

Andrzej WITKOWSKI

PRZYBLIŻONE RÓWNANIA PRZEPŁYWU W OBSZARZE WARSTWY PRZYŚCIENNEJ
NA OSIOWOSYMETRYCZNYCH ŚCIANKACH OGRANICZAJĄCYCH
ŁOPATKOWY WIENIEC SPRĘŻAJĄCY

Streszczenie. Wykorzystując model obliczeń składowych osiowych wielkości charakteryzujących narastanie warstwy granicznej na osiowosymetrycznych ściankach ograniczających wieniec sprężający, zaproponowany przez Stratforda [1], wyprowadzono uproszczone równanie przepływu umożliwiające wyznaczenie również składowych obwodowych wielkości warstwy granicznej. W równaniach uwzględniono grubość warstwy zmniejszenia siły łopatkowej zdefiniowanej w pracy [2]. Określono równania uzupełniające i przeanalizowano sposoby wyznaczenia koniecznych do pełnego rozwiązania równań parametrów doświadczalnych. Uzyskana postać równań jest dogodna do numerycznego obliczenia podstawowych wielkości pierścieniowej warstwy granicznej.

1. Wstęp

Dla uzyskania możliwie pełnego obrazu struktury przepływu w stopniu sprężającym przyjmuje się uproszczony model quasi - rzeczywistego przepływu, w którym rozwiązuje się cztery niezależne zagadnienia:

1. Zagadnienie tzw. przepływu quasi - trójwymiarowego, którego rozwiązanie umożliwi uzyskanie prędkości i ciśnień w przepływie głównym niezakłóconym wpływem warstw przyściennych, kolejno w przekroju merydionalnym stopnia oraz w kanałach międzyłopatkowych na wybranych powierzchniach osiowosymetrycznych.

2. Zagadnienie przepływu w warstwie granicznej tworzącej się na osiowosymetrycznych ściankach zewnętrznych stopnia i zwanej w dalszym ciągu w skrócie "pierścieniową warstwą graniczną". W rozwiązywaniu tego zagadnienia wykorzystuje się rozkłady prędkości i ciśnień uzyskane z rozwiązania quasi - trójwymiarowego modelu przepływu.

3. Znajomość rozkładów prędkości i ciśnień na profilach łopatkowych umożliwia z kolei określenie parametrów tzw. profilowej warstwy przyściennej.

4. Ostatnim zagadnieniem jest określenie wielkości charakteryzujących przepływy wtórne występujące w efekcie narastania warstw przyściennych pierścieniowych i profilowej oraz występowania przecieków nadłopatkowych.

Zagadnienie pierwsze rozwiązane zostało między innymi przez autora w pracy [3], [4], [5] w oparciu o tzw. model "krzywizny linii prądu".

Niniejszą pracę poświęcono rozwiązaniu zagadnienia drugiego. Zagadnienie przepływu w pierścieniowej warstwie granicznej tworzącej się wzdłuż osłony zewnętrznej i wzdłuż piasty stopnia stanowi przedmiot zainteresowań coraz większej liczby autorów [1], [2], [6], [7], [8]. Wynika to z dużego wpływu zjawisk występujących w obszarze tej warstwy na sprawność i przebieg charakterystyk aerodynamicznych stopni sprężających zarówno w obliczeniowym jak i pozaobliczeniowych punktach ich pracy. Obok strat wynikających z występowania tarcia przyściennego dodatkowe straty wynikają ze zmiany kątów natarcia na wieńce łopatkowe zarówno w obszarze warstwy przyściennej jak również w obszarze przepływu głównego. Zmiany kątów natarcia w obszarze strumienia głównego wywołane są zmianami profilu prędkości na skutek przewężenia czynnego przekroju przepływowego określonego przez miarę liniową zmniejszenia natężenia przepływu.

2. Model pierścieniowej warstwy granicznej

Zdecydowanie trójwymiarowy charakter zjawisk występujących w warstwie granicznej przy ściankach ograniczających kanał łopatkowy sprawia, że ogólne analityczne rozwiązanie problemu jest niemożliwe. W celu uproszczenia zagadnienia przyjmuje się fikcyjny model tzw. "pierścieniowej warstwy przyściennej" oparty na dwóch zasadniczych założeniach:

- 1) pomija się wpływ przepływów wtórnych,
- 2) pomija się oddziaływanie profilewej warstwy granicznej w narożach utworzonych przez przecięcie osiowoosymetrycznej ścianki ograniczającej kanał łopatkowy powierzchnią łopatki.

