

Andrzej WITKOWSKI

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

SEKWENCYJNO ITERACYJNY PROCES BADAWCZY
WENTYLATORÓW OSIOWYCH

Streszczenie. Przedstawiono wyniki niektórych badań teoretycznych i doświadczalnych struktury przepływu w osiowych stopniach sprężających. Wyniki te posłużyły do opracowania metod obliczeń aerodynamicznych modelowych wentylatorów osiowych z merydionalnym przyspieszeniem strumienia i reakcyjnych. Zamieszczono charakterystyki aerodynamiczne wentylatorów modelowych. Wyniki badań doświadczalnych skonfrontowano z wynikami analizy teoretycznej.

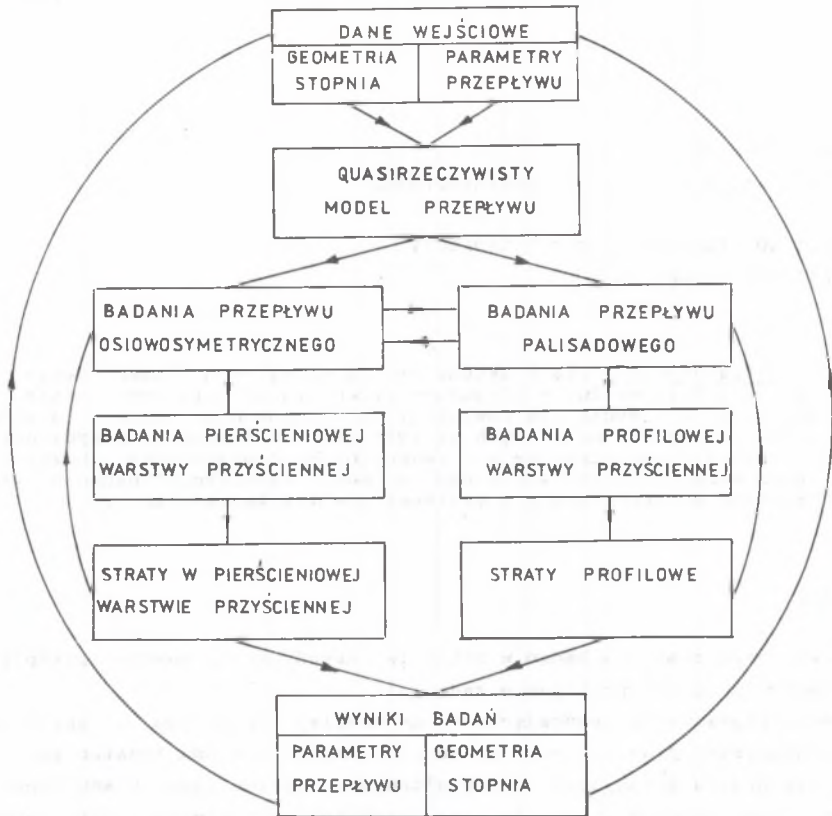
1. Wstęp

Rzeczony rozwój współczesnych badań w zakresie aerodynamiki maszyn przepływowych determinują dwa praktyczne zadania:

- zadanie pierwsze sprowadzające się do analizy przepływu i określenia charakterystyk pracy maszyn o znanej geometrii układu łopatkowego,
- zadanie drugie polegające na kształtowaniu optymalnego układu łopatkowego zapewniającego uzyskanie pożądaných lub narzuconých z góry parametrów.

Dla rozwiązania obu tych zadań konieczne jest dokładne poznanie zjawisk występujących w przepływie przez układy łopatkowe. Rzeczywisty postęp może tu być osiągnięty jedynie poprzez równoczesny rozwój, wzajemnie się uzupełniających badań teoretycznych i eksperymentalnych. Dążność do uzyskiwania układów przepływowych o coraz to wyższej sprawności aerodynamicznej wymaga uwzględnienia w obliczeniach o coraz to większym stopniu przestrzennej struktury przepływu.

Generalne ujęcie matematyczne wszystkich rzeczywistych cech przepływu jest niemożliwe, z uwagi na nieprzewyciężone do dzisiaj trudności zarówno w zakresie racjonalnego ujęcia teoretycznego jak i opracowania metody rozwiązania. Stosownie do tego obliczenia tak w ramach zadania pierwotnego jak i wtórnego prowadzono w niniejszej pracy w oparciu o odpowiednio uproszczony model, tak zwanego quasirzeczywistego przepływu gazu [1]. Sekwencyjny iteracyjny program badawczy opracowany w oparciu o ten model przedstawiony został w postaci schematu blokowego na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy procesu badawczego osiowych stopni sprężających

Zgodnie z tym schematem w procesie rozwiązywania zarówno pierwszego jak i drugiego zadania aerodynamiki maszyn przepływowych wyróżnia się cztery podstawowe zagadnienia badawcze:

- 1) zagadnienie przepływu osiowo-symetrycznego w przekroju merydionalnym stopnia,
- 2) zagadnienie przepływu w obszarach pierścionowych warstw przyściennych,
- 3) zagadnienie przepływu palisadowego,
- 4) zagadnienie profilowych warstw przyściennych.

Wyniki uzyskane z rozwiązania wymienionych zagadnień badawczych umożliwiają z kolei doskonalenie algorytmów i programów obliczeń aerodynamicznych stopni sprężających i wentylatorów osiowych. Informacje uzyskane z badań konstrukcji modelowych opracowanych przy wykorzystaniu tych algorytmów, stanowią podstawę dalszej weryfikacji przyjętych metod obliczeniowych. Przedstawiony program badawczy zastosowany został w procesie opracowywania nowych wysokosprawnych konstrukcji wentylatorów osiowych z

merydionalnym przyspieszeniem strumienia serii MWM 500 i MWG 500 oraz wentylatorów reakcyjnych serii MWO.

2. Quasirzeczywisty model przepływu

2.1. Zagadnienie osiowo-symetryczne

Zagadnienie osiowo-symetryczne rozwiązano posługując się pojęciem krzywizny linii prądu po uśrednieniu ogólnych równań równowagi wzdłuż podziałki łopatek przy założeniu, że przepływ jest ustalony i nielepki [2], [3], [4].

W rezultacie uśrednienia w równaniach ruchu pojawia się siła oddziaływania łopatek na strumień F a w równaniu ciągłości współczynnik przewodzenia \bar{U} uwzględniający grubość łopatek.

Straty tarcia w równaniach ruchu uwzględniono przez wprowadzenie do równań przepływu uśrednionych wzdłuż podziałki sił tarcia [5], [6], [7].

Ostatecznie do rozwiązania przepływu osiowo-symetrycznego wykorzystuje się układ równań:

- 1) równanie ruchu,
- 2) równanie energii,
- 3) równanie ciągłości,
- 4) równanie ortogonalności,
- 5) równanie powierzchni prądu.

Rozpisanie tak uzyskanych równań w układzie współrzędnych quasiortogonalnych q, ϑ, m i uwzględnienie geometrii układu przepływowego, umożliwia z kolei wyznaczenie równania dogodnego do numerycznego całkowania krok po kroku:

$$W_m \frac{\partial W_m}{\partial q} + P W_m^2 + Q W_m + R = 0, \quad (1)$$

gdzie zmienne P, Q, R są zależne od kształtu łopatek wieńca wirnikowego i geometrii linii prądu [4].

Równaniem zamykającym jest równanie ciągłości w postaci:

$$\dot{m} = z \int_0^q \varrho W_m \cos(\delta - \beta) \left(\frac{2dr}{z} - t \cdot \beta \right) dq. \quad (2)$$

Do obliczeń wykorzystano program obliczeniowy STO-PZDW-81 w języku Algol 1900 [8].

2.2. Przepływ palisadowy

2.2.1. Metoda funkcji prądu

Analizę przepływu palisadowego prowadzimy na wybranych osiowo-symetrycznych powierzchniach prądu określonych przez rozwiązanie pierwszego zagadnienia dwuwymiarowego w strudze o wysokości Δn . Do wyznaczenia rozkładu prędkości na powierzchni łopatek zastosowano równanie wyprowadzone z warunku niewirowości przepływu bezwzględniego w układzie współrzędnych "m" stycznej do linii prądu w przekroju merydionalnym oraz zgodnej z kierunkiem obwodowym. Jako równania uzupełniające wykorzystano równanie ciągłości oraz równania funkcji prądu. Ostateczna postać równania przepływu [9]

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial m^2} - \frac{1}{r^2} \frac{1}{\varrho} \frac{\partial \varrho}{\partial \phi} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} - \frac{\sin \delta}{\varrho} - \frac{1}{\Delta n \varrho} \frac{\partial (\Delta n \varrho)}{\partial m} \frac{\partial \psi}{\partial m} = \frac{2 \Delta n \varrho}{\dot{m}} \omega \sin \delta \quad (3)$$

jest typu eliptycznego i rozwiązywana jest na drodze numerycznej [10] przez zastąpienie go równaniem różnicowym rozpisany dla węzłów o nierównych odstępach i zastosowaniu związków dla różnic przednich w skończonym obszarze ograniczonym konturem ABCDEFGH (rys. 20).

2.2.2. Metoda krzywizny linii prądu

W praktyce obliczeniowej do wyznaczania obciążeń aerodynamicznych wirujących i nieruchomych palisad łopatkowych stosowano również w niniejszej pracy metodę opartą na pojęciu krzywizny linii prądu [11], [12]. Odpowiednią zależność uzyskano wykorzystując równanie równowagi przepływu w kierunku obwodowym

$$\frac{dW_{\phi}}{dt} + \frac{W}{r} \frac{W_{\phi}}{r} + 2\omega W_r = -1/\varrho \frac{\partial p}{r \partial \phi} \quad (4)$$

oraz równanie energii izentropowego przepływu względnego w układzie wirującym [11].

$$\frac{1}{\varrho} \frac{\partial p}{r \partial \phi} = -W \frac{\partial W}{r \partial \phi} \quad (5)$$

Ostateczne równanie równowagi przepływu w kierunku obwodowym ma postać:

$$\frac{d(W \sin \theta)}{dt} + \frac{1}{r} W^2 \cos \theta \sin \delta \sin \theta + 2\omega W \cos \theta \sin \delta = W \frac{\partial W}{r \partial \phi} \quad (6)$$

2.3. Przepływ w pierścieniowej warstwie przyściennej

Rozkłady prędkości uzyskane z rozwiązania osiowo-symetrycznego modelu przepływu wykorzystuje się z kolei do wyznaczenia wielkości geometrycznych pierścieniowych warstw przyściennych. Do rozwiązania tego zagadnienia stosuje się dwa równania całkowe umożliwiające wyznaczenie narastania grubości warstwy przyściennej w kierunku osiowym i obwodowym [13].

$$\frac{d}{dz} (W_z^2 \theta_z) + H \theta_z \frac{dW_z}{dz} = \frac{d}{dz} \left(\frac{W_z^2}{2} \zeta_{fz} \right) + \frac{\tilde{e}_z}{\xi} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dz} (W_z W_\psi \theta_\psi) + H \theta_\psi \frac{dW_\psi}{dz} = \frac{d}{dz} \left(\frac{W_z^2}{2} \zeta_{f\psi} \right) + \frac{\tilde{e}_\psi}{\xi} \quad (8)$$

Do rozwiązania w obszarze pierścieniowej warstwy przyściennej wykorzystywana jest różnicowa postać tego równania [14], umożliwiająca całkowanie krok po kroku w kierunku przepływu.

W równaniach tych uzyskanych w wyniku całkowania równań Naviera-Stokesa wzdłuż podziałki, następnie wzdłuż grubości warstwy przyściennej δ , występują wielkości charakterystyczne warstwy przyściennej takie, jak: miara liniowa zmniejszenia natężenia przepływu ζ^* , miara liniowa zmniejszenia momentu ilości ruchu θ oraz miara liniowa zmniejszenia sił łopatkowych ζ_f . Dla liczbowego określenia tych zależności konieczne jest wyznaczenie rozkładu prędkości w obszarze pierścieniowej warstwy przyściennej oraz w obszarze przepływu głównego.

