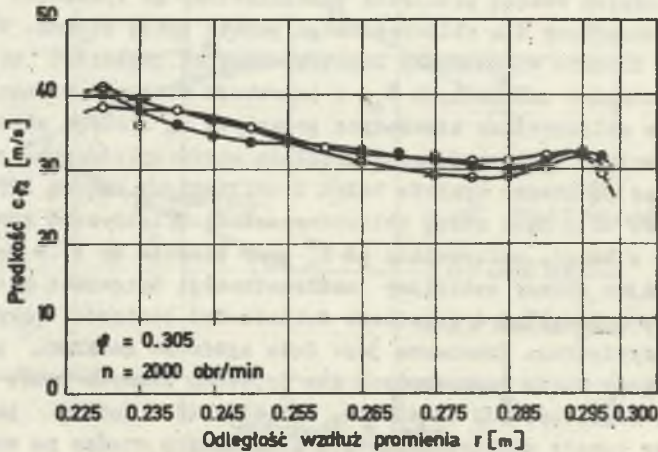
Kąt napływu	Pomiar dokładny		z sondowania		różnica względna	
	\dot{V}	N_u	\dot{V}_s	N_{us}^m	Wydaźności	Mocy
o	$[m^3/s]$	$[W]$	$[m^3/s]$	$[W]$	%	%
+10	5,458	11995,95	5,5035	11384	+0,82	-5,11
0	5,418	12839,77	5,372	12010,0	-0,84	-6,46
-10	5,418	13742,2	5,424	13021,08	+0,11	-5,24
-20	5,4258	14934,4	5,5123	14203,4	+1,59	-4,89

Różnicę wydaźności mierzoną przy pomocy dyszy 1 określoną poprzez sondowanie przepływu uznano za błąd pomiarowy sondowania.

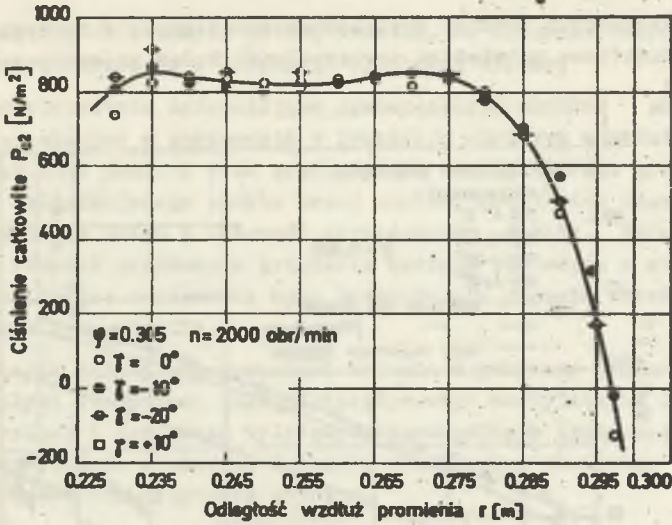
Różnica w wielkości mocy określonej z pomiarów momentu obrotowego i wielkości mocy określonej z sondowania stanowi w granicach dokładności pomiarów bezwzględną wartość strat związanych z przeciekami nadłopatkowymi w wirniku. Uzyskane wskaźniki sprężu znacznie przewyższają wskaźniki osiągnięte w wieńcach osiowych reakcyjnych, co przy wysokiej sprawności przepływowej dochodzącej przy kącie ustawienia kierownicy wlotowej $\varphi = -10^\circ$ do 94,5%, świadczy o wysokich własnościach aerodynamicznych badanego typu wieńca. Korzystne własności przepływowe potwierdza również obraz rozkładu prędkości i ciśnień wzdłuż promienia przedstawiony na wykresach (rys. 8, 9, 10, 11) i określony dla obliczeniowego punktu pracy wieńca. Wyrównany, poza obszarem bliskim wierzchołkom łopatek, rozkład prędkości merydionalnych o_m oraz ciśnień całkowitych P_o , w przekroju wlotowym wieńca, odpowiada przyjętej w obliczeniach kinematyce przepływu wg stałego wiru. Szczególnie interesujące jest porównanie rozkładu kątów wylotowych strumienia wyznaczonych na podstawie wyników badań i obliczonych metodą Pfleiderera i Howella (rys. 12). Kąty strug obliczone metodą Pfleiderera różnią się od uzyskanych z badań, maksymalnie od 2° przy piąście do 3° w pobliżu osi, wyłączając obszar szczeliny nadłopatkowej. Natomiast kąty strug obliczone metodą Howella, w granicach dokładności pomiarów, pokrywają się z kątami rzeczywistymi. Znamienna jest duża zgodność rozkładu parametrów przepływu i kątów strug wyznaczonych dla czterech różnych kątów ustawienia kierownic regulacyjnych na wlocie. Świadczy to o dobrym prowadzeniu czynnika przez kanały międzyłopatkowe i nieoczności wieńca na warunki napływu w przekroju wlotowym.



