

Joachim OTTE

Instytut Maszyn
i Urządzeń Energetycznych

GRAFICZNE UJĘCIE KRYTERIÓW AERODYNAMICZNEGO OBCIĄŻENIA
STOPNIA SPRĘŻAJĄCEGO

Streszczenie. W pracy dokonano przeglądu stosowanych kryteriów aerodynamicznego obciążenia wieńców łopatkowych. Krzywe dopuszczalnych obciążeń wyrażono poprzez uogólnione liczby ciśnienia i wydajności i przedstawiono na wykresach. Przeprowadzono graficzną analizę kryteriów.

Zestawienie ważniejszych oznaczeń

c , c_m , c_u - prędkość bezwzględna i jej składowa merydionalna i obwodowa

$D = 1 - \frac{w_2}{w_1} + \frac{1}{2} \frac{t}{l} \frac{c_{2u}}{w_1}$ - liczba dyfuzorowości

$E = \left[1.12 + 0.61 \cos^2 \psi_1 (\operatorname{tg} \psi_1 - \operatorname{tg} \psi_2) \frac{t}{l} \right] \frac{w_1}{w_2}$ - ekwiwalentna liczba dyfuzorowości

r - promień

w_1 , w_2 - prędkość względna na wlocie i wylocie palisady

β_p - kąt ustawienia

ξ - kąt zmiany kierunku przepływu; $\xi = \psi_1 - \psi_2$

ϑ - liczba prędkości merydionalnej

γ - stosunek średnic

ψ_1, ψ_2, ψ_m - kąt strumienia, na wlocie, wylocie, średni

ψ - liczba przyrostu ciśnienia.

1. Wstęp

Teoretyczne i doświadczalne badania płaskich palisad sprężających jak i badania wieńców łopatkowych i stopni pozwoliły określić szereg charakterystycznych wielkości będących miarami dopuszczalnego aerodynamicznego obciążenia palisady, zwanych dalej kryteriami. Mnogość kryteriów jak i fakt, że nie zawsze się one pokrywają, skłania do przeprowadzenia ich porównania i analizy. Wcześniej bazując na starszych danych, próbę takiego porównania podjęto w pracach [7] i [11].

W niniejszej pracy kryteria obciążenia przedstawiono w formie pomocnej konstruktorowi układów przepływowych, pozwalającej przy danym stosunku średnic ocenić dopuszczalne obciążenia stopnia wyrażone bezwymiarowymi liczbami φ , Ψ . Podjęto także próbę zweryfikowania, w świetle innych kryteriów, krzywej maksymalnego obciążenia określonej z warunku przepływu poza tzw. "martwym rdzeniem wiru" [14], wyznaczającą w pracach [1], [8], [14] obszar, w którym dopuszczalne jest postępowanie optymalizacyjne.

2. Założenia

Porównanie różnych kryteriów maksymalnego obciążenia wieńców łopatkowych osiowego stopnia sprężającego przeprowadzono przy następujących założeniach:

- stopień prauuje w układzie konstrukcyjnym wirnik - kierownica,
- kinematyka przepływu wynika z zasady projektowania $rc_u = \text{const}$, $c_z = \text{const}$, przy czym na wlocie i wylocie stopnia jest $c_u = 0$,
- rozstrzygające o maksymalnym obciążeniu stopnia jest obciążenie aerodynamiczne palisady profili przy podstawie łopatek, co wynika z przyjętej kinematyki przepływu,
- rozpatruje się kryteria maksymalnego obciążenia wieńców o wysokich sprawnościach przepływowych, co zabezpiecza się dodatkowo warunkiem względnej podziałki przy płaszczyźnie

$$t/l = 0.6.$$

Uwzględnienie powyższych założeń powoduje, że maksymalne obciążenie aerodynamiczne wieńca łopatkowego opisać można następującym równaniem

$$\Psi = f(\varphi, \nu, \eta, K) \quad (1)$$

gdzie K jest przyjętym kryterium.

