

dr hab. inż. Marek Jaszczur, prof. AGH
Prodziekan ds. Kształcenia

Kraków, 29.04.2021

Katedra Podstawowych Problemów Energetyki
Wydział Energetyki i Paliw
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 30
e-mail jaszczur@agh.edu.pl
Tel:126172657, Fax:126173767

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Pawła Jonaka

**pt. „Application and evaluation of fully turbulent and transition-sensitive
turbulence models for turbomachinery flows”**

**wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Sławomira Kubackiego na Wydziale
Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej**

I. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika (pismo RNDIM/II/4/2021 z dnia 25 stycznia 2021 roku).

II. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska dotyczy zastosowania oraz oceny własności modeli turbulencji oraz modeli przejścia laminarno-turbulentnego. Doktorant kontynuuje tym samym, badania prowadzone na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa przez promotora rozprawy profesora uczelni dr hab. inż. Sławomira Kubackiego. Modelowanie turbulencji szczególnie dla procesów przemysłowych i zagadnień środowiskowych nadal pozostaje olbrzymim wyzwaniem i wymaga dalszych intensywnych badań. Od wielu lat nieprzerwanie metoda RANS jest powszechnie wykorzystywana z mniejszym lub większym sukcesem podczas modelowania CFD elementów statków powietrznych w szczególności elementów silników lotniczych. Jednak opracowanie efektywnych modeli matematycznych i numerycznych dla symulacji takich zagadnień będących podstawą wiarygodnych i dokładnych obliczeń nieustannie natrafia na poważne problemy.

W pracy doktorskiej przeprowadzone przez Autora rozważania i eksperymenty numeryczne dotyczyły oceny własności wyselekcjonowanych wstępnie metod modelowania zarówno przepływów z przejściem laminarno-turbulentnym w warstwie przyściennej jak i przepływów

turbulentnych w pełni rozwiniętych. Jak pokazują badania warstwa przyścienna na znacznej części powierzchni niektórych elementów turbin może mieć charakter laminarny lub laminarno-turbulentny co sprawia, że analizy tego typu są uzasadnione. Autor w swojej pracy podejmuje próbę rozwinięcia algebraicznego modelu przejścia laminarno-turbulentnego o elementy umożliwiające precyzyjne modelowanie interakcji wzdłużnych struktur wirowych, w przypadku przepływu w oderwanej warstwie przyściennej w warunkach dużej intensywności turbulencji w przepływie poza warstwą oraz dla dużego gradientu ciśnienia w kierunku przepływu tak, aby w wiarygodny sposób opisywał dynamikę turbulentnej wymiany pędu. Takie rozwinięcie pozwoliłoby na wykorzystanie modelu m.in. do optymalizacji kształtu wybranych elementów silników lotniczych w szczególności sprężarek i turbin.

Autor pracy w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym na Uniwersytecie w Genewie, w których pomiarom podlegał przepływ nad płytą dla różnych liczb Reynoldsa, gradientów ciśnienia czy poziomów turbulencji; dokonał kalibracji rozbudowanego i zaimplementowanego w doktoracie numerycznego modelu przejścia laminarno-turbulentnego. Analizy nie poprzestają jednak na porównaniu wyników z prostymi geometrycznie konfiguracjami lecz zmodyfikowany model jest weryfikowany dla innych złożonych przypadków przepływ przez płaską palisadę łopat N3-60 oraz palisadę łopat V103. Wyniki symulacji komputerowych porównane zostały ponadto z referencyjnymi wynikami uzyskanymi jedną z dokładniejszych metod - metodą Large Eddy Simulation (LES) jak również z wynikami obliczeń uzyskanych z wykorzystaniem modelu $k-\omega$ i modelu przejścia laminarno-turbulentnego.