Zakładamy również, że grubość warstwy granicznej jest mała w porównaniu z promieniami zewnętrznej i wewnętrznej ścianki ograniczającej przepływ: $\delta/r \ll 1$.

Przy wyprowadzeniu równań przepływu w pierścieniowej warstwie przyściennej wykorzystany został opracowany przez Stratforda [1] model uwzględniający jedynie składowe osiowe wielkości charakteryzujących przepływ w tym obszarze. Stratford przyjął przy tym założenie, że składowa osiowa siła łopatkowej ma wartość stałą w obszarze warstwy przyściennej i równą wartości na granicy warstwy przyściennej i strumienia głównego.

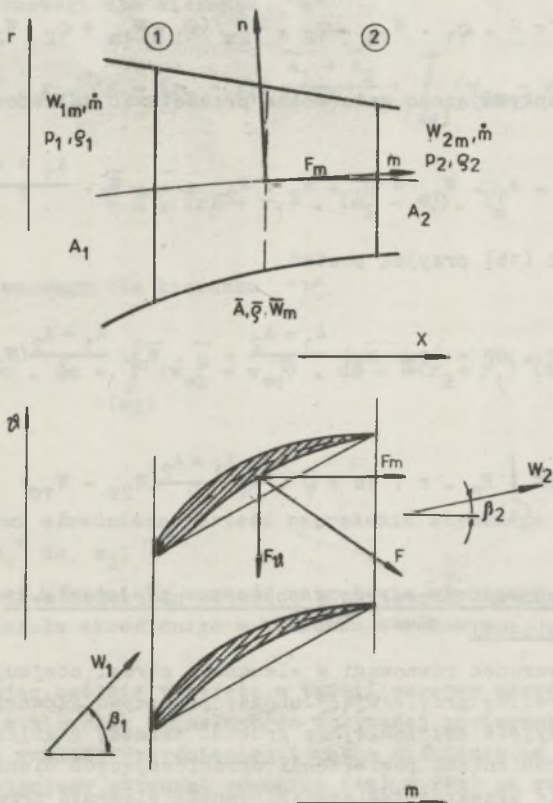
W niniejszej pracy określone dodatkowe równanie umożliwiające wyznaczenie również składowych obwodowych wielkości przepływu. Zrezygnowano przy tym z założenia stałości siły łopatkowej F , wprowadzając do równań przepływu składową osiową i obwodową grubości zmniejszenia siły łopatkowej zdefiniowanej przez Mellora i Wooda w pracy [2]. Uzyskane dwa równania ruchu wraz z czterema równaniami uzupełniającymi umożliwiają numeryczne wyznaczenie krok po kroku parametrów warstwy przyściennej wzdłuż osłony zewnętrznej

trznej i wewnętrznej wieńca łopatkowego. Warunki brzegowe określone są przez rozkłady prędkości i ciśnień na granicy odpowiednich warstw przyściennych wyznaczone przez rozwiązanie quasi-trójwymiarowego przybliżenia przepływu głównego. Dodatkowej analizy wymaga określenie liczb bezwymiarowych, takich jak parametr kształtu warstwy granicznej, przyścienny współczynnik naprężeń stycznych oraz współczynnik przepływów nadłopatkowych [2].

3. Równania równowagi przepływu

3.1. Równania równowagi w obszarze strumienia głównego

Rozpatrujemy element układu przepływowego wieńca łopatkowego zawierający obszar strumienia głównego na granicy warstwy przyściennych (rys. 1) między dwoma przekrojami kontrolnymi 1 i 2. Zakładamy przy tym, że



Rys. 1. Element układu przepływowego wieńca wirnikowego w obszarze strumienia głównego

grubość warstwy granicznej jest mała w stosunku do promieni ścianek ograniczających.

Równanie równowagi dla kierunku "m"

$$2\pi \int_{(n)} F_m \cdot r \cdot dn = (p_2 - p_1) \frac{A_1 + A_2}{2} + \dot{m}(W_{2m} - W_{1m}) \quad (1a)$$

Równanie równowagi dla kierunku obwodowego "r"

$$2\pi \int_{(n)} F_{r\varphi} \cdot r \cdot dn = \dot{m} \cdot (W_{2r\varphi} - W_{1r\varphi}) \quad (1b)$$

Wprowadzamy średnią wartość gęstości i prędkości dla rozpatrywanego przedziału (1-2):

$$\bar{q} \cdot \bar{W}_m = 2 \cdot q_1 \cdot W_{1m} = q_2 \cdot W_{2m} / (q_1 \cdot W_{1m} + q_2 \cdot W_{2m}) \quad (2)$$