2.4. Straty profilowe

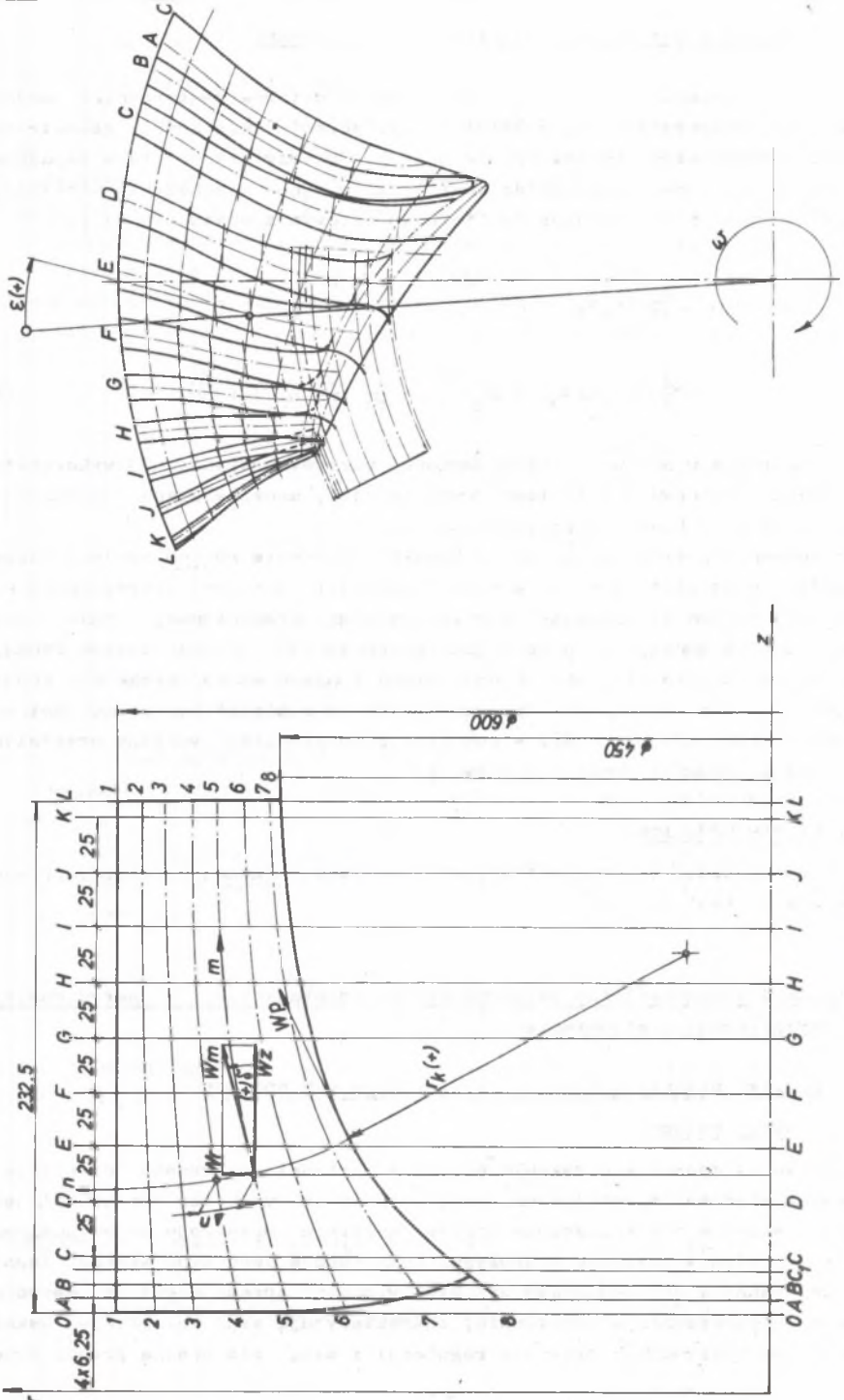
Do wyznaczenia strat profilowych wykorzystano znaną korelację opracowaną przez Liebleina [15].

3. Badania aerodynamiczne osiowych stopni sprężających z merydionalnym przyspieszeniem strumienia

3.1. Analiza przepływu w wieńcu sprężającym MWM 600/075

3.1.1. Uwagi wstępne

Jednym ze sposobów uzyskania wysokich wartości przyrostu ciśnienia w osiowych wieńcach sprężających, przy zachowaniu wysokości sprawności, jest nadanie strudze przyspieszenia poprzez zwężenie przekroju merydionalnego kanału wirnika w kierunku przepływu. Konstrukcje tego typu wieńców łopatkowych, zwane w dalszym ciągu osiowymi wieńcami sprężającymi z merydionalnym przyspieszeniem strumienia, charakteryzują się korzystnymi wskaźnikami bezwymiarowymi, prostotą regulacji i małą głośnością pracy. Prze-



Rys. 2. Przekroje modelowe łopatkı koła wirnikowego MWM 600/075

szkodę w szerszym wprowadzeniu tych urządzeń do praktyki przemysłowej stanowił brak miarodajnej metody obliczeń aerodynamicznych rozpatrywanego typu wentylatorów i skomplikowany przestrzenny, trudny technologicznie kształt łopatek kół wirnikowych. Wychodząc na przeciw tym trudnościom, przeprowadzono badania aerodynamiczne i analizę teoretyczną najbardziej ogólnej konstrukcji wieńca sprężającego z piastą o tworzącej krzywoliniowej i przestrzennie ukształtowanymi łopatkami [16].

Analizę teoretyczną przeprowadzono w oparciu o quasitrójwymiarowy model przepływu i wyniki jej porównano z wynikami badań przepływu rzeczywistego. Uzyskane stąd informacje wykorzystano z kolei do opracowania metody obliczeń aerodynamicznych wieńców sprężających z merydionalnym przyspieszeniem strumienia.

3.1.2. Konstrukcja modelu i program badań

Przedmiotem badań był osiowy wieńiec sprężający z piastą o tworzącej krzywoliniowej, przestrzennie ukształtowanymi łopatkami i cylindryczną osiową zewnętrzną (rys. 2).

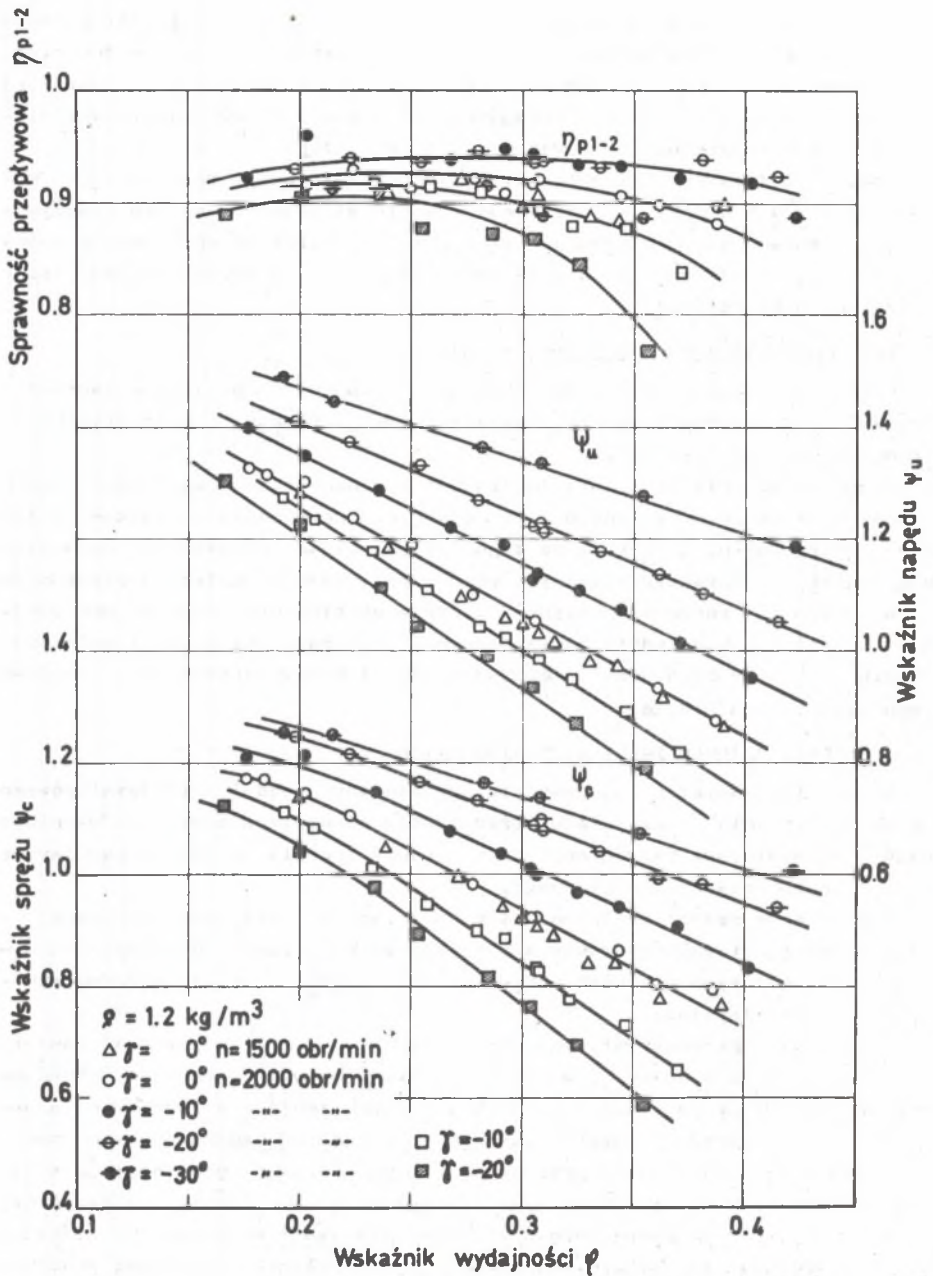
Celem badań było uzyskanie informacji o własnościach aerodynamicznych wieńca modelowego oraz danych niezbędnych do porównania z wynikami obliczeń numerycznych. Stosownie do tego program badań przewidywał wyznaczenie wielkości charakterystycznych wieńca przy różnych kątach napływu czynnika na łopatki robocze i zmiennej liczbie obrotów oraz badania pola prędkości i ciśnień w układzie bezwzględny w przekroju wlotowym i wylotowym wirnika dla wybranych wskaźników wydajności i kątów ustawienia łopatek regulacyjnych na wlocie.

1.3.3. Analiza teoretyczna i doświadczalna

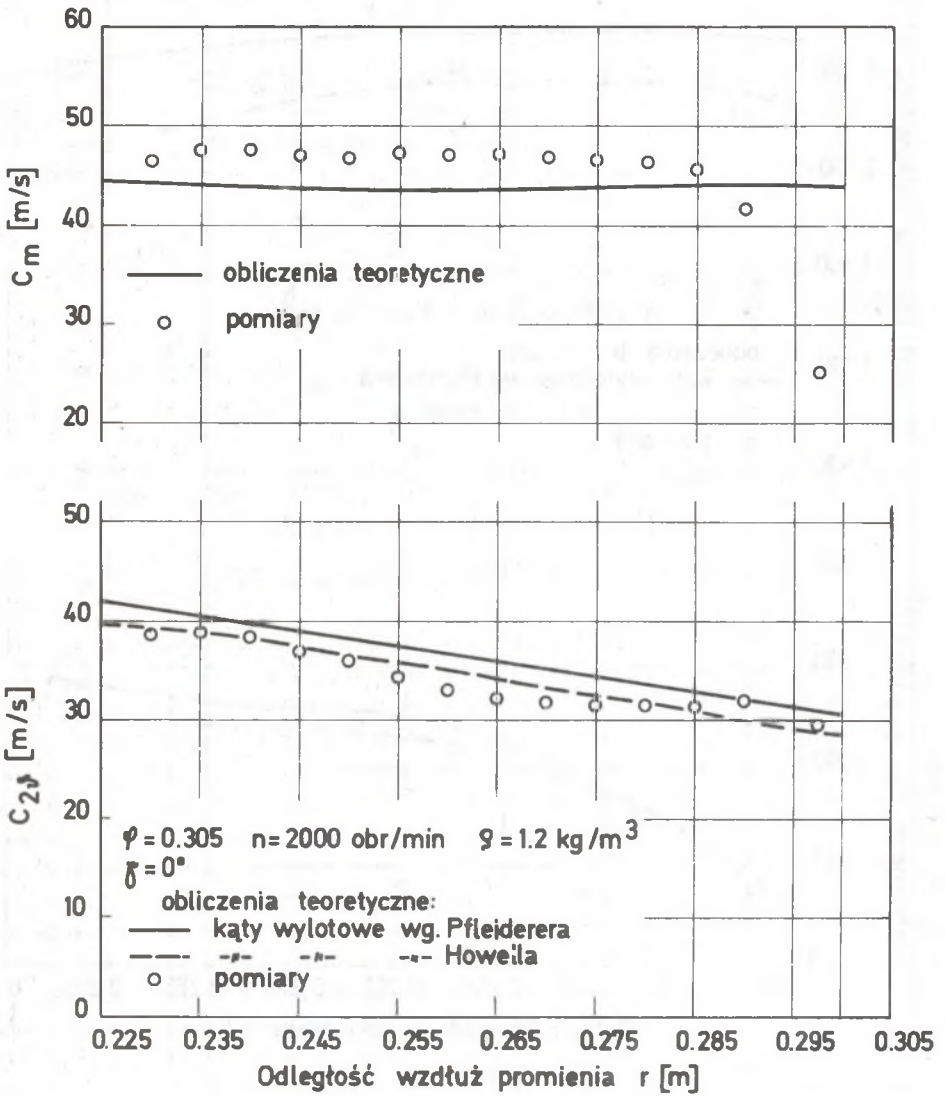
Do analizy teoretycznej przyjęto uproszczony model trójwymiarowego przepływu czynnika nielepkiego przez kanały międzyłopatkowe koła wirnikowego. Trójwymiarowe zagadnienie rozwiązano w oparciu o dwa dwuwymiarowe przybliżenia przepływu względnego.

