ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria: ENERGETYKA z. 91 Nr kol. 856

Tadeusz CHMIELNIAK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechniki Śląskiej

CHARAKTERYSTYKI BIDARDA PALISAD PROFILÓW

Streszczenie. Zdefiniowano i porównano różne wskaźniki bezwymiarowe wykorzystywane w teorii profilów. Opisano charakterystyki Bidarda. W formie przykładów obliczono charakterystyki Bidarda dla palisady odcinków i wybranych profilów sprężających.

1. Wprowadzenie

Wychodząc z równań zachowania masy pędu i energii dla przepływu palisadowego można zdefiniować wiele różnych wielkości bezwymiarowych charakteryzujących wzajemne oddziaływanie płynu i układu profilów. Zależności między tymi wielkościami (wskaźnikami) i wybranymi parametrami geometrycznymi lub kinematycznymi palisad nazywamy charakterystykami. Następstwem różnorodności wskaźników jest wielość propozycji dotyczących charakterystyk palisad profilów. W artykule przedyskutujemy zależności wiążące między sobą wskaźniki zaproponowane przez Bidarda [1, 2].

Tak otrzymane charakterystyki posiadają wiele zalet decydujących o ich praktycznej przydatności dla opisu konwersji energii w idealnych i rzeczywistych przepływach palisadowych. Główne z nich to: łatwość wykorzystania w teorii stopni maszyn przepływowych i uniwersalny charakter dla różnych rodzajów palisad.

2. Wskaźniki bezwymiarowe palisad profilów

W tablicy 1 zestawiono wskaźniki zdefiniowane w oparciu o siły oddziałujące na profil umiejscowiony w palisadzie omywanej strugą płynu nieściśliwego (rys. 1, 2).

Obok tych wskaźników wywodzących się z aerodynamicznej teorii pojedynczego profilu znajdują zastosowanie inne bezwymiarowe stosunki, wśród nich wskaźniki Bidarda:

