ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria: ENERGETYKA z. 91 Nr kol. 856

Joachim J. OTTE

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechniki Śląskiej

O RACJONALNYM KSZTAŁTOWANIU WIRNIKÓW WENTYLATORÓW PROMIENIOWYCH

Streszczenie. Rozpatrzono problematykę racjonalnego, pod względem aerodynamicznym, doboru cech geometrycznych wirników wentylatorów promieniowych. Jako kryterium oceny konstrukcji wirnika od strony przepływowej zaproponowano funkcję obciążenia aerodynamicznego, a szczególnie jej wartość maksymalną. Przedstawiono koncepcje wykorzystania funkcji obciążenia aerodynamicznego przy projektowaniu wirników promieniowych. Wykazano, że łuk okręgu nie jest optymalnym kształtem łopatki.

1. Wstęp

Poddając krytycznej analizie stosowane obecnie metody projektowania wirników typu promieniowego wentylatorów, pomp i sprężarek, można stwierdzić, że metody te zasadniczo opierają się na materiale empirycznym. Niezwykle istotne, z punktu widzenia doskonałości przepływowej wirników, zagadnienie określenia geometrii palisady łopatek sprowadzone jest do wyznaczania cech geometrycznych łopatek w przekroju wlotowym i wylotowym palisady, samą zaś łopatkę kształtuje się w zdecydowanej większości przypadków według łuku okręgu. Można wprawdzie spotkać się i z takim stwierdzeniem, że łopatki o szkieletowych w kształcie łuków koła są z jednej strony najwygodniejsze w produkcji, z drugiej najbardziej sprawne, które jednak w swej drugiej części jest nieudokumentowane. Takiego udokumentowanie nie można znaleźć przede wszystkim dlatego, że kołowy kształt łopatki wirnika promieniowego wcale nie ma racjonalnego uzasadnienia na gruncie aerodynamiki przepływu. W szeregu też przypadkach odejście od kształtu kołowego nie wpływa nawet na ocenę technologiczności konstrukcji wirnika.

Stosowane w praktyce konstruktorskiej klasyczne metody i algorytmy obliczeniowe w dużej mierze bazują na uproszczonych modelach, w których przyjmuje się, że istotnymi cechami geometrycznymi wystarczającymi do scharakteryzowania pracy palisady łopatek promieniowych są kąty łopatkowe na wlocie i wylocie. Milczęco zaś przyjmuje się, że kształt łopatki opisany funkcją $\beta_2 = \beta_2(r)$ nie wpływa na pracę palisady. To samo dotyczy rozkładu $b = b(r)$ opisującego kształt wirnika w przekroju merydionalnym oraz rozkładu grubości łopatki $g = g(r)$.

Wobec braku pewnych kryteriów oceny konstrukcji wirnika od strony przepływowej, została zaproponowana w tym względzie przez autora [1] bezwymiarowa funkcja

$$\Delta\pi = f(r)$$

nazwana funkcją obciążenia aerodynamicznego łopatek wirnika promieniowego. Niektóre aspekty jej zastosowania przedstawiono w pracy [2].

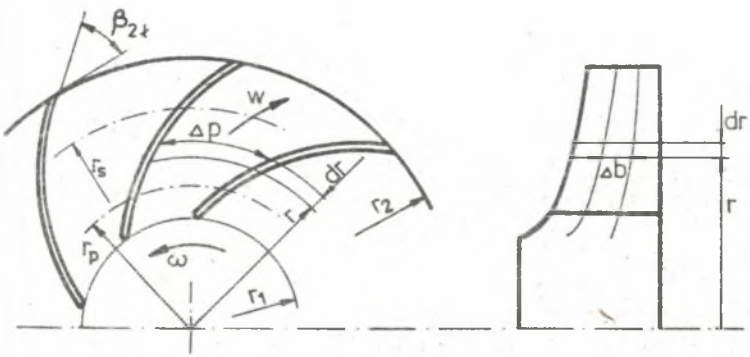
W niniejszym artykule rozpatrzono wyniki badań charakterystyk wentylatorów promieniowych przy różnych kształtach łopatek, a więc i różnych rozkładach funkcji obciążenia aerodynamicznego oraz podjęto próbę oszacowania pewnych charakterystycznych wartości funkcji obciążenia aerodynamicznego $\Delta\pi_{max}$.