W pierwszym przybliżeniu rozpatrzono przepływ osiowo-symetryczny, w drugim natomiast warunki równowagi przepływu w kierunku obwodowym na wybranych osiowo-symetrycznych powierzchniach prądu z uwzględnieniem skończonej liczby łopatek.

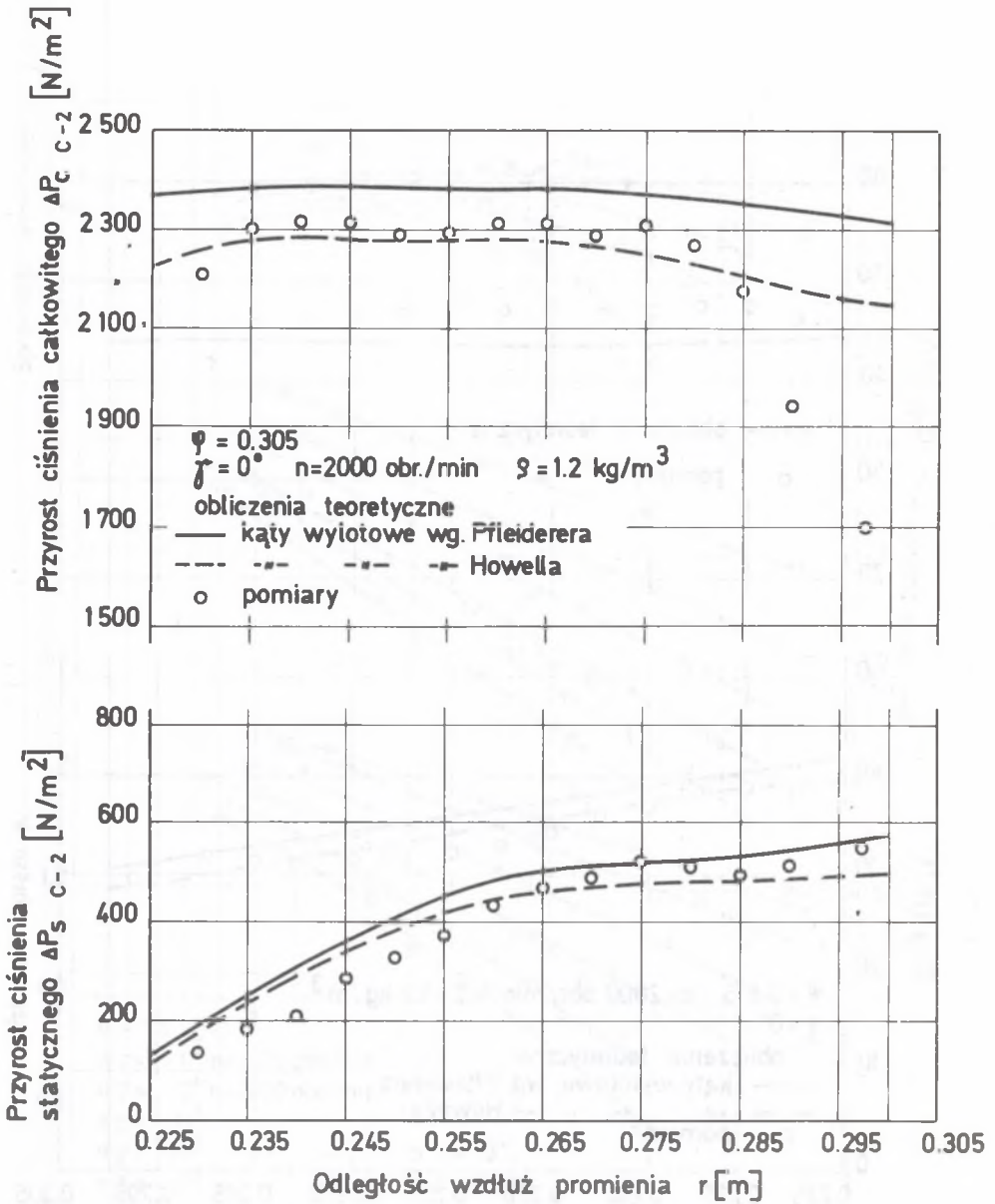
Zależności charakterystyczne pracy wieńca uzyskane na drodze pomiaru przedstawiono na rysunku 3, w układzie bezwymiarowym w funkcji wskaźnika wydajności φ . Szczególnie duże praktyczne znaczenie dla opracowania metody obliczeń aerodynamicznych wieńców sprężających badanego typu ma znaczne podobieństwo charakteru przebiegu krzywych zarówno prędkości (rys. 4) jak i przyrostów ciśnień (rys. 5), wyznaczonych na drodze teoretycznej oraz przy pomocy pomiaru. Równie interesujące jest porównanie rozkładu kątów wylotowych strumienia obliczonych i zmierzonych za pomocą sondowania (rys. 6). Kąty strug obliczone metodą Howella w granicach dokładności pomiaru pokrywają się w obszarze strumienia niezakłóconego wpływem szcze-



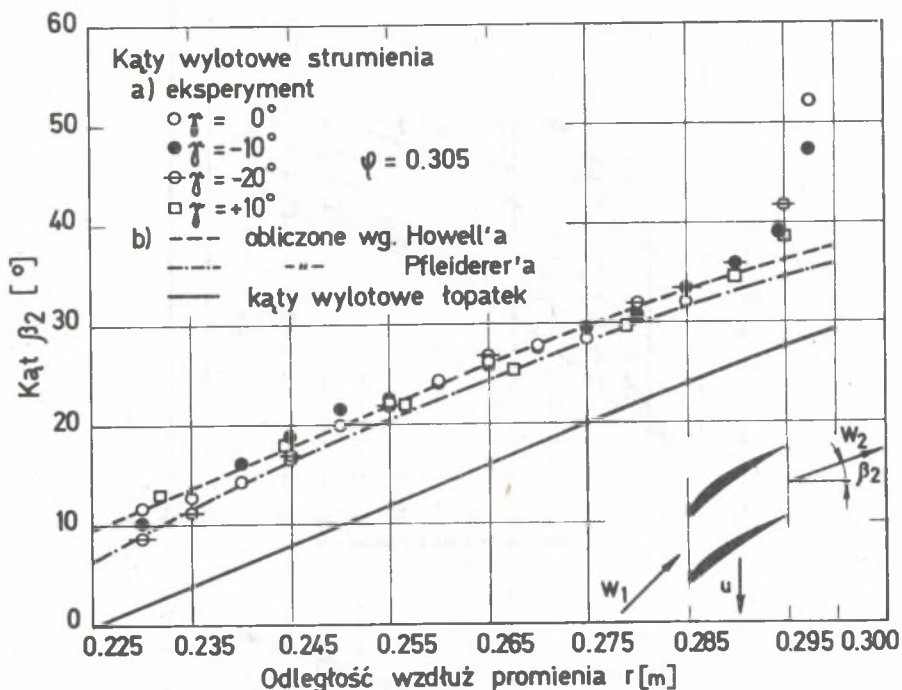
Rys. 3. Charakterystyka aerodynamiczna wieńca wirnikowego MWM 600/075



Rys. 4. Rozkłady prędkości wzdłuż promienia w przekroju wylotowym wieńca wirnikowego MWM 600/075



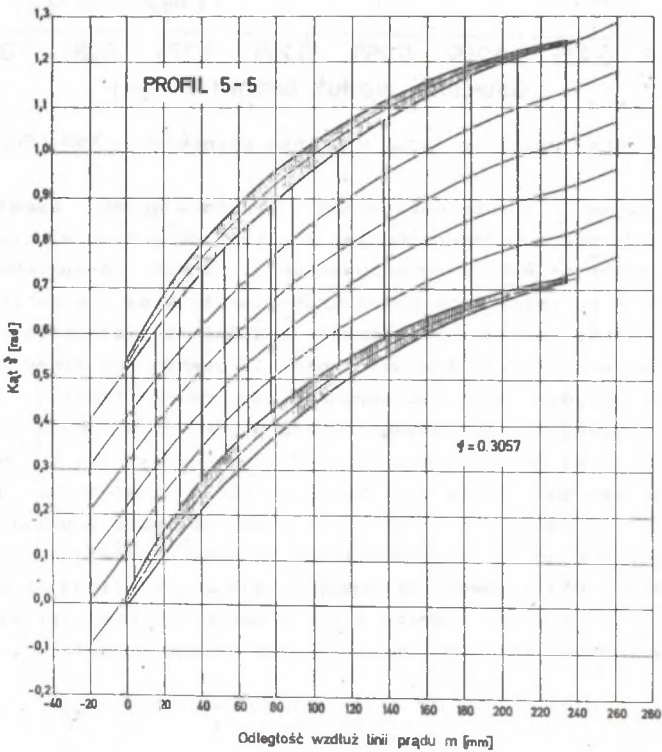
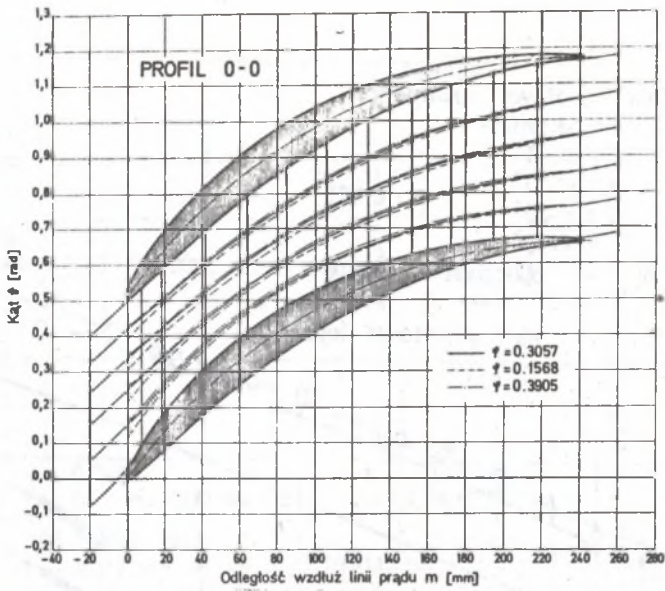
Rys. 5. Rozkłady ciśnień wzdłuż promienia w przekroju wylotowym koła wirnikowego MWM 600/075



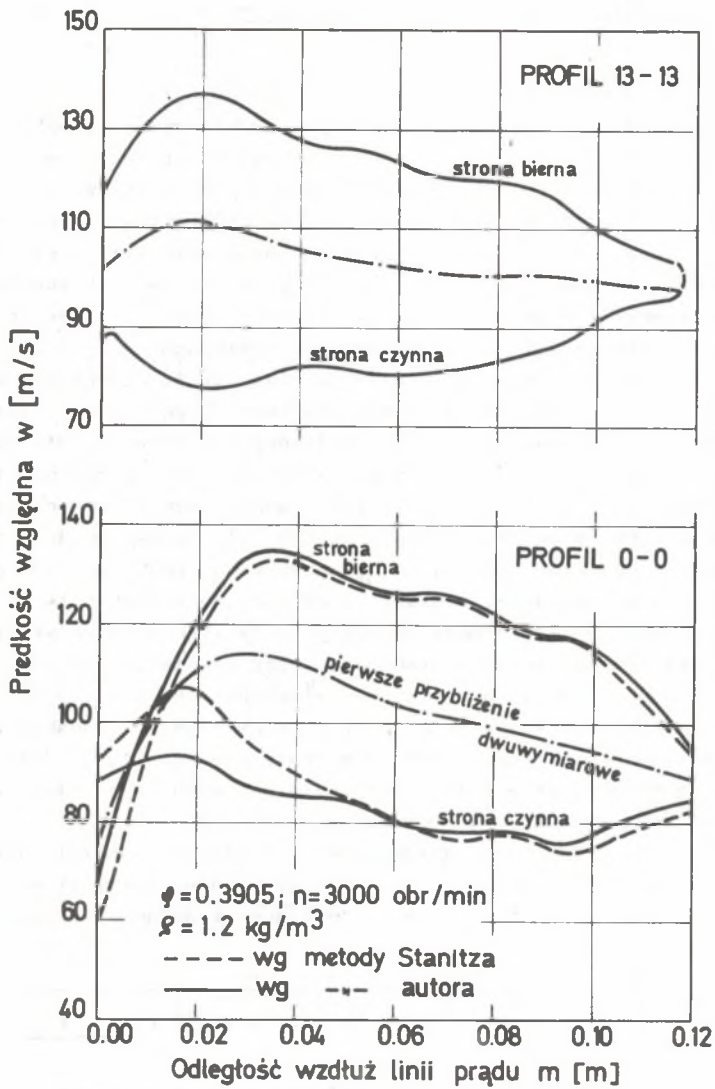
Rys. 6. Kąty wylotowe strug z wieńca wirnikowego MWM 600/075

liny nadłopatkowej i tarcia powierzchni ograniczających kanał z kątami rzeczywistymi. Przeprowadzono również analizę przepływu w przestrzeniach międzyłopatkowych na wybranych osiowo-symetrycznych powierzchniach prądu [1]. Geometrię palisady łopatkowej przy piastie wraz z przebiegiem linii prądu w przepływie względnym dla trzech wskaźników wydajności przedstawiono na rysunku 7. Szczególne znaczenie dla oceny aerodynamicznej wieńców ma rozkład prędkości po obu stronach powierzchni łopatek. Charakterystyczny dla palisad sprężarkowych rozkład prędkości i ciśnień uzyskano dla profilu łopatki przy piastie (rys. 8). Spełniony jest tu wyraźnie warunek stopniowego narastania obciążenia od wlotu w kierunku centralnych części profilu, a następnie spadku w kierunku spływu z łopatki.