W pracy doktorskiej zaprezentowano również walidację trzech modeli turbulencji wykorzystywanych powszechnie w analizach przepływów przemysłowych: model $k-\epsilon$, $k-\omega$ oraz $k-\omega$ SST. Walidację przeprowadzono w oparciu o przepływ przez palisadę z łopatami zainstalowanymi na płycie. Poza oceną ilościową wyników dokonano oceny jakościowej oraz szczegółowo przeanalizowano przepływ wtórny w pobliżu połączenia łopat z płytą. Analizy przeprowadzone przez Autora z wykorzystaniem różnych modeli wykazały, że modele $k-\omega$ i $k-\omega$ SST najlepiej odwzorowują przepływ i prawidłowo opisują dynamikę generowanych u podstawy łopat turbulentnych struktur koherentnych. Opierając się na zwalidowanych modelach w pracy przeprowadzono numeryczną analizę przepływu przez turbinę niskiego ciśnienia, dla której wyniki porównano z wynikami pomiarów eksperymentalnych uzyskanych w Laboratorium Badań Napędów Lotniczych Polonia Aero. Dokonana ocena zgodności wyników numerycznych w szczególności natężenia przepływu, rozkładów ciśnienia oraz wartości temperatury pozwoliła na uwiarygodnienie rozpatrywanych modeli.

Tematyka rozprawy jest niezwykle ważna i aktualna wobec zmieniających się w szybkim tempie wymogów w stosunku do napędów lotniczych w szczególności dotyczących sprawności, zanieczyszczenia środowiska czy hałasu. Zmodyfikowane modele turbulencji mogą w oczywisty sposób przełożyć się na aspekty poznawcze oraz aplikacyjne.

Skala trudności podjętych przez Autora badań, ze względu na analizę niezwykle złożonych zjawisk jakimi są przepływy turbulentne oraz złożoność rozpatrywanych układów, jest duża i odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim.

Rozprawę można od strony formalnej zakwalifikować do dziedziny nauk inżynierjno-technicznych i dyscypliny inżynieria mechaniczna.

III. Struktura i ocena wartości naukowej

Opiniowana rozprawa została wykonana na Politechnice Warszawskiej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, pod opieką naukową dr hab. inż. Sławomira Kubackiego, prof. PW. Pomocniczym opiekunem naukowym rozprawy jest dr inż. Zbigniew Rarata. Została zredagowana w języku angielskim i liczy 168 stron. Składa się z 7 rozdziałów, bibliografii i streszczenia. Bibliografia zawiera aż 193 pozycje które niejednokrotnie zostały omówione dosyć szczegółowo w tekście. Warto podkreślić, że wiele pozycji opisuje najnowsze osiągnięcia w dziedzinie rozwiązań i modelowania komputerowego w szczególności modelowania turbulencji. Wśród publikacji znalazło się również 5 pozycji Autora rozprawy, w tym 3 jako głównego Autora. Na uwagę zasługuje również fakt cytowania prac z krajowych ośrodków, co świadczy o dobrej wiedzy Autora na temat realizowanych w Polsce badań.

Główny cel pracy stanowiła kontynuacja wcześniejszych badań i dalszy rozwój modelu przejścia laminarno-turbulentnego do przewidywania zmian przepływu wywołanych separacją w warstwie przyściennej. Motywacją Autora jest fakt, że najpopularniejsze programy CFD używane do przewidywania tego typu przepływu są typowo oparte o klasyczne jedno lub dwurównaniowe modele turbulencji, które zakładają istnienie w pełni turbulentnych przepływów w całej domenie obliczeniowej. Jak wykazano w pracy nie jest to zasadne, ponieważ znaczące części warstw granicznych na powierzchniach łopatek są laminarne, a zatem ocena jakości modeli turbulencji w reprezentacji globalnych charakterystyk przepływu i struktura przepływu wtórnego w ścianach czołowych powinny być zweryfikowane. Drugim zdefiniowanym w pracy celem jest ocena przewidywania rzeczywistych przepływów w maszynach wirnikowych w oparciu o modele turbulencji opracowane dla przepływów w pełni turbulentnych.

