Seria: ENERGETYKA z. 88

Nr kol. 807

Jerzy POROCHNICKI

Stefan DEBIEC

Antoni SMOLNY

Instytut Haszyn Frzepływowych Politechnike Lodzka

> OBLICZZNIA TEORESYCZNE I BABANIA ENSPERANZETAIME LAMINAPNO-TURBULENTNEJ CARSTVY PRZYDCIENNEJ MAPROFILACH LOPATHOWYCH PALISADY TUREINOTES

Streszczenie : Przedstawiono wyniki badan eksperymentalnych warstwy przydelennej na grzbietowej stronie profilu modelowej kopatki wieńca kierującego turbiny. Parametrani zmiennymi w liozbe Peymoldze i intensymność Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych badaniach były: kąt napływu, liczba Reynoldza i intensywność turbulencji strumienia wlotowego. Do obliczeń teoretycznych mieszanej, laminarmo-turbulentnej warstwy przysciennej zacto-sowano metodo Cebeciego-Smithe z zerorównaniowym modelem turbulencji. Wyniki obliczeń porównano z eksperymentem.

1. 78120

Rozwiązanie stacjonarnego trójwymiarowego przepływu lepkiego w wieńcach maszyny wirnikowej można uzyskać, obchodzac trójwymiarowe zadanie obliczeniowe w ten sposób, że obliczenia prowadzi się na zbiorze odpowiednio dobranych powierzchní prądu, dzielacych strumień masy i przestrzeń wieśca pomiędzy dwiena sąsiednimi żopatkami zarówno w kierunku promieniowym /mg Wu [1] powierzchnie S, /, jak i obwodowym /powierzchnie prądu S₂/. Ha każdej z tak dobranych powierzchni przepływ może być obliczany metodami dwuwymiarowymi, gdyż trzeci wymiar określa geometria powierzchni pradu, która w najogólniejszym przypadku może być przestrzennie zwichrowana.

Oznaczenia

- 1 cięciwa kopatki
- t podziałka palisady
- współrzędna wzdłuż zarysu profilu łopatki
- S. całkowita długość drogi przepływu od punktu spiętrzenia do krawędzi spływowej
- u uśredniona składowa wzdłużna predkości przepływu
- u pulsacyjna składowa wzdłużna prędkości przepływu
- c. współczynnik tarcia r napreżenie streni
- 9 nestore
- uz predkosć tarcia
- y współrzędna normalna do powierzchni łopatki
- By kąt ustawienia žopatki

- ≪ kąt napływu /wypżywu/ na palisada
- p ciśnienie statyczne
- p_c ciśnienie całkowite ∂ grubość warstwy przyściennej 54 liniowa miara zmniejszenia
- strumienia masy
- 02 liniowa miara zmniejszenia strumienia podu
- H12 parametr kształtu warstwy 12 przyściennej Tu - intensywność turbulencji
 - wzdłużnej

eksy

- 0 wlot na palisadę
- 1 wylot z palisady
- e zewnętrzny brzeg warstwy
- w dotyczy wielkości na ściance

J. Porochniski i inni

W pierwszych przybliżeniach zakłada się często uproszczone kształty tych powierzchni. Powierzchnie 5. uważa się często za powierzchnie osiowo symetryczne, co sprowadza proces obliczania do rozwiązenia - w każdym razie poza strefami brzegowymi - przepływu płaskiego przez równoważne proste palisady profili, a więc do określenia rozkładu ciśnień na profilu przy założeniu w pierwszej fazie obliczeń przepływu nielepkiego, a następnie w drugiej kolejności do obliczanie charakterystycznych paremetrów warstwy przyściennej i strat tarcia.

W palisadach turbinowych o dużych odgięciach strugi i dużych przyspieszeniach warstwa przyścienna na grzbietowej /wypukłej/ stronie profilu posiada najczęściej złożony laminarno-turbulentny charakter przepływu. Stwierdzono, że w przypadku typowego profilu turbinowego ok. 75 ÷ 80 % całkowitej strety tarcia można przypisać właśnie tej stronie żopatki.

Dla umożliwienia dokładnych obliczeń rozwoju mieszanej warstwy przyściennej i strat tarcia na powierzchniach S., jak również projektowania · wysoko sprawnych profili dla użopatkowania turbinowego, należażoby zajęć się w pierwszym rzędzie opracowaniem adekwatnego modelu przejścia laminarno - turbulentnego. Na ważność tego zagadnienia zwracają uwagę autorzy kilku ostatnio wykonanych prac w tym zakresie [2,3], stwierdzając brak danych eksperymentalnych dla takiego modelu warstwy z przejściem i praktyczną nieprzydatność istniejących dotąd modeli, opartych bądź na intuicji ich twórców lub też tak dobieranych, aby zoptymalizować procedury obliczeniowe, często bez względu na samą istotę fizyczną zjawiska.

