

Dr hab. inż. Paweł Flaszynski, prof. IMP PAN
Zakład Aerodynamiki
Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk
Tel: 58 6995 268
E-mail: pflaszyn@imp.gda.pl

Recenzja pracy doktorskiej

mgra inż. Pawła Jonaka

pt.: „Application and evaluation of fully turbulent and transition-sensitive turbulence models for turbomachinery flows”
(„Zastosowanie i ocena własności modeli turbulencji i modeli przejścia laminarno-turbulentnego na przykładzie przepływów w maszynach wirnikowych”)

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie decyzji Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej oraz pisma, nr RNDIM/II/2021 z dnia 25.01.2021, przesłanego przez Pana prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

1. Charakterystyka pracy i uwagi ogólne

Praca doktorska Pana mgra inż. Pawła Jonaka napisana jest w języku angielskim i została zredagowana na 168 stronach. Materiał diskutowany w pracy ujęto w 7 rozdziałach, które zakończono spisem literatury zawierającym 193 pozycje. Pierwszy rozdział poprzedzony jest spisem rysunków, tabel, symboli i skrótów wykorzystanych w pracy.

W pierwszym rozdziale została przedstawiona krótka charakterystyka rozwoju turbin lotniczych i metod modelowania przepływu w turbinach gazowych części niskiego ciśnienia. Na tym tle został nakreślony cel pracy, którym jest rozwinięcie algebraicznego modelu przejścia laminarno-turbulentnego oraz ocena dokładności wybranych metod modelowania przepływów turbulentnych. Sformułowano także dwie tezy, które w skrócie można przedstawić jak poniżej:

1. *Rozszerzony, rozwinięty w ramach pracy doktorskiej, algebraiczny model przejścia L-T pozwala uzyskać dobrą zgodność wyników symulacji numerycznych przepływu przez płaską palisadę łopatkową z referencyjnymi wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu metody LES (ang. Large Eddy Simulation).*

2. *Obliczenia numeryczne przepływu realizowane z zastosowaniem klasycznych modeli turbulencji (nie uwzględniających laminarnych warstw przyściennych) pozwalają na uzyskanie wiarygodnych wyników symulacji zarówno w zakresie szacowania globalnych charakterystyk przepływowych dla turbiny niskiego ciśnienia jak i w opisie przepływu wtórnego przy podstawie łopat.*

Problem modelowania przejścia laminarno-turbulentnego w zastosowaniach lotniczych jest zagadnieniem badanym od wielu lat, ale wciąż pozostawiającym szereg pytań bez

odpowiedzi i zagadnień wymagających dalszych badań. Obecny rozwój metod obliczeniowych i pomiarowych oraz ich zastosowanie do badań w obszarze warstwy przyściennej pozwala na pogłębianie wiedzy o niestabilności przepływu w tym obszarze i formowaniu się struktur turbulentnych. Jednak złożoność tego procesu stawia wyzwania przed modelami umożliwiającymi poprawne przewidywanie przejścia laminarno-turbulentnego.

W przypadku palisad łopatkowych maszyn wirnikowych problem ten jest szczególnie złożony ze względu na silnie zmienny poziom turbulencji poza warstwą przyścinną, ślady łopatkowe i struktury wirowe generowane przez palisady poprzedzające daną łopatkę. W przypadku napędów lotniczych istnieje szerokie spektrum przypadków, gdzie przejście laminarno-turbulentne odgrywa istotną rolę i zasadniczo wpływa na dynamikę przepływu i charakterystyki przepływowe. Należy tu wspomnieć łopatki sprężarki/wentylatora, gdzie przejście laminarno-turbulentne może wystąpić w sposób naturalny w obszarze naddźwiękowym lub być indukowane oddziaływaniem fali uderzeniowej z warstwą przyścinną. Przejście laminarno-turbulentne jest także ważnym problemem na łopatkach turbin wysokiego ciśnienia charakteryzujących się dużą ilością otworów chłodzących, gdzie pomimo wydmuchu czynnika chłodzącego, ale na skutek silnej ekspansji dochodzi do relaminaryzacji warstwy przyściennej i powtórnego przejścia laminarno-turbulentnego. Położenie przejścia ma istotny wpływ na formujące się oderwanie warstwy przyściennej lub oddziaływanie fali uderzeniowej w palisadach transonicznych, a w konsekwencji na obciążenia termiczne i charakterystyki aerodynamiczne. Doktorant w swojej pracy koncentruje się na stopniach niskiego ciśnienia, w których ze względu na coraz większe obciążenie projektowanych układów łopatkowych i niską liczbę Reynoldsa przejście laminarno-turbulentne wymaga szczególnej uwagi. **Wobec czego można stwierdzić, że wybrana tematyka ma istotne znaczenie poznawcze, aplikacyjne i jest aktualnym zagadnieniem badawczym.**

