

Anrzej WITKOWSKI, Marek MIRSKI
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA OSIOWYCH WIENCÓW SPRĘŻAJĄCYCH Z MERYDIONALNYM PRZYSPIESZENIEM STRUMIENIA

Streszczenie. Przedstawiono metodę komputerowego kształtowania łopatek koła wirnikowego wentylatora z merydionalnym przyspieszeniem strumienia. Program obliczeniowy uwzględnia zarówno aerodynamiczny, jak i technologiczny aspekt projektowania. W części obliczeniowej wykorzystano osiowo-symetryczny model przepływu skojarzony z programem obliczającym narastanie pierścieniowych warstw przyściennych. Metoda umożliwia kształtowanie wieńców wirnikowych dla dowolnie wybranych wskaźników geometrycznych i kinematycznych. Jako przykład przedstawiono trzy konstrukcje wieńców łopatkowych o stosunku średnic na wylocie 0.63 o różnych kątach ustawienia łopatek wraz z wynikami badań wentylatorów modelowych.

1. WSTĘP

Jednym ze sposobów uzyskania wysokich przyrostów ciśnienia w osiowych wieńcach sprężających, przy zachowaniu wysokiej sprawności, jest nadanie strudze przyspieszenia poprzez zwężenie przekroju merydionalnego kanału koła wirnikowego w kierunku przepływu [1], [2].

Konstrukcje tego typu wieńców łopatkowych charakteryzują się korzystnymi wskaźnikami bezwymiarowymi, prostotą regulacji i małą głośnością pracy. Właściwości te sprawiły, że chętnie są stosowane w szczególności w konstrukcjach wentylatorów kopalnianych zarówno do głównego, jak i pomocniczego przewietrzania [3], [4]. Przeszkodę w szerszym stosowaniu tych wentylatorów do praktyki przemysłowej stanowią brak miarodajnej metody obliczeń aerodynamicznych i skomplikowany, przestrzenny, trudny technologicznie kształt łopatek kół wirnikowych.

Wychodząc naprzeciw tym trudnościom opracowany został w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej program obliczeń aerodynamicznych oparty na quasi-trójwymiarowym modelu przepływu [1], [2], [5], [6] z uwzględnieniem narastania pierścieniowych warstw przyściennych w obszarach piasty i osłony zewnętrznej [7]. Program ten jest skojarzony z nowoczesną procedurą umożliwiającą komputerowe wykreślanie przekrojów modelowych łopatki oraz całych kół wirnikowych w dowolnym, przestrzennym usytuowaniu [8], [9]. Opracowany program obliczeniowy umożliwia szybki wybór

optymalnego zarówno z punktu widzenia aerodynamicznego, jak i wykonawczego kształtu kanału międzyłopatkowego koła wirnikowego oraz uzyskanie kompletu rysunków wykonawczych przy zastosowaniu komputera IBM PC/XT.

Program może być również zastosowany do sterowania obróbką matryc do kształtowania powierzchni łopatek.

2. METODA OBLICZEŃ AERODYNAMICZNYCH

2.1. Przyjęty model przepływu

Współczesny rozwój maszyn przepływowych determinuje postęp w rozwiązywaniu dwóch praktycznych zadań aerodynamiki:

- 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 narzuconych z góry parametrów.

W niniejszej pracy skojarzone zostały oba zadania w celu rozwiązania zagadnienia projektowego łopatek wirnikowych zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rysunku 1 [6].

W algorytmie obliczeniowym wykorzystano jedynie osiowosymetryczne przybliżenie przepływu wraz z obliczeniem narastania pierścieniowych warstw przyściennych.

2.2. Zagadnienie osiowosymetryczne

Zagadnienie osiowosymetryczne rozwiązano posługując się pojęciem krzywizny linii prądu po uśrednieniu ogólnych równań równowagi wzdłuż podziałki łopatek przy założeniu, że przepływ jest ustalony i nielepki [1], [5], [6].