Wówczas masę przepływającego gazu można przedstawić zależnością

$$\dot{m} = q_1 \cdot A_1 \cdot W_{1m} = q_2 \cdot A_2 \cdot W_{2m} = \bar{q} \cdot \bar{W}_m \cdot \frac{A_1 + A_2}{2}, \quad (3)$$

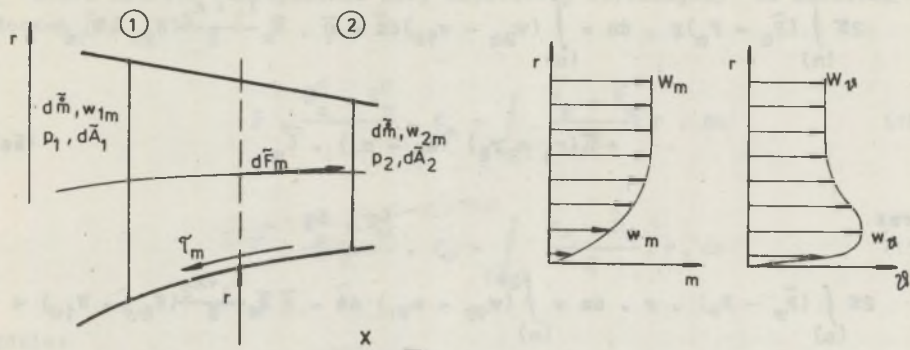
a równania (1a) i (1b) przyjmą postać

$$2\pi \int_{(n)} F_m \cdot r \cdot dn = (p_2 - p_1) \frac{A_1 + A_2}{2} + \bar{q} \cdot \bar{W}_m \cdot \frac{A_1 + A_2}{2} (W_{2m} - W_{1m}) \quad (4a)$$

$$2\pi \int_{(n)} F_{r\varphi} \cdot r \cdot dn = \bar{q} \cdot \bar{W}_m \frac{A_1 + A_2}{2} (W_{2r\varphi} - W_{1r\varphi}) \quad (4b)$$

3.2. Równanie równowagi przepływu w obszarze pierścieniowej warstwy granicznej

Rozpatrujemy warunek równowagi w elemencie strugi obejmującym warstwę graniczną oraz dowolny przylegający obszar przepływu głównego (rys. 2). Uwzględniając przyjęte założenie, że grubość warstwy granicznej jest mała w porównaniu z promieniami powierzchni ograniczających wieniec łopatkowy r przyjmujemy, że przekrój tak zdefiniowanego elementu przepływu (\tilde{A}) jest równy przekrojowi poprzecznemu przepływu głównego (A).



Rys. 2. Element układu przepływowego wieńca wirnikowego w obszarze warstwy przyściennej

Warunek równowagi dla kierunku "m"

$$2\pi \int_{(wg)} \tilde{F}_m \cdot r \cdot dn = (p_2 - p_1) \frac{\tilde{A}_1 + \tilde{A}_2}{2} + \int_{(wg)} (w_{2m} - w_{1m}) \cdot d\tilde{m} + \pi \cdot (r_2 + r_1) \cdot (m_2 - m_1) \cdot \bar{\tau}_m \quad (5a)$$

Warunek równowagi dla kierunku "r"

$$2\pi \int_{(wg)} \tilde{F}_r \cdot r \cdot dn = \int_{(wg)} (w_{\varphi 2} - w_{\varphi 1}) \cdot d\tilde{m} + \pi (r_2 + r_1) (m_2 - m_1) \bar{\tau}_\varphi \quad (5b)$$

gdzie:

$\bar{\tau}_m$ - stanowi uśrednioną wartość naprężenia stycznego dla przedziału od m_1 do m_2 ,

$\bar{\tau}_\varphi$ - stanowi uśrednioną wartość naprężenia stycznego od sił tarcia dla przedziału określonego w kierunku obwodowym.