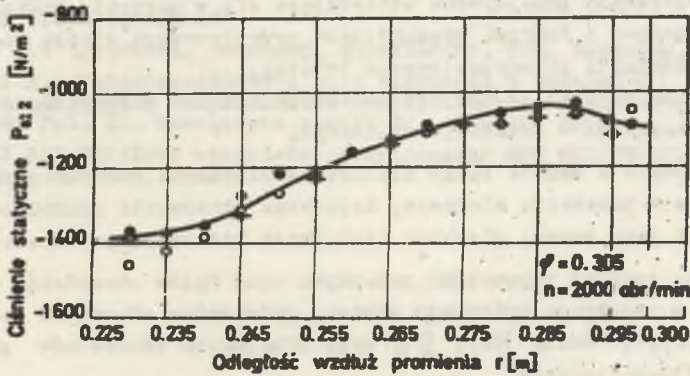
Rys. 8. Rozkład prędkości merydionalnej c_m wzdłuż promienia, w przekroju wylotowym wirnika.



Rys. 9. Rozkład składowej obwodowej prędkości bezwzględnej c wzdłuż promienia w przekroju wylotowym wirnika.

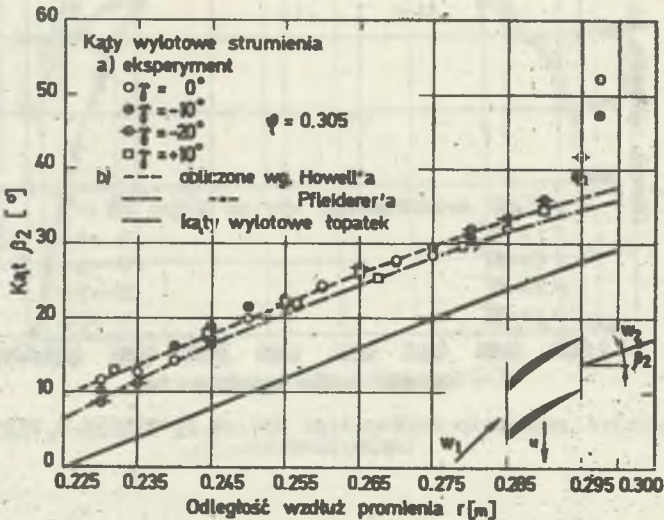


Rys. 10. Rozkład ciśnienia całkowitego wzdłuż promienia w przekroju wylotowym wirnika



Rys. 11. Rozkład ciśnienia statycznego wzdłuż promienia w przekroju wylotowym wirnika

Niewielki rozrzut punktów pomiarowych określonych w różnych seriach pomiarowych dodatkowo potwierdza powtarzalność badań prowadzonych przyjętą metodą.



Rys. 12. Porównanie kątów wylotowych strumienia obliczonych i uzyskanych z sondowania przepływu

7. Wnioski

- Badany wieniec sprężający osiąga przy nominalnym wskaźniku wydajności $\varphi = 0,3$ wysokie wskaźniki sprężu $\psi_0 = 0,82 - 1,1$, wyższe niż w wienicach osiowych normalnego typu,
- wysoka sprawność przepływowa utrzymująca się w szerokim zakresie wydajności świadczy o dobrych własnościach przepływowych wienca pomimo wysokiego obciążenia aerodynamicznego łopatek.
Wniosek ten potwierdza również wyrównany rozkład parametrów przepływu wzdłuż promienia w przekroju wylotowym,
- zaobserwowana w czasie badań niezczułość wienca na ewentualne zaburzenia przepływu w przekroju wlotowym, dopuszcza stosowanie stosunkowo prostej regulacji przy pomocy płaskich odohylnych kierownic na wlocie,
- zmierzony rozkład parametrów przepływu oraz kątów strumienia wzdłuż promienia, w przekroju wylotowym wienca, potwierdza słuszność zastosowanej metody projektowania [10], [11] oraz przyjętych wskaźników geometrycznych i kinematycznych,
- w granicach dokładności pomiaru uzyskano zgodność kątów odchYLENIA strumienia od stycznych do szkieletowych profili, określonych na drodze son-

dowania, z kątami obliczonymi metodą Howella. Do obliczeń przyjęto podziałkę łopatek określoną w przekroju wylotowym wieńca,