W celu ograniczenia liczby możliwych wariantów, co można uzyskać przez uniezależnienie się od stosunku ν oraz sprawności η , wprowadzono do rozważań uogólnione liczby:

$$\text{- prędkości merydionalnej} \quad \hat{\varphi} = \frac{\varphi}{\nu} \quad (2)$$

$$\text{- teoretycznego przyrostu ciśnienia w stopniu} \quad \hat{\Psi} = \frac{\Psi}{\eta \nu^2} \quad (3)$$

3. Kryteria przepływu w zastosowaniu do wieńca wirnikowego

A. Warunek zerowego kąta łopatkowego przy podstawie

W pracy [15] przeanalizowano wpływ kąta łopatkowego ψ_{2i}^a na charakter przepływu w różnych punktach charakterystyki i wykazano, że przy kącie $\psi_{2i}^a < 0$ zachodzi obniżanie się sprawności przepływu, a także zmniejsza się przepustowość układu. Stąd też w pracach [5], [15] postuluje się jako jedno z kryteriów obciążenia przyjęcie warunku

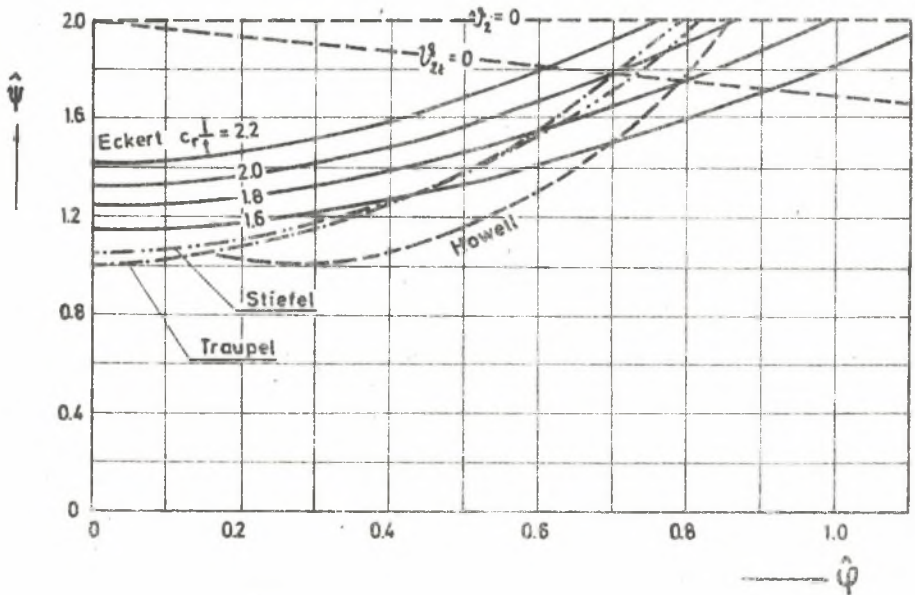
$$\psi_{2i}^a \geq 0. \tag{4}$$

Stosując przyjęte liczby bezwymiarowe $\hat{\Psi}$ i $\hat{\phi}$, powyższa realacja sprowadza się do nierówności

$$\hat{\Psi} = 2 (1 - \hat{\phi} \operatorname{tg} \psi_2^a) \tag{5}$$

gdzie przy określeniu kąta ψ_2^a należy mieć na uwadze, że różnica $\psi_2^a - \psi_{2i}^a$ w przypadku mocno obciążonych wieńców jest rzędu $9-10^\circ$. Ostatecznie więc dopuszczalne obciążenie stopnia wynikające z warunku $\psi_{2i}^a \geq 0$ zapisać można następująco:

$$\hat{\Psi} \leq 2 (1 - 0,16 \hat{\phi}) \tag{6}$$



Rys. 1

Dopuszczając w miejsce warunku (4) warunek $\psi_2 \geq 0$, dający większe obciążenia, uzyskuje się relację

$$\psi \leq 2 \quad (7)$$

Krzywe maksymalnego obciążenia otrzymane z zależności (6) i (7) przedstawiono na rys. 1,2,3.