Opierając się o tak zdefiniowane cele pracy doktorskiej, sformułowano dwie zasadnicze tezy naukowe rozprawy. Zgodnie z podanym przez Autora tłumaczeniem tezy zostały sformułowane następująco:

„1. Rozwinięty, w ramach pracy, algebraiczny model przejścia laminarno-turbulentnego pozwala na uzyskanie wiarygodnych wyników symulacji numerycznych przepływu w oderwanej warstwie przyściennej w obecności dużego poziomu turbulencji w przepływie poza warstwą i w obecności dużego dodatniego gradientu ciśnienia w kierunku głównym przepływu. Rozszerzony algebraiczny model przejścia L-T pozwala uzyskać dobrą zgodność wyników symulacji numerycznych przepływu przez płaską palisadę z łopatkami utwierdzonymi na płycie 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.

Wyniki zaprezentowane w pracy potwierdziły tezy naukowe, wykazano, że zarówno model LCTM jak i model algebraiczny pozwalają na uzyskanie dobrej zgodności w porównaniu do wyników uzyskanych metodą LES, przy czym model algebraiczny w oszacowaniu strat ciśnienia

całkowitego na wylocie z palisady okazał się dokładniejszy od modeli k- ω oraz LCTM. Tym bardziej zasadne jest więc stwierdzenie, że rozszerzony model algebraiczny przejścia laminarno-turbulentnego może stanowić dobrą alternatywę dla obecnie stosowanych modeli opartych o dodatkowe równania transportu.

Analizy potwierdziły również, że standardowe modele turbulencji pozwalają w sposób poprawny odwzorować ogólne globalne charakterystyki przepływu turbulentnego w szczególności dla przepływu przez turbinę niskiego ciśnienia, jednak co do zasady mają one znaczne ograniczenia w lokalnym odwzorowaniu struktur turbulentnych np. u podstawy łopat, powodując błędy w szacowaniu strat ciśnienia.

Opiniowana praca zawiera:

- a) wstęp,
- b) bogaty i wieloźródłowy opis stosowanych metodologii, typów analiz, sposobów modelowania matematycznego,
- c) zwięźle sformułowany cel,
- d) zakres rozprawy oraz tezy pracy,
- e) opisy modeli turbulencji wykorzystywanych w tego typu zagadnieniach,
- f) szczegółowy opis stosowanych metod numerycznych,
- g) analizę układów poprzedzoną założeniami i uproszczeniami,
- h) wyniki obliczeń dla różnych implementacji modeli turbulencji,
- i) porównanie wyników obliczeń z pomiarami eksperymentalnymi oraz wynikami LES,
- j) kalibrację i walidację modelu matematycznego,
- k) dyskusję wyników i zwięźłe podsumowanie, w postaci najistotniejszych wniosków.

Przyjęta przez Autora koncepcja, jak i metodyka rozwiązania przedstawionego w rozprawie problemu, zostały poprawnie dobrane i pomimo dokonanych uproszczeń, pozostają poprawne pod względem merytorycznym. Autor, swoją pracą udokumentował dobre opanowanie warsztatu naukowego. Na podkreślenie zasługuje wiedza i umiejętności z zakresu modelowania komputerowego w szczególności modelowania turbulencji oraz opanowanie narzędzi, w tym implementacja i zaprogramowanie własnych funkcji kodu numerycznego celem modyfikacji istniejących modeli turbulencji. W rozprawie, z sukcesem opracowano, zaimplementowano i przetestowano zmodyfikowane modele mogące stanowić niezwykle istotne narzędzie wspomagające procesy projektowania i optymalizacji nowoczesnych turbin.

Do ważniejszych elementów pracy stanowiących oryginalny wkład Autora należy zaliczyć:

1. Opracowanie i zaimplementowanie rozbudowanego algebraicznego modelu przejścia laminarno-turbulentnego, który pozwolił na uzyskanie wiarygodnych wyników analiz numerycznych dla przepływu w oderwanej warstwie przyściennej oraz znacznego poziomu intensywności turbulencji i dużego gradientu ciśnienia.
2. Przeprowadzenie obliczeń z wykorzystaniem zaproponowanego modelu i uzyskanie poprawnych oszacowań wartości kluczowych parametrów dla przepływu przez palisadę z łopatami zamontowanymi na płaskiej płycie.

