ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1977

Seria: ENERGETYKA z. 60 Nr kol. 512

Tadeusz CHMIELNIAK

ZASTĘPCZE WSPÓŁCZYNNIKI WNIKANIA CIEPŁA DLA WIRNIKA TURBINY AKCYJNEJ

Streszczenie. W pracy wyprowadzono formuły do określania zastępczych współczynników wnikania ciepła na zewnętrznym obrzeżu tarczy wirnikowej i dla wału turbiny. Analizę przeprowadzono dla łopatek cylindrycznych i tarcz o stałej grubości. Wyniki zilustrowano odpowiednimi wykresami.

Ważniejsze oznaczenia

a_i - Współczynniki w określeniu liczby Biota dla powierzchni bocznych tarcz wirnikowych i = 1,2,

b - cięciwa profilu,

h - połowa grubości tarczy wirnikowej,

$\bar{h}$ - $\frac{h}{l}$,

l - wysokość łopatki,

$m = \sqrt{Bi_1 \frac{\bar{P}}{\bar{\lambda}\bar{A}}}$,

n - liczba łopatek,

r - promień tarczy,

$\bar{r}$ = $\frac{r}{r_1}$,

r_1 - promień zewnętrzny tarczy,

r_o - promień wewnętrzny tarczy,

$\bar{r}_o$ - $\frac{r_o}{l}$,

t - temperatura łopatki,

t_o - temperatura odniesienia,

t - podziałka palisady,

$\bar{t}$ - $\frac{t}{b}$,

x - współrzędna wzdłuż łopatki,

$\bar{x}$ - $\frac{x}{l}$,

v - objętność właściwa,

w - prędkość względna,

w_1, w_2 - wartości prędkości przed i za wieńcem,

$w_{śr} = \frac{w_1 + w_2}{2}$,

A - przekrój poprzeczny łopatki,

$\bar{A} = \frac{A}{l^2}$,

Bi - liczba Biota,

$Bi_1 = \frac{\alpha_1 l}{\lambda_o}$ - liczba Biota na powierzchni łopatki,

$Bi_{2,3} = \frac{\alpha_{2,3} r_1}{\lambda_o}$ - liczby Biota na powierzchniach bocznych tarczy wirnikowej,

$Bi_1 = \frac{\alpha'_1 \cdot r_1}{\lambda_o}$ - liczba Biota na powierzchni dolnej kanału międzyłopatkowego,

$Bi_{łz} = \frac{\alpha_{łz} r_1}{\lambda_o}$ - zastępcza liczba Biota na powierzchni zewnętrznej tarczy,

$Bi_{wz} = \frac{\alpha_{wz} r_1}{\lambda_o}$ - zastępcza liczba Biota na powierzchni wewnętrznej tarczy (wału),

C_i - stałe $i = 1,2$,

D_i - stałe $i = 1,2$,

H - szerokość tarczy na promieniu r_1,

$\bar{H} = \frac{H}{r_1}$,

P - obwód łopatki,

$\bar{P} = \frac{P}{l}$,

S' - powierzchnia (rys. 2),

$\bar{S} = \frac{S'}{l^2}$,

T - temperatura tarczy,

T_p^* - temperatura spoczynkowa płynu, omywająca dolną powierzchnię kanału międzyłopatkowego,

α_1 - średni współczynnik wnikania ciepła dla łopatki,

α'_2 - średni współczynnik wnikania ciepła dla dolnej powierzchni kanału międzyłopatkowego,

α_2, α_3 - współczynniki wnikania ciepła dla powierzchni bocznych tarczy,

$\alpha_{łz}$, α_{wz} - zastępcze współczynniki wnikania ciepła dla powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej tarczy,