B. Kryteria Eckerta - maksymalna wartość liczby aerodynamicznego obciążenia palisady

Na podstawie szeregu badań Eckert [6] jako ograniczenie liczby aerodynamicznego obciążenia palisady podaje zakres $c_{\psi} \frac{1}{t} = 1.5 - 2.5$, jednak dla zapewnienia wysokich sprawności stawia warunek $c_{\psi} \frac{1}{t} \leq 2$. W pracy [2] proponuje się przyjmować $c_{\psi} \frac{1}{t} \leq 1.8$. Kryterium maksymalnego obciążenia oparte na liczbie $c_{\psi} \frac{1}{t}$ wydaje się być mało dokładne, nie wnioskujące w istotę przepływu przez palisadę. Na rys. 1 przedstawiono krzywe maksymalnego obciążenia dla wartości liczby $c_{\psi} \frac{1}{t} = 1.6; 1.8; 2.0; 2.2$.

C. Maksymalne wartości liczby cyrkulacji c_{ψ}

Liczba cyrkulacji c_{ψ} będąca jedną z głównych wielkości charakteryzujących pracę palisady profili, stanowi także kryterium określające dopuszczalne warunki pracy. Eckert [6] zaleca zakres 0,8 - 1,25, co w połączeniu ze względną podziałką t/l tworzy wcześniej omówioną liczbę $c_{\psi} \frac{1}{t}$. Inne propozycje w tym względzie pochodzą od Traupela i Stiefela. Traupel [17] na podstawie szeregu pomiarów i badań palisad formułuje zależność

$$c_{\psi} = 0.8 + 0.2 \frac{\xi}{100} + 1.435 \left(\frac{\xi}{100} \right)^2, \quad (8)$$

natomiast Stiefel [16], uogólniając wyniki badań NACA, otrzymał krzywą, którą aproksymować można równaniem

$$c_{\psi} = 1.85 - 0.5 \left(c_{\psi} \frac{1}{t} \sin \psi_m \right)^2 \quad (9)$$

Krzywe maksymalnego obciążenia wykreślone na podstawie równań (8) i (9) przedstawiono na rys. 1.

D. Dopuszczalny kąt zmiany kierunku przepływu-kryterium Howella

Howell [9] opracował wyniki swoich badań dla tzw. warunków nominalnych, odpowiadających kątowi zmiany kierunku przepływu $\xi^* = 0.8 \xi_{\max}$, gdzie ξ_{\max} jest kątem, przy którym mają już miejsce oderwanie przepływu. Dla warunków nominalnych dane Howella aproksymować można równaniem

$$\xi^* = 0.002 (128 - \psi_2)^2 (1.9 - 0.9 \sqrt{\frac{t}{l}}), \quad (10)$$

zaś kąt odpowiadający dopuszczalnemu obciążeniu zapisać można następująco:

$$\varepsilon_{\max} = 0.0025 (128 - \vartheta_2)^2 (1.9 - 0,9\sqrt{\frac{E}{I}}) \quad (11)$$

Krzywą obciążenia aerodynamicznego według tego równania przedstawiono na rys. 1.

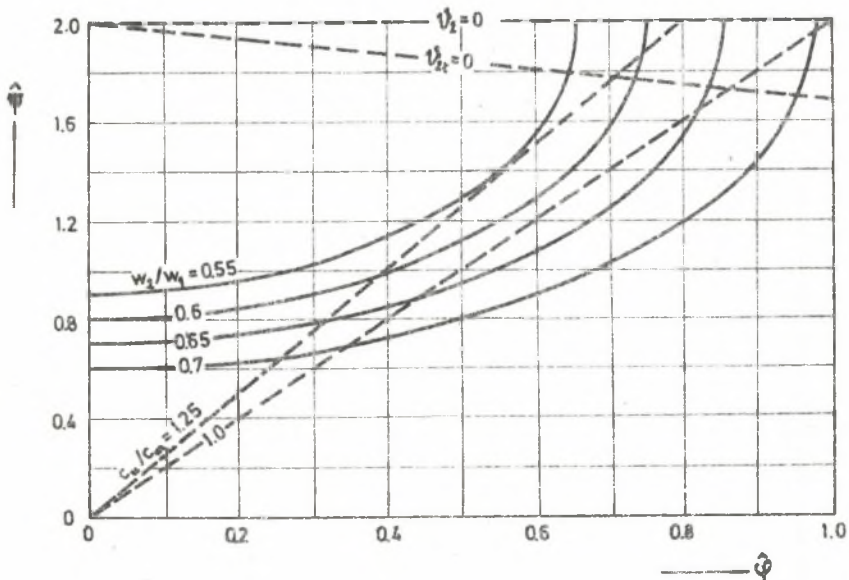
F. Kryterium de Hallera - stopień opóźnienia prędkości w palisadzie