2. Funkcja obciażenia i aerodynamicznego łopatki

Funkcję obciążenia aerodynamicznego łopatki wirnika promieniowego zdefiniowano następująco [1]:

$$\Delta\pi = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho w^2} \tag{1}$$

Bezwymiarowa funkcja $\Delta\pi = f(r)$ określona jest stosunkiem różnicy ciśnień statycznych Δp po obu stronach łopatki do ciśnienia dynamicznego strugi płynu (w przepływie względnym) w przekroju o promieniu r (rys.1).



Rys. 1. Kanał międzyłopatkowy. Szkic do definicji funkcji obciążenia aerodynamicznego

Wielkości ujęte w funkcji $\Delta\pi$, a mianowicie średnia prędkość w oraz różnica ciśnień statycznych Δp, są najważniejszymi parametrami charak-

teryzującymi przepływ w wirującym kanale międzyłopatkowym. Sama zaś funkcja obciążenia $\Delta\pi$ pomyślana została jako niezmiennik podobieństwa charakteryzujący deformację pola prędkości, jaka ma miejsce w kanale międzyłopatkowym. W przypadku pola jednorodnego $\Delta\pi = 0$.

Wielkości w oraz Δp, a więc także i funkcję $\Delta\pi$ wyznaczyć można różnymi metodami. W zakresie analizy przepływu płynu idealnego (nielepkiego) stosować można takie metody, jak: metoda funkcji prądu, metoda punktów osobliwych i metoda odwzorowań konforemnych. Metody te jednak nie są zbyt dogodne do praktycznego stosowania, szczególnie przez konstruktorów. Biorąc pod uwagę odniesienie do rzeczywistości, wydaje się w pełni uzasadnione stosowanie metod uproszczonych, jak np. metoda STANITZA [3].

Poniżej przedstawiono pewien stosunkowo prosty algorytm obliczeniowy szczególnie predystynowany, ze względu na swoją przejrzystość, do wyznaczenia funkcji obciążenia aerodynamicznego łopatki wirnika promieniowego.

Równaniem wyjściowym jest równanie ruchu Eulera

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\,\mathrm{grad}\,p, \tag{2}$$

która dla kierunku obwodowego zapisać można w postaci

$$c_r\,\frac{d(rc_u)}{dr} = -\frac{1}{\rho}\,\frac{\partial p}{\partial \varphi} \tag{3}$$

Przechodząc do aproksymacji różnicowej powyższego równania różniczkowego otrzymuje się

$$-\frac{1}{\rho}\,\frac{\partial p}{\partial \varphi} \approx \frac{1}{\rho}\,\frac{\Delta p}{\Delta \varphi} = c_r\,\frac{d(rc_u)}{dr}\bigg|_m \tag{4}$$

Indeks "m" oznacza, że dane wielkość wyznaczana jest w środku kanału międzyłopatkowego.

Uwzględniając, że różnica skończona podziałki kątowej $\Delta\varphi$ obejmuje kanał międzyłopatkowy, czyli że

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{z} \tag{5}$$

oraz pomijając indeks "m", uzyskuje się ostatecznie

$$\Delta p = \rho\,\frac{2\pi}{z}\,c_r\,\frac{d(rc_u)}{dr} \tag{6}$$

W powyższym wzorze występują następujące wielkości:

ρ - gęstość czynnika,

z - liczba łopatek,

τ - współczynnik zwężenia pola przekroju określony zależnością

$$\tau = 1 - \frac{zg}{2\pi}, \tag{7}$$

gdzie:

g - jest kątową grubością łopatki na promieniu "r",

c_u - składowa obwodowa prędkości bezwzględnej, którą wyznacza się ze wzoru

$$c_u = u - c_r \mathrm{ctg}\beta \tag{8}$$

c_r - składowa promieniowa prędkości bezwzględnej, którą oblicza się z równania ciągłości strugi.