β_1, β_2 - geometryczne kąty wejścia i wyjścia,

ϑ - $\frac{t}{t_o}$

$\vartheta_p^* = \frac{T_p}{t_o}$,

λ - współczynnik przewodzenia,

$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_ł}{\lambda_o}$,

$\bar{\lambda}_d = \frac{\lambda_d}{\lambda_o}$,

$\bar{\lambda}_p = \frac{\lambda_p}{\lambda_o}$,

μ - molekularny współczynnik lepkości,

ν - kinematyczny współczynnik lepkości,

η - opór cieplny zamocowania łopatki,

$\Theta = \frac{T}{t_o}$,

$\Theta_{pi} = \frac{T_{pi}}{t_o}$, $(i = 1,2)$

Indeksy

d - tarcza wirnikowa,

i - liczba porządkowa $(i = 1,2,3)$

ł - łopatka,

o - stan odniesienia,

p - para,

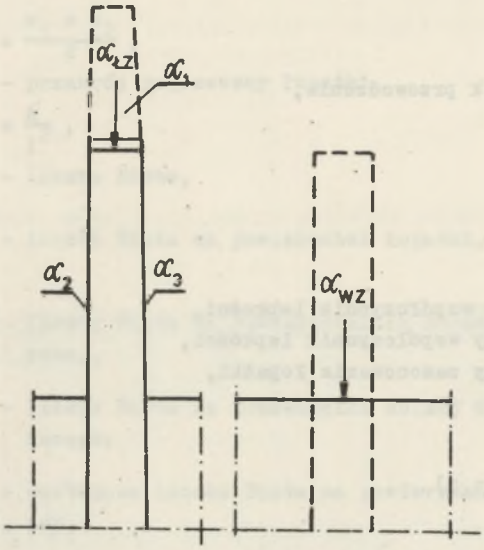
śr - wartość średnia,

$(\ )^*$ - stan spiętrzenia,

$(\bar{\ })$ - wielkości bezwymiarowe.

1. Wstęp

Wirniki turbin posiadają złożoną geometrię. Utrudnia to sformułowanie i rozwiązanie dla nich zadań określenia pól temperatur, naprężeń termicznych oraz wydłużeń cieplnych. Zadania te można znacznie uprościć przez określenie zastępczych współczynników wnikania ciepła. W pracy wprowadzono współczynniki wnikania ciepła uwzględniające udział w wymianie ciepła łopatek i tarcz wirnikowych (rys. 1). Do obliczeń $\alpha_{łz}$ i α_{wz} przyjęto model fizyczny zakładający zmienność współczynnika wnikania $\alpha_2 = f_1(r)$, $\alpha_3 = f_2(r)$. Temperaturę płynu omywającego tarczę oraz temperaturę czynnika i współczynnik α_1 wzdłuż wysokości łopatki przyjęto jako niezmienne. Założenia te, dla krótkich cylindrycznych łopatek, dostatecznie dokładnie oddają rzeczywisty przebieg procesu wymiany ciepła w tarczach wirnikowych i łopatkach.



Rys. 1. Schemat do określania $\alpha_{łz}$ i α_{wz}

2. Równania przewodzenia i ich rozwiązania

Jednowymiarowe ustalone pole temperatur w łopatkach i tarczy opisuje układ równań:

$$\frac{1}{\bar{A}}\frac{d}{d\bar{x}}\left(\bar{A}\,\bar{\lambda}\,\frac{d\vartheta}{d\bar{x}}\right) - Bi_1\,\bar{P}\,\frac{1}{\bar{A}}\left(\vartheta - \vartheta_p\right) = 0\,, \tag{1}$$

$$\bar{\lambda}_d\,\frac{1}{\bar{r}}\,\frac{d}{d\bar{r}}\left(\bar{r}\,\bar{h}\,\frac{d\,\Theta}{d\bar{r}}\right) - \frac{1}{2}\left[Bi_2\left(\Theta - \Theta_{p1}\right) + Bi_3\left(\Theta - \Theta_{p2}\right)\right] = 0 \tag{2}$$

Równanie (1) określa rozkład temperatury w łopatce, a równanie (2) w tarczy. Zakładając cylindryczność łopatki, stałą grubość tarczy oraz, że:

$$Bi_i = a_i\,\bar{r}^n \text{ i } \Theta_{pi} = \text{idem } (i = 1,2)$$

łatwo otrzymać rozwiązanie równań (1) i (2) w postaci zamkniętej. Mają one postać:

a) łopatka

$$\vartheta = \left[-\frac{m}{2}\int \vartheta_p(\bar{x})\exp(-m\,\bar{x})\,d\bar{x} + D_1\right]\exp(m\,\bar{x}) +$$

$$+ \left[\frac{m}{2}\int \vartheta_p(\bar{x})\exp(m\,\bar{x})\,d\bar{x} + D_2\right]\exp(-m\,\bar{x}),$$

gdzie:

$$m^2 = \frac{P}{\lambda \bar{A}} Bi_1 .$$

b) tarcza

$$\Theta = \Theta_{śr} + C_1 I_o(z) + C_2 K_o(z) , \qquad (4)$$

gdzie:

I_o , K_o - zmodyfikowane funkcje Bessela pierwszego i drugiego rodzaju,

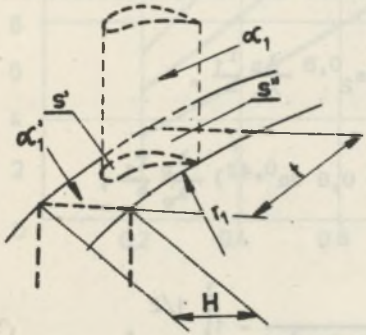
$$z = \zeta r^{\frac{n}{2}+1} ,$$

$$\zeta = \frac{1}{1+\frac{n}{2}} \sqrt{\frac{1}{\bar{h}} \frac{1}{\lambda_d} \frac{a_1 + a_2}{2}} ,$$

$$\Theta_{śr} = \frac{a_1 \Theta_{p1} + a_2 \Theta_{p2}}{a_1 + a_2}$$

3. Zastępczy współczynnik wnikania ciepła $\alpha_{łz}$

Zgodnie z oznaczeniami podanymi na rys. 2 strumień ciepła wnikający na zewnętrznym obrzeżu tarczy jest równy



Rys. 2. Współczynniki wnikania w układzie łopatkowym

$$Q_ł = \lambda \frac{\partial t}{\partial x}(0)\, n\, \eta_1 S' + (2\pi r_1 H - n S')\, \alpha_1' \left[T_p - T(r_1)\right] \eta_2 . \qquad (5)$$

Porównując równanie (5) z wyrażeniem definiującym współczynnik $\alpha_{łz}$

$$Q_ł = 2\pi r_1 H \left[T_p^* - T(r_1)\right] \alpha_{łz} , \qquad (6)$$

otrzymujemy następujący związek

$$\alpha_{łz} = \frac{\lambda \frac{\partial t}{\partial x}(0)\, n\, \eta_1 S'}{2\pi r_1 H \left[T_p^* - T(r_1)\right]} + \left(1 - \frac{nS'}{2\pi r_1 H}\right) \alpha_1' \eta_2 . \qquad (7)$$

W formie bezwymiarowej ma on postać

$$Bi_{łz} = \frac{\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial \bar{x}}(0)\, n\, \eta_1\, \bar{S}'}{2\pi \bar{H}\left[\vartheta_p^* - \Theta(1)\right]\left(\frac{r_1}{l}\right)} + \left[1 - \frac{n\, \bar{S}'}{2\pi \bar{H}\left(\frac{r_1}{l}\right)^2}\right] Bi_1\, \eta_2 . \quad (8)$$

Dla ostatecznego określenia zastępczej liczby Biota $Bi_{łz}$ należy wyeliminować z równań (7) i (8) wielkości: $\frac{\partial \vartheta}{\partial x}(0)$, $\Theta(1)$. Określamy je z warunków brzegowych:

$$x = 0 \qquad \vartheta = \Theta(1)$$

$$\bar{x} = 1 \qquad \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0$$

Po wyznaczeniu stałych D_1 i D_2 i przeprowadzeniu przekształceń otrzymujemy do określenia $Bi_{łz}$ zależność

$$Bi_{łz} = \left[1 - \frac{n\, \bar{S}'}{2\pi \bar{H}\left(\frac{r_1}{l}\right)^2}\right] Bi_1'\, \eta_2 - \frac{m\left[\exp(-2m) - 1\right] \bar{\lambda}\, n\, \eta_1\, \bar{S}}{2\bar{H}\left(\frac{r_2}{l}\right)\left[1 + \exp(-2m)\right]} \quad (9)$$

W liczby Bi_1 i m wchodzą współczynniki wnikania α_1' na powierzchni dolnej kanału międzyłopatkowego i współczynnik α_1 na powierzchni łopatki. Dyskusje stosowanych zależności obliczeniowych dla tych współczynników podano w [1,2]. W dalszych obliczeniach wykorzystano uniwersalne zależności:

$$Bi_1' = \frac{\alpha_1' r_1}{\lambda_o} = 0{,}032\,(1 + 0{,}7\, Sg^{-0{,}54})\, Re_2^{0{,}8}\, \frac{\lambda_p}{\lambda_o}\frac{r_1}{b} ,$$

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 r_1}{\lambda_o} = 0{,}206\, Re^{0{,}66}\, Sg^{-0{,}58}\,(1 + 0{,}8\, Sn^{0{,}42})\, \frac{\lambda_p}{\lambda_o}\frac{r_1}{b} ,$$