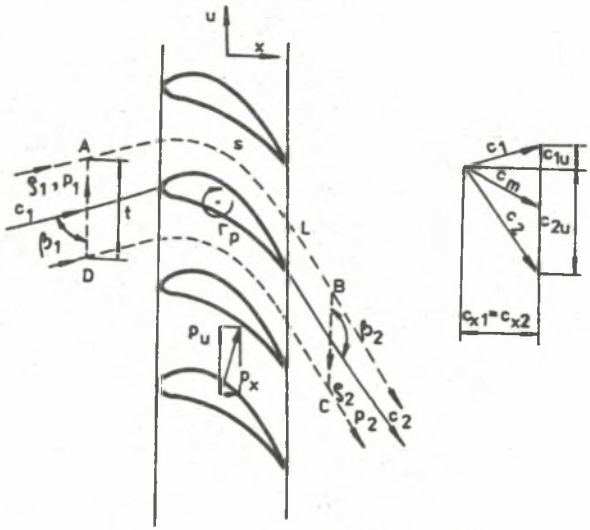
- wskaźnik zmiany entalpii statycznej

$$m = \frac{\Delta h}{(\Delta c_u)^2} \tag{1}$$

Tablica 1

Bezwymiarowe wskaźniki palisad profilów

Lp	Wskaźnik	β_1, β_2, θ	C_A', C_W	ζ, ζ_r
1	$C_A' = \frac{P}{\frac{1}{2} b \rho_m c_x^2}$ – wskaźnik siły nośnej	$2\frac{t}{b}\sin\beta_m \frac{ctg\beta_1 - ctg\beta_2}{1+\theta\, ctg\beta_m}$	———	$2\frac{t}{b}\zeta_r \sin\beta_m - \frac{t}{b}\zeta \sin^2\beta_m \cos\beta_m$
2	$C_A = \frac{P_s}{\frac{1}{2} b \rho_m c_x^2}$ – wskaźnik siły nośnej	$2\frac{t}{b}\sin\beta_m (ctg\beta_1 - ctg\beta_2)$	———	$2\frac{t}{b}\zeta_r \sin\beta_m$
3	$C_W = \frac{P_W}{\frac{1}{2} b \rho_m c_x^2}$ – wskaźnik oporu	$2\frac{t}{b}\sin\beta_m (ctg\beta_1 - ctg\beta_2) \frac{\theta}{1+\theta\, ctg\beta_m}$	———	$\frac{t}{b}\zeta \sin^3\beta_m$
4	$C_U = \frac{P_U}{\frac{1}{2} b \rho_m c_x^2}$ – wskaźnik składowej P_U	$2\frac{t}{b}(ctg\beta_1 - ctg\beta_2)$	$\frac{1}{\sin^2\beta_m}(C_A' \sin\beta_m + C_W \cos\beta_m)$	$2\frac{t}{b}\zeta_r$
5	$C_x = \frac{P_x}{\frac{1}{2} b \rho_m c_x^2}$ – wskaźnik składowej P_x	$2\frac{t}{b}(ctg\beta_1 - ctg\beta_2) + \left[\frac{\theta}{\sin^2\beta_m (1+\theta\, ctg\beta_m)} ctg\beta_m\right]$	$\frac{1}{\sin^2\beta_m}(C_W \sin\beta_m - C_A' \cos\beta_m)$	$\frac{t}{b}(2\zeta_r ctg\beta_m + \zeta)$
6	$\zeta_r = \frac{\Gamma p}{t\, c_x^2}$ – wskaźnik cyrkulacji	$ctg\beta_1 - ctg\beta_2$	$\frac{1}{2\sin\beta_m}\frac{b}{t}(C_A' + C_W ctg\beta_m)$	———
7	$\zeta = \frac{p_{02} - p_{01}}{\frac{1}{2}\rho_m c_x^2}$ – wskaźnik strat ciśnienia	$2\theta \frac{ctg\beta_1 - ctg\beta_2}{\sin^2\beta_m (1+\theta\, ctg\beta_m)}$	$\frac{1}{\sin^3\beta_m}\frac{b}{t} C_W$	———
8	$\varepsilon = \frac{P_W}{P_s}$, $\varepsilon' = \frac{C_W}{C_A'}$ – wskaźnik doskonałości aerodynamicznej	$\varepsilon' = tg\,\theta \triangleq \theta$	$\frac{C_W}{C_A'}$	$\varepsilon' = \frac{2\sin^2\beta_m}{4\left(\frac{\zeta_r}{\zeta}\right) - \sin 2\beta_m}$



Rys. 1. Palisada prostoliniowa

- wskaźnik wydajności

$$n = \frac{c_x}{|\Delta c_u|} \tag{2}$$

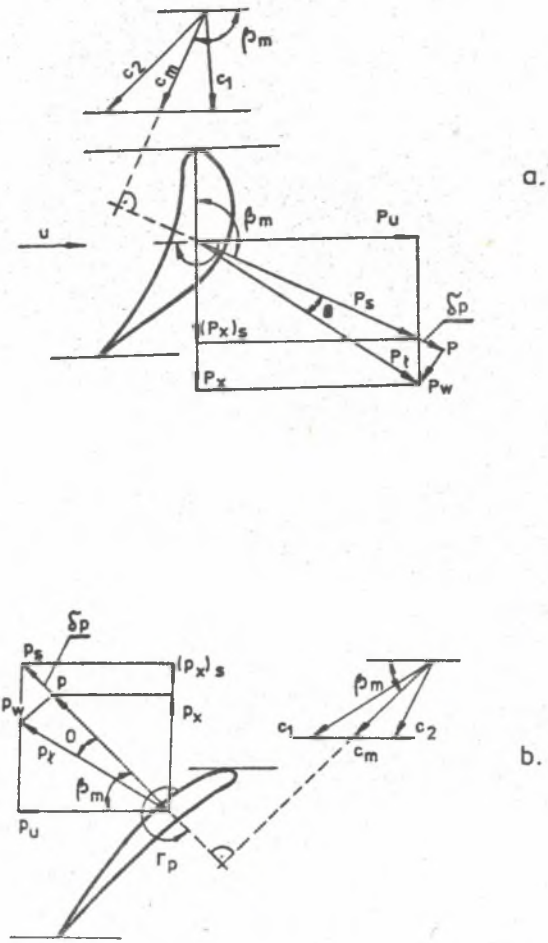
- wskaźnik rozproszenia (dyssypacji) energii

$$m = \frac{E}{(\Delta c_u)^2} \tag{3}$$

gdzie: Δh - zmiana entalpii statycznej w palisadzie, $\Delta h > 0$ - palisada opóźniająca (sprężarkowa), $\Delta h < 0$ - palisada przyspieszająca (turbinowa), c_x - rzut prędkości na kierunek prostopadły do frontu palisady, E - wartość rozproszonej energii odniesienia do jednostki masy.

