

Prof. dr hab. inż. Artur TYLISZCZAK
Katedra Maszyn Ciepłych
Politechnika Częstochowska

Al. Armii Krajowej 21
42-201 Częstochowa

tel.: (034) 3250505; fax: (034) 3250555

e-mail: artur.tyliszczak@pcz.pl

Częstochowa, 30.09.2023

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Piotrowicza „Oddziaływanie fali uderzeniowej z warstwą przyścienną na profilu sprężarki lotniczej”

Recenzja została opracowana na prośbę dr. hab. inż. Grzegorza Żywicę, prof. IMP PAN, zawartą w skierowanym do mnie piśmie z dnia 12 lipca 2023r.

1. Ocena ogólna.

Tematyka pracy dotyczy numerycznego modelowania i analizy przepływów transonicznych w sąsiedztwie ścian profilu sprężarki lotniczej ze szczególnym uwzględnieniem interakcji fal uderzeniowych z warstwą przyścienną. Pomimo wieloletnich prac w tej dziedzinie, jest to wciąż bez wątpienia bardzo ważna tematyka. Świadczy o tym chociażby fakt, że była ona głównym przedmiotem badań prowadzonych w ramach europejskiego projektu badawczego TFAST (Transition Location Effect on Shock Wave Boundary Layer Interaction, 2012-2016).

W pracy wykorzystywano program FINE™/Turbo firmy NUMECA dedykowany do badań przepływów przyściennych wokół profili łopatek turbinowych, sprężarkowych, palisad itp.. Wyniki symulacji porównywano z danymi eksperymentalnymi. **W mojej ocenie temat pracy i użyte w niej metody analizy rozpatrywanych zagadnień pozwalają zakwalifikować ją do dyscypliny inżynieria mechaniczna.** W pracy analizowano oddziaływanie fali uderzeniowej na warstwę przyścienną części ssącej łopatki sprężarki lotniczej ze szczególnym naciskiem na kształt fali uderzeniowej w sąsiedztwie powierzchni łopatki, powstające fale kompresji/ekspansji, lokalizację przejścia laminarno-turbulentnego (L-T) oraz lokalizację i wielkość strefy oderwania warstwy. Ponadto, w pracy analizowano możliwość kontroli tych parametrów poprzez umieszczenie na powierzchni łopatki elementów turbulizujących warstwę przyścienną w kilku lokalizacjach względem fali uderzeniowej. W pracy nie zdefiniowano w sposób jawny tezy, ale można założyć, że jest nią „Zmiana lokalizacji punktu przejścia L-T pozwala na modyfikację przepływu w części spływowej łopatki transonicznej”. Wykorzystanie metod CFD w tego typu badaniach jest niewątpliwie zasadne. Umożliwia to zarówno szczegółową analizę wszystkich parametrów przepływu, niekiedy niemierzalnych w pracach eksperymentalnych, jak i znacznie redukuje koszty prowadzonych badań. Mam tutaj na uwadze zawsze wysoki koszt finansowy badań eksperymentalnych, ich czasochłonność i stopień skomplikowania w przypadku pomiarów parametrów przepływu przy dużych prędkościach czynnika, sprawiających, że warstwa przyścienna jest bardzo cienka. W mojej ocenie, narzędzia badawcze, tj. CFD wsparte badaniami eksperymentalnymi zostało bardzo dobrze dobrane do zakresu realizowanych prac. Nie jest dla mnie jednak jasne co było

 1

zasadniczym **celem poznawczym** pracy, pomimo iż opisowi celu i zakresu pracy poświęcono cały rozdział i wyszczególniono w nim cztery zadania (w tym 2 techniczne). Czy celem pracy była: (1) wyłącznie analiza wpływu fali uderzeniowej na warstwę przyścienną łopatkı gładkiej oraz z elementami zaburzającymi; (2) próba polepszenia parametrów pracy łopatkı sprężarki poprzez kontrolę przejścia L-T; (3) ocena czy taka kontrola ma sens i warto na niej koncentrować przyszłe badania? Skłaniałbym się ku opcji nr (1), ale proszę doktoranta o jednoznaczną deklarację w tej kwestii. Pomijając tę wątpliwość, przedstawiona mi do oceny **praca jest oryginalna i reprezentuje stopień złożoności zwyczajowo spotykany w pracach doktorskich**.