Przegląd literatury został zawarty w rozdziale drugim, gdzie Doktorant koncentruje się na problemach przejścia laminarno-turbulentnego, przyczynach strat w kanale łopatkowym maszyny wirnikowej oraz omawia strukturę przepływów wtórnych. W tej części pracy scharakteryzowany jest proces przejścia laminarno-turbulentnego (L-T), tzw. przejście naturalne, przejście L-T inicjowane fluktuacją prędkości poza warstwą przyścinną (tzw. bypass) oraz indukowane oderwaniem warstwy przyściennej. Doktorant opisuje podstawowe mechanizmy oraz cechy struktury przepływu towarzyszące procesowi. To jest krótki fragment pracy, ale stanowi ważne wprowadzenie wskazujące na złożoność całego procesu i związanych z tym trudności w modelowaniu przejścia L-T. W dalszej części rozdziału omówiona jest struktura przepływu w kanale łopatkowym palisady turbinowej oraz podsumowanie prac numerycznych dotyczących modelowania przepływu turbulentnego z uwzględnieniem przejścia L-T na profilach lub palisadach łopatkowych turbin gazowych.

W rozdziale trzecim Doktorant opisuje modele turbulencji wykorzystywane w pracy, czyli $k-\epsilon$, $k-\omega$, $k-\omega$ SST oraz model przejścia laminarno-turbulentnego LCTM (Local correlation-based transition model) w sformułowaniu Mentera będącego rozszerzeniem modelu $\gamma-Re_{\theta}$. W dalszej części przedstawia najważniejsze cechy metody objętości skończonych i omawia metody numeryczne implementowane w Ansys/CFX i Ansys/Fluent, które są wykorzystywane w pracy.

Bardzo interesującym i ważnym elementem pracy jest analiza przeprowadzona w rozdziale 6, zawierającym opis algebraicznego modelu przejścia L-T i jego modyfikacje. Doktorant szczegółowo prezentuje cechy modelu zaproponowanego przez Kubacki&Dick, znaczenie poszczególnych funkcji i stałych związanych z parametrami warstwy przyściennej lub odpowiedzialnych za formowanie lub tłumienie struktur Klebanoffa. Na tym tle prezentuje rozwinięcie modelu przejścia L-T o elementy umożliwiające modelowanie oddziaływania struktur Klebanoffa dla przypadków z oderwaną warstwą przyścinną w obszarze intensywnej turbulencji poza warstwą i dodatnim gradientem ciśnienia w głównym kierunku przepływu. Kalibracja modelu została przeprowadzona w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych

uzyskanych na Uniwersytecie w Genewie. Przypadki testowe dotyczyły przepływu wzdłuż płaskiej ściany dla różnych liczb Reynoldsa, poziomów turbulencji i dodatnich gradientów ciśnienia wzdłuż przepływu. Z danymi eksperymentalnymi porównano składowe prędkości, energię kinetyczną turbulencji oraz współczynnik kształtu warstwy przyściennej. Należy podkreślić dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi, co oznacza dobrze dobrane parametry modelu. W kolejnym kroku wykonano walidację modelu porównując wyniki obliczeń z pomiarami dla przypadku testowego ERCOFTAC flat plate T3C i palisady profili turbinowych N3-60 oraz dostępnymi w literaturze wynikami obliczeń DNS dla palisady sprężarkowej V103. W przypadku płaskiej płytki przejście L-T przewidziane numerycznie zachodzi szybko na krótkim dystansie, krótszym niż zaobserwowane eksperymentalnie, ale lokalizacja przejścia jest wyznaczona bardzo dobrze. Wyniki obliczeń 2D dla przypadku palisady turbinowej i sprężarkowej również wykazują dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi lub wynikami DNS, chociaż w tym drugim przypadku wartości naprężeń w obszarze warstwy turbulentnej są niedoszacowane, czego przyczynę Doktorant wyjaśnia w pracy. Bez wątpliwości Doktorant wykazuje bardzo dobre zorientowanie w tematyce modelowania przepływu z przejściem L-T.