Wnioski wypływające z przeprowadzonej analizy teoretycznej i badań aerodynamicznych wieńca modelowego wykorzystano z kolei do opracowania na EMC metody obliczeń stopni sprężających z merydionalnym przyspieszeniem strumienia z piastą stożkową i cylindryczną osłoną zewnętrzną.



Rys. 7. Palisada łopatkowa wieńca wirnikowego MWM 600/075 przy płaszcie



Rys. 8. Rozkład prędkości wzdłuż profilu łopatki przy piąście i przy osłonie zewnętrznej

3.2. Modelowe wentylatory osiowe z merydionalnym przyspieszeniem strumienia

3.2.1. Algorytm obliczeniowy

Zmniejszenie dyfuzorowości kanałów międzyłopatkowych przez zastosowanie przyspieszenia strugi umożliwia projektowanie wirników wieńców łopatkowych rozpatrywanego typu dla wysokich wskaźników spiętrzenia. Powoduje to jednakże znaczne przestrzenne zwichrowanie powierzchni łopatek. Podstawowym problemem przy projektowaniu tych kół wirnikowych jest więc także dobranie wskaźników geometrycznych, by przy możliwie wysokich wskaźnikach spiętrzenia i wydajności uzyskać łopatki proste, łatwe do wykonania. Na ostateczny kształt łopatek ma wpływ w szczególności dobór stosunku średnic na wlocie i wylocie, liczba łopatek, dobór wskaźników spiętrzenia i wydajności oraz kształtu szkieletowych profili na poszczególnych promieniach począwszy od piasty od osłony zewnętrznej. Biorąc pod uwagę znaczną liczbę zmiennych, mających wpływ na ostateczne ukształtowanie powierzchni łopatek i związaną z tym znaczną liczbę pracochłonnych obliczeń, opracowano, algorytm obliczeń na EMC [17]. Jako model przyjęto koło wirnikowe z piastą stożkową i cylindryczną osłoną zewnętrzną. Przykład ten ma duże znaczenie, ponieważ jest technologicznie łatwy do realizacji i zapewnia prostotę konstrukcji oraz taniocść wirnika wentylatora.

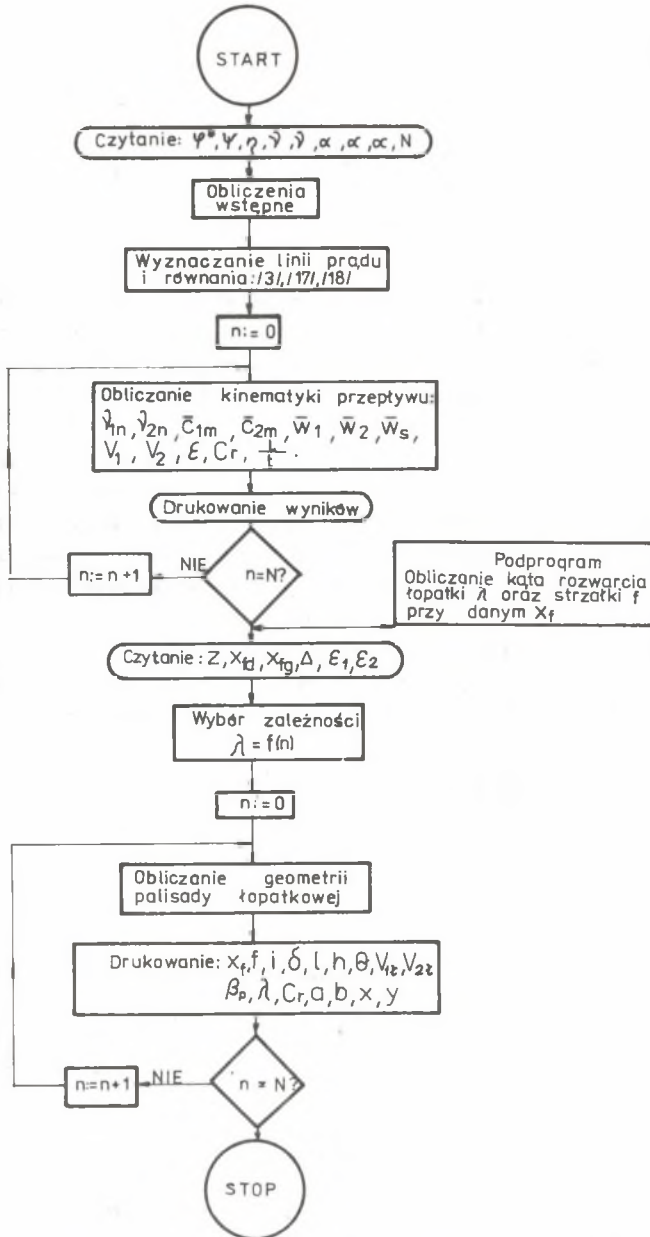
Kształt powierzchni łopatek wyznaczono przy założeniu, że ruch czynnika odbywa się na osiowo-symetrycznych powierzchniach stożkowych, zgodnie z zasadami przepływu potencjalnego oraz przy założeniu jednakowych przyrostów ciśnienia całkowitego w każdej strudze elementarnej. Przy przyjęciu stałej cyrkulacji pole składowych merydionalnych prędkości jest jednakowe w nieruchomym i wirującym wirniku.

Rozkłady linii prądu oraz bezwymiarowych prędkości merydionalnych odniesionych do prędkości obwodowej u_2 w płaszczyźnie krawędzi wlotowych i wylotowych łopatek wirnika obliczono z zależności podanych w pracy [18]:

$$c_{1m} = \frac{\varphi}{1 \sqrt{k^{-2} + (1 - \vartheta)^2} \left[\delta_0^* - \sqrt{k^{-2} + (1 - \vartheta)^2} (1 - \cos \delta_0^*) \right]} \quad (9)$$

gdzie: $k = \operatorname{tg} \delta_0^* / (1 - \vartheta_1)$, w płaszczyźnie krawędzi wylotowych łopatek wirnika;

$$c_{2m} = q \frac{\varphi}{1 - \vartheta_2} \vartheta - \frac{m^2}{m^2 + 1} \left[m^2 (1 - \vartheta)^2 + 1 \right] - \frac{m^2 + 2}{2(m^2 + 1)} \exp \left[\frac{m}{m^2 + 1} \arctg m (\vartheta - 1) \right] \quad (10)$$



Rys. 9. Schemat blokowy obliczeń wieńców wirnikowych wentylatorów serii MWM

gdzie: $m = \tan^2 \delta_0 (1 - \vartheta_2)$, natomiast q jest czynnikiem wynikającym z równania ciągłości;

$$q = \frac{1 - \vartheta_2^2}{1 - \int_{\vartheta_2}^{\vartheta} 2c_z(\vartheta) d\vartheta} \quad (11)$$

Po wyznaczeniu geometrii profili łopatki na pomocniczych powierzchniach odwzorowania, wykreślą się z kolei w oparciu o metodę Kaplana przekroje modelowe łopatki w płaszczyznach prostopadłych do osi wirnika. Szczególnie wiele informacji o kształcie łopatki, dostarcza kształt krawędzi wlotowej i wylotowej oraz kąt rozwarcia λ (rys. 10). Kąt ten ze względów konstrukcyjnych powinien zmieniać się w sposób ciągły począwszy od piasty w kierunku osłony zewnętrznej. Zastosowano profile o szkieletowej parabolicznej. Umożliwiały one konstruowanie łopatki dla założonego wstępnie przebiegu krawędzi wlotowych i wylotowych, przez zmianę usytuowania maksymalnej strzałki ugięcia, zarówno w kierunku osiowym jak i promieniowym.

Schemat blokowy programu obliczeń według podanego algorytmu przedstawia rysunek 9. Algorytm przewiduje możliwość realizacji dowolnego modelowania kształtu łopatki przez kolejne zmiany kinematycznych i geometrycznych wskaźników bezwymiarowych.

3.2.2. Konstrukcje wentylatorów modelowych

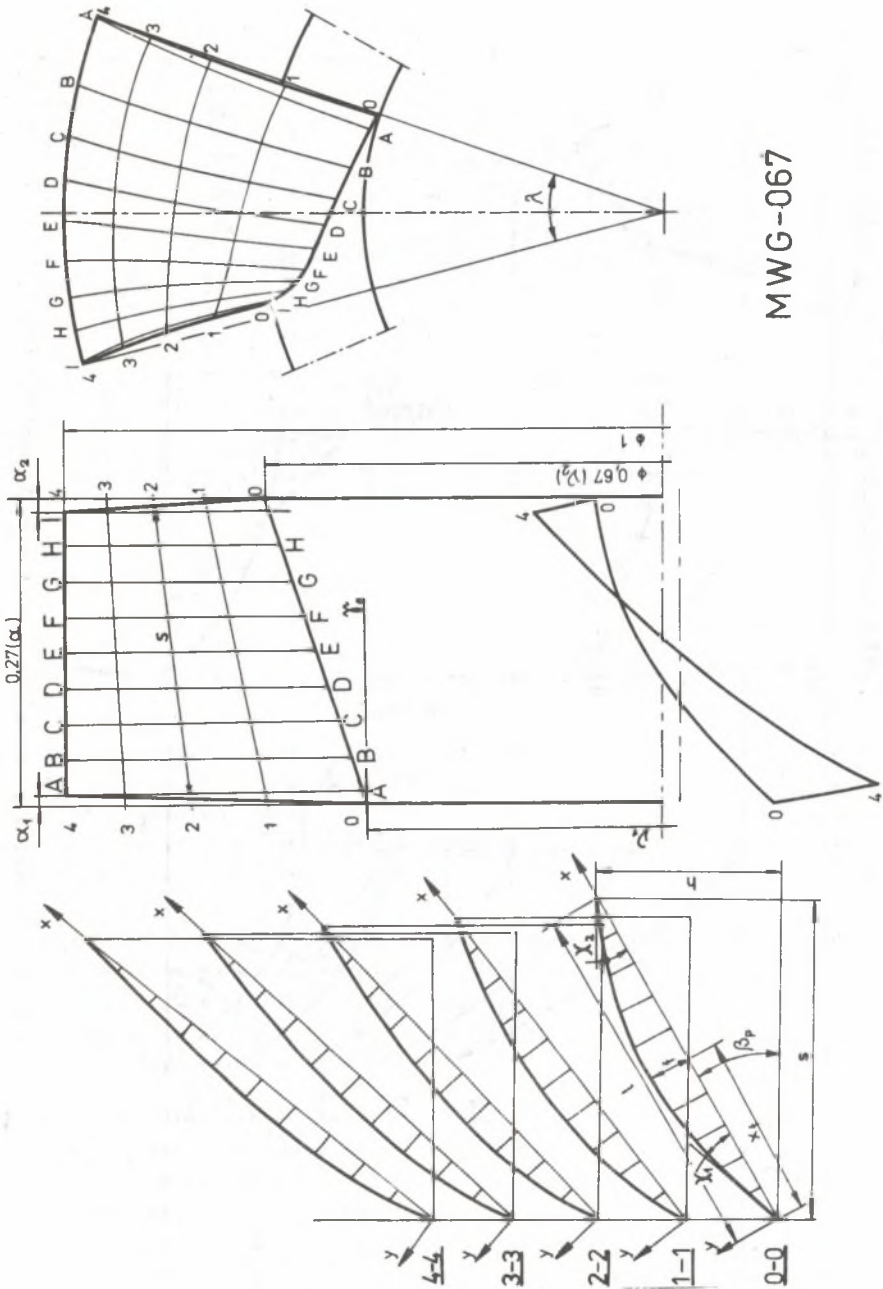
Wykorzystując przedstawiony program, przeprowadzono obliczenia kół wirnikowych, których wskaźniki geometryczne i kinematyczne zestawiono w tabelicy 1.