De Haller [4] na podstawie badań tunelowych i badań układów przepływowych sprężarek stwierdza, że w przypadku gdy stopień opóźnienia prędkości wyrażany stosunkiem $w_2/w_1 \leq 0.72$, to warstwy przyscienne na ściankach ograniczających kanał przepływu narastają do takich grubości, że powodują jakby "zapychanie" się kanału, prowadząc nieuchronnie do oderwań. W maszynach jednostopniowych zaobserwowano, że najwyższą sprawność przepływu uzyskuje się w warunkach, gdy przekrój przy płaszczyźnie pracuje na granicy oderwania. Stąd też kryterium de Hallera formułuje się następująco:

- w pracy [15] $w_2/w_1 \geq 0.55 - 0.60$

- w pracy [5] $w_2/w_1 \geq 0.60 - 0.65$

Dopuszczalne obciążenie wynikające z kryterium de Hallera $w_2/w_1 = 0.55; 0.6; 0.65; 0.70$ przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2

F. Kryterium Strscheletzky'ego - warunek pracy poza rdzeniem wiru

Wyhodząc z wariacyjnego ujęcia zasad mechaniki Strscheletzky sformułowaliśmy teorię tworzenia się tzw. "martwego rdzenia wiru", która została uzupełniona badaniami Marciniowskiego [14]. Na podstawie tych badań, dopuszczalne obciążenie przy płaszczyźnie wirnika określone jest warunkiem:

$$- \text{ dla maszyn jednostopniowych } \frac{c_u}{c_m} \leq 1.25,$$

$$- \text{ dla maszyn wielostopniowych } \frac{c_u}{c_m} \leq 1,$$

co po zastosowaniu przyjętych oznaczeń prowadzi do nierówności, odpowiednio

$$\hat{\Psi} \leq 2.5\hat{\rho} \quad (12)$$

$$\hat{\Psi} \leq 2\hat{\rho} \quad (13)$$

Krzywe dopuszczalnych obciążeń przedstawiono na rys. 2.

G. Kryterium Liebleina - liczba dyfuzorowości palisady

Bazując na teorii warstwy przysciennej, przy założeniu pewnej idealizacji rozkładów prędkości po obu stronach profilu oraz wykorzystując liczne badania palisad NACA, Lieblein [12] utworzył liczbę dyfuzorowości palisady D charakteryzującą stopień obciążenia palisady. Badania wykazały, że powyżej $D = 0.55 - 0.6$ straty przepływu silnie rosną, co dało podstawy do sformułowania kryterium maksymalnego obciążenia

