Seria: ENERGETYKA z. 79

Nr kol. 703

Andrzej WITKOWSKI

WSTĘPNE WYNIKI ANALIZY STRUKTURY PRZEPŁYWU W OSIOWYM STOPNIU SPRĘŻAJĄCYM

> Streszczenie. W pracy przedstawiono teoretyczne i doświadczalne badania struktury przepływu i obciążeń aerodynamicznych wieńców łopatkowych w osłowym modelowym stopniu sprężającym. W części teoretycznej przeprowadzono obliczenia rozkładów prędkości i ciśnień w kanałach międzyłopatkowych stopnia i na powierzchni łopatki wieńca wirnikowego oraz określono narastanie tzw. pierścieniowych warstw przyściennych. Wyniki obliczeniowe porównano z wynikami badań doświadczalnych przeprowadzonych na stanowisku do badań obciążeń aerodynamicznych wirującego wieńca łopatkowego oraz struktury przepływu w przestrzeniach międzywieńcowych. Porównanie wykazało zadowalającą zgodność rezultatów uzyskanych na drodze teoretycznej i doświadczalnej.

1. Wstep

Skomplikowany charakter zjawisk występujących w przepływie przez osiowy stopień sprężający, trudny do ścisłego opisu matematycznego,skłania do poszukiwania rozwiązań zarówno na drodze teoretycznej, jak i doświadczalnej.

Przedstawiony artykuł stanowi próbę wstępnego rozpoznania stopnia zgodności wyników uzyskanych przy zastosowaniu metody obliczeniowej z wynikami badań rzeczywistej struktury przepływu oraz określenia wniosków do dalszych badań.

W części teoretycznej zagadnienie przepływu przez osiowy stopień sprężający rozwiązano rozpatrując uproszczony tzw. quasi-rzeczywisty [1] model przepływu, w którym dla ułatwienia analizy wyodrębniono trzy charakterystyczne obszary: obszar przepływu głównego, w którym pomija się wpływ tarcia przyściennego, a uwzględnia jedynie straty profilowe oraz dwa obszary przy piaście i osłonie zewnętrznej, gdzie tworzy się pierścieniowa warstwa przyścienna.

Pełny schemat blokowy obliczeń opracowany w oparciu o przyjęty model przepływu przedstawiony został na rysunku 1. Zgodnie z tym schematem zagadnienie przepływu głównego rozwiązano przy wykorzystaniu tzw.quasi-trójwymiarowego modelu przepływu, w którym rozwiązuje się dwa dwuwymiarowe zagadnienia:

1. Zagadnienie przepływu osiowo symetrycznego na średniej międzyłopatkowej powierzchni prędu [2]. 2. Zagadnienie przepływu palisadowego na wybranych osiowosymetrycznych powierzchniach prądu [3].



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu obliczeń

W części doświadczalnej pracy określono rozkłady parametrów przepływu w przekroju wlotowym i wylotwym wieńca łopatkowego oraz obciążenia aerodynamiczne łopatek wirnika w przekroju przy stopie.

Szczególnie interesujące, wzbogacające analizę teoretycznę sę informacje dotyczące przepływu w obszarach pierócieniowych warstw przyściennych.

2. Część teoretyczna

2.1. Przepływ osiowo symetryczny

Zagadnienie osiowo symetryczne rozwiązano posługując się pojęciem krzywizny linii prądu po uśrednieniu ogólnych równań równowagi wzdłuż podziałki łopatek przy założeniu, że przepływ jest nielepki i ustalony. W rezultacie uśrednienia w równaniach ruchu pojawia się siła oddziaływania łopatek na strumień, a w równaniu ciągłości współczynnik przewężenia uwzględniający grubość łopatek. Rozpisanie tak określonych równań w układzie współrzędnych quasi-ortogonalnych q, , m [2] i uwzględnienie geometrii układu przepływowego prowadzą do równania równowagi przepływu w postaci [2]:

$$W_{\rm m} \cdot \frac{\partial W_{\rm m}}{\partial q} + P W_{\rm m}^2 + Q W_{\rm m} + R = 0 \tag{1}$$

gdzie: zmienne P, Q, R są zależne od kształtu łopatek wieńca sprężającego i geometrii linii prądu.