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

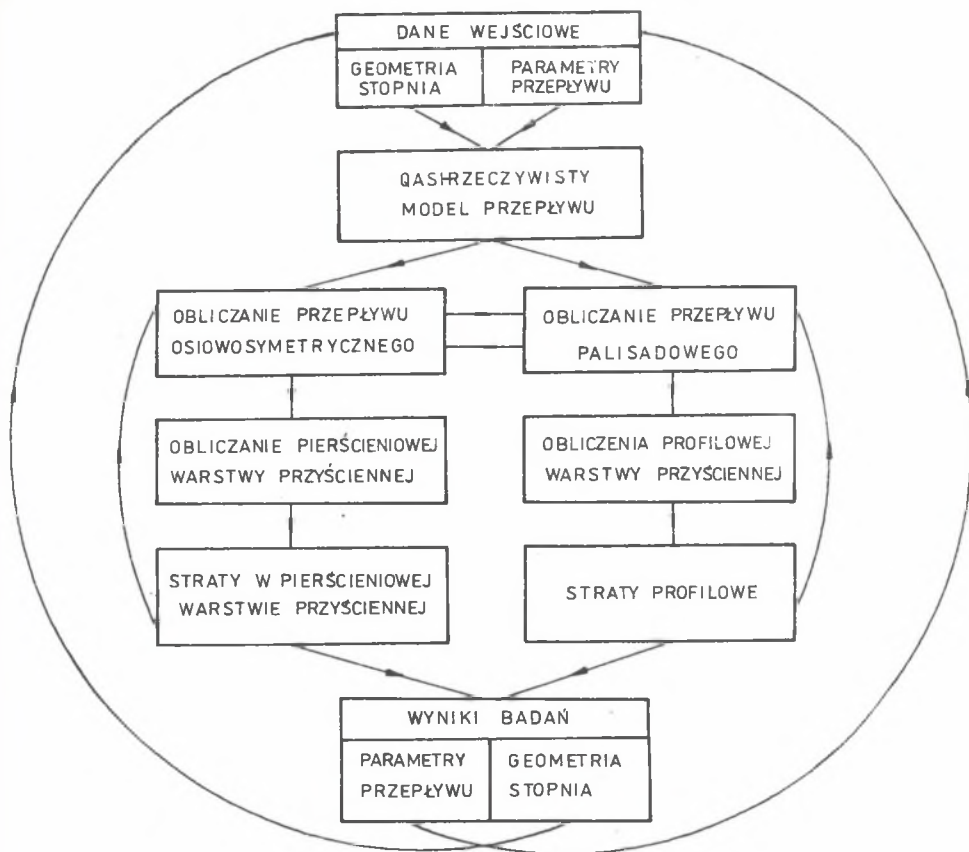
Do pełnego rozwiązania zagadnienia wykorzystano układ równań:

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

Rozpisanie tych równań w układzie współrzędnych quasi-ortogonalnych q, ψ, m i uwzględnienie geometrii układu przepływowego umożliwia 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 [5], [6].



Rys. 1. Schemat blokowy quasirzeczywistego modelu przepływu [6]

Fig. 1. Block scheme of the quasireal flow model

Równaniem zamykającym jest równanie ciągłości w postaci:

$$\dot{m} = z \int_0^q \rho W_m \cos(\delta - \gamma) \left(\frac{2\pi r}{z} - t_{\theta} \right) dq. \quad (2)$$

Do obliczeń wykorzystano program obliczeniowy STO-PZDW-QR-89 w języku Fortran 77 [9].

2.3. Narastanie pierścieniowych warstw przysściennych

Rozkłady prędkości uzyskane z rozwiązania osiowosymetrycznego modelu przepływu wykorzystuje się z kolei do wyznaczania wielkości charakterystycznych pierścieniowych warstw przysściennych. Do rozwiązania tego zagadnienia stosuje się dwa równania całkowe umożliwiające wyznaczenie narastania grubości warstwy przysściennej w kierunku osiowym i obwodowym [7]:

$$\frac{d}{dm} (\bar{w}_m^2 \delta_m^{**}) + H \delta_m^{**} \bar{w}_m \frac{d\bar{w}_m}{dm} = \frac{d}{dm} \left(\frac{\bar{w}_m^2}{2} \delta_{fm} \right) + \frac{\bar{\tau}_{om}}{\rho} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dm} (\bar{w}_m \bar{w}_{\psi} \delta_{\psi}^{**}) + H \delta_{\psi}^{**} \bar{w}_m \frac{d\bar{w}_{\psi}}{dm} = \frac{d}{dm} \left(\frac{\bar{w}_m^2}{2} \delta_{f\psi} \right) + \frac{\bar{\tau}_{o\psi}}{\rho} \quad (4)$$

Do rozwiązania przepływu w obszarze pierścieniowej warstwy przysściennej wykorzystywana jest różnicowa postać tego równania [6], umożliwiającą całkowanie krok po kroku w kierunku przepływu.

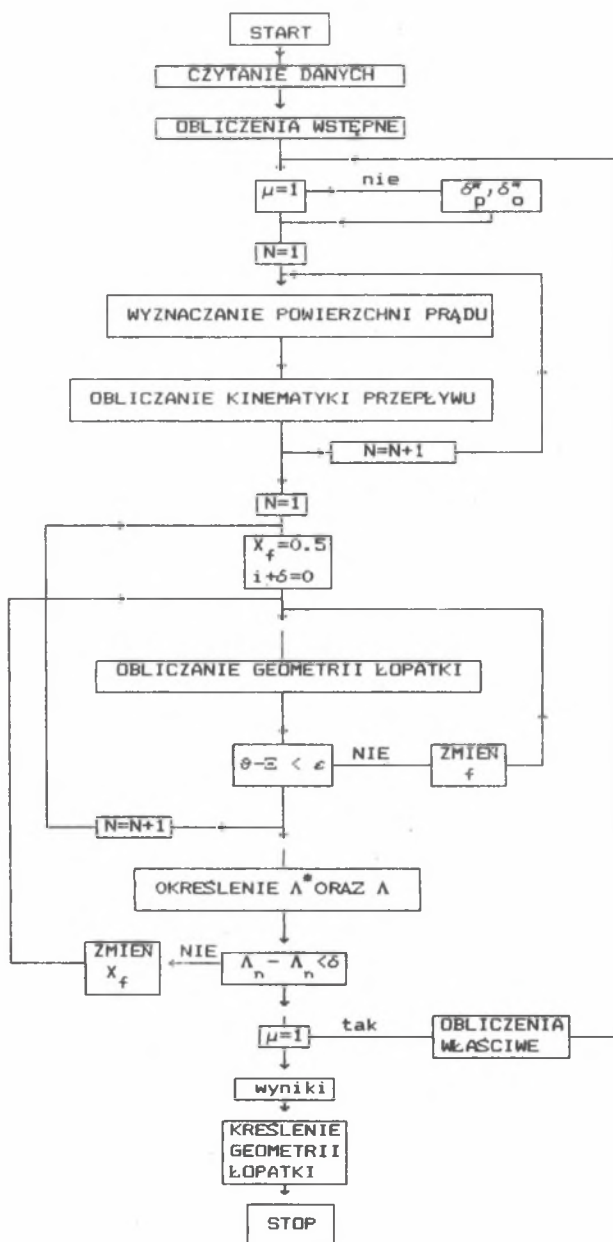
Uzyskane w wyniku rozwiązania równań warstwy przysściennej rozkłady miar liniowych zmniejszenia natężenia przepływu wzdłuż piasty δ_p^* i osłony zewnętrznej δ_o^* wykorzystywane są następnie do modyfikacji kształtu przekroju merydionalnego wieńca łopatkowego w rozwiązaniu osiowosymetrycznego zagadnienia przepływu.