$$D \leq 0.55 - 0.6 \quad (14)$$

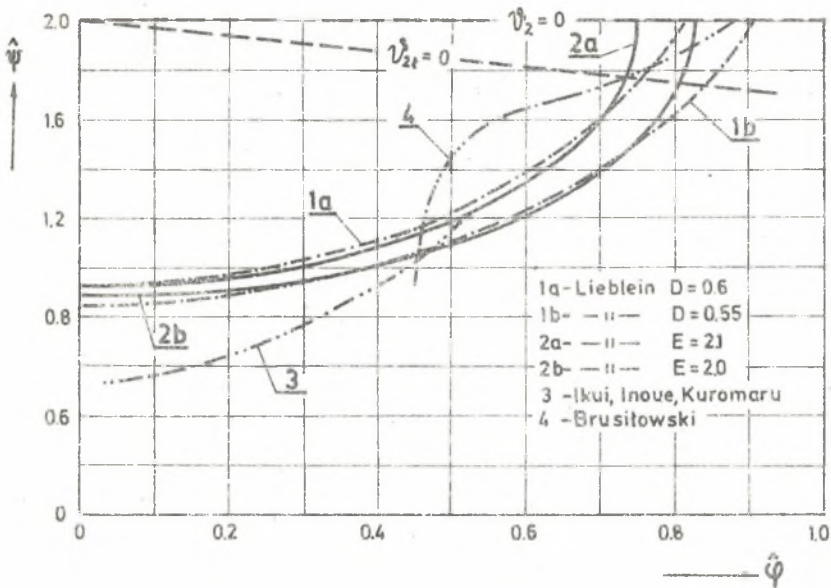
Krzywe obciążenia dla tych wartości kryterium D przedstawiono na rysunku 3.

Dalsze prace Liebleina nad metodą określenia zależności pomiędzy wielkościami geometrycznymi, kinematycznymi i stratami przepływu w palisadzie doprowadziły do sformułowania półempirycznej wartości, tzw. stopnia opóźnienia prędkości przepływu na wypukłej stronie profilu inaczej nazywanego ekwiwalentną liczbą dyfuzorowości [13]

$$E = \frac{w_{\max}}{w_2} \quad (15)$$

Według Liebleina w zakresie $E = 2 - 2.1$ straty gwałtownie rosną i dlatego uważa się, że dopuszczalne obciążenie łopatek palisady powinny odpowiadać warunkowi

$$E \leq 2 \div 2.1. \quad (16)$$



Rys. 3

Obciążenia aerodynamiczne stopnia wynikające z tego kryterium przedstawiono na rys. 3.

Uzupełniające badania autorów japońskich (Ikui i inni) [10] doprowadziły w zakresie kątów ustawienia palisady $\beta_p = 55 - 80^\circ$ do następującego uściślenia

$$E \leq 0.9 \exp \left[1 / (2 - 1.4 \cos \psi_m) \right] \quad (17)$$

Wobec nieznacznych różnic, w powyższym wzorze przyjęto $\psi_m \approx \beta_p$. Obciążenie dopuszczalne według tej zależności wykreślono na rys. 3.

H. Dopuszczalne obciążenie wg Brusilowskiego

Brusilowski w pracy [3] zagadnienie określenia dopuszczalnych parametrów obliczeniowych wentylatorów jednostopniowych rozpatrzył na drodze eksperymentalnej. W rezultacie przebadania szeregu wariantów konstrukcyjnych wentylatorów ustalił on, że krzywą dopuszczalnego obciążenia wyznaczona może być funkcją $E = f(\psi_1)$. Po aproksymacji warunek Brusilowskiego jest następujący:

$$E \leq \text{tg}^2 \psi_1 (8 - 10.6 \text{tg} \psi_1 + 5.45 \text{tg}^2 \psi_1 - \text{tg}^3 \psi_1) \quad (18)$$

Krzywą obciążenia wg tej zależności przedstawiono na rys. 3.

4. Kryteria przepływu w zastosowaniu do wieńca stojanowego

Dopuszczalne obciążenie aerodynamiczne stopnia wynikające z zastosowania kryteriów przepływu w odniesieniu do wieńca stojanowego może być przedstawione relacją

$$\hat{\Psi} \leq a \hat{\sigma} \quad (19)$$

gdzie a jest współczynnikiem zależnym od przyjętego kryterium. Rozpatrując te same, co i poprzednio, kryteria, należy mieć na uwadze pewne pogorszenie się warunków przepływu przez wieńiec stojanowy w stosunku do wirnikowego, co każe przyjmować wielkości kryterialne trochę mniejsze. W tabelicy 1 zestawiono współczynniki a równania (19) dla poszczególnych kryteriów.