Wprowadzone pojęcie funkcji aerodynamicznego obciążenia łopatki odnosi się zasadniczo do strugi elementarnej o szerokości $\Delta b = \Delta b(r)$ i wówczas równanie ciągłości ma postać

$$\Delta \dot{m} = 2\pi r \tau \rho c_r \Delta b \tag{9}$$

Dla łopatek jednokrzywiznowych obliczenia można prowadzić dla strugi obejmującej całą szerokość wirnika. Stosuje się wtedy równanie ciągłości w następującej formie

$$\dot{m} = 2\pi r \tau \rho b c_r \tag{9a}$$

Niezbędną do obliczenia funkcji $\Delta\Phi$ według wzoru (1) średnią prędkość względną "w" wyznacza się z oczywistej zależności

$$w = \frac{c_r}{\sin\beta} \tag{10}$$

Ustalenie rozkładu średniego kąta strugi $\beta = \beta(r)$ wymaga pewnych założeń. I tak proponuje się tu wyróżnić trzy strefy (rys. 1), w których kąt strugi β opisany będzie zależnościami wynikającymi z różnych przesłanek. W strefie środkowej kąt strugi można przyjąć jako pokrywający się z kątem łopatkowym, natomiast w strefach wlotowej i wylotowej kąt strugi będzie wypadkową oddziaływań łopatek i warunków napływu i wypływu strugi. Poszczególne strefy rozgranicza promień r_p, od którego przyjmuje się, że zanika wpływ warunków na wejściu do wieńca oraz promień r_s, będący tzw. promieniem STANITZA [3]. Promień r_p określony może być w przybliżeniu następującą zależnością

$$r_p = r_1(1 + \frac{\pi}{z} \sin 2\beta_{1ł}), \tag{11}$$

gdzie:

$\beta_{1ł}$ - jest kątem łopatkowym na wlocie.

Ostatecznie w wyszczególnionych trzech strefach odnośnie rozkładu kąta strugi płynu $\beta = \beta(r)$ można przyjąć następujące założenia:

- strefa I, $r \leq r_p$, $\beta = a_o + a_1 r + a_2 r^2$
- strefa II, $r_p < r < r_s$, $\beta = \beta_ł$ (12)
- strefa III, $r \geq r_s$, $\beta = b_o + b_1 r + b_2 r^2$.

Współczynniki a_o, a_1, a_2, b_o, b_1, b_2 wyznacza się odpowiednio na podstawie następujących warunków: kąta strugi na wlocie lub wylocie, kątów łopatkowych w przekroju o promieniu r_p lub r_s oraz wartości pochodnych kąta łopatkowego w tych samych przekrojach.

O ile w przypadku kąta wlotowego strugi β_1, jego wartość narzucona jest kinematyką przepływu, to w przypadku kąta wylotowego strugi β_2, jego wartość musi wynikać z warunku spełnienia postulatu Kutty-Żukowskiego o spływie z ostrza profilu. Wartość kąta β_2 określa się tu więc na drodze iteracyjnej tak, by w przekroju wylotowym spełnić warunek $\Delta p = 0$.