Równaniem zamykającym jest równanie ciągłości:

$$\hat{n} = Z \int_{0}^{q} \varphi \cdot W_{m} \cdot \cos(\delta - \gamma) (\frac{2\pi r}{Z} - t_{\gamma}) dq. \qquad (2)$$

Równania (1) i (2) stanowią układ równań ważny zarówno dla wieńców wirujących, nieruchomych, jak i dla przestrzeni międzywieńcowych.

2.2. Przepływ palisadowy

Analizę przepływu palisadowego prowadzimy na wybranych osiowo-symetrycznych powierzchniach prędu określonych przez rozwiązanie pierwszego zagadnienia dwuwymiarowego w strudze o wysokości An [4]. Do wyznaczenia rozkładu prędkości na powierzchni łopatek zastosowano równanie wyprowadzone z warunku niewirowości przepływu bezwzględnego w układzie współrzędnych "m" stycznej do linii prędu w przekroju merydionalnym oraz "-)" zgodnej z kierunkiem obwodowym.

Jako równania uzupełniające wykorzystano równanie ciągłości oraz równanie funkcji prądu.

Ostateczna postać równania przepływu

$$\frac{1}{r^{2}}\frac{\partial^{2}\Psi}{\partial v^{2}} + \frac{\partial^{2}\Psi}{\partial^{2}m} - \frac{1}{r^{2}}\frac{1}{p}\frac{\partial \rho}{\partial v}\frac{\partial \Psi}{\partial v} - \frac{\sin \sigma}{r} - .$$
$$-\frac{1}{\Delta n \cdot \rho}\frac{\partial(\Delta n \cdot \rho)}{\partial m}\frac{\partial \Psi}{\partial m} = \frac{2}{m}\frac{\Delta n \cdot \rho}{m}\omega \cdot \sin \sigma \qquad (3)$$

jest typu eliptycznego i rozwiązywana jest na drodze numerycznej[3] przez zastąpienie go równaniem różnicowym rozpisanym dla węzłów o nierównych odstępach i zastosowaniu związków dla różnic przednich w skończonym obszarze ograniczonym.

W obliczeniach wykorzystano program DZDW-MFP [5].

2.3. Przepływ w obszarze pierścieniowej warstwy przyściennej

Wyniki rozwiązania przepływu osiowo-symetrycznego posłużyły następnie do określenia przepływu w obszarze pierścieniowej warstwy przyściennej narastającej na powierzchniach piasty i osłony zewnętrznej.

Do rozwiązania zagadnienia wykorzystuje się równania Naviera-Stokesa, które po scałkowaniu wzdłuż podziałki łopatek i szeregu uproszczeniach i przekształceniach dają się przedstawić w postaci dwóch równań całkowych [6]:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}(\mathsf{W}^2 \cdot \vartheta_z^{**}) + \mathsf{H} \cdot \vartheta_z^{**} \frac{\mathrm{d}\mathsf{W}z}{\mathrm{d}z} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}(\frac{W^2}{2} \, \vartheta_z^*) + \frac{\tau_z}{\rho}, \tag{4}$$

$$\frac{d}{dz}(Wu \cdot W_{\varphi} \cdot \partial_{\varphi}^{**}) + H \cdot \partial_{z}^{**} \frac{dW_{\varphi}}{dz} = \frac{d}{dz}(\frac{W^{2}}{2} - \partial_{z}f_{\varphi}) + \frac{\tau_{\varphi}}{\rho}.$$
 (5)

Dla ułatwienia rozwiązania równania te przekształcone do postaci różnicowej [7] dogodnej do numerycznego rozwiązania.

3. Część doświadczalna

3.1. Stopień modelowy

Modelowy, osiowy stopień sprężający [9] przedstawiono na rysunku 2.Zasadniczym elementem stopnia jest koło wirnikowe o średnicy zewnętrznej 750 mm podwieszone na wale i połączone z urządzeniem do przenoszenia impulsów ciśnieniowych z koła wirnikowego do układu stałego z uszczelnieniem wodnym. Przekaźnik ciśnień umożliwia przenoszenie 96 impulsów ciśnieniowych z układu wirującego do układu stałego bez konieczności zatrzymywania stanowiska.