Uwzględniając ogólnie przyjęte w teorii warstwy przyściennej założenie, że ciśnienie w kierunku normalnym do opływanej powierzchni ma wartość stałą w obszarze warstwy przyściennej i równą ciśnieniu na granicy przepływu głównego, odejmujemy stronami równania (4a) i (4b) od równań (5a) i (5b) i otrzymujemy:

$$2\pi \int_{(n)} (\tilde{F}_m - F_m) r \cdot dn = \int_{(n)} (w_{2m} - w_{1m}) d\tilde{h} - \bar{\varrho} \cdot \bar{w}_m \frac{A_1 + A_2}{2} (w_{2m} - w_{1m}) + \\ + \pi (r_1 + r_2) (m_2 - m_1) \cdot \bar{\tau}_m \quad (6a)$$

oraz

$$2\pi \int_{(n)} (\tilde{F}_v - F_v) \cdot r \cdot dn = \int_{(n)} (w_{2v} - w_{1v}) d\tilde{h} - \bar{\varrho} \bar{w}_m \frac{A_1 + A_2}{2} (w_{2v} - w_{1v}) + \\ + \pi (r_1 + r_2) (m_2 - m_1) \cdot \bar{\tau}_v \quad (6b)$$

4. Wielkości charakteryzujące warstwę przyścienną

Miara liniowa zmniejszenia natężenia przepływu

$$2\pi r_1 \cdot \delta_1^* = A_1 - A_1' \\ 2\pi r_2 \cdot \delta_2^* = A_2 - A_2' \quad (7)$$

gdzie A' - przekrój poprzeczny strugi, przez który przepływa cała masa gazu, z lokalną prędkością przepływu głównego określoną na krawędzi warstwy przyściennej.

Miara liniowa straty momentu ilości ruchu

składowa merydionalna

$$r_1 \cdot \varrho_1 \cdot w_{1m}^2 \cdot \delta_{1m}^{**} = \int_{(wg)} (w_{1m} - w_{1m}') d\tilde{h}/2\pi \quad (8)$$

$$r_2 \cdot \varrho_2 \cdot w_{2m}^2 \cdot \delta_{2m}^{**} = \int_{(wg)} (w_{2m} - w_{2m}') d\tilde{h}/2\pi$$

składowa obwodowa

$$r_1 \cdot \varrho_1 \cdot w_{1m} \cdot w_{1v} \cdot \delta_{1v}^{**} = \int_{(wg)} (w_{1v} - w_{1v}') \cdot d\tilde{h}/2\pi \quad (9)$$

$$r_2 \cdot \varrho_2 \cdot w_{2m} \cdot w_{2v} \cdot \delta_{2v}^{**} = \int_{(wg)} (w_{2v} - w_{2v}') \cdot d\tilde{h}/2\pi$$

Miarę liniową zmniejszenia siły łepatkowej definiujemy za Mellorem i Woodem [2]

$$\bar{H} = \frac{\bar{W}_m^2 + \bar{W}_{1\psi}^2}{2} \cdot f_m = \int_{(wg)} \frac{F_m - \tilde{F}_m}{\varrho} r \cdot dn \quad (10)$$

$$\bar{H} = \frac{\bar{W}_m^2 + \bar{W}_{1\psi}^2}{2} \cdot f_{1\psi} = \int_{(wg)} \frac{F_{1\psi} - \tilde{F}_{1\psi}}{\varrho} \cdot r \cdot dn \quad (11)$$

gdzie:

$$\bar{W}_m = \frac{W_{1m} + W_{2m}}{2}$$

$$\bar{W}_{1\psi} = \frac{W_{1\psi} + W_{2\psi}}{2}$$

$$\bar{W} = (\bar{W}_m^2 + \bar{W}_{1\psi}^2)^{1/2}$$

stanowią wielkości średnie dla danego przedziału od 1 do 2.
Parametr kształtu

$$H = \delta / \delta_m^{**} \quad (12)$$

5. Równania warstwy przyściennej

Równania (8) oraz równania (9) odejmujemy stronami i po przekształceniach otrzymujemy:

$$\begin{aligned} r_2 \cdot \varrho_2 \cdot W_{2m}^2 \cdot \delta_{2m}^{**} - r_1 \cdot \varrho_1 \cdot W_{1m}^2 \cdot \delta_{1m}^{**} &= \frac{1}{2\pi} [(W_{2m} - W_{1m}) \cdot \tilde{h} - \\ &- \int_{(wg)} (w_{2m} - w_{1m}) \cdot d\tilde{h}] \quad (13a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_2 \cdot \varrho_2 \cdot W_{2\psi} \cdot W_{2m} \cdot \delta_{2\psi}^{**} - r_1 \cdot \varrho_1 \cdot W_{1\psi} \cdot W_{1m} \cdot \delta_{1\psi}^{**} &= \frac{1}{2\pi} [(W_{2\psi} - W_{1\psi}) \cdot \tilde{h} - \\ &- \int_{(wg)} (w_{2\psi} - w_{1\psi}) \cdot d\tilde{h}] \quad (13b) \end{aligned}$$

gdzie:

\tilde{m} - natężenie przepływu gazu w obszarze warstwy przyściennej.