Zauważmy, że wielkością normalizującą zmiany charakterystycznych wielkości Δh, c_x i E jest różnica obwodowych składowych prędkości $\Delta c_u = c_{2u} - c_{1u}$, wielkość określająca odchylenie strugi w palisadzie, czyli wielkość charakteryzująca podstawową funkcję układu łopatkowego. W tym tkwi szerokie praktyczne zastosowanie wskaźników Bidarda i charakterystyk w oparciu o nie skonstruowanych.

Liczby (1-3) dotyczą zgodnie z przyjętymi oznaczeniami (rys. 3), palisad stojanowych wprowadzając zamiast Δc_u i c_x odpowiednio Δw_u i w_x ($\Delta w_u = w_{2u} - w_{1u}$ - różnica obwodowych składowych prędkości przepływu względnego, w_x - odpowiednia składowa osiowa) otrzymujemy charakterystyczne wskaźniki dla palisad wirnikowych.



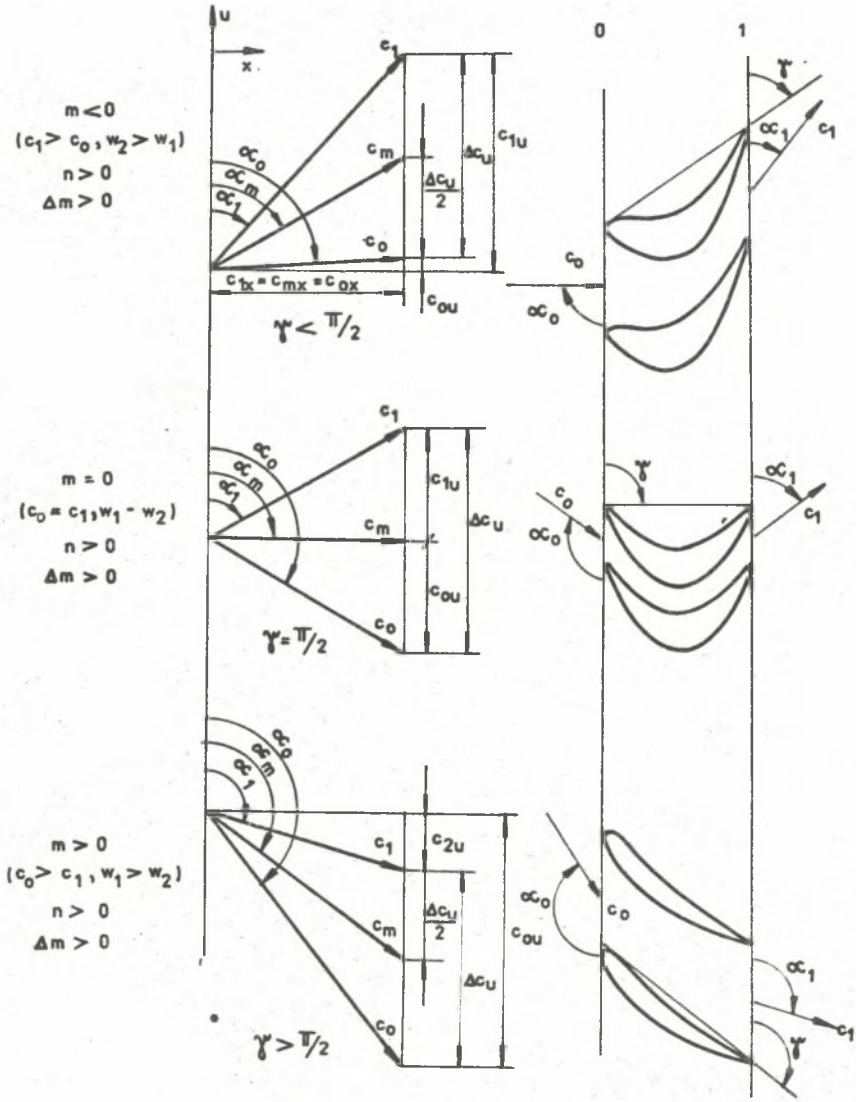
Rys. 2. Siły oddziałujące na profil usytuowany w palisadzie