Tabelica 1

K r y t e r i u m	a
Eckerta $c_{\sigma} \frac{1}{t} = 2$	2.309
De Hallera $w_2/w_1 = 0.65$	2.338
Howella	2.322
Traupela	6.654
Stiefela	2.435
Liebleina $D = 0.55$	2.203
Liebleina $E = 2.0$	2.35

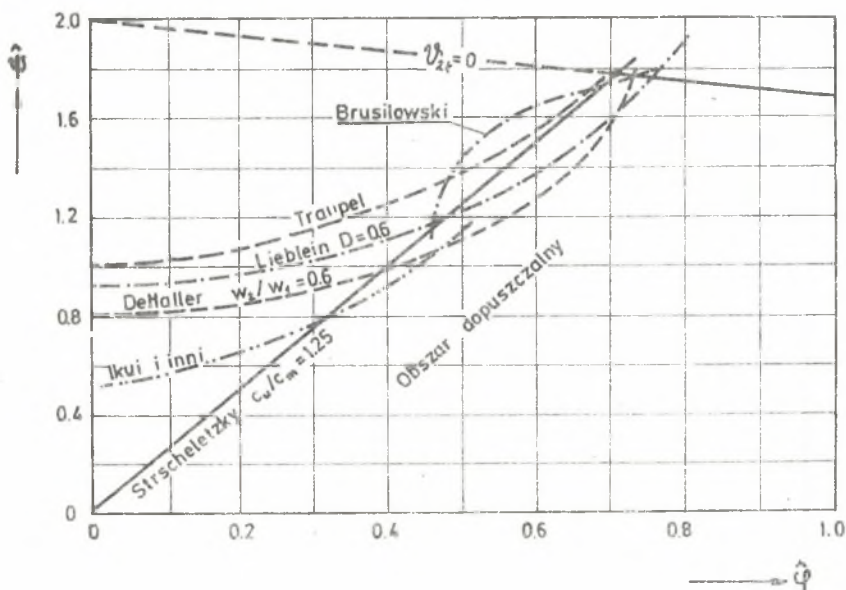
Z tabelicy 1 wynika, że wartości współczynnika z równania (19) leżą w zakresie 2.2 - 2.6, czyli odpowiadają dopuszczalnemu obciążeniu określonemu z kryteriów Strocheletzky'ego (12).

5. Wnioski końcowe

1. Krzywe dopuszczalnych obciążeń (rys. 2) wyznaczone według zalecanych w różnych pracach wartości kryterium de Hallera dają dosyć duże różnice w obszarach dopuszczalnych.

Najczęściej proponuje się $w_2/w_1 \geq 0.6$. Należy tu zaznaczyć, że spełnienie kryterium de Hallera zależy nie tylko od obciążenia aerodynamicznego profili przy płaszczyźnie, lecz także w dużej mierze od takich czynników jak stopień turbulencji, grubość warstwy przyściennej, których wpływ nie jest uwzględniony.

- Kryterium Eckerta (rys. 1) wyrażone wartościami liczby, aerodynamicznego obciążenia palisady jest zbyt globalne, by mogło dobrze oddać istotę charakteru przepływu przez palisadę. Szczególnie przy niższych wartościach $\hat{\sigma}$ dopuszcza ono zbyt wielkie wartości $\hat{\Psi}$. Najbardziej godną polecenia wydaje się tu wartość $c_r \frac{1}{T} = 1.8$.
- Kryteria Traupela i Stiefela praktycznie się pokrywają (rys. 1). W porównaniu z kryterium Eckerta lepiej kreślą one obszar dopuszczalnego obciążenia.
- Kryteria Liebleina wyrażone liczbami D oraz E dla podanych na rys. 3 wartości odpowiednio się pokrywają. Jako najbardziej reprezentatywną dla nich wydaje się wartość kryterium D = 0,6.
- W zakresie małych wartości $\hat{\sigma}$ (do 0,40) najbardziej wiarygodne wydaje się być krzywa określona na podstawie badań autorów japońskich (Ikui i inni) [10], natomiast w zakresie większych wartości $\hat{\sigma}$ (0,5-0,75) godną polecenia wydaje się być krzywa dopuszczalnych obciążeń według Traupela [17], potwierdzona także badaniami Brusilowskiego [3].
- Analizując rysunek 4, widoczne jest, że dopuszczalne obciążenie określone w warunkach przepływu poza "martwym rdzeniem wiru" $c_u/c_m \leq 1.25$ stanowi dobrą aproksymację pozostałych kryteriów.