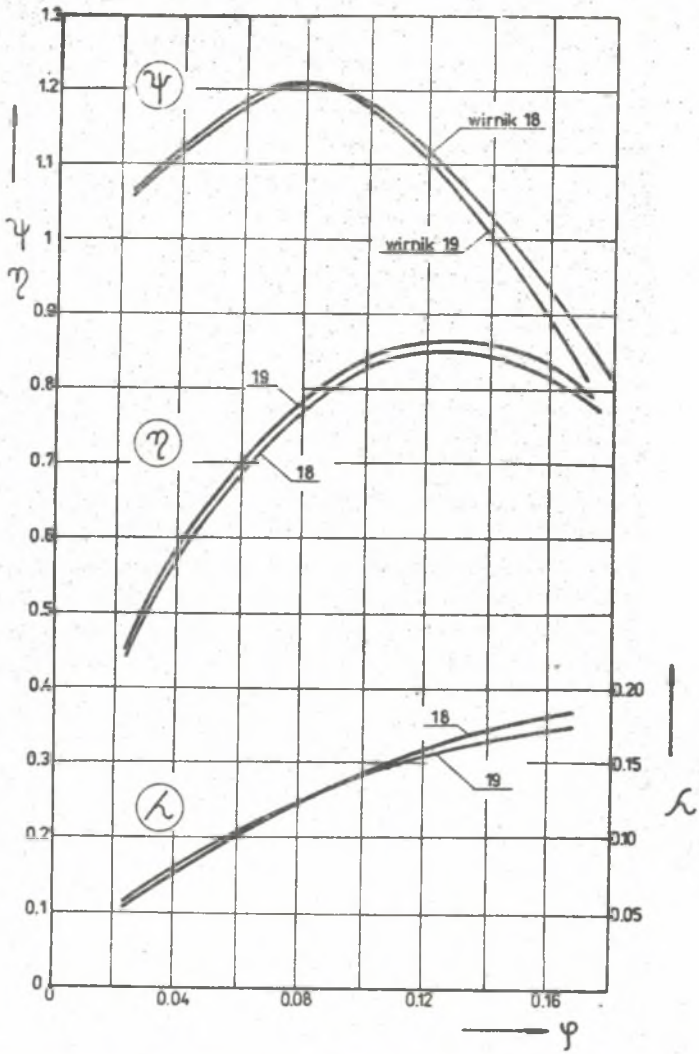
Przedstawiony algorytm obliczań pozwala stwierdzić, że przebieg funkcji obciążenia aerodynamicznego łopatek wirnika promieniowego zależny jest od:

- kształtu łopatki,
- geometrii wirnika w przekroju merydionalnym,
- liczby łopatek wirnika,
- grubości łopatek,
- punktu pracy wirnika.

3. Przykłady różnego kształtowania łopatek wirnika

W dotychczasowych pracach projektowo-badawczych w Zakładzie Cieplnych Maszyn Wirnikowych Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych przeprowadzono cztery testy wykonując wirniki raz z łopatkami kołowymi, drugi raz natomiast z łopatkami ukształtowanymi według innej zależności, dobranej za pomocą funkcji obciążenia aerodynamicznego $\Delta\mathcal{T}$. We wszystkich tych próbach stwierdzono, że wirniki z łopatkami niekołowymi osiągnęły wyższe sprawności.

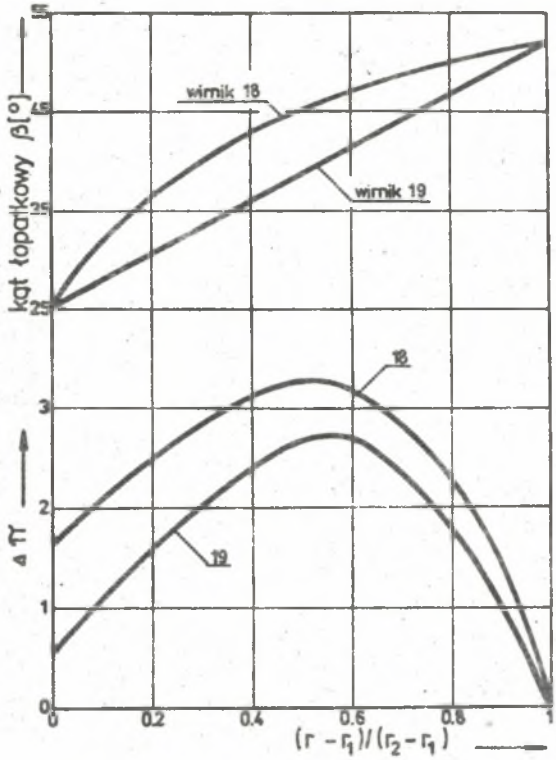
Dla przykładu na rys. 2 przedstawiono charakterystyki wentylatora z dwoma różnymi wirnikami posiadającymi takie same kąty łopatkowe: $\beta_{1ł} = 25^o$ i $\beta_{2ł} = 52^o$, z innym jednak rozkładem kątów łopatkowych wzdłuż promienia, co pokazano na rys. 3. Jednocześnie na tym samym rysunku przed-



Rys. 2. Charakterystyki wentylatora z wirnikami różniącymi się jedynie rozkładem kątów łopatkowych wzdłuż promienia (jak na rys. 3)

stawiono rozkład funkcji obciążenia dla tych wirników. Z bardzo starannie przeprowadzonych pomiarów wynika, że wirnik nr 18 z łopatkami kołowymi osiągnął sprawności około 2% mniejsze od wirnika 19.