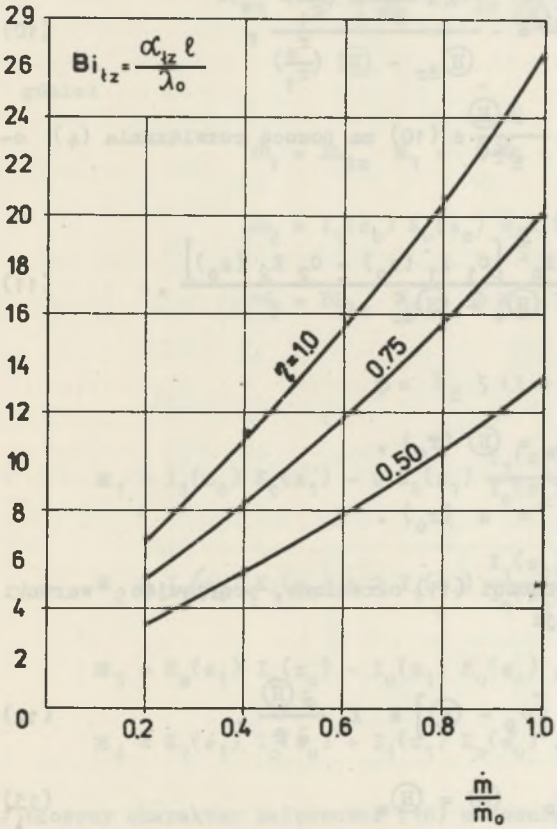
gdzie:

$$Sg = \frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_2}\left[\frac{2\bar{b}}{\bar{t}\sin(\beta_1 + \beta_2)\cos^2\left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2}\right)} - 1\right]^{1/2} ,$$

$$Sn = \frac{U\, l}{w_2\, D} , \qquad Re_2 = \frac{w_2 b}{\nu_2} , \qquad Re = \frac{w_{śr}\, b}{\nu} .$$

Liczba m jest zależna od geometrii, materiału łopatki i średniego współczynnika wnikania α_1 (Bi_1). Dla warunków kinematycznych i termodynamicznych w stopniach wysokoprężnych i średnioprężnych turbin wielkiej mocy liczby m w całym zakresie obciążenia przyjmują wartości $m > 8$. Można więc zależność (9) uprościć do postaci

$$Bi_{łz} = \left[1 - \frac{n\,\bar{S}'}{2\pi\,\bar{H}\left(\frac{r_1}{l}\right)^2}\right] Bi'_1 \quad \eta_2 + \frac{m\bar{\lambda}\;n\;\eta_1\;\bar{S}'}{2\pi\;\bar{H}\;\frac{r_1}{l}}\,. \tag{9a}$$



Rys. 3

Zależność $Bi_{łz} = \frac{\alpha_{łz}\,l}{\lambda_o} = f\left(\frac{\dot{m}}{m_o}, \eta\right)$

W oparciu o związki (9a) wykonano obliczenia zastępczej liczby Biota $Bi_{łz}$ łopatek dla geometrii wybranego stopnia części wysokoprężnej turbiny 13K215 przy zmiennym obciążeniu stopnia. Rezultaty przedstawiono na rys. 3.

Obliczenia przeprowadzono dla trzech wartości liczby

$$\eta = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2}\,,$$

charakteryzującej opór cieplny zamocowania łopatki w tarczy wirnikowej. Z postaci zależności (5) wynika, że opór cieplny może być określony jako stosunek

$$\eta = \frac{R_m}{R_z}\,,$$

gdzie:

R_m - opór cieplny materiału,

R_z - opór cieplny zamocowania.

Rozpatrywana liczba dla każdego typu zamocowania powinna być określona oddzielnie. Wycinkowe badania tego problemu wskazują, że opór cieplny η może przyjmować wartości w stosunkowo szerokim zakresie. Dla zamocowania typu jodełkowego $\eta \cong 0{,}7$ [3].