Wprowadzamy średnie dla danego przedziału wartości prędkości i ciśnień:

$$\tilde{m} = W_{2m} \cdot A_2' \cdot \varrho_2 = W_{1m} \cdot A_1' \cdot \varrho_1 = \bar{\varrho} \cdot \bar{W}_m \cdot \frac{A_1' + A_2'}{2} \quad (14)$$

Równania (5a) i (5b) wstawiamy odpowiednio do równań (13a) i (13b) i wykorzystując zależności (7), (10), (11) i (14), otrzymujemy ostatecznie dwa równania różnicowe określające narastanie składowej merydionalnej i obwodowej miary liniowej straty pędu:

$$r_2 \cdot \varrho_2 \cdot W_{2m}^2 \cdot \delta_{2m}^{**} - r_1 \cdot \varrho_1 \cdot W_{1m}^2 \cdot \delta_{1m}^{**} = \bar{\varrho} \cdot \bar{r} \cdot \frac{\bar{W}^2}{2} \cdot f_m + \\ + \frac{r_1 + r_2}{2} (m_2 - m_1) \cdot \bar{\tau}_m - 1/2 \bar{\varrho} \cdot \bar{W}_m \cdot (W_{2m} - W_{1m}) (r_1 \cdot \delta_{1m}^* + r_2 \cdot \delta_{2m}^*) \quad (15a)$$

$$r_2 \cdot \varrho_2 \cdot W_{2\psi} \cdot W_{2m} \cdot \delta_{2\psi}^{**} - r_1 \cdot \varrho_1 \cdot W_{1\psi} \cdot W_{1m} \cdot \delta_{1\psi}^{**} = \bar{\varrho} \cdot \bar{r} \cdot \frac{\bar{W}^2}{2} \cdot f_\psi + \\ + \frac{r_1 + r_2}{2} (m_2 - m_1) \bar{\tau}_\psi - 1/2 \bar{\varrho} \cdot \bar{W}_m (W_{2\psi} - W_{1\psi}) (r_1 \delta_{1\psi}^* + r_2 \delta_{2\psi}^*) \quad (15b)$$

Postać wyprowadzonych równań jest dogodna do numerycznego rozwiązania krok po kroku wzdłuż kanału łopatkowego. Prędkości $W_m(m)$ i $W_\psi(m)$ na granicy warstwy przyściennej w kolejnych przekrojach układu przepływowego znajdujemy z analizy przepływu quasi-trójwymiarowego. Po określeniu początkowych wartości δ_{1m}^{**} i H_1 na wlocie do wieńca łopatkowego pozostaje siedem niewiadomych: $\bar{\tau}_m$, $\bar{\tau}_\psi$, f_m , f_ψ , δ_{m2}^{**} , $\delta_{\psi2}^{**}$ oraz H_2 . Konieczne jest więc znalezienie dalszych pięciu równań uzupełniających.

6. Równania uzupełniające

6.1. Naprężenia styczne

Dokładne określenie składowych wartości naprężeń stycznych τ w równaniach (15a) i (15b) wymaga przeprowadzenia pełnej analizy trójwymiarowego przepływu na zewnętrznych powierzchniach ograniczających stopień sprężający. Analiza taka nawet w uproszczonej postaci byłaby bardzo skomplikowa-

na. Stratford [1] wyprowadził zależność na wartość naprężenia stycznego dla dwuwymiarowego opływu płaskiej płytki, przy czym struga przepływa pod kątem β do osi X.

Zmodyfikowane do naszych celów równanie może być przedstawione w postaci:

$$\tau_m = \tau_{śc} \cdot \cos\beta = 0,086 \cdot \rho \cdot W_m^{9/5} (\sec\beta)^{4/5} \cdot \nu^{1/5} \cdot \delta_m^{** - 1/5} \quad (16)$$

Oryginalne równanie Stratforda uwzględnia ponadto ściśliwość gazu oraz przewężenie przekroju przepływowego wywołane grubością łopatek.

W naszym przypadku rozpatrujemy przepływ nieściśliwy, a przewężenie przekroju przepływowego uwzględnia się z reguły w obliczeniach przepływu głównego.

W pracy [2] zaproponowano następujące zależności na wartość składowej osiowej i obwodowej naprężeń stycznych:

$$\frac{\bar{\tau}_m}{\rho} = \left[\bar{W}_m^2 + (\bar{W}_{\psi}^2 - U_w^2) \right]^{1/2} \cdot \bar{W}_m \frac{C_f}{2} \quad (17a)$$

$$\frac{\bar{\tau}_\psi}{\rho} = \left[\bar{W}_m^2 + (\bar{W}_{\psi}^2 - U_w^2) \right]^{1/2} \cdot (\bar{W}_{\psi} - U_w) \frac{C_f}{2} \quad (17b)$$

gdzie:

U_w - prędkość ścianek ograniczających względem wienca łopatkowego.