Tabelica 1

Oznaczenie modelu	$\vartheta_2 = D_2/D_1$	$\psi = \frac{2\Delta p_c}{\rho u_2^2}$	$\psi^* = \frac{4V}{\pi D_2^2 u_2}$
MWM/063	0,63	0,54	0,32
MWM/067	0,67	0,60	0,31

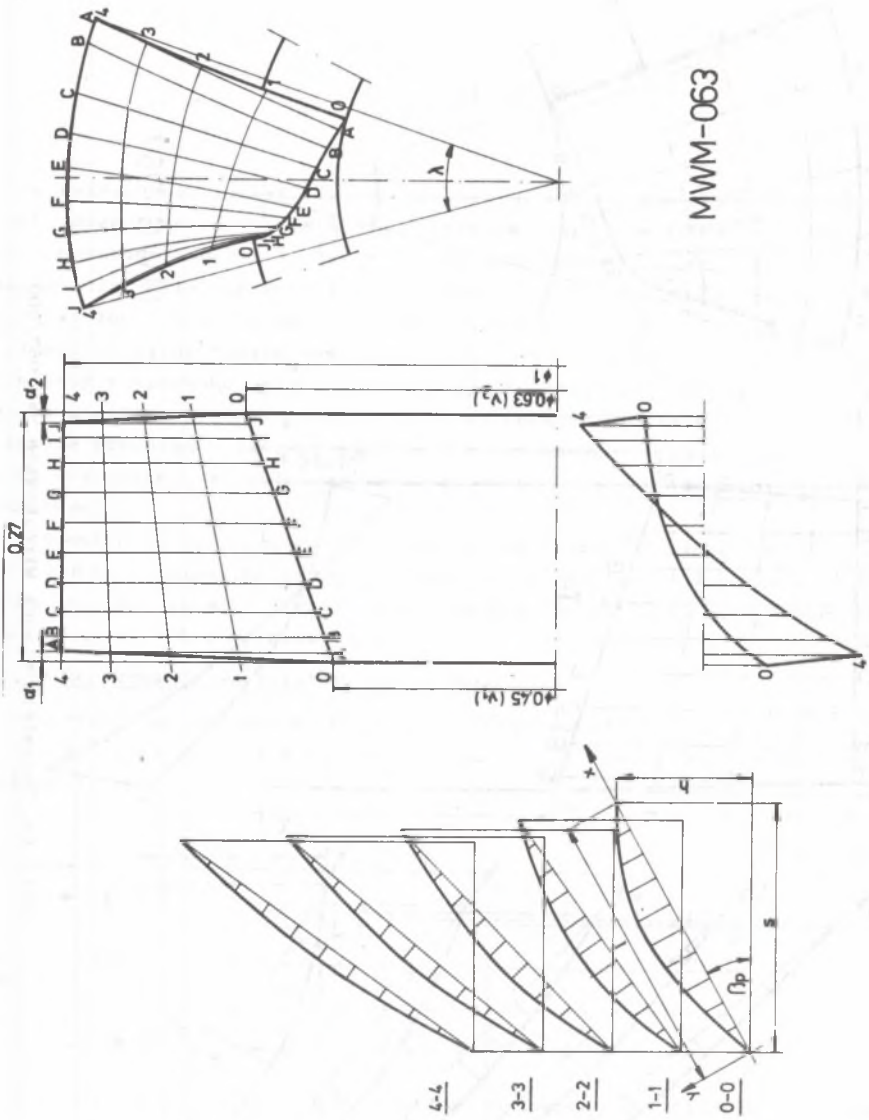
Rozwiązania konstrukcyjne łopatek kół wirnikowych wentylatorów modelowych przedstawiono na rysunkach 10 i 11. Optymalizacja kształtu łopatek ze względu na liniowy przebieg zmian kątów rozwarcia λ wzdłuż wysokości łopatki, określony w płaszczyźnie prostopadłej do osi, umożliwiło uzyskanie łopatek o małym przestrzennym zwichrowaniu ich powierzchni.

Jako model podstawowy przyjęto do badań wentylator w układzie przepływowym składającym się z dwustopniowego wlotu dyszowego, wstępnej kierow-



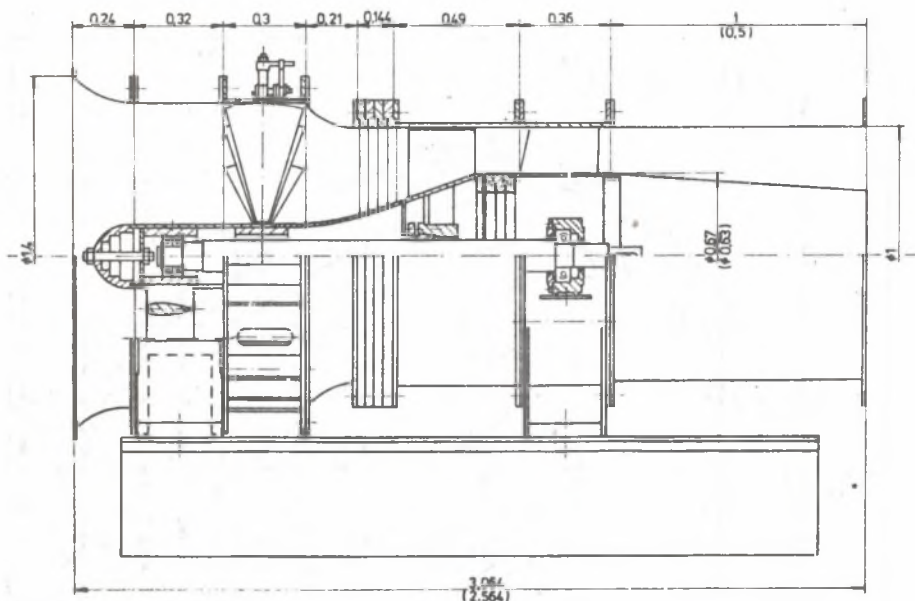
MWG-067

Rys. 10. Geometria wieńca wirnikowego MWG 067/500



MWM-063

Rys. 11. Geometria wiecia wirnikowego MWM 063



Rys. 12. Układ przepływowy wentylatora modelowego MWG 067/063

nicy regulacyjnej o dwanaście płaskich łopatek, koła wirnikowego, kierownicy tylnej oraz dyfuzora wylotowego (rys. 12).

Koło wirnikowe o średnicy zewnętrznej 500 mm posiada piastę stożkową z kulistą czaszą wlotową i pierścieniowym elementem końcowym. Do piasty przyspawanych jest dwanaście blaszanych łopatek o szkieletowych parabolicznych.

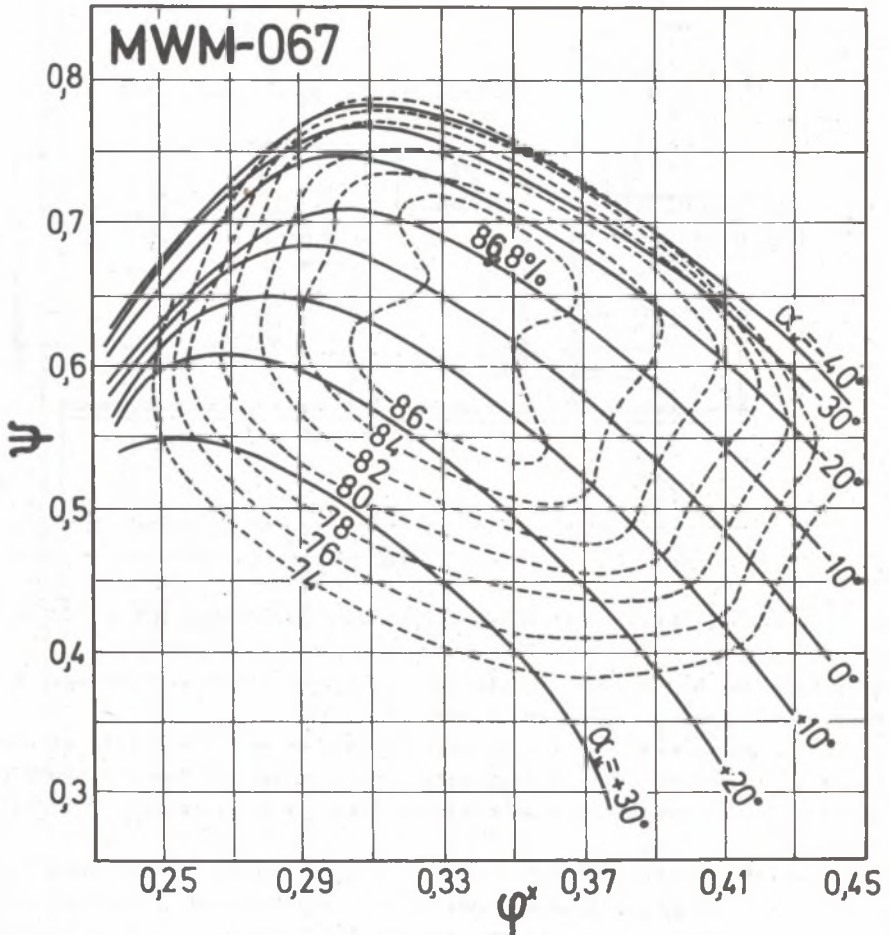
Za kołem wirnikowym znajduje się kierownica tylna składająca się z trzynastu blaszanych łopatek o powierzchni cylindrycznej. Ostatni element układu przepływowego wentylatora stanowi krótki dyfuzor z cylindryczną powierzchnią zewnętrzną o względnej długości odniesionej do średnicy zewnętrznej wynoszącej 0,5.

3.2.3. Wyniki badań aerodynamicznych

Charakterystyki wentylatorów modelowych wyznaczano przy osiowym napływie czynnika na łopatki robocze wirnika oraz przy współbieżnym i przeciwbieżnym zawirowaniu wstępnym.

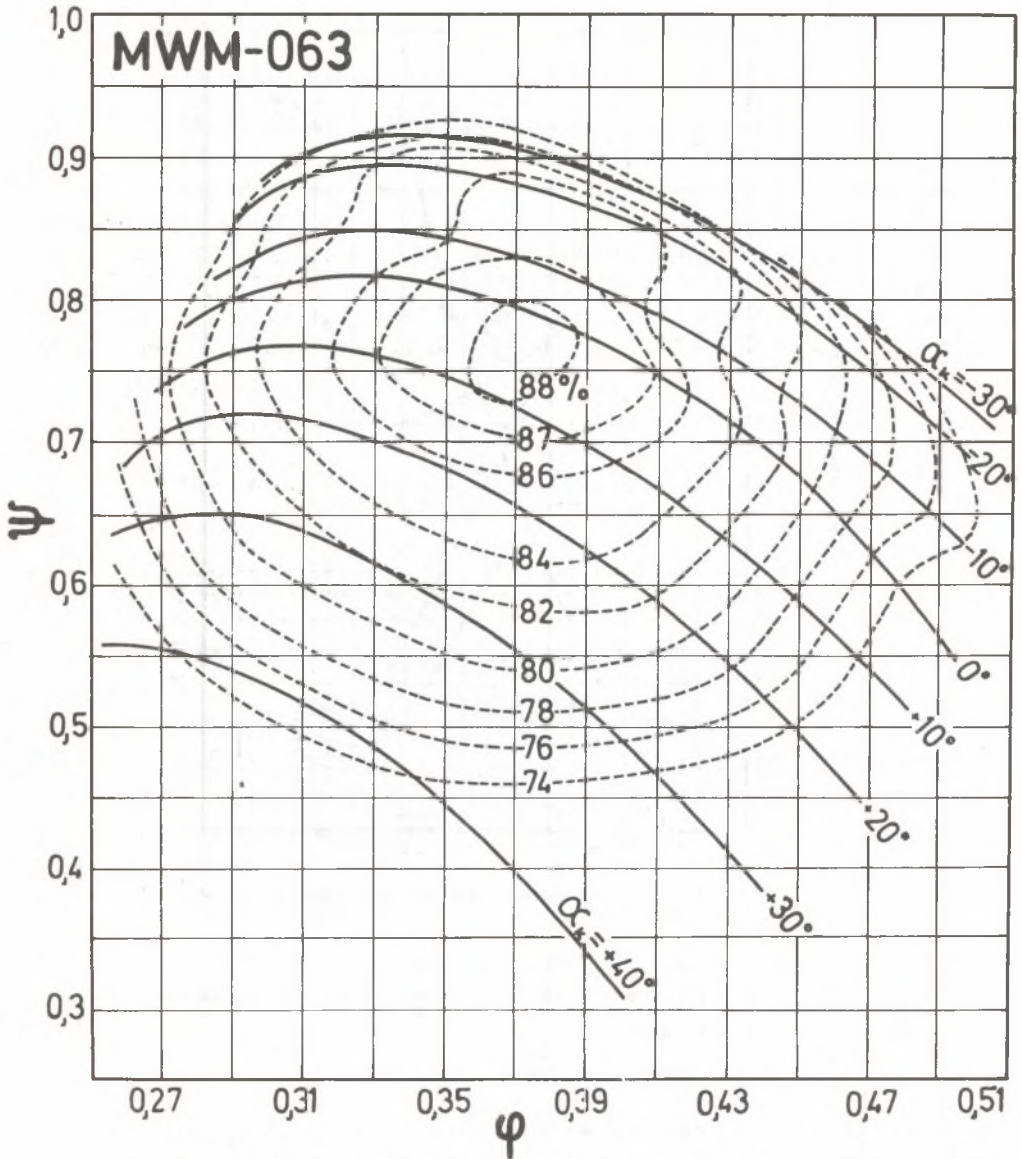
Na rysunkach 13 oraz 14 zestawiono charakterystyki obu wentylatorów uzyskane przy regulacji parametrów pracy poprzez zmianę kąta ustawienia łopatek wstępnej kierownicy regulacyjnej w zakresie kątów $\beta = +30^\circ$ do -40° .