Inny przykład dotyczy próby modernizacji trójstopniowej dmuchawy odkurzacza CI-110 produkowanego przez Fabrykę GLIWENT w Gliwicach. Chodziło tu o poprawę sprawności i obniżenie głośności pracy przy ewentualnym wzroście ciśnienia. Wirniki są równoległotarczowe. Po przeprowadzonej analizie zaproponowano zmianę wersji fabrycznej ($\beta_{1ł}$ = 41,4°, $\beta_{2ł}$ = 23,6°, z = 6 łopatek o kształcie kołowym) na wersję zmodernizowaną ($\beta_{1ł}$ = 39,4°,

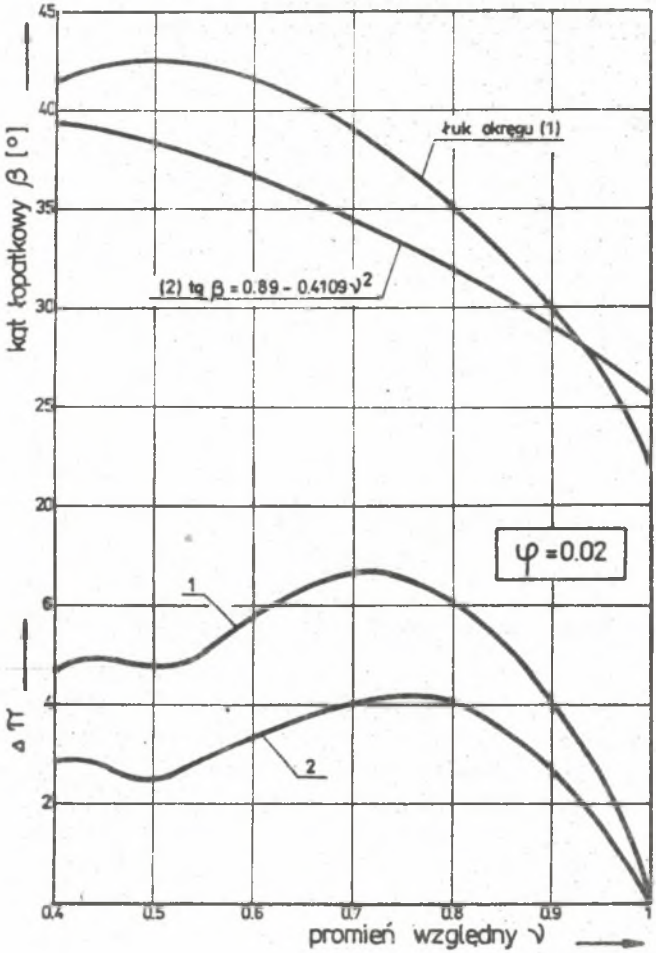


Rys. 3. Rozkład funkcji obciążenia aerodynamicznego $\Delta\pi$ dla przypadku różnego kształtowania łopatek