6.2. Równania końcowe

Przyjmujemy, że całkowita siła łopatkowa ma w przybliżeniu kierunek normalny do wektora średniej prędkości przepływu głównego. Otrzymujemy wówczas dodatkową zależność wiążącą ze sobą równania (15a) i (15b)

$$f_m = \frac{\bar{W}_{\psi}}{\bar{W}_m} \cdot f_\psi \quad (18)$$

Końcowe równanie otrzymujemy, wykorzystując zależności wyprowadzone w pracy [2] w wyniku analizy przepływów wtórnych występujących w przepływie przez wieniec łopatkowy. Zależność ta określa warunki przepływu w płaszczyźnie krawędzi wylotowych łopatek:

$$W_{\psi 2} \delta_{\psi 2}^{**} - \delta_{m 2}^{**} = \frac{K \cdot \delta_s}{\cos\gamma} \left[\frac{t}{l} \bar{W} (W_{\psi 2} - W_{\psi 1}) \right]^{1/2} \operatorname{sgn}(W_{\psi 2} - W_{\psi 1}) \quad (19)$$

gdzie:

δ_m - szczelina nadkapatkowa,

γ - kąt ustawienia profilu w palisadzie,

$$\text{sgn}(z) = \begin{cases} +1 & z > 0 \\ -1 & z < 0 \end{cases}$$

W przypadku, gdy $\delta_m = 0$, mamy wówczas do czynienia z przepływem równoległościowym na wylocie $\delta_{u2}^{**} = \delta_{m2}^{**}$.

7. Wielkości empiryczne

Przedstawione równania (15a), (15b), (17a), (17b), (18) oraz (19) umożliwiają wyznaczenie wielkości charakterystycznych pierścieniowej warstwy granicznej: δ_m^{**} , δ^* , δ_{u2}^{**} , F_m i F_{u2} . W obliczeniach tych konieczne jest wcześniejsze określenie prędkości W_m i W_{u2} oraz parametrów empirycznych H , C_F i K .

7.1. Parametr kształtu

Stratford [1] wykorzystał empiryczny związek pomiędzy parametrem kształtu H a gradientem prędkości osiowej oraz liczbą Reynoldsa $Re_{\delta^{**}}$ wyznaczony dla płaskiej płytki. Liczba Reynoldsa określona tu została dla grubości warstwy zmniejszenia momentu ilości ruchu

$$Re_{\delta^{**}} = \frac{W_m \cdot \delta^{**}}{\gamma} \quad (20)$$

Dla naszych celów równanie określające parametr kształtu przedstawić możemy w postaci:

$$H = 1,67 - 0,09 \log Re_{\delta^{**}} - 0,11 \frac{\delta^{**}}{W_m} \cdot \frac{dW_m}{dm} \cdot 10^3 + 0,015 \cdot 10^3 \frac{\delta^{**}}{W_m} \cdot \frac{dW_m}{dm} \quad (21)$$

Proste równanie określające związek pomiędzy parametrem kształtu a grubością warstwy zmniejszenia momentu ilości ruchu wyprowadzone zostało przez Dussourda [9]

$$H = H_1 + (H_1 - 1,05) 70 \frac{d\delta^{**}}{dm} \quad (22)$$

gdzie:

H_1 - początkowa wartość parametru kształtu na wlocie do wieńca.

Wartość liczbowa tego parametru zgodnie z danymi zawartymi w pracy [10] może być przyjmowana około 1,4.

7.2. Współczynnik oporu

Na wartość współczynnika oporu ma wpływ zarówno opór wynikający z występowania tarcia powierzchniowego jak również z występowania przepływów wtórnych.

Współczynnik oporu tarcia powierzchniowego może być określony z formuły opracowanej przez Squire'a i Younga [9]

$$\frac{C_f}{2} = \frac{1}{[5,89 \lg(4,075 \cdot \text{Re}_{\delta^*})]^2} \quad (23)$$

Inna zależność określona została w pracy [11]

$$C_f = C_{fo} \left[\frac{\text{Re}_{\delta^*}}{\text{Re}_{\delta_0^*}} \right]^{-2\alpha_0/(\alpha + \alpha_0)} \quad (24)$$

gdzie:

$\alpha = 0,41$ stała Karmana

$$\alpha_0 = \sqrt{C_{fo}}/2$$

$$C_{fo} = 0,011 \text{ dla } \text{Re}_{\delta_0^*} = 21,00$$

$\text{Re}_{\delta_0^*}$ - liczba Reynoldsa określona dla grubości warstwy zmniejszenia natężenia przepływu.