Wskaźniki bezwymiarowe wentylatorów odpowiadające punktowi maksymalnej sprawności przy kącie $\gamma = 0^\circ$, naniesiono ponadto na krzywą Cordiera (rys. 15).

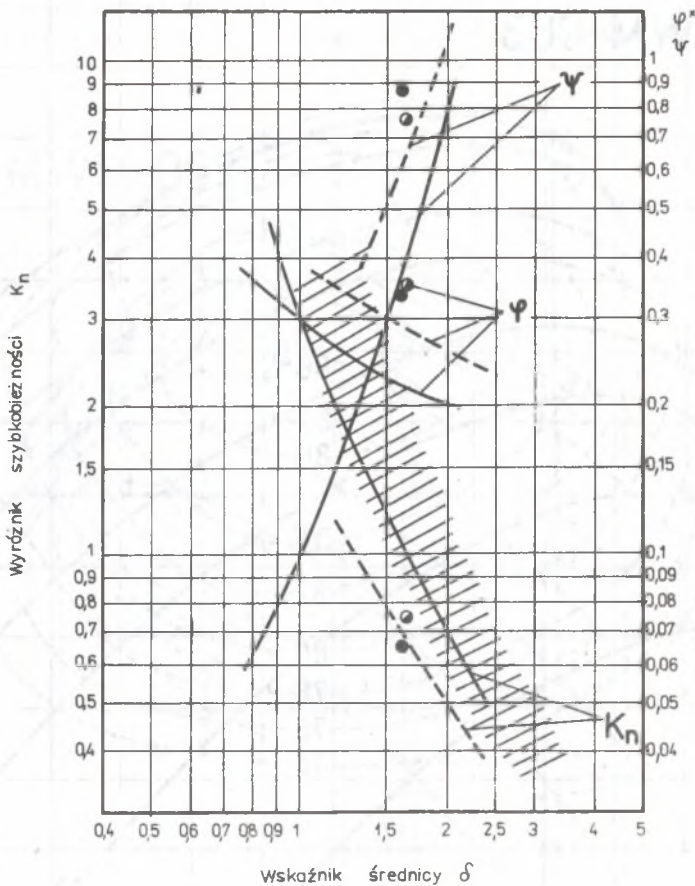


Rys. 13. Charakterystyka regulacyjna wentylatora MWM 067

Badane konstrukcje wentylatorów modelowych charakteryzują się wysokimi wskaźnikami bezwymiarowymi, znacznie korzystniejszymi niż osiągnięte przez konstrukcje wentylatorów osiowych reakcyjnych. Przy płaskim przebiegu wysokiej sprawności i obszernym zakresie regulacji świadczy, to o korzystnych właściwościach aerodynamicznych badanych typów wentylatorów. Jak wynika z wykresu (rys. 15) wskaźniki badanych modeli są wyższe również od wskaźników uzyskiwanych przez znane konstrukcje wentylatorów z merydionalnym przyspieszeniem strumienia.



Rys. 14. Charakterystyka regulacyjna wentylatora MWM 063

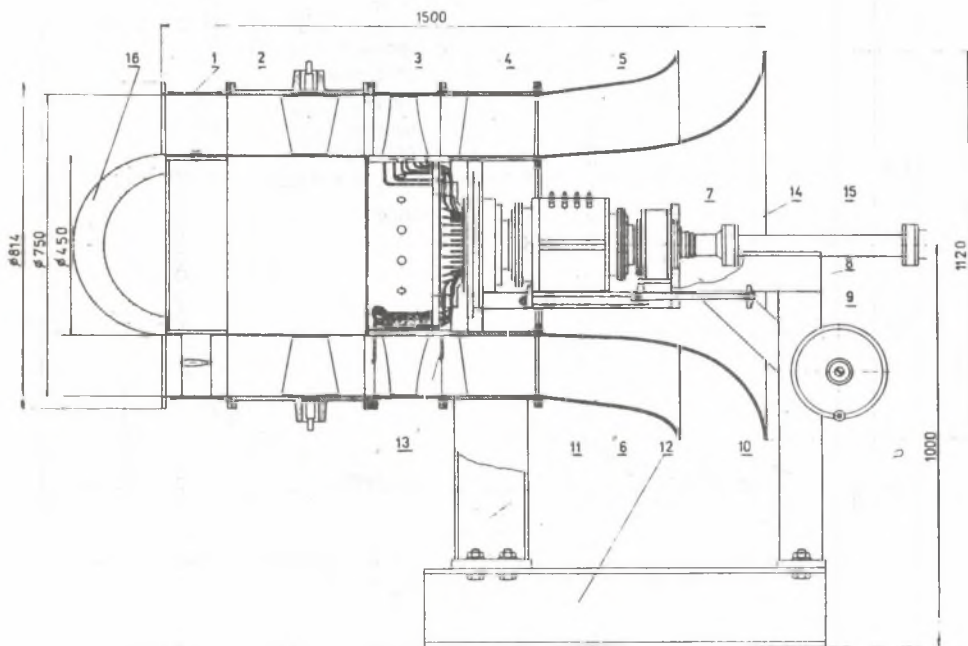


- — wentylatory osiowe reakcyjne
- - - wentylatory osiowe z merydionalnym przyspieszeniem strumienia
- — modelowy wentylator MWG-067
- — modelowy wentylator MWG-063

rys. 15. Wskaźniki bezwymiarowe wentylatorów modelowych serii MWG 063/067

4. Badanie aerodynamiczne wentylatorów osiowych reakcyjnych4.1. Osiowy stopień sprężający OSS750/06/14.1.1. Konstrukcja stopnia modelowego

Dla uzyskania uzupełniających informacji dotyczących przepływu przez osiowe stopnie sprężające oraz dla umożliwienia weryfikacji wyników badań teoretycznych skonstruowano stanowisko do badań obciążeń aerodynamicznych wirujących wieców łopatkowych oraz struktury przepływu w wybranych przekrojach kontrolnych stopnia zarówno w układzie względnym, jak i bezwzględnym, w obliczeniowym i pozaobliczeniowych punktach pracy. Stanowisko umożliwia ponadto badanie pełnych charakterystyk aerodynamicznych stopnia.

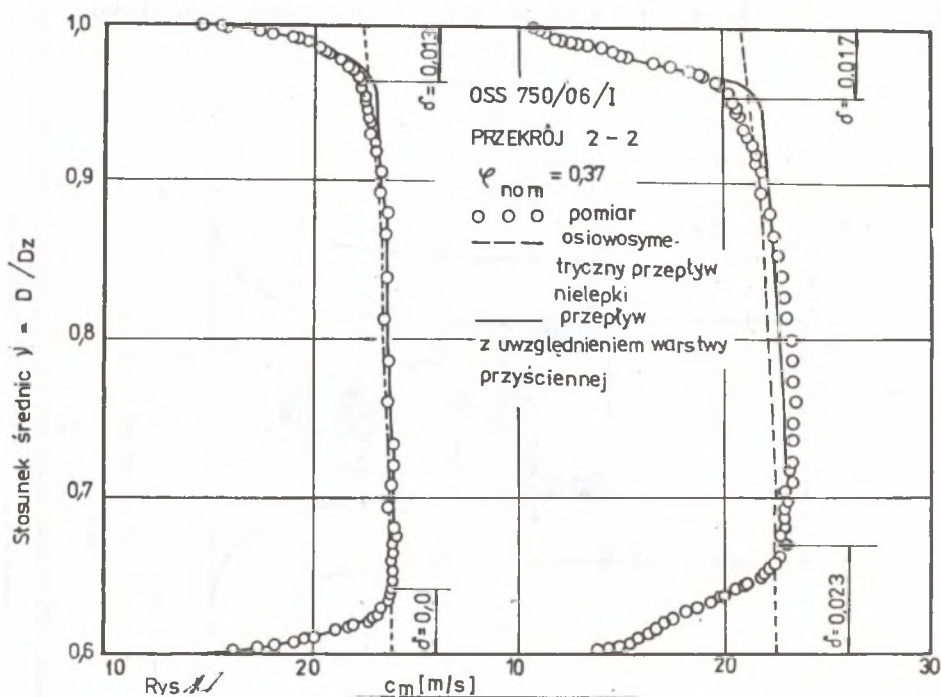


Rys. 16. Osiowy stopień sprężający OSS 750/06

Układ przepływu modelowego osiowego stopnia sprężającego (rys. 16) składa się z pierścieniowej części wlotowej dwunastu profilowanych łopatek wstępnej kierownicy regulacyjnej, koła wirnikowego, łopatek kierownicy tylnej oraz krzywoliniowego dyfuzora pierścieniowego.

Koło wirnikowe o stosunku średnic $\vartheta = 0,6$ składa się z cylindrycznej płyty stalowej z zamocowanymi na niej za pomocą śrub osiemnastoma łopatkami, wykonanymi z epidianu zbrojonego włóknem szklanym, o stałej długości cięciwy wzdłuż wysokości.

Przełożenie ciśnień umożliwia przenoszenie 96 impulsów ciśnieniowych z układu wirującego do układu stałego bez konieczności zatrzymywania stanowiska. Urządzenie umożliwia równoczesny odczyt ośmiu punktów pomiarowych i kolejną ich zmianę w czasie ruchu wieńca wirnikowego.



Rys. 17. Rozkład prędkości w przekroju wlotowym i wylotowym wieńca wirnikowego OSS 750/06 przy $\varphi_z = 0,37$

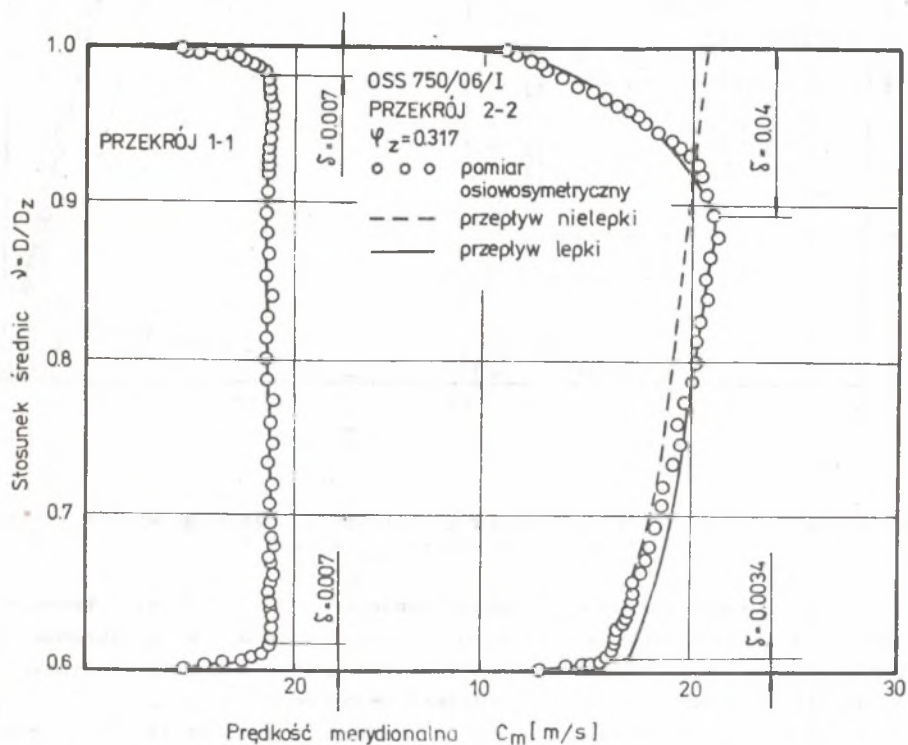
Jedna z łopatek wykonana jest jako drenowana w siedmiu, przekrojach na siedmiu promieniach z 21 punktami poboru ciśnienia wzdłuż obwodu łopatki. Pozostałych 75 dysponowanych punktów pomiarowych rozdzielonych jest pomiędzy 15 pięciootworowych sond kulowych wirujących wraz z wirnikiem.

Za kołem wirnikowym znajduje się kierownica tylna składająca się z 13 płaskich łopatek cylindrycznych. Ze względów konstrukcyjnych zastosowano dyfuzor pierścieniowy, zakrzywiony wykonany z epidianu zbrojonego włóknem szklanym.