4. Określenie zastępczej liczby Biota na powierzchni wewnętrznej tarczy Bi_{wz}

Zastępczy współczynnik wnikania ciepła α_{wz} zdefiniowano zależnością

$$Bi_{wz} = \frac{\alpha_{wz}\, r_1}{\lambda_o} = - \frac{\bar{\lambda} d \frac{\partial \Theta}{\partial \bar{r}} \left(\frac{r_o}{r_1}\right)}{\Theta_{śr} - \Theta \left(\frac{r_o}{r_1}\right)} \,; \tag{10}$$

Po wyeliminowaniu wyrażenia $\frac{\partial \Theta}{\partial \bar{r}}$ z (10) za pomocą rozwiązania (4) otrzymano

$$Bi_{wz} = \frac{\bar{\lambda} d\, \zeta \left(1 + \frac{n}{2}\right) \bar{r}_o^{\frac{n}{2}} \left[C_1 I_1(z_o) - C_2 K_2(z_o)\right]}{\Theta_w - \Theta_{śr}} \,, \tag{11}$$

gdzie:

$$\Theta_w = \Theta(\bar{r}_o) \,,$$

$$z_o = z(r_o) \,.$$

Stałe C_i występujące w zależnosci (11) określano, przyjmując warunki brzegowe, dla tarczy wirnikowej:

$$\bar{r} = 1 \quad Bi_{łz} \left[\vartheta_p - \Theta\right] = \lambda_d \frac{\partial \Theta}{\partial \bar{r}} \,, \tag{12}$$

$$\bar{r} = r_o \quad \Theta = \Theta_w \tag{13}$$

Po przekształceniach otrzymano zależności określające stałe:

$$C_1 = \frac{(\Theta_w - \Theta_{śr}) \left[\gamma_2 I_o(z_o) - 2\gamma_1 K_o(z_o) - Bi_{łz}(\vartheta^*_p - \Theta_{śr}) I_o(z_o) K_o(z_o)\right]}{I_o(z_o)\left[\gamma_2 I_o(z_o) - \gamma_1 K_o(z_o)\right]} \,, \tag{14}$$

$$C_2 = \frac{Bi_{łz}(\vartheta^*_p - \Theta_{śr}) I_o(z_o) - (\Theta_w - \Theta_{śr})\gamma_1}{\gamma_2 I_o(z_o) - \gamma_1 K_o(z_o)} \,, \tag{15}$$

gdzie:

$$\gamma_1 = Bi_{łz}\, I_o(z_1) + \bar{\lambda}_d\, \zeta\,(1 + \tfrac{n}{2})\, I_1\,(z_1)\,,$$

$$\gamma_2 = Bi_{łz}\, K_o(z_1) - \bar{\lambda}_d\, \zeta\,(1 + \tfrac{n}{2})\, K_1\,(z_1)\,.$$

Po wprowadzeniu (14) i (15) do (11) otrzymano ostatecznie

$$Bi_{wz} = r_o^{\frac{n}{2}} \left[\frac{\omega_1}{\omega_3} - Bi_{łz} \frac{\vartheta_p^{\tau} - \Theta_{śr}}{\Theta_{śr} - \Theta_w} \frac{\omega_2}{\omega_3} \right], \tag{16}$$

gdzie:

$$\omega_1 = Bi_{łz}\, \varkappa_1 - \Phi \varkappa_2\,,$$

$$\omega_2 = I_1(z_o)\, K_o(z_o) + K_1(z_o)\, I_o(z_o)\,,$$

$$\omega_3 = Bi_{łz}\, \varkappa_3 - \Phi\, \varkappa_4\,,$$

$$\Phi = \bar{\lambda}_d\, \zeta\,(1 + \tfrac{n}{2})\,, \tag{17}$$

$$\varkappa_1 = I_1(z_o)\, K_o(z_1) - 2\, I_o(z_1) \frac{I_1(z_o)}{I_o(z_o)} K_o(z_o) + I_o(z_1)\, K_1(z_o)\,,$$

$$\varkappa_2 = I_1(z_o)\, K_1(z_1) + 2\, I_1(z_1) \frac{I_1(z_o)}{I_o(z_o)} K_o(z_o) - I_1(z_1)\, K_1(z_o)\,,$$