W rzeczywistości z uwagi na występowanie tarcia wirów wtórnych współczynnik C_f jest znacznie większy niż obliczony z formuł (23) i (24).

Współczynnik C_f zgodnie z danymi doświadczalnymi zamieszczonymi w pracy [11] mieści się w granicach 0,006-0,012.

7.3. Współczynnik przepływów nadłopatkowych

Współczynnik K jest trudny do bezpośredniego określenia analitycznego. Wartość tego współczynnika można wyznaczyć pośrednio, badając jego wpływ na wartość pracy sprężarki i jej sprawność określoną na drodze obliczeniowej i porównując uzyskane wyniki z charakterystykami otrzymanymi na drodze eksperymentu. W tym celu konieczne jest opracowanie obliczeniowej metody wyznaczania strat występujących w stopniu sprężającym. W pracy

[2] autor sugeruje, że współczynnik K mieści się w granicach 0,2-0,3. Dokładne określenie wartości K winno stanowić przedmiot dalszych badań.

Podobnie zmieniając w obliczeniach pozostałe parametry H i C_f i porównując uzyskane charakterystyki z charakterystykami rzeczywistymi, można również uzyskać dokładne ich wartości dla danego układu łopatkowego sprężarki.

8. Uwagi końcowe

Wyprowadzone równania (15a) i (15b) wraz z równaniami uzupełniającymi umożliwiającą, postępując krok po kroku wzdłuż osiowosymetrycznych ścianek ograniczających wieniec sprężający, wyznaczenie miary liniowej zmniejszenia natężenia przepływu oraz miary liniowej zmniejszenia momentu ilości ruchu. Konieczne jest w tym celu wstępne określenie początkowych wartości δ^{**} i H oraz składowej merydionalnej i obwodowej prędkości na granicy strumienia głównego i warstwy przyściennej. Prędkości te otrzymujemy z obliczeń quasi-trójwymiarowego przepływu płynu nielepkiego. Obliczenia parametrów warstwy granicznej prowadzone są w układzie współrzędnych nieruchomych względem łopatek wienca sprężającego. W obliczeniach występują parametry empiryczne H , C_f i K , które winny stanowić przedmiot eksperymentu w celu określenia ich dokładnych wartości dla danych rodzaju wiańców sprężających. Wyznaczenie parametrów pierścieniowej warstwy przyściennej umożliwia określenie zmniejszenia przekroju swobodnego przepływu oraz w dalszej kolejności wielkości strat występujących w tym obszarze. Pełny obraz strat występujących w stopniu sprężarki można uzyskać, analizując przepływ w profilowej warstwie granicznej oraz straty związane z występowaniem przepływów wtórnych.

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

- A - przekrój poprzeczny elementu strugi
- C_f - uśredniony wzdłuż powierzchni pierścieniowej współczynnik tarcia powierzchniowego
- F - elementarna siła łopatkowa na jednostkę powierzchni średniego przekroju strugi elementarnej
- f - miara liniowa zmniejszenia siły łopatkowej
- H - średnia wartość parametru kształtu warstwy przyściennej
- K - współczynnik przepływu nadłopatkowego
- l - długość cięciwy profilu łopatkowego
- \dot{m} - natężenie przepływu w strudze elementarnej

- m - odległość merydycjalna mierzona wzdłuż omywanej powierzchni
 n - odległość mierzona w kierunku normalnym do omywanej powierzchni
 p - ciśnienie statyczne
 r - współrzędna promieniowa
 Re - liczba Reynoldsa
 t - podziałka ułopatkowania
 U_w - prędkość osiowosymetrycznych ścianek ograniczających względem wieńca łopatkowego
 W - prędkość w strumieniu głównym względem wieńca łopatkowego
 w - prędkość w obszarze warstwy przyściennej względem wieńca łopatkowego
 β - kąt między kierunkiem prędkości a osią maszyny
 δ^* - miara liniowa zmniejszenia natężenia przepływu
 δ^{**} - miara liniowa zmniejszenia momentu ilości ruchu
 ρ - gęstość gazu
 γ - lepkość kinematyczna
 τ - naprężenia styczne od sił tarcia