4.2.2. Wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych

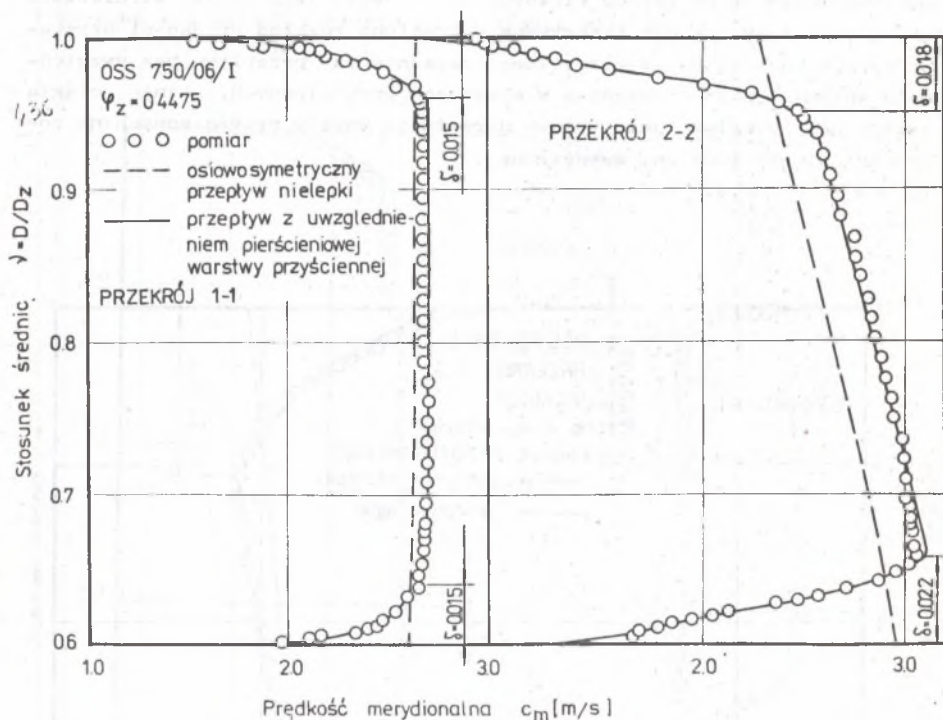
Badania przepływu osiowo-symetrycznego

Obliczenia przepływu osiowo-symetrycznego przeprowadzono w układzie współrzędnych 33 quasiortogonalnych i 11 linii prądu dla trzech punktów charakterystyki aerodynamicznej stopnia: $\psi_z = cm/u_z = 0,317, 0,37, 0,447$. Uzyskane rozkłady prędkości porównano z wynikami sondowania przepływu przeprowadzonymi w przekroju wlotowym 1-1 i wylotowym koła wirnikowego (rys. 17, 18 i 19). Linia przerywana wykreśliła rozkład prędkości uzyskany z rozwiązania osiowo-symetrycznego zaęadnienia przepływu bez uwzględnienia wpływu lepkości czynnika w obszarach przyściennych. Linia ciągłą uzyskano przy uwzględnieniu wpływu narastania warstw przyściennych na powierzchni piasty i osłony zewnętrznej.



Rys. 18. Rozkład prędkości w przekroju wlotowym i wylotowym wieńca wirnikowego OSS 750/06 przy $\psi_{\min} = 0,307$

Pełny profil prędkości otrzymano przez skojarzenie tak uzyskanego profilu w przepływie głównym z profilem w obszarach warstw przyściennych obliczonych formułą Colesa [19]. Wpływ pierścieniowych warstw przyściennych na rozkład prędkości w przepływie głównym uwzględniono przez wprowadzenie "współczynnika blokady" czynnego przekroju przepływowego.



Rys. 19. Rozkład prędkości w przekroju wlotowym i wylotowym wieńca wirnikowego OSS 750/06 przy $\varphi_{\max} = 0,4475$

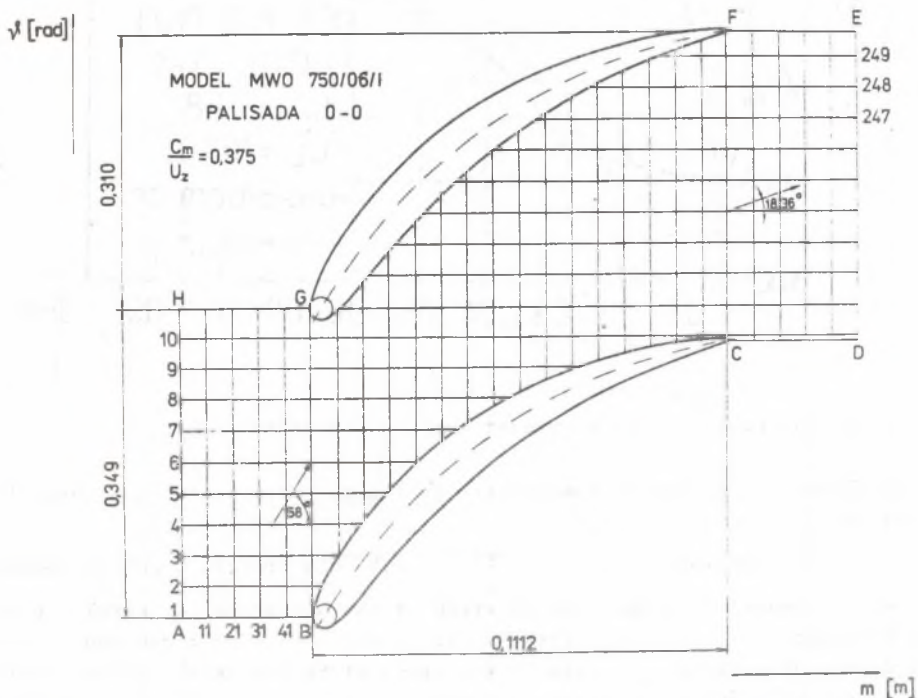
Na podkreślenie zasługuje jednakowa tendencja w przebiegu krzywych prędkości merydionalnych, w przekroju wylotowym wieńca wirnikowego, w przepływie głównym, określonych na drodze obliczeniowej i doświadczalnej dla wszystkich trzech wartości strumienia wydajności.

W obliczeniowym punkcie pracy wieńca prędkości merydionalne mają zgodnie z zasadą stałego wiru, stałą wartość wzdłuż wysokości kanału (rys.17). Uzyskano tu zadowalającą zgodność wyników obliczeń z wynikami pomiaru poza obszarem przejścia przepływu swobodnego w strefę oddziaływania przyściennego przy osłonie zewnętrznej.

W przypadku punktu pracy stopnia o wydajności niższej od obliczeniowej prędkości rosną wzdłuż wysokości kanału, natomiast przy wydajności wyższej maleją. Przedstawione porównanie potwierdza wiarygodność wyników obliczeń przepływu w osiowym stopniu sprężającym przy zastosowaniu modelu osiowo-symetrycznego.

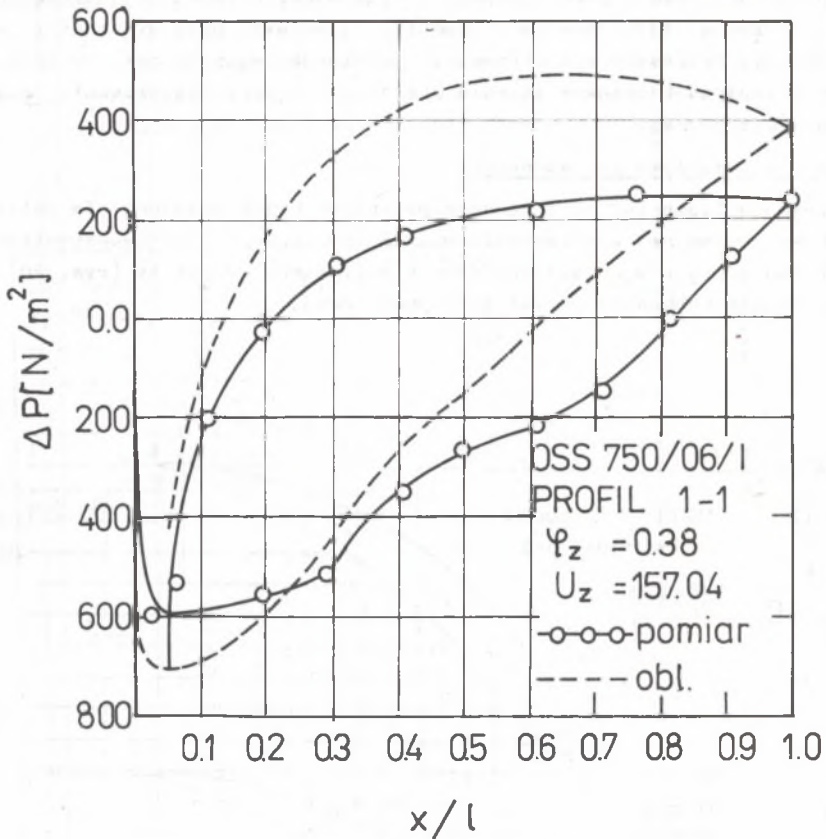
Badania przepływu palisadowego

Zarówno obliczenia jak i badania przepływu przeprowadzono dla palisady łopatkowej uzyskanej w przecięciu wieńca wirnikowego osiowo-symetryczną powierzchnią prądu w odległości trzech milimetrów od piasty (rys. 20) dla trzech punktów charakterystyki aerodynamicznej.



Rys. 20. Palisada łopatkowa wieńca wirnikowego OSS 750/06 przy piastce

Na rysunku 21 porównano wykresy ciśnień w obliczeniowym punkcie pracy wieńca określone na drodze pomiaru z wykresami określonymi na drodze obliczeniowej. Porównanie potwierdza podobieństwo przebiegu obu wykresów. Obliczeniowe wykresy ciśnień zarówno po stronie czynnej jak i biernej profilu odchylają się w stronę wyższych ciśnień w miarę oddalania się od kra-



Rys. 21. Rozkład ciśnień wzdłuż profilu przy kącie $\varphi_{nom} = 0,37$

wędzi natarcia. W efekcie rzeczywiste obciążenie aerodynamiczne profilu jest mniejsze od obliczeniowego.

Współczynnik dyfuzorowości $D = \frac{w_{max}}{w_2} = 2,154$ dla profilu prędkości określonego w nominalnym punkcie pracy wienca tylko nieznacznie różni się od współczynnika określonego z formuły Liebleina $D_L = 2,142$. Znajomość tego współczynnika umożliwia z kolei wyznaczenie miary liniowej zmniejszenia momentu ilości ruchu na spływie z łopatki

$$\theta/l = 0,004(1 - 1,17 \ln D_L) = 0,03912,$$

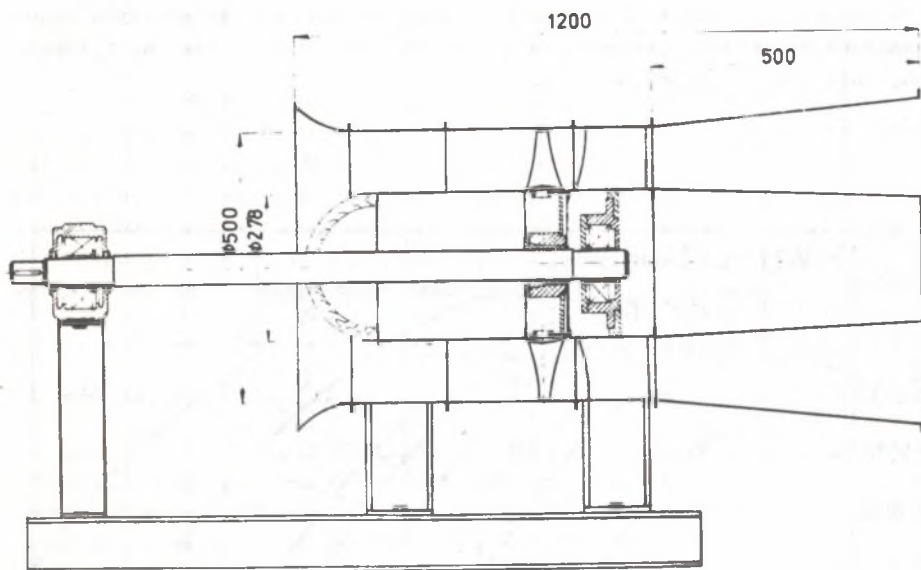
$\theta = 0,005838$, co potwierdza wcześniej uzyskane wyniki zarówno na drodze obliczeniowej jak i doświadczalnej [20]. Nadzmiernie duży współczynnik dyfuzorowości D oraz zbyt bliskie noska profilu położenie wierzchołka prędkości po stronie biernej profilu wskazuje na nadmierne obciążenie aerodynamiczne badanej palisady.

4.2. Modelowe wentylatory osiowe serii MWO 500/056/067

Istniejące metody obliczeń aerodynamicznych wentylatorów osiowych nie gwarantują wystarczającej dokładności. Wynika to zarówno z braku szczegółowo sprecyzowanych kryteriów wyboru wskaźników bezwymiarowych, jak również z nieadekwatności przyjętego do obliczeń modelu przepływu do przepływu rzeczywistego. Doskonalenie istniejących metod obliczeń układu przepływowego wymaga doświadczalnej weryfikacji przyjętych wskaźników pracy i metod obliczeniowych.