Koło wirnikowe o stosunku średnicy № = 0,6 składa się z cylindrycznej piasty stalowej z zamocowanymi do niej za pomocą śrub osiemnastoma łopatkami wykonanymi z epidiamu zbrojonego włóknem szklanym, o stałej długości cięciwy wzdłuż wysokości. Jedna z łopatek posiada po 21 otworków impulsowych ciśnienia statycznego rozmieszczonych na jej powierzchni wzdłuż obwodu na pięciu promieniach. Pozostałych 75 dysponowanych punktów pomiarowych rozdzielonych jest pomiędzy 15 pięciootworowych sond kulowych wirujących wraz z wirnikiem. Za kołem wirnikowym znajduje się kierownica tylna składająca się z 13 płaskich łopatek cylindrycznych. Ze względów konstrukcyjnych zastosowano dyfuzor pierścieniowy zakrzywiony,wykonany z epidianu zbrojonego włóknem szklanym



65



Rys. 3. Stanowisko do badań charakterystyk aerodynamicznych

3.2. Stanowisko badawcze

Modelowy stopień spręzający podłączony jest po stronie ssania do rurociągu pomiarowego (rys. 3). Stanowisko umożliwia wyznaczanie pełnych cherakterystyk aerodynamicznych w całym zakresie wydajności, sondowanie przepływu bezwzględnego w przekrojach kontrolnych 0, 1, 2 i 3, badania struktury przepływu względnego przed i zą.wirnikiem oraz badania obciężeń aerodynamicznych łopatek koła wirnikowego [8].

4. Analiza wyników badań

4.1. Przepływ główny

Obliczenia przepływu przeprowadzono dla trzech wskaźników wydajności

$$\frac{Cm}{U_z} = 0,26, 038, 0444.$$

Kąty odgięcia strug wywołane przez palisady w obliczeniowym i pozaobliczeniowych punktach pracy wieńca określono wykorzystując zależności opracowane przez Liebleina [9]. W wyniku rozwiązania zagadnienia osiowo-symetrycznego w układzie współrzędnych quasi-ortogonalnych uzyskano rozkład linii prądu w przekroju merydionalnym stopnia (rys. 4) oraz rozkłady prędkości w przestrzeni łopatek wirnika i kierownicy tylnej oraz w przestrzeniach międzywieńcowych.



Rys. 4. Rozkład linii prądu w przekroju merydionalnym stopnia

Na rysunkach 5, 6, 7 przedstawiono porównanie rozkładów prędkości w przekrojach wlotowym i wylotowym wieńca wirnikowego uzyskanych z obliczeń bez uwzględnienia pierścieniowej warstwy przyściennej, z wynikami uzyskanymi z pomiarów.



Rozkład prędkości merydionalnych w przekroju wlotowym i wylotowym wieńca wirnikowego (C₂/U₂ = 0,38) Rys. 5.





Rys. 7. Rozkład prędkości merydionalnych w przekroju wlotowym i wylotowym wieńca wirnikowego (C_m/U_z = 0,444)





Na podkreślenie zasługuje występowanie tych samych tendencji w rozkładach prędkości merydionalnych określonych na drodze obliczeniowej i doświadczalnej.

Zgodnie z rysunkiem 8 rzeczywiste kąty wylotowe strug mierzone od osi palisady w nominalnym punkcie pracy są większe od obliczonych, co wpływa na zmniejszenie składowych obwodowych prędkości rzeczywistych (rys. 9), w przekroju wylotowym wieńca i w konsekwencji na zmniejszenie rzeczywistej wartości pracy przekazywanej czynnikowi gazowemu przez koło wirnikowe.



Rys. 9. Rozkład składowych obwodowych prędkości na wylocie z łopatek koła wirnikowego

4.2. Narastanie pierścieniowych warstw przyściennych

Wyznaczenie w wyniku rozwiązania zagadnienia osiowo-symetrycznego roz-, kładów prędkości i ciśnień wzdłuż piasty i osłony zewnętrznej umożliwiło rozwiązanie zagadnienia narastania warstw przyściennych wzdłuż tych powierzchni.