7 związku z powyższym przeprowadzono badania eksperymentalne, których głównym celem jest zgromadzenie odpowiedniego materiału porównawczego do rozwijanych metod obliczeniowych. Jako obiekt badań wybrano więc profil łopatkowy i taką geometrię palisady, dla której stwierdzono istnienie w pełni rozwiniętej turbulentnej warstwy przyściennej przy krawędzi spływowej oraz występowanie trudnego do opisania matematycznie zjawiska pęcherza laminarnego, zapoczątkowującego rozległą strefę przejścia.

2. Geometria palisady i zakres badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne przeprowadzono w tunelu gerodynamicznym IMP PL.



Rys.1 Schemat pomiady.

Możliwy do uzyskania zakres liczby Reynoldsa /zdefiniowanej w oparciu o cięciwę kopatki 1=125 mm i prędkość wypływu z palisady/ wynosił Re,= 2.8x10⁵+ 7.5x10⁵ a zmiany intensywności turbulencji strumienia wlotowego, realizowane poprzez odpowiednio umiejscawianą kratę zaburzającą w tunelu przed palisadą, zawierały się w granicach Tu₀= 4% ÷ 12% - co odpowiada w przybliżeniu wartościom występującym w maszynach wirnikowych. Badania przeprowadzono dla trzech wartości kąte napływu na palisadę: $\mathcal{K}_{o} = 60^{\circ}$; 90° i 120°. Podstawowe parametry geometryczne badanego układu żopatkowego były następujące: kąt ustawienia $\beta_{v} = 36^{\circ}$; rowy badanej palisa- podziałka względna t/l=1.0 ; efektywny kąt wypływu z palisady & 1 = 15.90 .

80

W trakcie eksperymentu wykonano szczegółowe pomiary następujących wielkości:

- rozkładów ciśnień statycznych na profilach i ich deformacji w okolicy występującego pęcherza laminarnego;
- rozkładów prędkości w warstwie przyściennej na grzbietowej stronie profilu;
- intensywności turbulencji Tu_o w płaszczyźnie wlotowej do pelisady, jak też pulsacyjnej składowej wzdłużnej prędkości u w warstwie przyściennej w strefie przejścia laminarno - turbulentnego.

Przeprowadzono także olejową wizualizację przepływu na powierzchni grzbietowej żopatki w celu określenia miejsca i rozciągłości występującej strefy oderwania laminarnego /pęcherza/.

3. Pomiary rozkładów ciśnień statycznych na profilu

Konieczność określenia rozkładów ciśnień statycznych wokół opływanych profili wynike w pierwszym rzędzie z przyjętej metodyki badań warstwy przyściennej. Często jednakże charakterystyczne deformacje rozkładów ciśnień wnoszą dodatkowe informacje o zjawiskach zachodzących w warstwie przyściennej. Dzieje się tak szczególnie w przypadku występowania pęcherza laminarnego, który objawia się przede wszystkim jako charakterystyczne wybrzuszenie, w początkowej fazie dla strefy oderwanej warstwy laminarnej bardziej płaskie, w części końcowej dla przylegającej warstwy turbulentnej - strome. Pomiar powstałej deformacji rozkładu ciśnień statycznych określa więc jednocześnie długość strefy pęcherza laminarnego,

jak też identyfikuje jego część laminarną i turbulentną.

Na rys.2 przedstawiono przykładowe pomierzone rozkłady ciśnień na grzbietowej stronie profilu dla najmniejszej z występujących w badaniach turbulencji strumienia wlotowego Tu 1 liczby Reynoldsa Re, oraz trzech kątów napływu na palisadę, a także lokalne deformacje rozkładów w strefie występującego pęcherza /szczegół "A"/. wyraźniejsze przy maleją* cych wartościach Tuji Rea a zanikające przy ich wzroście.



Rys.2 Przykładowe rozkłady ciśnień ne grzbietowej stronie badanego profilu.