3. KSZTAŁTOWANIE POWIERZCHNI ŁOPATEK

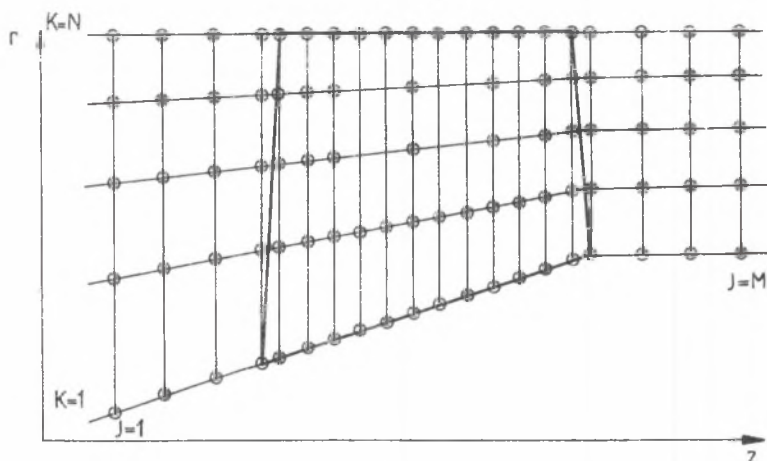
3.1. Geometria szkieletowych profili łopatek

Ogólny schemat blokowy algorytmu obliczeń geometrii układu łopatkowego przedstawiono na rysunku 2. Zgodnie z tym schematem w pierwszej kolejności wyznacza się rozkład osiowosymetrycznych powierzchni prądu oraz prędkości w przekroju merydionalnym koła wirnikowego (rys. 3). Rozkłady te uzyskuje się z rozwiązania zagadnienia osiowosymetrycznego przepływu w dwóch kolejnych przybliżeniach. W pierwszym przybliżeniu, nazwanym na schemacie obliczeniowym (rys. 2) "obliczenia wstępne" uzyskuje się wstępny rozkład powierzchni prądu oraz prędkości z rozwiązania równań przepływu kanałowego, które wykorzystane są do wyznaczenia wstępnej geometrii łopatki. Wyniki obliczeń wstępnych stanowią podstawę wyznaczenia rozkładu miary liniowej zmniejszenia natężenia przepływu wzdłuż piasty i osłony zewnętrznej kanału wirnika oraz kolejnego, ostatecznego już ukształtowania powierzchni łopatki.

Szkieletowe łopatki określone zostały na osiowosymetrycznych powierzchniach prądu po uprzednim odwzorowaniu ich na płaszczyźnie pomocniczej (rys. 4a) [2]. Rysunek (4a) wraz z geometrią przekroju merydionalnego wirnika (rys. 4b) stanowi podstawę wykreślenia przekrojów modelowych łopatki



Rys. 2. Schemat blokowy algorytmu obliczeń aerodynamicznych łopatk
 Fig. 2. Block scheme of algorithm of aerodynamic computation of blade



Rys. 3. Rozkład powierzchni prądu i quasi-ortogonalnych w przekroju merydionalnym wirnika

Fig. 3. The distribution of streamlines and orthogonals in meridional cross section of impeller