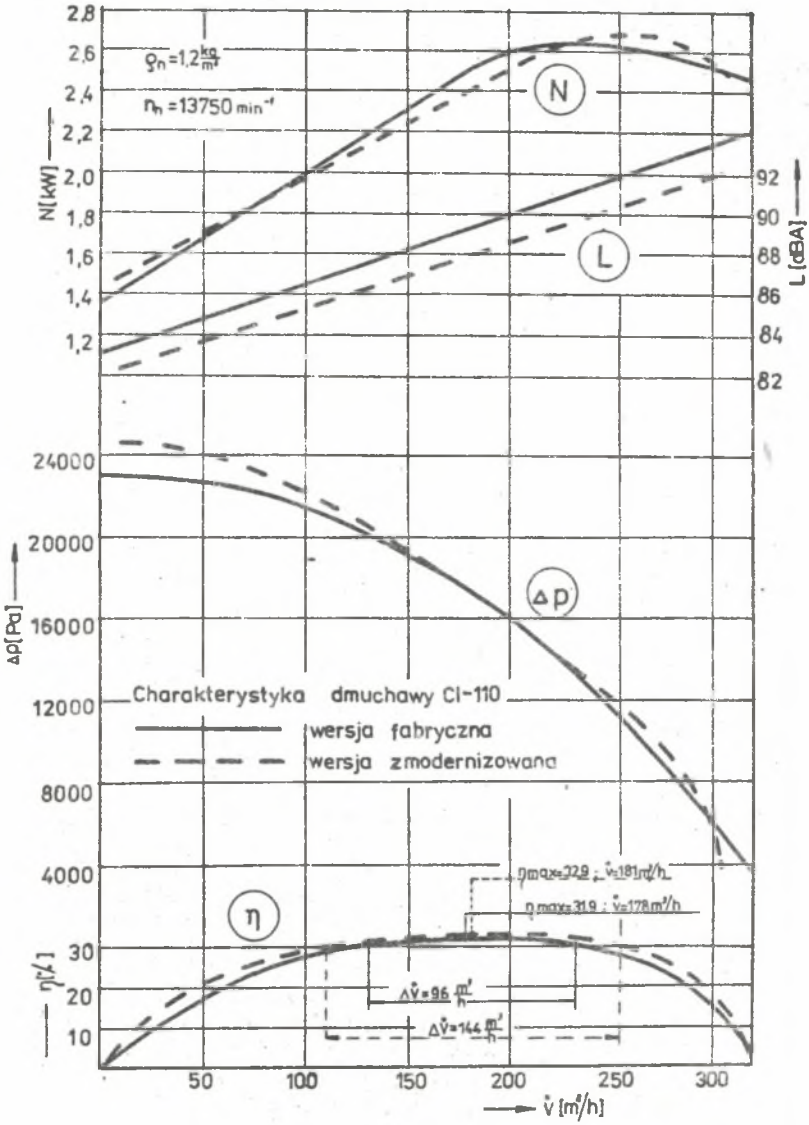
$\beta_{2ł} = 25{,}6^{\circ}$, $z = 8$ łopatek o zmienności kąta według równania $tg\beta = a + b\vartheta^2$). Rozkład kątów łopatkowych oraz funkcji $\Delta\pi$ przedstawiono na rys. 4. Wyniki pomiarów charakterystyk zestawiono na rys. 5. Uzyskano tu wprawdzie przyrost sprawności w punkcie nominalnym tylko o 1%, natomiast w punktach pozanominalnych przyrost ten jest większy, co powoduje, że zakres pracy przy sprawności $\eta \geq 30\%$ powiększył się o 50% (od wartości $\Delta\dot{V} = 96\ m^3/h$ do $\Delta\dot{V} = 144\ m^3/s$).

4. Możliwości wykorzystania funkcji obciążenia aerodynamicznego przy projektowaniu wirników

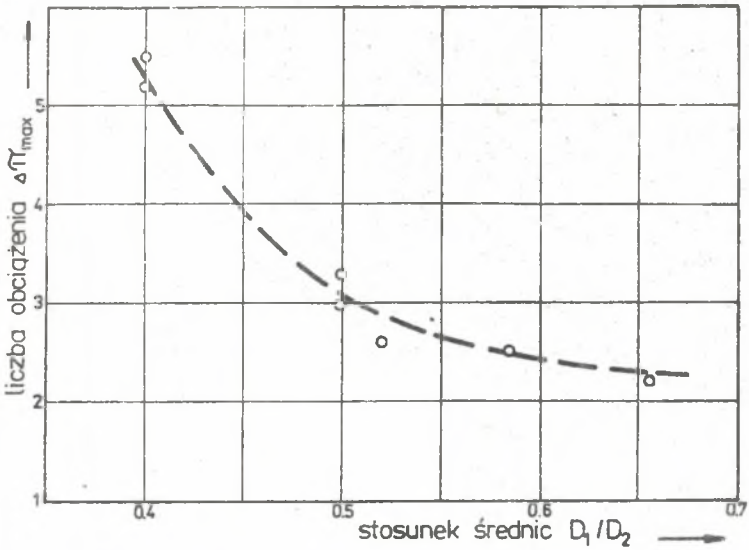
Analizując typowe rozkłady funkcji obciążenia wzdłuż promienia stwierdzić można, że charakterystycznymi punktami tego rozkładu są wielkości obciążenia aerodynamicznego na wlocie oraz wielkość obciążenia maksymalnego $\Delta\pi_{max}$. Wartości $\Delta\pi_{max}$ w dużym stopniu przesądzają o doskonałości