3. Poprawne odwzorowanie struktury wirowej SCS - potwierdzonej przez wielu innych Autorów wynikami badań eksperymentalnych i numerycznych - dla przepływu przez płaską palisadę z łopatomy posadowionymi na płycie.
4. Przeprowadzenie oceny dokładności wybranych modeli turbulencji w przepływie przez turbinę niskiego ciśnienia.
5. Zwaliowanie wyników obliczeń numerycznych pomiarami zrealizowanymi w Laboratorium Badań Napędów Lotniczych Polonia Aero, co pozwoliło na wykazanie, że standardowe modele turbulentne odwzorowują w sposób poprawny ogólne charakterystyki przepływu turbulenta przez turbinę niskiego ciśnienia.

IV. Uwagi rzeczowe i pytania do Autora

Rozprawa jest napisana przejrzysto, jednak niektóre kwestie wyszczególnione poniżej wymagają dodatkowego wyjaśnienia:

1. We wstępie podano, że emisja CO₂ od statków powietrznych rośnie szybciej niż z jakiegokolwiek innego rodzaju transportu co poparto rysunkiem 1.1. W przeliczeniu na osobę i km zaprezentowane statystyki wskazują na wysoką emisję CO₂ jednak zastanawia czy jest to znaczący problem o zasięgu globalnym?
2. W przeglądzie literatury wskazano kilka prac w których Autorzy opierali swoje obliczenia na metodzie DNS (Direct Numerical Simulation). Wydaje się zasadne porównanie wyników proponowanych modeli turbulencji do tego typu wyników DNS?
3. Zastanawia fakt, dlaczego w analizach przedstawionych w pracy wykorzystano model standard k-ε pomimo, że znane są jego ograniczenia i nie nadaje się on do tego typu obliczeń. Dużo ciekawsze było porównanie wyników obliczeń uzyskanych z wykorzystaniem modelu k-ε w wersji RNG albo Realizable zamiast standard.
4. Równania (3.35) wprowadzają parametr chropowatość, czy to oznacza, że analizowano wpływ chropowatości na wyniki; ile wynosił ten parametr dla prezentowanych wyników?
5. Rysunek 3.1 przedstawia sposób dyskretyzacji przestrzeni w pobliżu ściany dla przepływów o małej i wysokiej liczbie Reynoldsa. Czy taka dyskretyzacja zawsze występuje i czy Autor pracy właśnie taką zastosował? W analizowanych przypadkach poza hydrodynamiczną występuje również termiczna warstwa przyścienna, która wymaga właściwej siatki i którą należy poprawnie zamodelować. Jednak w pracy nie ma informacji na ten temat.
6. Symulacje komputerowe, oparte o różne modele turbulencji mogą generować różne wyniki zarówno pod względem ilościowym jak i jakościowym co zresztą Autor wykazał w pracy. Na problematykę modeli turbulencji nakłada się dodatkowo problem dyskretyzacji przestrzeni. Czy Autor analizował wpływ siatek na poszczególne modele? Ponadto poza dyskretyzacją przestrzeni w obliczeniach niestacjonarnych ważna jest również dyskretyzacja czasu. Czy weryfikowano wpływ kroku czasowego na obliczenia?

7. W obliczeniach wykorzystano metodę MRF co oznacza, że pewien obszar domeny „rotuje” podczas gdy inny pozostaje np. w spoczynku, przy czym z punktu widzenia dokładności obliczeń istotny jest właściwy podział domen i ich rozgraniczenie. W pracy nie przedstawiono w jaki sposób dokonano podziału domen. Ponadto w przypadku obliczeń stacjonarnych analizowany jest pewien stały „zamrożony” układ geometryczny który nie zmienia położenia względem siebie, jednak może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki.
8. Jakie byłyby potencjalne propozycje rozszerzeń i wskazówki dla kontynuatorów badań o podobnej tematyce?

Podkreślić należy, że powyższe uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej pracy.