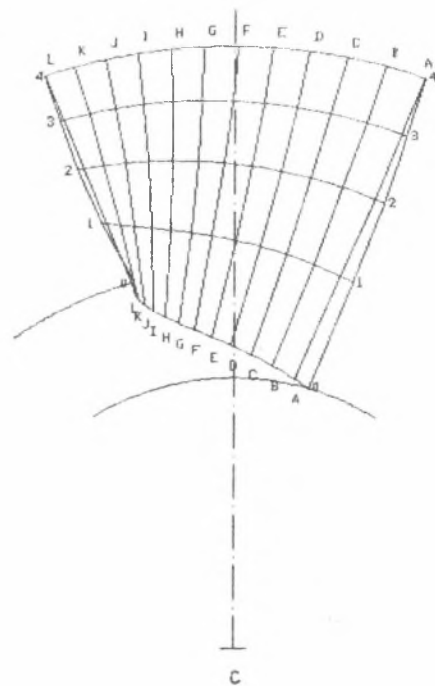
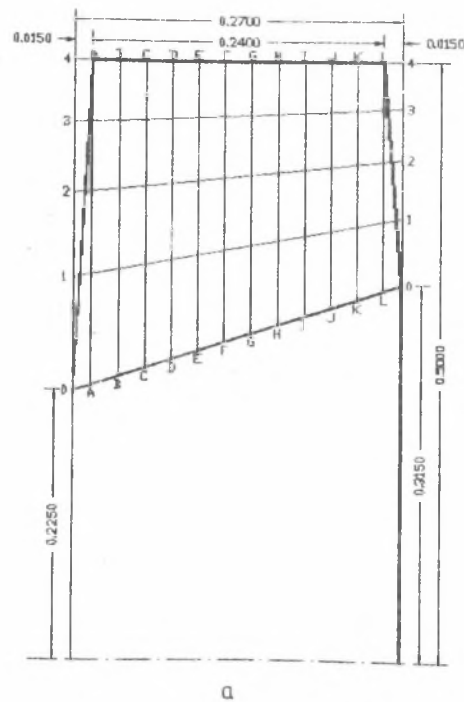
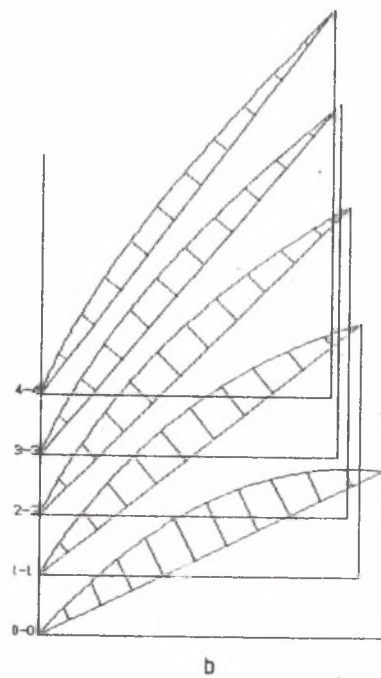
w płaszczyznach prostopadłych do osi wirnika (rys. 4c) zgodnie z metodą odwzorowania konforemnego. Technologiczność wykonawstwa łopatek zapewnia właściwie dobrany w programie iteracyjnym, zbliżony do liniowego, rozkład kątów rozwarcia łopatek $\lambda(n)$ wzdłuż jej wysokości. Niezbędną swobodę doboru kąta λ umożliwia przyjęcie parabolicznego kształtu szkieletowych profili. W celu spełnienia założonego przebiegu funkcji $\lambda(n)$ dobierane są iteracyjne dla każdej szkieletowej współrzędne X_f maksymalnej strzałki ugięcia f w zakresie wartości przyjmowanych w płaskich palisadach łopatkowych ($X_f = 0,4 - 0,55$).

3.2. Komputerowe wspomaganie projektowania łopatek wirnika przy pomocy programu graficznego AUTOCAD [9]

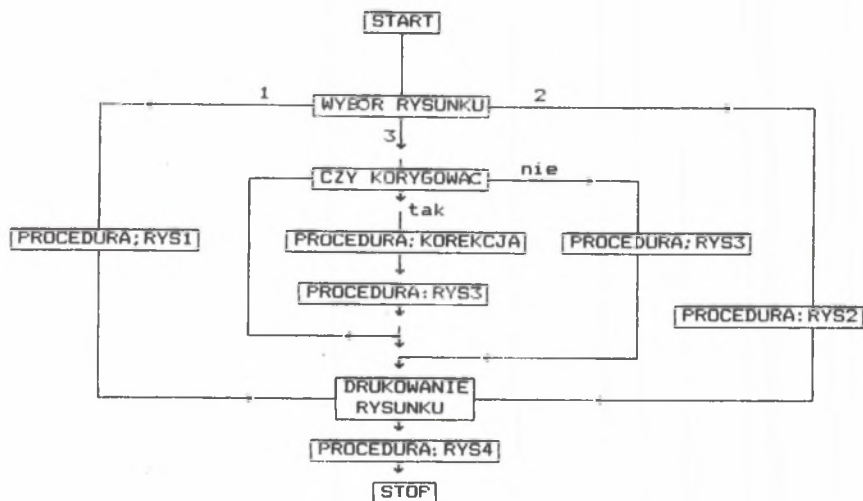
Program napisany jest w systemie blokowym (rys. 5), w którym występują cztery procedury:

- procedura kreślenia przekroju merydionalnego wirnika (1) (rys. 4b),
- procedura kreślenia palisad łopatkowych (2) (rys. 4a),
- procedura kreślenia przekrojów modelowych (3) (rys. 4c),
- procedura kreślenia wirnika w rzucie aksonometrycznym (4) (rys. 6).