Jeżeli wykorzystać uśrednione równanie energii dla osiowego wieńca łopatkowego

$$\frac{1}{2} c_o^2 + h_o = \frac{1}{c} c_1^2 + h_1$$

to liczbę m można zapisać w postaci

$$m = \frac{\Delta h}{(\Delta c_u)} = \frac{h_1 - h_o}{(\Delta c_u)^2} = \frac{c_o^2 - c_1^2}{2(c_{1u} - c_{ou})^2} \tag{4}$$



Rys. 3. Wektory prędkości dla różnych rodzajów palisad

Dla dodatkowego założenia $c_{ox} = c_{ix} = c_s$ (rys. 3) uzyskujemy

$$m = \frac{c_{mu}}{\Delta c_u} = -\frac{\mathrm{ctg}\alpha_o + \mathrm{ctg}\alpha_1}{2(\mathrm{ctg}\alpha_1 - \mathrm{ctg}\alpha_o)} \tag{5}$$

$$n = \frac{c_x}{|\Delta c_u|} = \frac{1}{|\mathrm{ctg}\alpha_1 - \mathrm{ctg}\alpha_o|} \tag{6}$$

z (5) i (6) wynika, że dla palisad ekspansyjnych: $m < o$; dla palisad łopatek nawrotnych: $m = 0$ a dla opóźniających: $m > 0$ (rys. 3).

Określamy teraz relacje między Δm i ε oraz innymi wskaźnikami strat. Uśredniony efekt zmniejszenie energetycznego oddziaływania płynu na jednostkę długości łopatki powstały na skutek rozproszenia energii w kanale międzyłopatkowym wynosi

$$P_w c_m = \frac{m}{l} E = t \varrho c_x E \tag{7}$$

gdzie:

l - wysokość łopatki.

Biorąc pod uwagę definicję cyrkulacji

$$|\Gamma_p| = t\Delta c_u$$

oraz formułę Kutty i Żukowskiego

$$P_s = \varrho |\Gamma_p| c_m$$

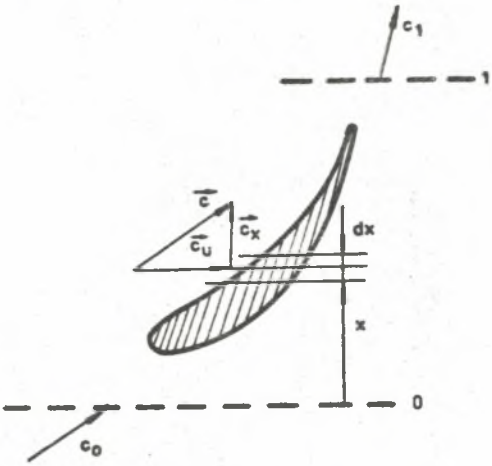
otrzymujemy z (7)

$$E = \frac{P_w c_m}{t\varrho c_x} = \frac{c_m^2 \Delta c_u}{c_x} \varepsilon \tag{8}$$

Tak więc

$$\Delta m = \varepsilon \frac{c_m^2}{\Delta c_u c_x} = \varepsilon \frac{m^2 + n^2}{m^2} \tag{9}$$

Ostatnia zależność może być stosowane w tych przypadkach, gdy prędkość opływu profilu niewiele odbiega od prędkości średniej c_m. Praktycznie ogranicza to jej stosowalność do łopatek wentylatorowych mało wygiętych. Dla bardziej złożonych geometrii można otrzymać inny związek przyjmując że lokalnie słuszna jest równość (8), czyli (rys. 4)