Rys. 4.

7. Maksymalną liczbę teoretycznego przyrostu ciśnienia otrzymuje się w punkcie przecięcia się linii wyznaczonych z warunków $v_{2i} = 0$ oraz $c_u/c_m = 1.25$. Współrzędne tego punktu wynoszą: $\phi = 0.71$; $\psi_{\max} = 1.77$.

LITERATURA

- [1] Bernard T.: Wpływ parametrów kinematycznych i geometrycznych na sprawność wentylatorów osiowych. Prace ITC Łódź, z.26 (1965).
- [2] Broecker E.: Beziehungen zwischen den Einflussgrößen für den Kennwertzuordnung von Axialventilatoren. Heiz.-Lüft.-Haustechn. 11 (1960) Nr 7.
- [3] Brusilowski I.W.: Opredielenije priedelnych rasozetnych parametrov osiowych wentilatorow. Promyslennaja aerodynamika, Wypusk 32.
- [4] De Haller P.: Das Verhalten von Tragflügelgittern in Axialverdichtern und im Windkanal. VDI-Berichte Bd.3, 1955.
- [5] Eck B.: Ventilatoren, Springer Verlag 1972.
- [6] Eckert B.: Sprężarki osiowe i promieniowe. PNT, Warszawa 1959.
- [7] Hausenblas H.: Vergleich der verschiedenen Grenzbedingungen für den Innendurchmesser von Axialgebläsen. Heiz.-Lüft.-Haustechn. 14 (1963) Nr 5.
- [8] Hausenblas H.: Zur optimalen Auslegung von einstufigen Axialgebläsen. Konstruktion 23 (1971) H.4.
- [9] Howell A.R., Bonham R.P.: Overall and Stage Characteristics of Axial Flow Compressors. Proc.Inst.Mechn.Engrs.London 163 (1950).
- [10] Ikui T., Inoue M., Kurōmura M.: Researches on the Two-Dimensional Retarded Cascade. Bulletin of the JSME, 1972-1973, Vol. 15-16.
- [11] Laux H.: Zum Problem der optimalen Auslegung von Axialventilatoren. Heiz.-Lüft.-Haustechnik 12 (1961), Nr 6.
- [12] Lieblein S. i inni: Diffusion Factor for Estimation Losses and Limiting Blade Loadings in Axial Flow-Compressor Blade Elements NACA RME 53D01.
- [13] Lieblein S.: Loss and Stall Analysis of Compressor Cascades, Journal of Basic Engineering, vol.81, 1959.
- [14] Marciniowski H.: Optimalprobleme bei Axialventilatoren Heiz.-Lüft.-Haustechn. 8 ((1957).
- [15] Pfeleiderer C.: Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase. V Aufl., Springer Verlag 1961.
- [16] Stiefel W.: Betrachtungen zur Auslegung der Beschauelfelung von axial durchströmten Verdichtern. MTZ 20 (1959) H.9.
- [17] Traupel W.: Thermische Turbomaschinen, Springer Verlag 1966.

ГРАФИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ
ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ

Р е з ю м е

В работе делается сравнительный анализ предельной аэродинамической нагрузки лопаточных венцов осевых компрессорных турбомашин. Кривые предельных нагрузок выражены как функции обобщенных коэффициентов давления и расхода и представлены в виде графиков.

GRAPHICAL ANALYSIS OF LOADING CRITERIA
AXIAL FLOW COMPRESSOR STAGES

S u m m a r y

The paper presents a graphical analysis of the blade loading criteria for axial flow compressor stages. Curves of the critical loading are expressed as a function of the generalized blade loading and the flow coefficients.