Z uwagi na brak w chwili obecnej kompletu równań zamykających w obliczeniach pierścieniowej warstwy granicznej wykorzystano jedynie równanie (5) przyjmując, że ciśnienie statyczne, a stąd i siła łopatkowa mają wartość stałą w obszarze pierścieniowej warstwy przyściennej.

Wstępne wyniki analizy

Na rysunku 10 przedstawiono narastanie warstw przyściennych przy stopie i przy wierzchołku łopatki wirnikowej w nominalnym punkcie pracy stopnia. Analiza wyników obliczeń wskazwje na bardzo silny wpływ opóźnienia merydionalnego strugi na wzrost grubości warstwy przyściennej. Mniejszemu opóźnieniu przepływu towarzyszy mniejsze narastanie grubości warstwy przyściennej.





4.3. Przepływ palisadowy

Zarówno obliczenia, jak i badania przepływu przeprowadzone dla palisady łopatkowej w przecięciu wieńca wirnikowego osiowo-symetryczną powierzchnią prądu w odległości trzech milimetrów od piasty•

Na rysunku 11 zestawiono wykresy prędkości na powierzchni łopatki uzyskane na drodze obliczeniowej w trzech punktach charakterystyki aerodynamicznej stopnia. Odpowiednie wykresy ciśnień uzyskane na drodze pomiaru przedstawiono na rysunku 12.

Na rysunku 13 porównano bezpośrednio wykres ciśnień określony na drodze pomiaru z wykresem określonym na drodze obliczeniowej w nominalnym punkcie pracy stopnia.

Obliczeniowy wykres ciśnień zarówno po stronie czynnej, jak i biernej profilu odchyla się w stronę wyższych ciśnień w miarę oddalania się od krawędzi natarcia.

71

A. Witkowski







Rys. 12. Rozkłady ciśnień wzdłuż profilu przy piaście uzyskane na drodze pomiaru





W efekcie rzeczywiste obciążenie aerodynamiczne profilu jest mniejsze od obliczeniowego.

Nazbyt duży współczynnik dyfuzorowości D_L = 2,154 [9] oraz zbyt bliskie [10] noska profilu położenie wierzchołka prędkości po stronie biernej profilu (rys.13) w nominalnym punkcie pracy wskazuje na nadmierne obciężenie aerodynamiczne badanej palisady, co tłumaczyłoby pracę wieńca przy wskażnikach niższych od założonych w obliczeniach.

5. Wnioski końcowe

Porównanie wyników obliczeń przepływu głównego z wynikami badań struktury przepływu na wlocie i wylocie z wieńca wirnikowego wykazało występowanie w obu przypadkach tych samych tendencji. Dotyczy to w szczególności nachylenia krzywych prędkości osiowych w przekroju wylotowym wieńca w trzech punktach charakterystyki stopnia.

Uwzględnienie w obliczeniach przepływu głównego przewężenia czynnego przekroju przepływowego wywoływanego przez pierścieniową warstwę przyścienną winno doprowadzić do pełnej zgodności rozkładów prędkości uzyskanych na drodze obliczeniowej z prędkościami uzyskanymi na drodze pemiaru.

Uzyskano również zadowalającą zgodność grubości warstwy przyściennej obliczonej i wyznaczonej na drodze pomiaru. Zaobserwowane różnice w obliczeniowym i pomiarowym obciążeniu palisady w obliczeniowym cunkcie pracy stopnia stanowią wynik jej nadmiernego obciążenia aerodynamic.nego.

Przedstawione wyniki porównania struktury przepływu określonej na drodze obliczeniowej i na drodze pomiaru wskazuje na możliwość wykorzystania przyjętego modelu obliczeniowego do wyznaczania charakterystyk aerodynamicznych stopnia w obliczeniowym punkcie jego pracy.