Rys. 4. Schemat pomocniczy do wyprowadzenia zależności (10)

$$\frac{dE}{dx} = \varepsilon_1 \frac{c^2}{c_x} \frac{dc_u}{dx}$$

Po scałkowaniu między przekrojami o-1 znajdujemy

$$E = \int_{c_{ou}}^{c_{1u}} \varepsilon_1 \frac{c^2}{c_x} dc_u = \frac{1}{n}(\Delta c_u)^2 (m^2 + n^2 + \frac{1}{12})$$

i

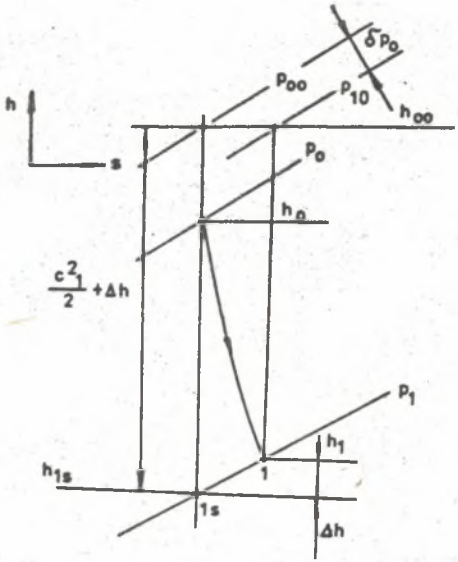
$$\Delta m = \varepsilon \frac{m^2 + n^2 + \frac{1}{12}}{n} \tag{10}$$

Dysponując relacjami między ε a innymi wskaźnikami rozproszenia energii w palisadach można uzyskać wzajemne związki między Δm i owymi wskaźnikami. Dla przepływu nieściśliwego za wskaźnik strat przyjęto ζ (tablica 1), jego związek z ε opisuje formuła

$$\varepsilon = \frac{\zeta \sin^2 \beta_m}{2}$$

czyli

$$\Delta m = \frac{m^2 + m^2 + \frac{1}{12}}{2n} \frac{\zeta}{\zeta_T} \sin^2 \beta_m \tag{11}$$



Rys. 5. Schemat pomocniczy do określenia wskaźnika strat dla przepływu płynu ściśliwego

Podobnie przyjmując dla przepływu ściśliwego (palisada ekspansyjna rysunek 5)

$$\zeta_o = \frac{h_1 - h_{1s}}{h_{oo} - h_{1s}} = \frac{\Delta h_s}{h_{oo} - h_{1s}}$$

znajdujemy

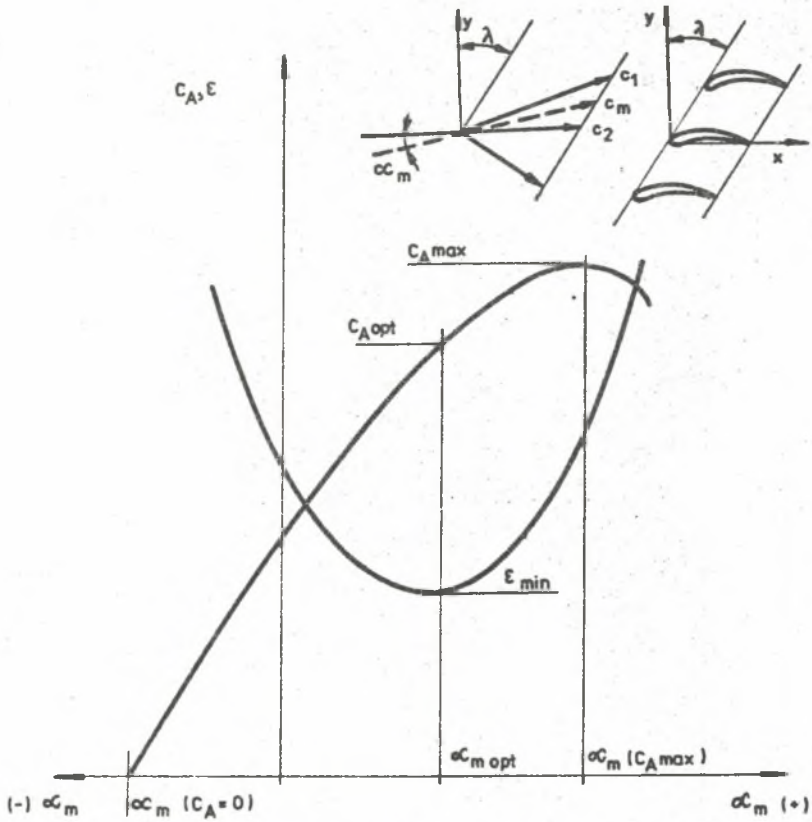
$$\Delta m = -\frac{\zeta_o^m}{(1-\zeta_o)\left[1-\left(\frac{c_o}{c_1}\right)^2\right]} = -\frac{\zeta_o^m}{(1-\zeta_o)\left[1-\left(\frac{c_o}{c_{1s}}\right)^2\right]} \tag{12}$$