- sprawdzona wielokrotnie zadowalająca powtarzalność wyników parametrów przepływu, uzyskanych z sondowania w przekroju wlotowym i wylotowym oraz niewielki błąd pomiaru pola prędkości za wirnikiem, nie przekraczający 2% dla obliczeniowego punktu pracy wieńca, potwierdza miarodajność uzyskanych wyników badań i celowość zastosowanej metody. Zadawalające wyniki dało również porównanie przyrostu energii powietrza w wirniku określonego na drodze sondowania pola prędkości, z energią określoną na drodze pomiaru mocy silnika,
- w dalszym etapie należy przeprowadzić badania współpracy badanego wieńca z pozostałymi elementami układu przepływowego wentylatora, łopatkami kierownicy tylnej i dyfuzorem wylotowym. Szczególnych trudności nastąpi czy dobór odpowiednio sprawnego dyfuzora wylotowego, zważywszy znaczne prędkości w przekroju wylotowym wirnika.

- [1] BRUSIŁOWSKI J.W.: Wentylatory s meridionalnym uskorienijem potoka. Promyslennaja aerodinamika, zeszyt 24, Oborongiz, 1962.
- [2] ECK B.: Ventilatoren. Springer-Verlag, 1963.
- [3] FRITZCHE K.H.: Ein neuer Schaubenlaufter mit meridianbeschleunigter Bauart. Glückauf, 1956.
- [4] GUNDLACH W.: Maszyny przepływowe, cz. 1, PWN, Warszawa, 1970.
- [5] HANSEL H.: Podstawy rachunku błędów. WNT, Warszawa, 1968.
- [6] KAZIMIERSKI Z.: Opisanie rzeczywistego przepływu przez stopień maszyny przepływowej przy pomocy parametrów uśrednionych. Ciepłne maszyny przepływowe nr 34, Łódź, 1961.
- [7] PELEIDERER C.: Strömungsmaschinen. Springer, Berlin, 1957.
- [8] THE STORK FANS: (prospekt).
- [9] TULISZKA E.: Sprężarki, dmuchawy, wentylatory, WNT, Warszawa, 1969.
- [10] WITKOWSKI A.: Osłowosymetryczne pole prędkości i ciśnienia w osłowym wieńcu sprężającym s merydionalnym przyspieszeniem strumienia. Zeszyty naukowe Pol. Sl. Energetyka zeszyt 31, Gliwice, 1969.
- [11] WITKOWSKI A.: Modelowy wentylator merydionalny MWM 60C/75/12. Projekt techniczny, Gliwice, 1967.

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРНОГО
РАБОЧЕГО КОЛЕСА С МЕРИДИОНАЛЬНЫМ УСКОРЕНИЕМ ПОТОКА

Р е з ю м е

Предметом настоящей работы является экспериментальное исследование структуры и параметров потока во вращающемся колесе с меридионально ускоренным потоком [10].

Экспериментальное исследование колеса включало: получение аэродинамических характеристик колес, измерения абсолютных скоростей и углов потока при входе и выходе из колеса.

Аэродинамические характеристики получено при разных скоростях вращения и различных углах установки лопаток направляющего аппарата. Результаты эксперимента подтверждают хорошие аэродинамические свойства колеса и судность использованной методы расчета.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF AXIAL FLOW COMPRESSOR
IMPELLER WITH MERIDIONAL ACCELERATION

S u m m a r y

A method and results of investigations of axial flow compressor impeller with meridional acceleration [10] have been given. Test of rotor consist of the efficiency and rate of energy transfer at various combinations of flow quantity and rotational speed, and angles of attack.

These general performance value have been obtained by calculation from measured value of fluid direction, total and static pressure and velocity profiles, upstream and downstream of the impeller.

On the basis of the experimental results obtained with the designed impeller it would seem that the general designed criteria and design procedure used could be considered reliable.