Rys. 4. Rozkład funkcji obciążenia aerodynamicznego $\Delta\pi$ dla dwóch przypadków kształtowania łopatek wirnika dmuchawy CI-110



Rys. 5. Wyniki badań charakterystyk dmuchawy CI-110



Rys. 6. Wartości optymalne obciążenia aerodynamicznego $\Delta\pi_{max}$ dla wysokosprawnych wentylatorów promieniowych

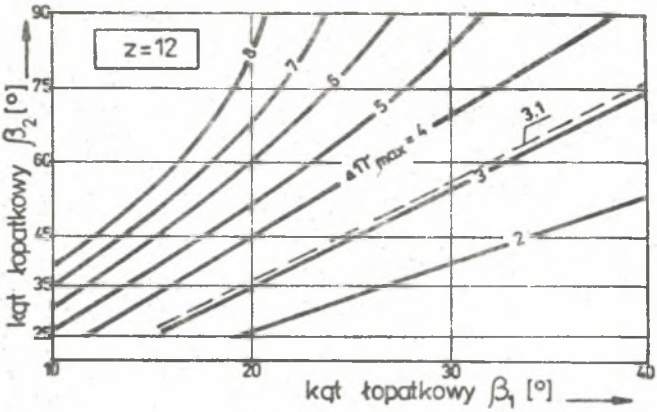
przepływu w wirniku. Dotychczas zebrane doświadczenia pozwalają stwierdzić, że optymalne wartości $\Delta\pi_{max}$ zależą od stosunku średnic wirnika i dla wysokosprawnych wentylatorów ($\eta > 86\%$) układają się według rys.6. Zaobserwowano również inną prawidłowość, że im mniejsze jest $\Delta\pi$ na wlocie, tym większe można dopuścić wartości $\Delta\pi_{max}$.

Znajomość optymalnych wartości $\Delta\pi_{max}$ wykorzystać można w procesie projektowania wirników. Dla zilustrowania istniejących w tym względzie możliwości opracowano dwa wykresy (rys. 7 i rys. 8), na których w układzie ($\beta_{1ł}$, $\beta_{2ł}$) oraz (z, $\beta_{2ł}$) wykreślono izolinie $\Delta\pi_{max}$ = const. Wykresy dotyczą wirników o stosunku $D_1/D_2 = 0,5$ z tarczą nakrywającą kształtowaną według zasady $b \cdot r$ = const oraz łopatkami o zarysie kołowym. Linią przerywaną zaznaczono przebiegi krzywych o wartości $\Delta\pi_{max}$ = 3,1; optymalnej według rys. 6, dla tego stosunku średnic. Dalsza analiza przebiegu tych krzywych pozwala przykładowo uzyskać (rys. 7), przy założeniu wartości

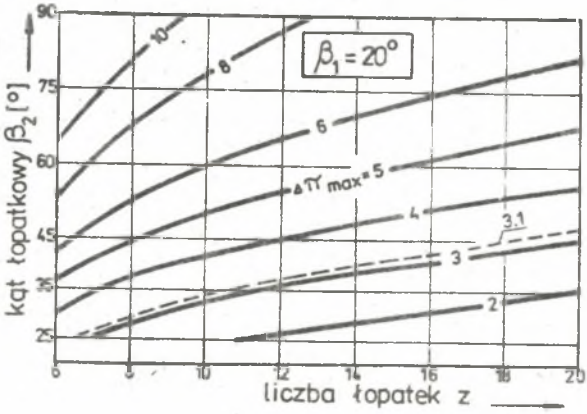
$$z = 12, \quad \Delta\pi_{max} = 3,1; \quad \text{zależność} \quad \beta^{\circ}_{2ł} = 2\beta^{\circ}_{1ł} - 3,$$

oraz z wykresu 8, przy założeniu wartości

$$\beta_{1ł} = 20^{\circ}, \quad \Delta\pi_{max} = 3,1; \quad \text{zależność} \quad \beta^{\circ}_{2ł} = 10,55\sqrt{z}$$



Rys. 7. Przykładowy rozkład izolinii $\Delta\pi_{max}$ = const dla wirnika o stosunku średnic D_1/D_2 = 0,5 z tarczą nakrywającą kształtowaną według zasady br = const.