$$\varkappa_3 = K_o(z_1)\, I_o(z_o) - I_o(z_1)\, K_o(z_o)\,,$$

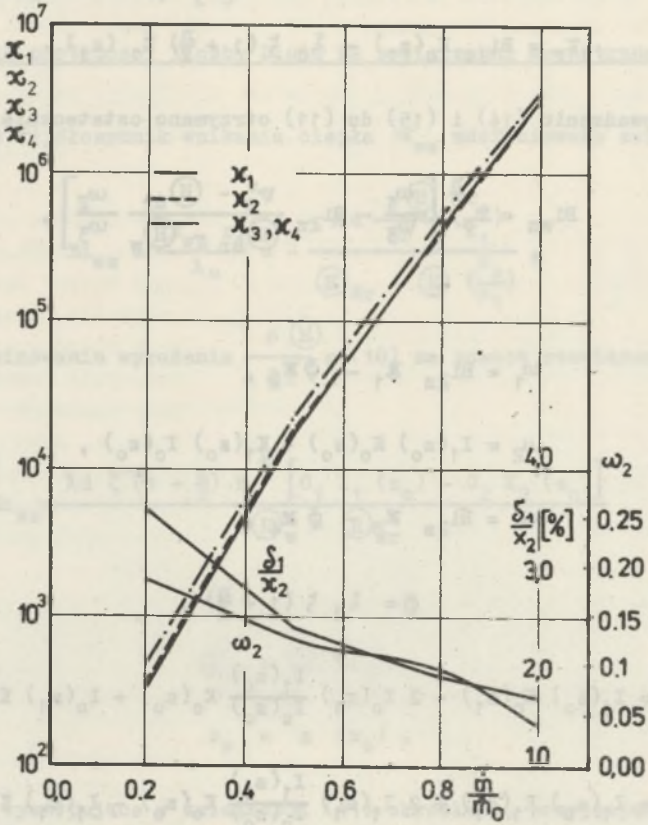
$$\varkappa_4 = K_1(z_1)\, I_o(z_o) + I_1(z_1)\, K_o(z_o)\,.$$

Złożony charakter zależności (16) utrudnia jej zastosowanie w obliczeniach praktycznych. Możliwości uproszczeń poszukiwano analizując wartości poszczególnych jej członów dla typowych geometrii i warunków pracy charakterystycznych dla turbin akcyjnych. Rezultaty tych obliczeń podane na rys. 4 wskazują, że można przyjąć:

$$-\varkappa_1 = \varkappa_2$$

$$-\varkappa_3 = \varkappa_4$$

Błąd tych założeń nie przekracza 3,5% (na rys. 4 zaznaczono tylko przebieg krzywej $\frac{|\varkappa_1| - \varkappa_2}{\varkappa_2} = \frac{\delta_1}{\varkappa_2}$).



Rys. 4. Zależność $\varkappa_i = f\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_o}\right)$

$$\omega_2 = f\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_o}\right), \quad \frac{\delta_1}{\varkappa_2} = \frac{|\varkappa_1| - \varkappa_2}{\varkappa_2} = f\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_o}\right)$$

Wykorzystując te uproszczenia zapisano zależność (16) w postaci

$$Bi_{wz} = \Phi\, r_o^{\frac{n}{2}} \left\{ \frac{\varkappa_1}{\varkappa_3} + \frac{v_b^* - \Theta_{śr}}{\Theta_{śr} - \Theta_w} \frac{\omega_2}{\omega_3} \frac{1}{(1 + \Phi / Bi_{kz})} \right\} . \tag{18}$$

Rozpatrując drugi człon w nawiasie związku (18) można na podstawie danych przedstawionych na rys. 4 zauważyć, że wobec $\omega_2 \ll \varkappa_1$ - człon ten będzie niewielki w stosunku do $\frac{\varkappa_1}{\varkappa_3}$. Po jego pominięciu otrzymano:

$$Bi_{wz} = \Phi\, r_o^{\frac{n}{2}} \frac{\varkappa_1}{\varkappa_3}. \tag{19}$$

W tej postaci Bi_{wz} nie zależy od $Bi_{łz}$, czyli od warunków wymiany ciepła na powierzchni zewnętrznej tarczy wirnikowej. Fakt ten można wytłumaczyć małym stosunkiem powierzchni wymiany ciepła na obrzeżu zewnętrznym do powierzchni bocznych tarczy. Postać zależności (19) i określeń (17) wskazuje, że wpływ liczby $Bi_{łz}$ będzie zauważalny tylko w przypadkach niewielkich wartości z_o i różnicy $z_1 - z_o$. Sytuacja taka będzie charakterystyczna dla małych stosunków $\frac{r_1}{r_o}$, szerokich tarcz oraz dla niewielkich wartości $\frac{\bar{\lambda}_p}{(\nu_p\ \mu_p)^{0,8}}$ (niskich parametrów pary).