Interesująca analiza została wykonana dla palisady T106A reprezentującej układ turbiny niskoprężnej. Wyniki obliczeń dla dwóch przypadków warstwy przyściennej (laminarnej i turbulentnej) przed palisadą przeanalizowano dla trzech modeli turbulencji, dwóch z modelem przejścia L-T (algebraiczny i LCTM) oraz modelu $k-\omega$. Widać wyraźnie, że tylko poprzez poprawne modelowanie przejścia można przewidzieć oderwanie warstwy na stronie ssącej profilu i uzyskać zgodny z pomiarami rozkład współczynnika kształtu H . Jak pokazuje Doktorant, modelowanie przejścia L-T ma także wpływ na strukturę przepływu w palisadzie w zależności od wlotowej warstwy przyściennej, czego konsekwencje widać w rozkładzie uśrednionego współczynnika strat za palisadą. Ogólnie wiadomo, że wlotowa warstwa przyścienna ma wpływ na intensywność wiru kanałowego i wiru podkowiastego, a odpowiednia wizualizacja tych struktur nie jest trywialnym zadaniem. Doktorant wykorzystał do tego powierzchni stałej wartości kryterium Q . Ten obraz można byłoby dopełnić wartością wirowości wzdłużnej w wybranym przekroju na wylocie z palisady, co umożliwiłoby ocenę intensywności poszczególnych wirów. Na wybranych rysunkach przedstawione są wektory prędkości przepływu wtórnego, ale niestety nie są one czytelne. W rozdziale 4 lokalizacja wirów jest dyskutowana w oparciu o normalizowaną wartość energii kinetycznej turbulencji, gdzie wyniki obliczeń porównane są z wynikami pomiarów opublikowanymi przez Zunino. Ta wielkość mogłaby być wykorzystana także w rozdziale 6.

Lektura rozdziału 6 wzbudza dodatkowe zainteresowanie wynikami (prezentowanymi w wcześniejszym rozdziale) obliczeń układu przepływowego turbiny niskiego ciśnienia w Polonia Aero w Zielonce (w ramach projektu INNOLOT/COOPERNIK) i ewentualnym wpływem modelu przejścia L-T. Interesującym byłoby zastosowanie zaproponowanego modelu do obliczeń w kilku stopniach turbiny, ale jak wyjaśnia doktorant, takie obliczenia są na razie poza jego możliwościami ze względu na brak mocy obliczeniowych. Zamieszczone w rozdziale 5 wyniki obliczeń dla czterech stopni turbiny niskiego ciśnienia, poprzedzonych zawirowywaczem i wstępną kierownicą oraz kierownicą w kanale wylotowym są ważnym elementem pracy doktorskiej, który może być szerzej analizowany, gdy Doktorant będzie mógł sięgnąć po większe moce obliczeniowe. Obliczenia zostały wykonane przy użyciu modeli turbulencji $k-\omega$ i $k-\omega$ SST, jako wniosek analiz przeprowadzonych dla liniowej palisady profili turbiny niskiego ciśnienia w rozdziale 4. Z dalszych rozważań został odrzucony model $k-\epsilon$ ze względu na zbyt wysoki poziom energii kinetycznej turbulencji przy ścianie kanału. Warunki brzegowe zostały określone w oparciu o pomiary na stanowisku badawczym, a obliczenia zostały poprzedzone testami wpływu siatki w obszarze wstępnej kierownicy. Analiza struktury przepływu i współczynnika strat ciśnienia całkowitego została wykonana dla trzech metod modelowania interakcji kierownicy i wirnika: mixing-plane, frozen rotor i sliding mesh umożliwiającą obliczenia niestacjonarne. Układ kilku stopni wymaga czasochłonnych

obliczeń, co w pewnym sensie, uzasadnia gorszą rozdzielczość siatki przy powierzchni ścian kanału i łopatek, a na co zwraca uwagę Doktorant uzasadniając już wcześniej wspomnianymi problemami dostępu do mocy obliczeniowych. Wydaje się jednak, że dla konfiguracji z metodą mixing-plane można było spróbować ocenić wpływ zagęszczenia siatki biorąc pod uwagę, że uzyskane wyniki wskazują na istnienie oderwań przepływu na obu stronach wybranych łopatek. Pomimo tego, porównanie rozkładu ciśnienia z pomiarami na wstępnej kierownicy wykazuje dobrą zgodność. Szkoda, że w pracy nie pokazano porównania zmierzonych i obliczonych parametrów za turbiną.

Bardzo wartościowym elementem tej części pracy jest identyfikacja i analiza struktur wirowych w wybranych przekrojach w kanale wstępnej kierownicy jednocześnie przedstawiających lokalny współczynnik strat ciśnienia całkowitego. Przepływy wtórne zostały także omówione w oparciu o powierzchnie stałej wartości kryterium Q, ale niestety czytelność rysunku 5.6 jest ograniczona i trudno dostrzec opisywane struktury wirowe.

Problem naukowy jaki analizował Doktorant jest bardzo ważny gdyż wskazuje na możliwość skutecznego stosowania algebraicznego modelu przejścia L-T, jako alternatywnego dla powszechnie stosowanych i bardziej złożonych modeli.