3. Charakterystyki palisad profilów

Wśród różnych charakterystyk palisad profilów dobrze spełniają owe funkcje zależności

$$c_A(c_A') = f(\alpha_1(\beta)); \quad \zeta_\Gamma = f(\alpha_m(\beta_m)); \quad \varepsilon = f(\alpha_1(\beta)),$$

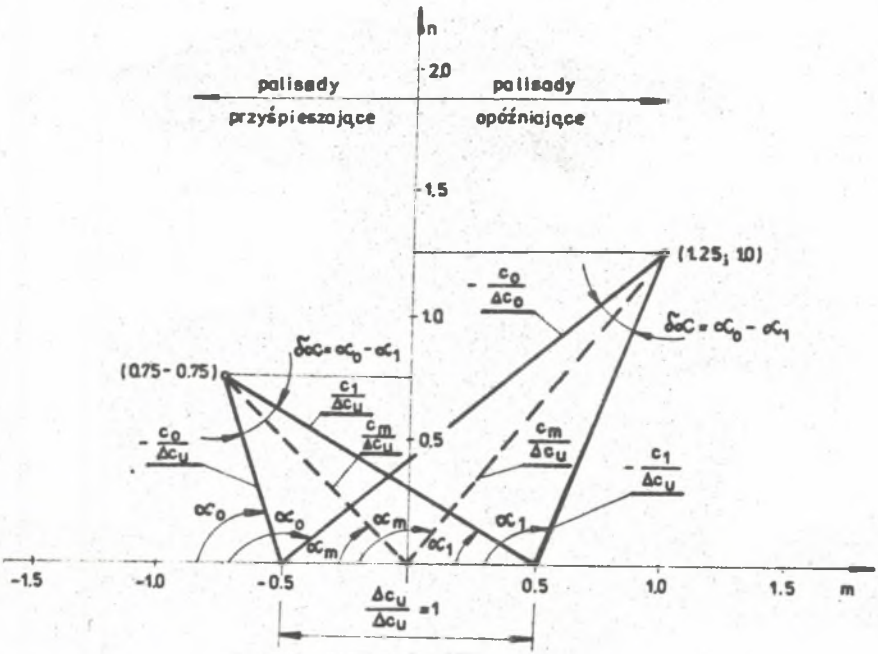
$$m = f(n); \quad \Delta m = f(n).$$



Rys. 6. Charakterystyki, $C_A = f(\alpha_\gamma)$, $\varepsilon = f(\alpha_\gamma)$

Charakterystyki $C_A(C_A')$, $\varepsilon = f(\alpha_\gamma)$ (rys. 6) są podstawowymi dla opisu przepływu wokół pojedynczego profilu. Są one także, chociaż rzadziej, wykorzystywane przy opracowywaniu badań palisad łopatkowych. W efekcie porównania przebiegu $C_A = f(\alpha_{\gamma m})$ i $\varepsilon = f(\alpha_{\gamma m})$ można określić optymalne wartości $\alpha_{\gamma m}$ i C_A dla danego kąta ustawienia $\lambda(\xi)$.
Zależności: $\zeta_\Gamma = f(\alpha_m(\beta_m))$ (wykres Eulera) $m = f(n)$ ułatwiają proces doboru układu łopatkowego dla konkretnych wieńców i stopni maszyn przepływowych. Wynika to głównie stąd, że każdemu punktowi na tych wykresach odpowiadają konkretne wartości odchylenia strumienia w palisadzie (konkretny trójkąt prędkości). Inaczej mówiąc kanały międzyłopatkowe posiadające jednakowe wartości ζ_Γ i β_m lub m i n są aerodynamicznie równoważne. Szczególnie wiele praktycznych informacji odczytać można z wykresu $m = f(m)$ (rys. 7).