Rys. 8. Przykładowy rozkład izolinii $\Delta\pi_{max}$ = const (dla wirnika jak na rys. 7)

Dalszy postęp w racjonalnym ujęciu zagadnień przepływu w wirnikach promieniowych można uzyskać przez uwzględnienie w przyjętym modelu efektów lepkości płynu [4].

5. Wnioski końcowe

1. Przedstawiono stosunkowo prosty i dający wystarczająco dokładne wyniki, algorytm obliczenia funkcji obciążenia aerodynamicznego łopatek wirnika promieniowego.

2. Przytoczone przykłady wskazują, że funkcja obciążenia aerodynamicznego łopatek $\Delta\pi$ stanowić może jedno z ważniejszych kryteriów oceny wirnika pod względem przepływowym.

3. Celowość stosowania funkcji obciążenia przy projektowaniu wirników wydaje się być bezsporna. Obecnie wszystkie projektowane przez autora pracy wirniki promieniowe powstają z uwzględnieniem doboru odpowiedniego rozkładu obciążenia aerodynamicznego $\Delta\pi$. Rezultaty badań tych wirników są zaskakująco pozytywne.

4. Wykazano, że zarys kołowy łopatek wirnika promieniowego nie jest optymalny pod względem doskonałości aerodynamicznej. Im kąt łopatkowy $\beta_{2ł}$ jest większy, tym większa jest różnica na niekorzyść łopatki o zarysie kołowym.

5. Przedstawione w niniejszej pracy koncepcje zastosowania i wykorzystania funkcji obciążenia aerodynamicznego kreślą pewien kierunek postępowania w dziedzinie poznawania związków przyczynowo-skutkowych aerodynamiki wirników wentylatorów (dmuchaw, sprężarek) promieniowych. Niezbędne są w tym zakresie dalsze prace badawcze.

Literatura

[1] Otte J.J.: Koncepcja funkcji obciążenia aerodynamicznego palisady łopatek wirnika promieniowego. Materiały V krajowej konferencji Mechaniki Cieczy i Gazów, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Maszyny Robocze i Pojazdy, nr 22, 1982.

[2] Otte J.J.: Function of the Aerodynamic Blade Loading as the Criterion to the Design of the Centrifugal Impeller. Proceedings of the Seventh Conference on Fluid Machinery, Budapest 1983.

[3] Traupel W.: Thermische Turbomaschinen. Springer Verlag, III Auflage.

[4] Otte J.J.: Problematyka obliczeń przepływu w kanałach międzyłopatkowych wirników promieniowych z uwzględnieniem warstw przyściennych. Materiały VI krajowej konferencji Mechaniki Cieczy i Gazów, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Energetyka z. 88, 1984.

Recenzent: doc. dr inż. Jan Radwański

Wpłynęło do redakcji, maj 1985

ОБ РАЦИОНАЛЬНОМ ПРОФИЛИРОВАНИИ КОЛЕС ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Р е з ю м е

В работе приводятся основные сведения об использовании функции аэродинамической нагрузки как критерий рационального профилирования колес центробежных вентиляторов и компрессоров. Здесь показано что функция аэродинамической нагрузки есть относительно универсальной величиной определяющей качество течения в межлопаточных каналах и что её распределение по радиусу существенно влияет на кпд и форму напорной характеристики центробежных вентиляторов.

RATIONAL DESIGNING OF CENTRIFUGAL FAN IMPELLERS

S u m m a r y

The general outline of the function of the aerodynamic blade cascade loading of centrifugal impeller has been considered as the criterion of its rational designing. It has been proved that the distribution of aerodynamic loading function along the radius has significant influence on the efficiency and performance characteristics of centrifugal fans.