Osiowy wentylator modelowy

MWO-500/056/16/1



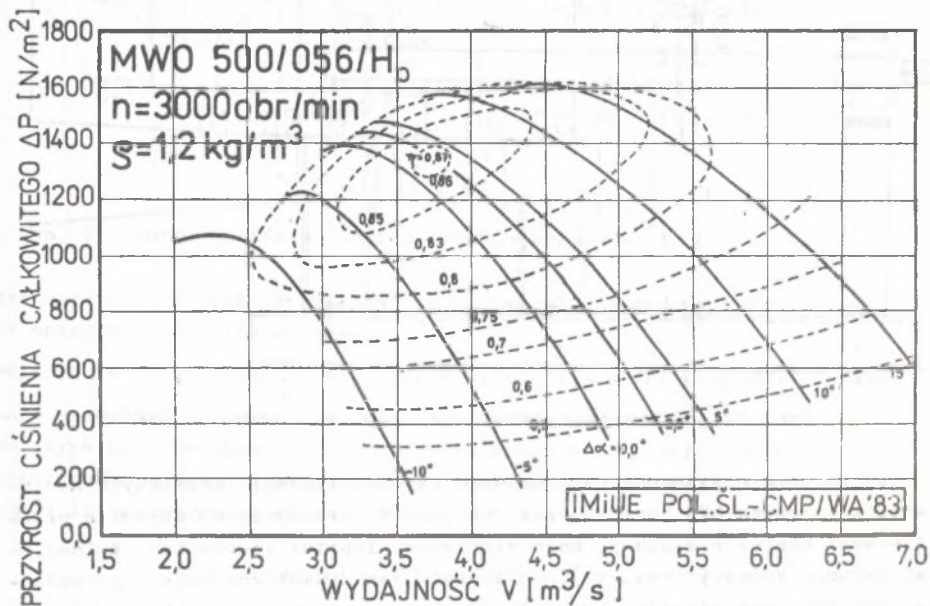
Rys. 22. Osiowy wentylator modelowy serii MWO 500/056

Celowi temu poświęcone były badania aerodynamiczne, modelowych wentylatorów osiowych MWO 500/056 oraz MWO 500/067 pracujących w układzie przepływowym: konfuzor wlotowy, koło wirnikowe, łopatki kierownicy tylnej oraz dyfuzor końcowy (rys. 22). Obliczenia aerodynamiczne modeli prowadzone były przy wykorzystaniu wielowariantowego programu obliczeniowego STOS-W1 [21]. Jako podstawowe kryterium przy wyborze dopuszczalnego obciążenia aerodynamicznego układów łopatkowych przyjęto współczynnik dyfuzorowości opracowany przez Leibleana [15]. Wyniki badań sześciu wentylatorów modelowych odpowiadające maksymalnej sprawności zestawione zostały w tablicy 2.

Tablica 2

Lp.	Model	Punkt odpowiadający $\varphi_{i \max}$				
		φ_i %	φ^*	ψ	k_n	δ
1	056/20/I	86,0	0,2220	0,2517	1,3	1,5325
2	056/16/I	86,44	0,2349	0,367	1,008	1,6377
3	056/20P/II	83,6	0,2662	0,3817	1,00	1,5535
4	067/20/I	79,0	0,2409	0,4123	0,9339	1,6676
5	067/16/I	82,16	0,2582	0,5279	0,7625	1,777
6	067/20P/II	81,12	0,2560	0,54	0,7877	1,727

Na rysunku 23 przedstawiona została regulacyjna charakterystyka aerodynamiczna najsprawniejszego modelu MWO 500/056/16/II o szesnastu łopatkach, obliczonego metodą Howella.



Rys. 23. Charakterystyka regulacyjna wentylatora modelowego MWO 500/056/16

Na najwyższą sprawność wentylator modelowy uzyskuje przy kącie ustawienia łopatek roboczych koła wirnikowego $\alpha = 2,5^{\circ}$. Obliczone w punkcie maksymalnej sprawności wentylatora wskaźniki bezwymiarowe wynoszą:

$$\varphi^* = 0,2485,$$

$$\varphi = 0,3781,$$

$$K_n = 1,0339,$$

$$\delta = 1,5729,$$

$$p_i = 0,8685.$$

Przy kącie $\alpha = 0,0$ odpowiednie wskaźniki bezwymiarowe odpowiadające maksymalnej sprawności wewnętrznej wynoszą:

$$\varphi^* = 0,2331,$$

$$\varphi = 0,361,$$

$$K_n = 1,0366,$$

$$\delta = 1,6055,$$

$$p_i = 0,855.$$

Porównanie przedstawionych wskaźników bezwymiarowych wyznaczonych na drodze pomiaru ze wskaźnikami przyjętymi do obliczeń wskazuje, że badany model osiąga wskaźnik wydajności zgodny z obliczeniowym, wskaźnik spiętrzenia o około 9% wyższy od obliczeniowego przy wysokiej sprawności. Zważywszy, że badany model ma stosunkowo małą średnicę zewnętrzną i pracuje przy liczbie $Re = 8.15.10^5$, należy oczekiwać wyższych sprawności przy wzroście wymiarów maszyn rzeczywistych i wyższej liczbie Re .

5. Wnioski końcowe

1. Konfrontacja wyników obliczeń uzyskanych z rozwiązania quasi-rzeczywistego modelu przepływu z wynikami badań doświadczalnych wykazała miarodajność przyjętej metody obliczeniowej wyznaczania rozkładów parametrów przepływu w osiowych stopniach sprzężających zarówno w obliczeniowym jak i pozaobliczeniowych punktach jego pracy.

2. Informacje uzyskane w trakcie teoretycznej i doświadczalnej analizy struktury przepływu w modelowych stopniach sprzężających wykorzystane zostały do opracowania algorytmów obliczeń aerodynamicznych osiowych stopni sprzężających o dowolnym kształcie przekroju merydionalnego.

3. Badanie modelowe wentylatorów osiowych z merydionalnym przyspieszeniem strumienia wykazały, że osiągają one bardzo korzystne wskaźniki bezwymiarowe, znacznie wyższe niż osiągane przez znane konstrukcje wentylatorów osiowych reakcyjnych. Parametry pracy tych wentylatorów są wyższe od założonych w obliczeniach. Wskazuje to na konieczność dalszego doskonalenia metod obliczeniowych tego typu wentylatorów.

5. W badaniach osiowych stopni reakcyjnych skoncentrowano się w szczególności na opracowaniu metod uzgadniania wyjściowych do obliczeń wskaźników geometrycznych i kinematycznych. Najbardziej miarodajnym wskaźnikiem oceny doskonałości aerodynamicznej palisad łopatkowych wydaje się być współczynnik dyfuzorowości opracowany przez Liebleina, sprawdzony w niniejszej pracy na palisadzie wirującej.

5. W efekcie wzajemnie się uzupełniającej analizy teoretycznej i doświadczalnej przepływu w osiowych stopniach sprężających, opracowano model wentylatora MWO 500/056/61 Ho charakteryzujący się wysoką sprawnością i dobrą zgodnością wskaźników obliczeniowych z pomiarowymi.

6. Opanowanie metod wyznaczania charakterystyk aerodynamicznych na drodze obliczeniowej wymaga uwzględnienia wpływu przepływów wtórnych oraz przecieków nadłopatkowych [22].

Ważniejsze oznaczenia

- c - prędkość bezwzględna
- m - masowe natężenie przepływu
- m - współrzędna merydionalna
- n - współrzędna normalna do m
- p - ciśnienie statyczne
- q - quasi-ortogonalna
- r - promień
- t - podziałka palisady, czas
- w - prędkość względna
- z - liczba łopatek, współrzędna osiowa
- β - kąt wektora prędkości względnej
- δ - kąt nachylenia linii prądu do osi
- δ - grubość warstwy przyściennej
- δ_1 - miara liniowa ubytku siły łopatkowej
- δ^* - miara liniowa zmniejszenia natężenia przepływu
- η - sprawność
- θ - miara liniowa zmniejszenia momentu ilości ruchu
- ψ - współrzędna kątowna
- ϑ - stosunek średnic
- ϱ - gęstość gazu
- τ - naprężenie styczne
- φ - wskaźnik wydajności
- ψ - wskaźnik spiętrzenia, funkcja prądu
- ω - prędkość kątowna.

LITERATURA

- [1] Witkowski A.: Quasi-rzeczywisty model przepływu w osiowym stopniu sprężającym. ZN Pol.Śl. Energetyka z. 96, Gliwice 1978.
- [2] Witkowski A.: Flow Analysis in Axial Flow Compressor Impeller with Meridional Stream Acceleration. Proceedings of the Fourth Conference on Fluid Machinery, Budapest 1972.
- [3] Witkowski A.: Zastosowanie współrzędnych quasi-ortogonalnych do obliczeń przepływu w wieńcach sprężających o przestrzennie ukształtowanych kanałach międzyłopatkowych ZN Pol.Śl. Energetyka, Gliwice 1973.
- [4] Witkowski A.: Algorytm obliczeń rozkładu prędkości i ciśnień w stopniu sprężającym z uwzględnieniem pierścieniowej warstwy przyściennej. Problem MR-I-26 zadania 01,2,3. Etap II. Gliwice 1977. Praca nieopublikowana.
- [5] Stiepanow G. Ju.: Gidrodinamika rieszetok turbomaszin. Moskwa 1962.
- [6] Sirotkin A. A.: Aerodinamiczeskij rasczet lopatok osiowych turbomaszin. Izd. Maszynostrojenije, Moskwa 1972.
- [7] Otte J. J.: Osiowo-symetryczny przepływ płynu nieściśliwego w kanałach łopatkowych osiowych maszyn wirnikowych. Archiwum Budowy Maszyn z. 4 t. XXII, 1975.
- [8] Witkowski A.: Program "ALGOL 1900" obliczeń przepływu osiowo-symetrycznego w osiowym stopniu sprężającym ST0-PZDw_m Opracowanie wewnętrzne IMiUE Pol.Śl. Gliwice 1981.
- [9] Stanitz J. D.: Some Theoretical Aerodynamic Investigations of Impeller in Radial and Mixed Flow Centrifugal Compressors. Trans. ASME, May, 1952.
- [10] Misiewicz A.: Opracowanie programu "KATSANIS'a" obliczeń pola prędkości i ciśnień w kanałach międzyłopatkowych maszyn wirnikowych w zastosowaniu do maszyn cyfrowych serii Odra 1300. Opracowanie wewnętrzne IMiUE Pol.Śl. Gliwice 1978.
- [11] Witkowski A.: Zastosowanie quasi-ortogonalnych współrzędnych do obliczeń przepływu w wieńcach sprężających o przestrzennie ukształtowanych kanałach międzyłopatkowych. ZN Pol.Śl. Energetyka z. 47, Gliwice 1973.
- [12] Witkowski A.: Wybór metody analizy przepływu w kanałach międzyłopatkowych stopnia sprężającego. ZN Pol.Śl. Energetyka z. 60 Gliwice 1977.
- [13] Mellor G. L., Wood G.: An Axial Compressor End Wall Boundary Layer Theory. Trans. ASME Journal of Basic Engineering, June 1971.
- [14] Witkowski A.: Przybliżone równania przepływu w obszarze warstwy przyściennej na osiowo-symetrycznych ściankach ograniczających łopatkowy wieńiec sprężający. ZN Pol.Śl. Energetyka z. 63, Gliwice 1978.
- [15] Lieblein S.: Analysis of Experimental Low - Speed Loss and Stall Characteristics Two Dimensional Compressor Blade Cascades. NASA RM B37 1728.
- [16] Witkowski A.: Analiza przepływu w kanałach łopatkowych osiowego wieńca sprężającego z merydionalnym przyspieszeniem strumienia. Praca doktorska. Gliwice 1971.
- [17] Witkowski A., Otte J.: Design and Test of Axial Flow Fans with Meridional Stream Acceleration. Proc. of the Fifth Conference on Fluid Machinery. Budapest 1975.
- [18] Otte J. J.: Rozkłady prędkości na wlocie i wylocie wirnika o stożkowym przepływie czynnika. ZN Pol.Śl. Energetyka z. 47. Gliwice 1973.
- [19] Colles D.: The law of the wake in the turbulent boundary layer: J. Fluid Mech., I, 1956 p. 191.

- [20] Witkowski A., Misiewicz A.: Badania teoretyczne i doświadczalne struktury przepływu w osiowym stopniu sprzężającym. ZN IMP PAN nr 114/1022 /82. Gdańsk 1982.
- [21] Witkowski A.: Program STOS W1 obliczeń aerodynamicznych osiowych stopni sprzężających. Opracowanie wewnętrzne IMiUE Politechniki Śląskiej, Gliwice 1981.
- [22] Kutarba K., Witkowski A.: Niektóre problemy analizy przepływu w kanałach łopatkowych maszyn wirnikowych. Zbiór referatów na Konferencję Naukową Techniczną pn. Wentylatory Przemysłowe. Gliwice - Katowice 1974.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Roszkowski

СЕКВЕНЦИОННО-ИТЕРАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС ИСПЫТАНИИ АКСИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Резюме

В статье представлено результаты некоторых теоретических и практических исследований структуры потока в аксиальных напорных ступенях. Результаты использовано при разработке методов аэродинамических расчётов моделей аксиальных вентиляторов. Дано аэродинамические характеристики моделей вентиляторов. Результаты экспериментальных исследований сравнено с результатами теоретического анализа.

SEQUENTIALLY ITERATIVE EXAMINATION PROCESS FOR AXIAL-FLOW FANS

Summary

Results of theoretical and experimental investigations of flow structures in axial compression stages are presented. They have been used to produce the computational methods of aerodynamic axial flow fans with meridional flow acceleration, and with reaction. Aerodynamic characteristic curves are given for model fans. Results of experimental investigation are compared with theoretical analyses.