Stosunek $\frac{\varkappa_1}{\varkappa_3}$ z dostateczną dokładnością dla $z_1 - z_o > 3$ można zapisać w postaci

$$\frac{\varkappa_1}{\varkappa_3} = 2\,\frac{I_1(z_o)}{I_o(z_o)} - \frac{K_1(z_o)}{K_o(z_o)}.$$

Z rys. 5, na którym naniesiono dokładny i przybliżony przebieg funkcji $\frac{\varkappa_1}{\varkappa_3} = f(z_o)$, wynika możliwość dalszego uproszczenia zależności (19).

Dla $z_o \gg 5$ stosunek $\frac{\varkappa_1}{\varkappa_3}$ można bowiem wyrazić przez

$$\frac{\varkappa_1}{\varkappa_3} = 2\,\frac{8z_o - 3}{8z_o + 1} - \frac{8z_o + 3}{8z_o - 1}. \tag{20}$$

Zależność (20) otrzymano aproksymując funkcje Bessela formułami [4]:

$$I_o(z_o) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z_o}}\exp(z_o)\left(1 + \frac{1}{8z_o}\right),$$

$$I_1(z_o) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z_o}}\exp(z_o)\left(1 - \frac{3}{8z_o}\right),$$

$$K_o(z_o) = \sqrt{\frac{\pi}{2\,z_o}}\,\exp(z_o)\left(1 - \frac{1}{8\,z_o}\right),$$

$$K_1(z_o) = \sqrt{\frac{\pi}{2\,z_o}}\,\exp(z_o)\left(1 + \frac{3}{8\,z_o}\right).$$

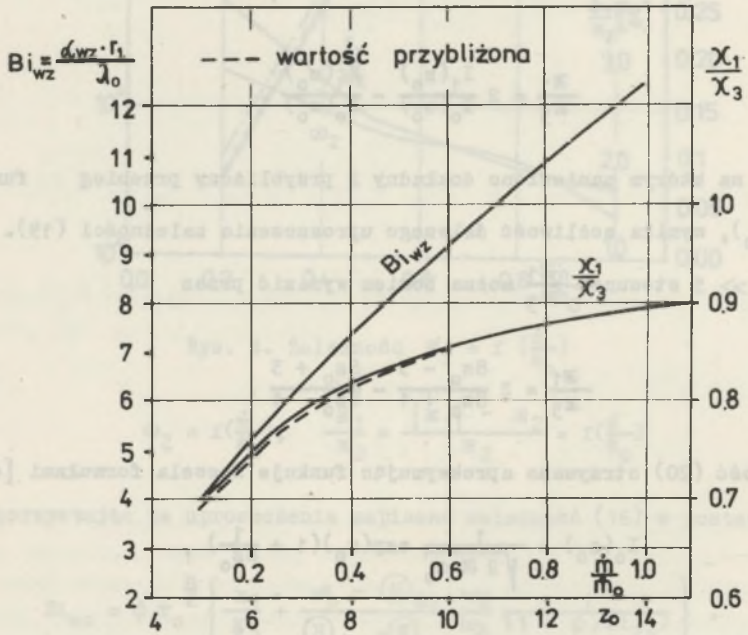
Jeżeli do określenia liczby Biota charakteryzującej wymianę ciepła na powierzchniach bocznych tarczy wirnikowej przyjąć związek

$$Bi_d = a_{śr}\, r^{0,6}, \tag{21}$$

gdzie:

$$a_{śr} = \frac{a_1 + a_2}{2},$$

$$a_i = 0{,}0217\, Re_i^{0,8} \qquad \bar{\lambda}_{p_i} = 2{,}157 \cdot r_i^{1,6}\, \frac{\bar{\lambda}_p}{(\nu_p\, \mu_p)^{0,8}},$$