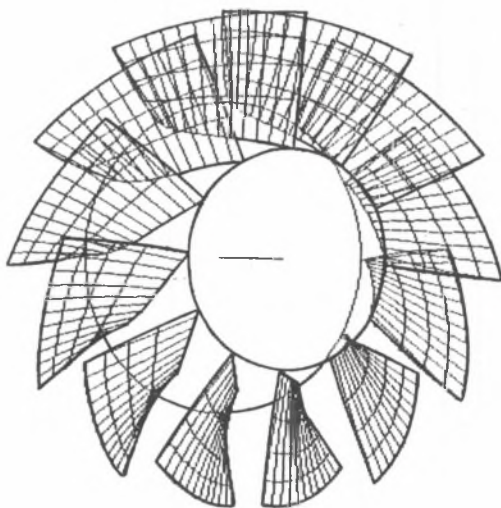
Procedura kreślenia przekrojów modelowych umożliwia dodatkową korektę kształtu łopatki poprzez wzajemny obrót sąsiednich przekrojów względem siebie o zadany w trybie konwersacyjnym kąt $\Delta\psi$. Ukoronowaniem procedur wykreślonych jest procedura (4) kreśląca kompletne koło wirnikowe w dowol-



Rys. 4. Przekroje modelowe łopatk
Fig. 4. Vane pattern sections



Rys. 5. Schemat blokowy projektowania łopatk
Fig. 5. Block diagram of the blade design procedure



Rys. 6. Rzut aksonometryczny koła wirnikowego
Fig. 6. Spatial view of impeller

nym rzucie aksonometrycznym (rys. 6). Procedura ta w sposób szczególnie plastyczny ułatwia ocenę jakościową kształtu łopatek i kanałów międzyłopatkowych.

4. PRZYKŁADOWE KONSTRUKCJE MODELOWE

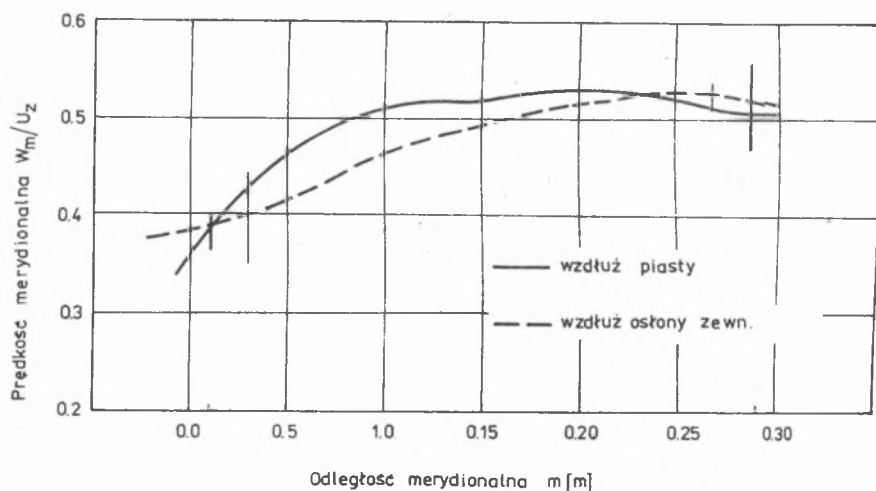
4.1. Model MWM-063/00 o geometrii nominalnej

Dane wyjściowe modelu do obliczeń zestawione zostały w tablicy 1.

Tablica 1

Dane wyjściowe do modelu obliczeń

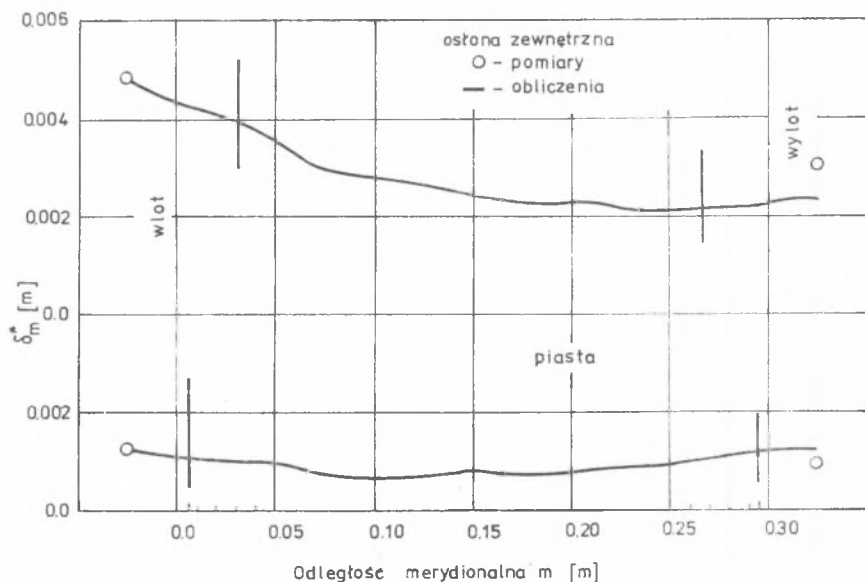
Lp.	M O D E L	MWM-063/00
1	Stosunek średnic w przekroju wylotowym v_2	0,63
2	Wskaźnik spiętrzenia Ψ	0,6
3	Wskaźnik wydajności φ^*	0,31
4	Wskaźnik szybkobieżności K_n	0,876



Rys. 7. Rozkład prędkości merydionalnych wzdłuż płasty i osłony zewnętrznej

Fig. 7. Meridional velocity distribution on the hub and outer wall

Na rysunku 7 przedstawiony został rozkład prędkości merydionalnych wzdłuż piasty i osłony zewnętrznej uzyskany z rozwiązania modelu przepływu osiowosymetrycznego, natomiast na rysunku 8 odpowiadające tym prędkościom narastanie miary liniowej zmniejszenia natężenia przepływu.