4. Pomiary w warstwie przyściennej

Badania rozkładów prędkości w warstwie przyściennej na grzbietowej stronie profilu przeprowadzone zostały za pomoce mikrosondy Pitota w tra-wersach pomiarowych rozmieszczonych w ten sposób, by ich zagęszczenie przypadało w przewidywanym obszarze przejścia laminarno - turbulentnego. W dalszym ciągu opisu do określenia miejsca na grzbietowej stronie profilu wykorzystywana będzie współrzędna względne S/S_o mierzone od punktu spiętrzenia na nosku łopatki /rys.1/. Przykładowe rozkłady prędkości w warstwie przyściennej w tradycyjnym układzie współrzędnych /u/u_e i y/S/ przedstawiono na rys.3.



Rys.3 Przykładowe pomierzone i obliczone rozkłady prędkości w warstwie przyściennej.

Na podstawie wykonanych pomiarów prędkości w warstwie przyściennej określono jej podstawowe parametry charakterystyczne: liniową miarę zmniejszenia strumienia masy δ_1 ; liniową miarę zmniejszenia strumienia pędu δ_2 ; parametr kształtu $H_{12}=\delta_1/\delta_2$. Dla turbulentnego zakresu przepły-



wu, dla którego krzywe rozkładów prędkości posiadały wyraźny odcinek logarytmiczny określono współczynnik tarcia c, metodą Clausera. Przedstawione ne rys.4 przykładowe rozkłady prędkości w nowym półlogarytmicznym układzie współrzędnych /z naniesioną siatką współczynnika c, jako parametrem/ oraz obliczone na ich podstawie parametry warstwy przyściennej określają laminarny bądź turbulentny charakter warstwy i pozwalają na oszacowanie rozciągłości strefy przejścia. W tym ostatnim przypadku najczęściej używaną wielkością jest parametr kształtu H₁₂ oraz współczynnik tarcia c...

Obliczenia teoretyczne i badania eksperymentalne ...

W miejscu oderwania laminarnego, które można traktować jako początek strefy przejściowej, w wyniku zaniku naprężeń stycznych współczynnik tercia c_f spada do zera, natomiast parametr kształtu osiąga swoją największą wartość /w badaniach ok. 3.0+3.2/. Koniec przejścia laminarno - turbulentnego znamienny jest osiągnięciem przez parametr kształtu ustalonej wartości H_{12} =1.5 typowej dla rozwiniętej warstwy turbulentnej, co odpowiada w przybliżeniu lokalnemu maksimum wartości współczynnika c_f i pokrywa się z miejscem występowania rozkładu prędkości, u którego po raz pierwszy pojawia się wyraźny odcinek logarytmiczny /na rys.4 trawers S/S_=0.68/.

W ten sposób oszecowane rozciągłość strefy przejścia zaznaczona jest na rys.5, na którym przedstawiono także wpływ kąta napływu na palisadę na



Rys.5 Wpływ kąta napływu na podstawowe parametry warstwy przyściennej i rozciągłość strefy przejścia. pozostałe wielkości charakterystyczne \mathcal{S}_1 i \mathcal{S}_2 warstwy przyściennej. Z przykładu tego widoczne jest, że wraz ze wzrostem kąta napływu początek strefy przejścia przesuwa się w stronę krawędzi spływowej łopatki, a jej rozciągłość w niewielkim stopniu wzrasta.

Z zebranego materiału badawczego wynikają także wnioski odnośnie do wpływu burzliwości strugi wlotowej i liczby Reynoldsa na rozwój warstwy przyściennej ne profilu,co przykładowo ilustruje rys.6. Badania potwierdzają ogólnie znany z innych prac /np. (4]/ fakt skracania i przesuwania się strefy przejścia w stronę krawędzi wlotowej kopatki w miarę



Rys.6 Wpływ liczby Reynoldsa i burzliwości strugi wlotowej na rozwój warstwy przyściennej.

wzrostu intensywności turbulencji strugi wlotowej. Oddzieływanie intensywności turbulencji na położenie strefy przejścia jest przy tym wyraźniejsze w przypadku mniejszych liczb Reynoldse oraz mniejszych wartości kąte napływu \mathcal{C}_{0} . Analogicznie, nejwyraźniejszy woływ liczby Reynoldse na przesunięcie strefy przejście w kierunku krewędzi wlotowej zauważa się w przypadku mniejszych wartości intensywności turbulencji i dla więkczych kętów napływu.

5. Obliczenia teoretyczne

Do obliczeń teoretycznych mieszanej laminarno - turbulentnej warstwy przyściennej zastosowano w pierwszym etapie metodę Cebeciego-Smitha [5], wykorzystującą zerorównaniowy model turbulencji. Płynne przejście od przepływu laminarnego do turbulentnego uzyskane zostało przez modyfikację "lepkości turbulentnej" i wprowadzenie w strefie przejście współczynnike intermitencji 7....