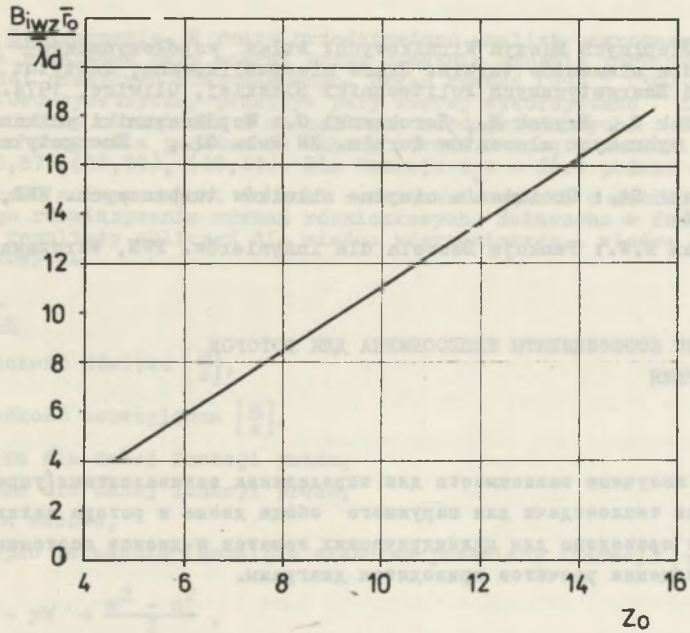
Rys. 5

Zależności: $Bi_{wz} = \frac{\alpha_{wz}\, r_o}{\lambda_o} = f(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_o})$, $\frac{\varkappa_1}{\varkappa_3} = f(z_o)$

to z uwzględnieniem (20) do obliczeń Bi_{wz} otrzymano zależność

$$Bi_{wz} = 1{,}3\ \bar{\lambda}_d \frac{z_o}{\bar{r}_o} \left(2\ \frac{8\ z_o - 3}{8\ z_o + 1} - \frac{8\ z_o + 3}{8\ z_o - 1}\right). \tag{22}$$

Rezultaty obliczeń Bi_{wz} dla stopnia przy zmiennym obciążeniu pokazano na rys. 5. Uniwersalną zależność $\frac{B_{wz}\ r_o}{\bar{\lambda}_d}$ zilustrowano na rys. 6.



Rys. 6. Zależność $Bi_{wz} \frac{\bar{r}_o}{\bar{\lambda}_d} = \frac{\alpha_{wz}\ r_o}{\lambda d} = f(z_o)$

5. Wnioski i uwagi końcowe

Zastępcza liczba $Bi_{łz}$ opisana zależnością (9a) jest silnie uzależniona od stopnia obciążenia danego wieńca łopatkowego. Wprawdzie analiza zastępczego współczynnika dla wału turbiny dowodzi, że jest on praktycznie niezależny od wartości $Bi_{łz}$, to stosunkowo dokładne jej określenie ma jednak istotne znaczenie dla badań stanu termicznego samej tarczy wirnikowej.

Zależność (22) otrzymana ze ścisłej zależności (16) umożliwia szybkie określenie Bi_{wz} z dostateczną do celów praktycznych dokładnością. Różnice

między wynikami uzyskiwanymi z (16) i (22) nie przekraczają w badanym zakresie zmienności z_0 1,5 - 3,5%. Różnica ta maleje ze wzrostem z_0.

Końcowa zależność (22) uzależnia zastępczą liczbę Biota tylko od jednej zmiennej z_0, ujmującej wpływ geometrii i parametrów termodynamicznych. Jest to znaczna zaleta związku (22) umożliwiająca szybkie modelowanie warunków brzegowych dla wału w miejscu występowania tarcz. To z kolei znacznie upraszcza sformułowanie warunków brzegowych dla takich badań jak określenie pól temperatur i wydłużeń cieplnych.

LITERATURA

[1] Zespół Cieplnych Maszyn Wirnikowych: Atlas współczynników wnikania ciepła dla elementów turbin. Praca nieopublikowana, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1974.

[2] Chmielniak T., Prysok E., Sorokowski G.: Współczynniki wnikania ciepła dla wybranych elementów turbin. ZN Pol. Sl., Energetyka z. 54, 1976.

[3] Wiśniewski St.: Obciążenie cieplne silników turbinowych. WKŁ, Warszawa, 1974.

[4] McLachlan N.W.: Funkcje Bessela dla inżynierów. PWN, Warszawa, 1964.

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ РОТОРОВ АКТИВНЫХ ТУРБИН

Р е з ю м е

В работе получено зависимости для определения эквивалентных(усредненных) коэффициентов теплоотдачи для наружного обода диска и ротора активной турбины. Анализ проведено для цилиндрических лопаток и дисков постоянной толщины. Для облегчения расчётов приводятся диаграмы.

SUBSTITUTE SURFACE - FILM CONDUCTANCES FOR THE ROTOR OF THE IMPULSE TURBINE

S u m m a r y

Formulae were deriwed to enable a determination of substitute surface - film conductances on the outside edge of the rotating disc and on the turbine shaft. The analysis was corried out in reference to cylindrical blades and the rotating disc of a constant thickness, and its results were presented in diagrams below.