Rys. 8. Narastanie pierścieniowych warstw przysściennych

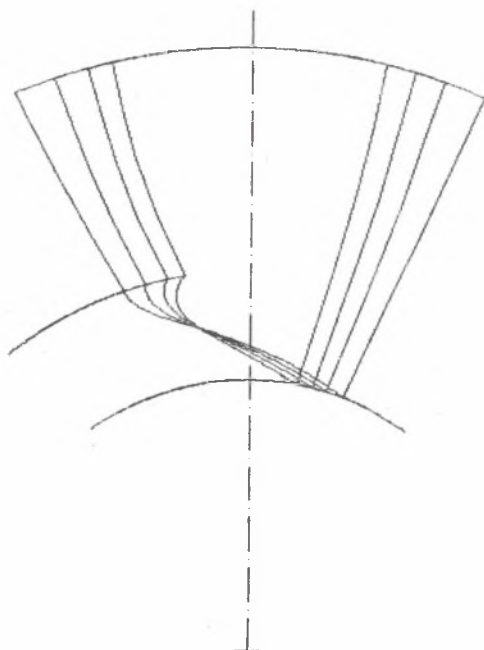
Fig. 8. Annulus boundary layer growth

Komputerowy wydruk rysunków konstrukcyjnych łopatki wraz z iteracyjnie skorygowanym kształtem przekrojów modelowych zamieszczony jest na rysunku 4.

Opracowane konstrukcyjnie koło wirnikowe o średnicy zewnętrznej 500 mm pracuje w układzie przepływowym wentylatora składającego się z łopatek wstępnej kierownicy regulacyjnej, kierownicy tylnej oraz dyfuzora końcowego [2].

4.2. Model łopatki uniwersalnej

W celu rozszerzenia pola pracy wentylatorów analizowanego typu przeprowadzone zostały badania wpływu kąta ustawienia łopatek roboczych koła wirnikowego z merydionalnym przyspieszeniem strumienia na charakterystykę aerodynamiczną wentylatorów modelowych. W tym celu opracowano na podstawie modelu MWM-063/00, przy wykorzystaniu przedstawionej procedury projektowej, konstrukcję łopatki uniwersalnej o wymiarach uwzględniających obrys łopatek dla kątów ustawienia $\Delta\alpha = +15^\circ, +10^\circ, 0,0^\circ, -0,5^\circ$ (rys. 9).



Rys. 9. Łopatka uniwersalna

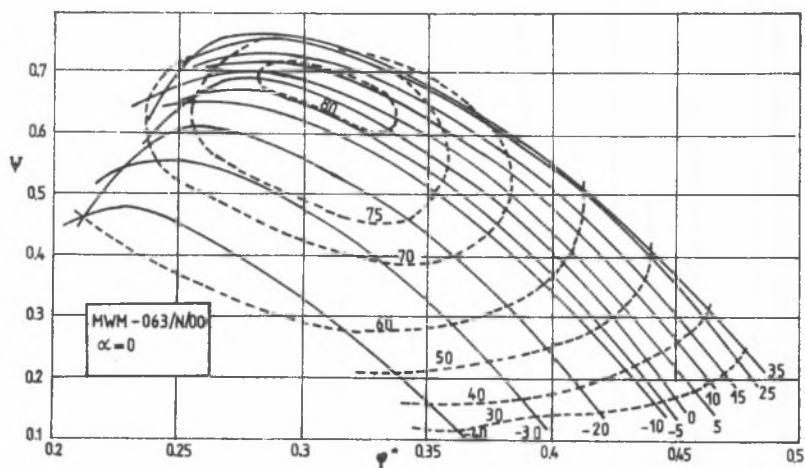
Fig. 9. Universal blade

Przyjęcie koncepcji "łopatki uniwersalnej" obniża znacznie koszty wykonawstwa alternatywnych łopatek, umożliwiając opracowanie jednej matrycy dla całego przyjętego zakresu kątów ustawienia. Indywidualny kształt łopatki dla wybranego kąta ustawienia uzyskuje się przez przycięcie odpowiednich krawędzi łopatki uniwersalnej.

4.3. Wyniki badań aerodynamicznych konstrukcji modelowych

Przeprowadzono badania aerodynamiczne wentylatorów modelowych z trzema wersjami kół wirnikowych z łopatkami o kątach ustawienia różniących się od kąta nominalnego o $\Delta\alpha = 0,0, -5^\circ, +10^\circ$, dla kątów ustawienia łopatek wstępnej kierownicy regulacyjnej zmienianych w granicach od $\beta = -30^\circ$ do $\beta = +40^\circ$.

Charakterystykę regulacyjną wentylatora z nominalnym kołem wirnikowym MWM-063/00 w układzie współrzędnych bezwymiarowych przedstawiono na rysunku 10. Na rysunku 11 porównano obszary pracy wentylatorów z trzema wersjami kół wirnikowych wykreślone w układzie współrzędnych logarytmicznych. Dla porównania, w tablicy 2 zestawiono wskaźniki bezwymiarowe badanych modeli odpowiadające maksymalnej sprawności.