V. Strona redakcyjna pracy

Rozprawa doktorska jest zredagowana bardzo dobrze. Struktura pracy jest poprawna, wprowadzono bardzo dobry podział na sekcje; opisy i wyprowadzenie równań oraz przygotowanie wartościowych rysunków dobrej jakości, o dobrze przemyślanej zawartości, jak i ilości, nie budzi zastrzeżeń. Praca zawiera kilka drobnych błędów literowych i niepoprawnych konstrukcji gramatycznych, które jednak nie wpływają na czytelność tekstu ani na jego ocenę. Poniżej zestawiono wybrane zauważone w pracy usterki redakcyjne:

- a) brak jest odnośników literaturowych do szeregu podawanych w pracy wzorów np. rozdział 3 model matematyczny i dla szeregu innych rozdziałów,
- b) dla liczby Macha wykorzystywane jest zarówno oznaczenie M jak również Ma ,
- c) w wykazie oznaczeń pominięto definicje liczb kryterialnych, np. brak definicji Re , Re_t (s.28),
- d) następuje wielokrotne definiowanie skrótów w pracy, np. LCTM lub LPT kilkanaście razy,
- e) występuje cytowanie zbyt wielu pozycji literaturowych na raz np. [39-45] (s.34),
- f) drobne błędy w zdaniach: „opposite sense of rotation” (s.40), „conservation f mass” (s.49), „Nearly on separated regions are observed” (s.101), „term in between brackets” (s.109), „ Wilcox[?]” (s.109), „100 in not high enough”.

VI. Wniosek końcowy

Przedstawiona praca stanowi pewną zamkniętą dobrze opracowaną całość, dowodzi posiadania przez Autora zasobu wiedzy z zakresu modelowania komputerowego przepływów w szczególności modelowania turbulencji i przepływów przez palisadę łopata oraz opanowania w stopniu bardzo dobrym zagadnień obliczeniowych, metod analizy zjawisk, jak i umiejętności analizowania uzyskanych wyników, ich interpretacji i falsyfikacji oraz wyciągania logicznych

wniosków. Autor w swojej rozprawie w pełni zrealizował postawione cele a ponadto w sposób właściwy zaprezentował istotę przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników.

Recenzowana rozprawa doktorska wskazuje na znaczny wkład pracy Autora i dowodzi rozwiązania ważnego problemu naukowego. Wyniki z prowadzonych badań zostały opublikowane m. in w bardzo dobrym czasopiśmie International Journal of Heat and Fluid Flow: S. Kubacki, P. Jonak, and E. Dick. Evaluation of an algebraic model for laminar-to-turbulent transition on secondary flow loss in a low-pressure turbine cascade with an endwall. International Journal of Heat and Fluid Flow, 77:98–112, 2019, oraz P. Jonak, T. Borzecki, and S. Kubacki. Prediction of secondary flow losses in an entrance duct to a low-pressure turbine. Archives of Mechanics, 71(1):65–90, 2019.

Przedstawiona rozprawa pozwala stwierdzić, że Autor stał się bardzo dobrym specjalistą w zakresie modelowania przepływów turbulentnych w szczególności dla zastosowań w maszynach rotacyjnych. Wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, niezbędną do przygotowania rozprawy, co wynika jednoznacznie z treści rozprawy.

Podsumowując na podstawie przedstawionej do recenzji pracy stwierdzam, że mgr inż. Paweł Jonak wykazał opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań. Ponadto będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska pt. " Application and evaluation of fully turbulent and transition-sensitive turbulence models for turbomachinery flows", (tłum. Zastosowanie i ocena własności modeli turbulencji i modeli przejścia laminarnoturbulentnego na przykładzie przepływów w maszynach wirnikowych) spełnia oczekiwania stawiane zwyczajowo rozprawom doktorskim, a także wymagania formalne stawiane pracom doktorskim i odpowiada warunkom ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) oraz jest zgodna z przepisami wprowadzającymi Ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U 2018, poz. 1669 z późn. zm.) i może stanowić podstawę do ubiegania się przez mgra inż. Pawła Jonaka o stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

W oparciu o powyższe stawiam wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgra inż. Pawła Jonaka do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.



Marek Jaszczur