Dla ilustracji postaci charakterystyk Bidarda przedstawiono na rys. 8 rodzinę charakterystyk dla palisady odcinków (rys. 9). Obliczenie wykona-



Rys. 7. Charakterystyki Bidarda

no dla t/b = 1 i kilku wartości γ. Na rys. 8 zaznaczono sposób budowy trójkątów prędkości dla wybranych punktów na charakterystykach (punkt A - palisada sprężająca punkt B - palisada ekspansyjna). Inny przykład przedstawia rys. 10. W tym przypadku nakreślono charakterystyki Bidarda dla danej palisady wentylatorowej przy zmianie jej podziałki względnej.

Przedstawione przykłady wskazują na uniwersalny charakter charakterystyk m = f(n). Szczególnie przydatne są one dla rejestracji kompleksowych obliczeń analitycznych i badań eksperymentalnych palisad. Łatwo także na podstawie pełnych charakterystyk rozwiązywać zadania doboru optymalnych wieńców łopatkowych.

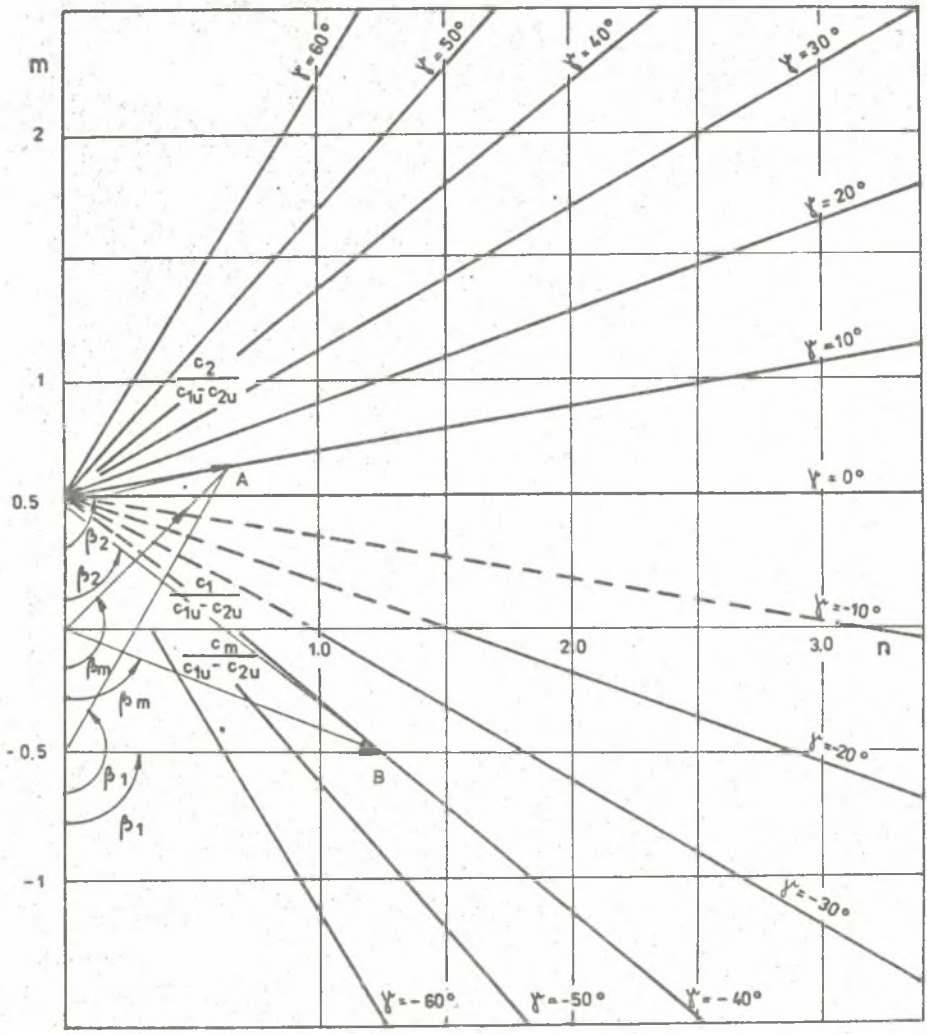
Literatura

[1] M.E. Imbach: Zur Darstellung der Ergebnisse systematischer Untersuchungen an Schaufelgittern. Brown Boveri Mitteilungen, Marz 1966, s. 210-215.