Rys. 10. Charakterystyka regulacyjna wentylatora MWM-063/00

Fig. 10. Performance curves of the MWM-063/00 fan

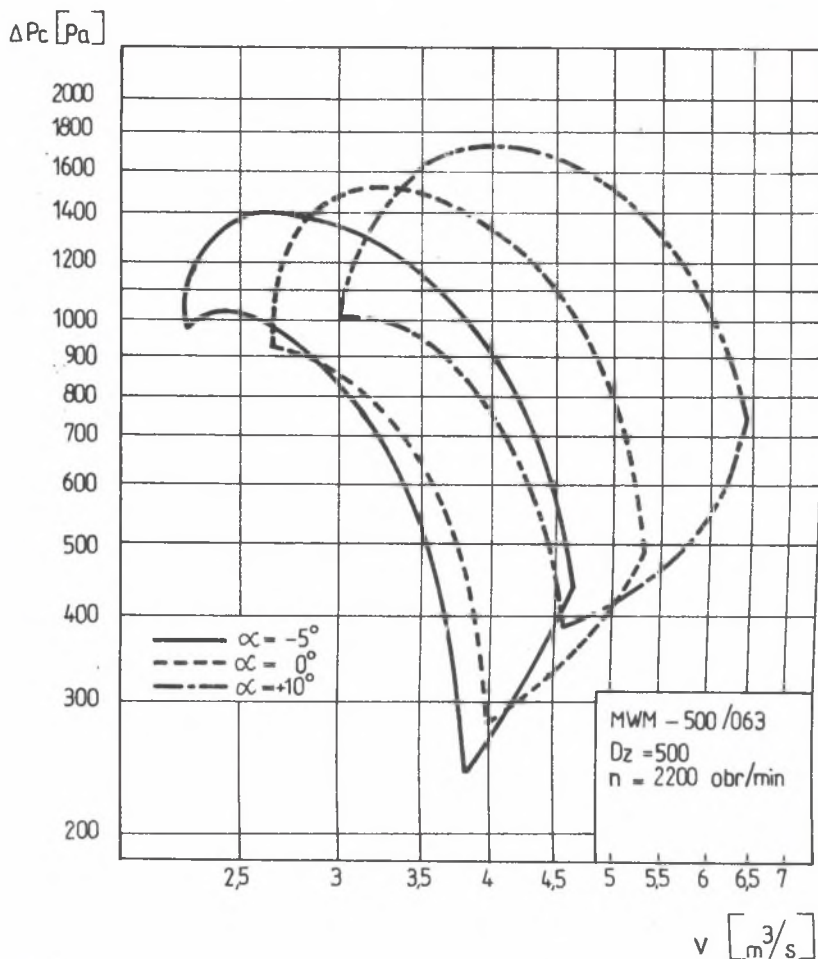
Tablica 2

Wskaźniki bezwymiarowe badanych modeli odpowiadające maksymalnej sprawności

Lp.	MODEL	η_{\max}	φ^*	Ψ
1	$\alpha = 0^\circ$	80,86	0,313	0,64
2	$\alpha = 10^\circ$	77,8	0,38	0,774
3	$\alpha = -5^\circ$	78,3	0,276	0,57

Wskaźniki pracy wentylatora przy nominalnym kącie ustawienia łopatek koła wirnikowego ($\alpha = 0^\circ$) nieznacznie się tylko różnią od wskaźników obliczeniowych zestawionych w tablicy 1.

Obrót łopatki koła wirnikowego o $+10^\circ$ powoduje wzrost wskaźnika wydajności w punkcie nominalnym o 21,4%, natomiast wskaźnika spiętrzenia o 21% przy spadku sprawności w granicach 3%. Osiągalne graniczne wartości wskaźników wydajności przy $\eta \geq 0,6$ wynoszą dla zespołu trzech badanych wirników odpowiednio $\varphi^* = 0,225 - 0,5$. Maksymalne osiągalne wskaźniki spiętrzenia zestawione zostały w tablicy 3.



Rys. 11. Obszar pracy wentylatorów z wirnikami o zmiennym kącie ustawienia łopatek

Fig. 11. Performance curves of fans with different angles of impeller blades setting

Tablica 3

Maksymalne osiągalne wskaźniki spiętrzenia

Lp.	MODEL	Ψ_{max}	φ^*
1	$\Delta\alpha = 0^\circ$	0,759	0,7
2	$\Delta\alpha = 10^\circ$	0,873	0,717
3	$\Delta\alpha = -5^\circ$	0,701	0,686

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Opracowany program obliczeniowy umożliwia optymalizowanie konstrukcji kół wirnikowych z merydionalnym przyspieszeniem strumienia zarówno z punktu widzenia aerodynamicznego, jak i technologicznego, przy minimalnym nakładzie czasu.