Liodel ten nie obejmuje zjawiske pęcherza laminarnego, co powodowało w obliczeniach konieczność zakładanie początku strefy przejście $/8_{tr}=0/$ w odległości kilku grubości warstwy przyściennej przed określonym uprzednio miejscem oderwania laminarnego. Odbija się to w oczywisty sposób na wynikach obliczeń - szczególnie w rejonie początkowym strefy przejście co widoczne jest zarówno na rys.3, gdzie porównano pomierzone i obliczone rozkłady prędkości w warstwie przyściennej, jak i w przebiegu charakterystycznych parametrów warstwy /rys.7/. Kiemniej należy stwierdzić dobrą zgodność obliczeń teoretycznych i eksperymentu w zakresie laminarnej i w pełni turbulentnej warstwy przyściennej.

Długość strefy przejścia wyznaczona na podstawie badań wynosi w większości przypadków ok. 30 do 35 mm i jest o wiele krótsza niż obliczona teoretycznie. Różnica ta wynike między innymi z nieuwzględnienia w metodzie obliczeniowej

zjawiska pęcherza laminarnego oraz turbu-U×10 [m/s] lencji strumienia zew- 61 ×10 [m/s] odgrywa pierwszoplano- cf×103 wą rolę w zjawisku przejścia warstwy przyściennej z laminarnej w turbulentną.

Rys.7 Pomierzone i obliczone teoretycznie podstawowe parametry warstwy przyściennej dla wybranego przypadku opływu profilu.



6. Inioski końcowe

Zebrany w trakcie wykonanych badań materiał eksperymentalny posłuży w najbliższym czasie do udoskonalenia i weryfikacji rozwijanej metody obliczeniowej. Jak wynika z zamieszczonych przykładów, modyfikacje muszą przede wszystkim uwzględnić istnienie zjawiska pęcherza laminarnego na powierzchni kopatki /np. ostatnio wykonana praca [6] / oraz wprowadzenie właściwego dla tego typu warstwy przyściennej z przejściem modelu turbulencji.

Należy się spodziewać, że wprowadzone modyfikacje polepszą zdecydowanie zgodność wyników badań i obliczeń teoretycznych, szczególnie w strefie przejścia laminarno - turbulentnego - co w rezultacie umożliwi dokładniejsze obliczenia rozwoju warstwy przyściennej i strat tarcia przy projektowaniu wysoko sprawnych profili dla użopatkowania turbinowe-5°.

Literatura

[1] Wu C.H. : A General Theory of Three-Dimensional Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachines of Axial, Radial, and Mixed-Flow Types. Trans. ASME, 1952. [2] Oldfield M.L. : Boundary Leyer Studies on Highly Loaded Cascades Using Heated Thin Films and a Traversing Probe. J. of Eng. for Power, 103/1981/. [3] Sharma O.P. : Boundary Layer Development on Turbine Airfoil Suction Surfaces. J. of Eng. for Power. 104/1982/. [4] Schlichting H. : On the Influence of Turbulence Level on the Aerodynamic Loses of Axial Turbomachines. Flow Research on Blading, ed. L.S. Dzung, Els. Pub. Co., Amsterdam 1970. [5] Bradshaw P., Cebeci T., Whitelaw J. : Enginering Calculation Methods for Turbulent Flows. Academic. [6] Cebeci T., Schimke S. : The Calculation of Separation Bubbles in Interactive Turbulent Boundary Layers. J. of Fluid Mech., 131/1983/.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВИЧИСЛЕНИЯ И ЗЕСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Наминарно стурбулентного пограничного слоя. Профилей Турбинных решеток

Резвие

В работе предотавляето результати исследования пограничного слоя профили нодельной лопаоти направляеного венца турбных. Принято изменным нараметрани: угоя напина, число Рейнольдов, интексплисть турбуленции впуского нотока.

В теорогических личнолениях ланинарио-турбулентного пограничного слон прините метод Цебецего-Снифа с нульораниенся ноделом турбуленции. Результати вычислений сравнено с эксперинентом.

THEORETICAL CALCULATIONS AND EXPERIMENT INVESTIGATION BOUNDARY LAYER ON TURBINE BLADE PROFILE

S

The boundary layer development on turbine blade profile is investigated in a low speed wind tunnol. Detailed measurements are presented for a vatied inflow angle, Reynolds number and turbulence level. The resulting data describing the laminer, transitional and turbulent regises of boundary layer are compared to theoretical predictions obtained from Cebeci-Smith colculation procedure.