2. Uwagi szczegółowe

Poza uwagami w pierwszej części recenzji nasuwają się poniższe spostrzeżenia i pytania.

1. Szerokość śladu na rys. 4.5 i podana w tabeli 4.2 jest większa o ok. 50% niż zmierzona. Czy na profilu jest oderwanie warstwy przyściennej? Czy zastosowanie modelu turbulencji z przejściem L-T poprawiłoby ten wynik?
2. Na rys. 4.5b, niżej położone maksimum q jest zinterpretowane jako efekt wiru TS. Proszę wyjaśnić z czego to wynika. Czy wizualizacja kryterium Q to potwierdza?
3. W tabeli 5.3 podano wartości masowego natężenia przepływu, ciśnienia całkowitego oraz temperatury całkowitej w odniesieniu do wartości zmierzonych. W pracy nie podano wartości absolutnych wobec czego proszę o podanie tych różnic dla spadku ciśnienia całkowitego i temperatury całkowitej (przed i za turbiną).
4. Tabela 5.5 - co jest przyczyną tak dużego zróżnicowania strat spowodowanych przepływami wtórnymi w kierownicy V3 i V4 przy wewnętrznym i zewnętrznym ograniczeniu kanału?
5. Naprężenie styczne na łopatkach kierowniczych i wirnikowych przedstawione na rys. 5.10 wskazuje na oderwanie generowane na krawędzi natarcia, co sugeruje, że jest ono powodowane lokalnym kątem napływu strumienia. Czy na stronie ssącej również zaobserwowano jakieś oderwanie lub relatywnie niską wartość naprężenia, która mogła by oznaczać niebezpieczeństwo oderwania?
6. Na stronie 113 podano, że parametr y^+ nie przekracza wartości 0.01. Jaka jest przyczyna stosowania tak gęstej siatki przy ścianie?
7. Na rys. 6.11a i c pokazano rozkład współczynnik tarcia c_f na stronie ssącej profilu. Dla niskiego poziomu turbulencji uzyskano bardzo dobrą zgodność z wynikami DNS, a dla wyższego poziomu $Tu\%$ przejście L-T występuje w miejscu, gdzie DNS wykazuje początek oderwania. Czy porównywano inne parametry np. współczynnik ciśnienia, albo parametr kształtu warstwy H dla tego przypadku?
8. Opisując strukturę przepływu na rys. 6.19, Doktorant stwierdza, że wiry PHS i SHS w przypadku modelu $k-\omega$ formują się bliżej krawędzi sływu niż w przypadku z modelem przejścia L-T. Czy można wyjaśnić skąd ta różnica i dlaczego nie widać tych wirów na rys. 6.19a. Jak wygląda profil prędkości przed krawędzią natarcia dla obu przypadków? Wir określony jako narożny PC_{LE} przypomina wir podkowiasty i tak jest oznaczony na rys. 6.24 i 6.25 dla turbulentnej warstwy przed palisadą.

9. Struktura przepływu na rys. 6.18, 6.19, 6.24 i 6.25 wskazuje na szybko zanikającą część wiru podkowiastego po stronie ssącej, ale wyraźnie są widoczne SCE_1 , SCE_2 i SCS. W jaki sposób je zidentyfikowano? Czy wizualizacja wiru SHS w oparciu o linie prądu i wirowość w kierunku normalnym do wybranych przekrojów prostopadłych do powierzchni łopatki również wykazuje szybką dyssypację tego wiru?
10. Czy wizualizacja linii prądu przy powierzchni T106A (tzw. numeryczna wizualizacja olejowa) wykazuje w obszarze naroża oderwanie, jak sugeruje to nazwa wiru *suction-side corner separation vortex*?

3. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Pan mgr inż. Paweł Jonak osiągnął założone cele. Zaproponowane rozwinięcie algebraicznego modelu przejścia laminarno-turbulentnego prowadzi do poprawy wyników symulacji numerycznych przepływu w oderwanej warstwie przyściennej w obecności dużego poziomu turbulencji, co ma duże znaczenie dla poprawnego wyznaczenia struktury przepływu nie tylko w kanale łopatkowym turbiny. W swojej pracy udowodnił znajomość badanych zagadnień i wykazał umiejętność detekcji i identyfikacji struktur wirowych w palisadach turbin gazowych, a wykonane obliczenia stanowią bazę wyników, która może być wykorzystana do dalszych analiz. Uwagi krytyczne zawarte w recenzji nie obniżają wartości naukowej pracy doktorskiej i nie wpływają na moją pozytywną opinię.

Uważam, że praca doktorska Pana mgra inż. Pawła Jonaka pt.: „Application and evaluation of fully turbulent and transition-sensitive turbulence models for turbomachinery flows” w pełni odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