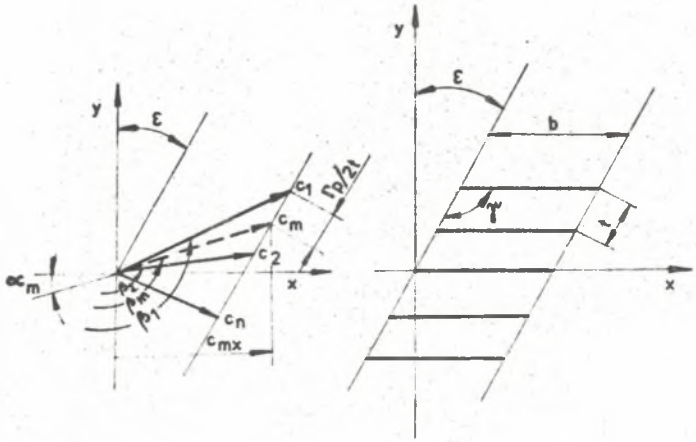
[2] Flow Research on Blading (Ed. L.S. Dzung). Proceedings of the Symposium on Flow Research on Blading, Brown Boveri, Baden 1969.

Recenzent: doc. dr inż. Jan Radwański

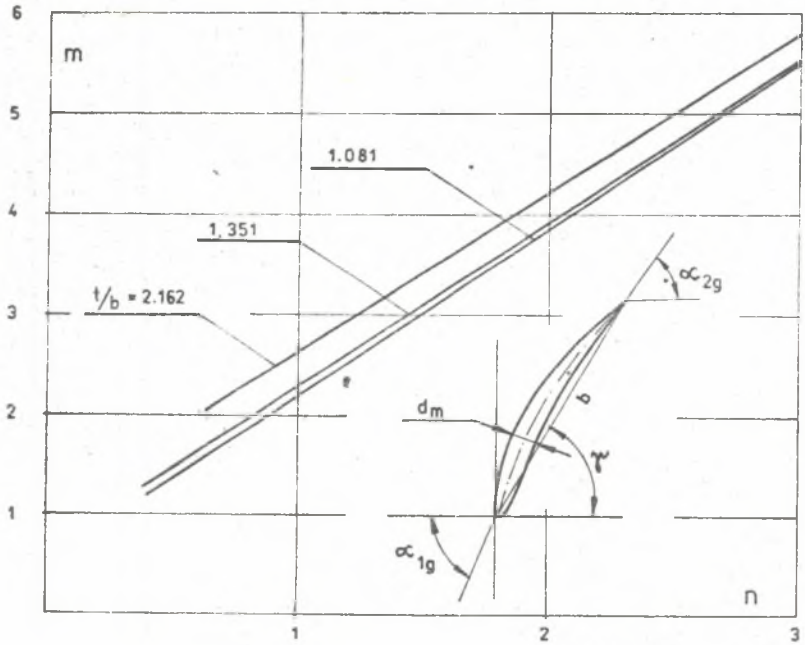
Wpłynęło do redakcji, maj 1985



Rys. 8. Charakterystyki Bidarda dla palisady odcinków



Rys. 9. Schemat pomocniczy do określenia podstawowych wielkości dla palisady odcinków



Rys. 10. Charakterystyki Bidarda dla wybranej palisady wentylatorowej przy zmianie podziałki względnej t/b

ХАРАКТЕРИСТИКИ BIDARDA РЕШЕТОК ПРОФИЛЕЙ

Р е з ю м е

Рассмотрено разные безразмерные коэффициенты теории решеток. Подробно обсуждено коэффициенты и характеристики Bidarda. Расчитано и показано характеристики Bidarda для решеток простых отрезов и для вентиляторной решетки профилей.

CASCADE CHARACTERISTICS OF BIDARD

S u m m a r y

The different coefficients for a blade row are described. In particular, a detailed analysis of Bidard's coefficients and characteristics is given. Some characteristics of accelerating and decelerating cascades for incompressible flow are calculated for example.