WSKAŹNIKI

- 1 - przekrój wlotowy wieńca łopatkowego
 2 - przekrój wylotowy wieńca łopatkowego
 m - składowa w kierunku osi m
 (wg) - całkowanie w poprzek grubości warstwy granicznej
 $(-)$ - wielkości średnie
 (\sim) - wielkości określone w obszarze warstwy granicznej

LITERATURA

- [1] Stratford B.S.: The Use of Boundary Layer Techniques to Calculate the Blockage From the Annulus Boundary Layers in a Compressor, ASME Paper No 67-WA/GT-1, New York, 1967.
 [2] Mellor G.L., Wood G.M.: An Axial Compressor End Wall Boundary Layer Theory, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, June 1971.
 [3] Witkowski A.: Flow Analysis in Axial Flow Compressor Impeller with Meridional Stream Acceleration, Proceedings of the Fourth Conference on Fluid Machinery, Budapest 1972.

- [4] Witkowski A.: Rozkład prędkości i ciśnień w kanałach międzyłopatkowych osiowego wieńca sprężającego z merydionalnym przyspieszeniem strumienia, ZN Pol.Sl. Energetyka z. 45, Gliwice, 1972.
- [5] Witkowski A.: Zastosowanie quasi - ortogonalnych współrzędnych do obliczeń przepływu w wieńcach sprężających o przestrzenie ukształtowanych kanałach międzyłopatkowych, ZN Pol.Sl. Energetyka z. 47, Gliwice, 1973.
- [6] Horlock J.H.: Annulus Wall Boundary Layers in Axial Compressor Stages, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, March, 1963.
- [7] Gregory Smith D.G.: An Investigation of Annulus Wall Boundary Layers in Axial Flow Turbomachines, Trans ASME, Journal of Engineering for Power, October 1970.
- [8] Horlock J.H., Headley D.: Calculation of the Annulus Wall Boundary Layers in Axial Flow Turbomachines, ARC CP No 1196, March 1971.
- [9] Dussourd J.L.: Aerodynamic Criteria for Optimum Design of Mixed Flow Impeller - Final Evaluation, ARL T.N. 60-317, September, 1961.
- [10] Jansen W.: The Application of End Wall Boundary - Layer Effects in the Performance Analysis of Axial Compressors, ASME Paper No 67-WA/GT-11, New York, 1967.
- [11] Balsa T.F., Meller G.L.: The Simulation of Axial Compressor Performance Using an Annulus Wall Boundary Layer Theory, Trans. ASME, Journal of Engineering for Power, July 1975.

ПРИБЛИЖЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
У ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СТенок ОГРАНИЧИВАЮЩИХ ЛОПАТОЧНЫЙ
КОМПРЕССОРНЫЙ ВЕНЕЦ

Р е з ю м е

Применяя модель расчёта осевых составляющих нарастания пограничного слоя на осесимметричных стенках ограничивающих компрессорный венец, предложенный Стратфордом [1] получено приближенные уравнения течения дающие возможность решения тоже составляющих окружных пограничного слоя. В уравнения включено толщину потери лопаточной силы определённую в работе [2]. Определено дополнительные уравнения и сделано анализ методов назначения необходимых для решения уравнений экспериментальных параметров.

Полученные уравнения являются пригодными для численного решения кольцевого пограничного слоя.

THE SIMPLIFIED EQUATIONS FOR FLOW IN ANNULUS
BOUNDARY LAYERS IN A COMPRESSOR BLADES ROW

S u m m a r y

Taking into considerations the Stratferds [1] model for calculating the growth of the axial component of the annulus boundary layer in a compressor blade row, the simplified equations, also for the circumferential component of the flow, have been deduced. These equations introduce axial and tangential defect force thickness proposed by the paper [2]. The additional equations have been developed and empirically required parameters discussed.

The equations are useful for numerical calculating the growth of the annulus boundary layer.

Wzrost

Wzrost warstwy granicznej w kierunku osi i w kierunku stycznym w przepływie w rowie łopatek kompresora. Wzrost warstwy granicznej w kierunku osi i w kierunku stycznym w przepływie w rowie łopatek kompresora. Wzrost warstwy granicznej w kierunku osi i w kierunku stycznym w przepływie w rowie łopatek kompresora.



Fig. 1. Schematyczny przekrój rowa łopatek kompresora z warstwą graniczną w kierunku osi i w kierunku stycznym.

Wzrost warstwy granicznej w kierunku osi i w kierunku stycznym w przepływie w rowie łopatek kompresora.

Wzrost warstwy granicznej w kierunku osi i w kierunku stycznym w przepływie w rowie łopatek kompresora.