Zestawienie ważniejszych oznaczeń

- H parametr kształtu warstwy przyściennej,
- m strumień masy,
- m odległość merydionalna,
- An odległość pomiędzy sąsiednimi liniami prądu w przekroju merydionalnym stopnia,
- P ciśnienie statyczne,
- Aq odległość mierzona wzdłuż quasi-ortogonalnej,
- promień mierzony od osi obrotu,
- t podziałka łopatek,
- W prędkość względna w strumieniu głównym,
- w prędkość względna w obszarze warstwy przyściennej,
- z liczba łopatek wieńca, współrzędna osiowa,
- δ kąt nachylenia linii prądu w przekroju merydionalnym do osi maszyny,
- d^{##} miara liniowa zmniejszenia momentu ilości ruchu,
- o_f miara liniowa zmniejszenia siły łopatkowej,
- 7 naprężenie styczne od sił tarcia.

Wskaźniki

- m składowa w kierunku osi m,
- z składowa w kierunku osi z,
- 🔊 składowa w kierunku obwodowym.

Wstępne wyniki analizy...

LITERATURA

- Witkowski A.: Quaai-rzeczywisty model przepływu w osiowym stopniu sprężającym. ZN Pol. Śl. Energetyka z. 66. Gliwice 1978.
- [2] Witkowski A.: Algorytm obliczeń rozkładu prędkości i ciśnień w stopniu sprężającym z uwzględnieniem pierścieniowej warstwy przyściennej. Problem MR-I-26 zadanie 02.2.3 etap II. Gliwice 1977. Praca nie opublikowana.
- [3] Katsanis T.: A Computer Program for Calculating Velocities and Streamlines on a Blade-to-Blade Stream Surface of a Turbomachine. NASA TN D-4525 (1968).
- [4] Witkowski A., Misiewicz A., Biernat J.: Modelowanie przepływu rzeczywistego w osiowym stopniu sprężającym. Sympozjum "Modelowanie w mechanice" PTMTiS, Szczyrk 1980.
- [5] Misiewicz A.: Program "Fortran 1900" obliczeń przepływu nielepkiego i ściśliwego w kanałach międzyłopatkowych stopni sprężających o dowolnej geometrii. Problem MR-I-26, zadanie 11.1.4. Gliwice 1980. Praca nie opublikowana.
- [6] Mellor G.L., Wood G.M.: An Axial Compressor End Wall Boundary Layer Theory. Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, June 1971.
- [7] Witkowski A.: Przybliżone równania przepływu w obszarze warstwy przyściennej, na osiowo-eymetrycznych ściankach ograniczających łopatkowy wieniec sprężający. ZN Pol. Śl. Energetyka, z. 68, Gliwice 1978.
- [8] Witkowski A.: Stanowisko do badań struktury przepływu w osiowym stopniu sprężającym. ZN Pol. Śl. Energetyka z. 72, Gliwice 1979.
- [9] Lieblein S.: Loss and Stall Analysis of Compressor Cascades. Trans.of the ASME J. of Basic Engineering, 1959.
- [10] Walker G.J.: A Family of Surface Velocity Distribution of Axial Compressor Blading and Their Theoretical Performance. Trans. of the ASME J. of Eng. for Power. April 1976.

Recenzent: Prof. dr hab, inż, Ryszard WYSZYŃSKI

Praca wpłynęża do Redakcji w dniu 10 grudnia 1980 r.

Предварительные результаты анализа структуры течения в осевой компрессорной ступени

Резрие

В статье приводятся теоретические и экспериментальные изучения структуры течения и аэродинамических нагрузок допаточных венцов в осевой компроссорной ступени.

В теоретической части произведено вычисления распределения скоростей и давлений в междулопаточных каналах ступени и на поверхности лопатки рабочего колеса. Определено тоже нарастание толщины пограничного слоя на осесиметричных поверхностях ограничивающих канал. Результаты исчислений сопоставляются с результатами экспериментов сделанных на стенде для исследования аэродинамических усилий лопаточных венцов и структуры течения в межвенечных пространствах. Получено удовлетворительное совпадение результатов.

Preliminary results of analysis of the flow structure in axial compressor stage

Summary

The theoretical and experimental investigations of the flow structure and blade loading in axial flow compressor stage have been described. In the theoretical part, the calculation of the pressure and velocity distribution in blade to blade surfaces has been done. A calculation method includes the estimation of the growth of the annulus boundary layers. The results from the theoretical predictions are compared with an experimental investigation which has been performed on the test stand for determining of the relative and absolute flow structure in axial compressor stage. The satisfactory agreement has been obtained.