Wybór właściwej konstrukcji ułatwia w szczególności analiza kształtu koła wirnikowego przedstawiona w rzucie aksonometrycznym. Zamieszczone przykłady zastosowań programu wykazały jego przydatność w projektowaniu łopatek o skomplikowanej geometrii dla dowolnych wskaźników geometrycznych i kinematycznych. Przedstawiona koncepcja projektowania "łopatki uniwersalnej" umożliwia znaczne rozszerzenie pola pracy wentylatorów z merydionalnym przyspieszeniem przez zastosowanie łopatek wirnikowych o różnym kącie ustawienia, wykonanych z jednej matrycy.

ZESTAWIENIE WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

$H = \delta^*/\delta^{**}$	- parametr kształtu warstwy przyściennej,
\dot{m}	- strumień masy,
m	- kierunek merydionalny,
q	- odległość mierzona wzdłuż quasiortogonalnej,
r	- promień mierzony od osi obrotu,
t	- podziałka łopatek,
t_v	- grubość profilu łopatkowego w kierunku obwodowym,
u	- prędkość obwodowa,
w	- prędkość względna w obszarze strumienia głównego,
z	- współrzędna w kierunku osiowym, liczba łopatek,
γ	- kąt ustawienia profilu w palisadzie, kąt nachylenia quasi-ortogonalnej,
δ	- kąt nachylenia linii prądu, grubość warstwy przyściennej,
δ^*	- miara liniowa zmniejszenia natężenia przepływu,
δ^{**}	- miara liniowa zmniejszenia pędu,
δ_f	- miara liniowa zmniejszenia siły łopatkowej,
η	- sprawność,
ψ	- współrzędna kątowa,
λ	- kąt środkowy rozwarcia łopatki,
ρ	- gęstość gazu,
τ	- naprężenia styczne,
φ^*	- wskaźnik wydajności,
ψ	- wskaźnik spiętrzenia całkowitego.

LITERATURA

- [1] WITKOWSKI A.: Flow Analysis in Axial Flow Compressor Impeller with Meridional Stream Acceleration. Proc. of the Fourth Conference on Fluid Machinery, Budapest 1972.
- [2] 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.
- [3] WITKOWSKI A., KANIA A.: Układ przepływowy wentylatora merydionalnego MWG-063/2600 dla potrzeb głównego przewietrzania, KWK "Anna". Praca nieopublikowana, Gliwice 1985.
- [4] WITKOWSKI A.: Analiza celowości zastosowania wentylatorów merydionalnych w górniczej wentylacji pomocniczej. ZN Pol. Śl. Energetyka z. 91, Gliwice 1985.
- [5] WITKOWSKI A.: Zastoscwanie quasiortogonalnych współrzędnych do obliczeń przepływu w wieńcach sprężających o przestrzennie ukształtowanych kanałach międzyłopatkowych. ZN Pol. Śl. Energetyka z. 47, Gliwice 1973.
- [6] WITKOWSKI A.: Analiza teoretyczna i doświadczalna struktury przepływu w osiowym stopniu sprężającym. ZN Pol. Śl. Energetyka, Gliwice 1986.
- [7] WITKOWSKI A.: Doświadczalna weryfikacja metod obliczeniowych narastania pierścieniowych warstw przyściennych w osiowym stopniu sprężającym. ZN Pol. Śl. Energetyka z. 91, Gliwice 1985.
- [8] MIRSKI M.: Komputerowe wspomaganie projektowania łopatek wirników z merydionalnym przyspieszeniem strumienia. Praca magisterska wykonana pod kierunkiem Andrzeja Witkowskiego, Gliwice 1989.
- [9] Intersoft AutoCAD version 2,17, Warszawa 1987.
- [10] WITKOWSKI A., JAWOREK P.: Program obliczeń przepływu quasi-rzeczywistego Sto-PZDW-QR w języku Fortran 77. Gliwice 1989.

Recenzent:

Prof. dr hab. inż. Ryszard Wyszynski

ВСПОМАГАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ КОЛЕС
С МЕРИДИОНАЛЬНЫМ УСКОРЕНИЕМ ПОТОКА ПРИ ПОМОЩИ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Р е з ю м е

Представлено метод формирования лопаток колеса вентилятора с меридионально ускоренным потоком при помощи вычислительной машины. Вычислительная программа применяет во внимание совместно аэродинамический как и технический аспект проектирования.

В части посвященной аэродинамическому исчислению использовано осесимметрический модель течения совместно из программ вычисляющим нарастание кольцевого пограничного слоя. Метод дает возможным формирование лопаточных венцов для произвольно избранных геометрических и кинематических коэффициентов. Как пример приведено три конструкции лопаточных венцов с относительном диаметре втулки на выходе 0.63, с разным углом установки лопаток

совместно из результатами аэродинамического эксперимента модельных вентиляторов.

COMPUTER AIDED DESIGN OF AXIAL FLOW COMPRESSOR IMPELLER WITH MERIDIONAL STREAM ACCELERATION

S u m m a r y

The method of computer aided shapes of impeller blades of fan with meridional stream acceleration has been presented. The aerodynamical and technological aspect of design problem has been taken to the considerations in the computer programme.

In the calculational part the axial symmetrical flow model included the solutions of the annulus wall boundary layer growth has been used. The method made possible the impeller blades forming for different chosen kinematics and geometrics indices. For example the three constructions of the impellers with tip hub ratio at the outflow $\psi = 0.63$ and different angles of blades together with results of model fans aerodynamics investigations has been presented.