2. Ocena szczegółowa.

Układ pracy jest typowy do tego jaki dotychczas spotykałem w recenzowanych przeze mnie pracach doktorskich. Praca jest stosunkowo krótka (97 stron łącznie ze spisem literatury), ale nie traktuję tego jako element negatywny. Zasadnicza część pracy składa się z wprowadzenia, sześciu rozdziałów opisujących kolejno model matematyczny, strukturę przepływu międzyłopatkowego, opis stanowiska eksperymentalnego, wyniki symulacji 2D i 3D. Pracę kończą podsumowanie uzyskanych wyników i wnioski. Ponadto, w pracy zamieszczono spis ilustracji, tabel i wykaz większości symboli. Spis literatury nie jest obszerny, zawiera 63 pozycji, w tym 2 pozycje, których doktorant jest autorem [31] i współautorem [57]. W przypadku pracy [31] nie podano kompletnych danych bibliograficznych. Proszę o informację, czy są to jedyne publikacje doktoranta.

We wstępie przedstawiono elementarną wiedzę na temat przepływów przyściennych oraz w kanałach międzyłopatkowych. Opisano, jak wygląda struktura warstwy przyściennej oraz obszary przepływu wokół łopatek sprężarek. Omówiono typy fal uderzeniowych, mechanizmy ich oddziaływania z warstwą przyścienną oraz cechy przepływu przed i za falami uderzeniowymi. Przegląd literatury przedstawiony w tym rozdziale jest wystarczający, ale w mojej ocenie skupia się on głównie na fizykalnych aspektach analizowanego zagadnienia, a za mało uwagi poświęcono zasadniczej tematyce pracy, tj. zastosowaniom CFD do analizy przepływów w układach sprężarkowych oraz próbą ich optymalizacji przy wykorzystaniu CFD. Definiując zakres badań podano orientacyjne lokalizacje stopni (turbulizatorów) na łopatkę względem fali uderzeniowej oraz ich wysokości, od 0.05mm do 0.8mm. Proszę o informację jakie przesłanki kierowały za wyborem wielkości stopni i ich położenia.

Rozdział 2 to opis klasycznego modelu matematycznego do analizy przepływów ściśliwych. W Rów. 2.17 jest błąd. Ponadto, napisano pod nim, że „Dla płynów newtonowskich tensor naprężeń τ_{ij} może być związany z właściwościami materiałowym.....”, co sugeruje, że można go też przedstawić jako powiązanego z innymi parametrami. Co doktorant ma tutaj na myśli? Rozdziały 2.2-2.3 przedstawiają metody modelowania przepływu turbulentnego. Wykorzystywane jest uśrednianie Favre’a, tzw. ważone gęstościowo, a nie masowo jak podano w pracy. Jest ono stosowane tylko do wybranych wielkości, np. do pola prędkości, entalpii. Do innych wielkości, np. ciśnienia, gęstości, stosuje się uśrednianie klasyczne Reynoldsa. Proszę o informację, dlaczego stosuje się taki zabieg (inny typ uśredniania) i dlaczego, generalnie, stosuje się uśrednianie Favre’a. W rozdziale 2.3, opisując modele hybrydowe podano, że są takie, które łączą DNS z innymi modelami. Proszę podać przykład takiej symulacji lub artykułu, gdzie była ona stosowana. Nie rozumiem, co doktorant ma na myśli pisząc o modelowanej analitycznie części podsiatkowej fluktuacji w metodzie LES.

Podobnie, nie jestem pewien co doktorant ma na myśli pisząc o 'efekcie dużej skali', 'naprężeniach głównych' lub 'trójwymiarowych cechach' opisując metody RANS. Równanie 2.31 jest równaniem transportu kinetycznej energii turbulencji, a nie jej produkcji. Wielkość 'omega' w Rów. 2.32 to nie jest ani 'energia kinetycznej turbulencji', bo nie ma takiego pojęcia jak 'kinetyczna turbulencja'. Wielkość 'omega' nie jest też 'energiją kinetyczną turbulencji', jak być może doktorant chciał napisać. Proszę o informację, co to jest część inicjująca i destrukcyjna, dla których wprowadza się związki 2.36 i 2.37.

Począwszy od rozdziału 3, doktorant posługuje się wielkością 'izentropowa liczba Macha'. Zakładam, że w jakiś sposób jej definicja różni się od powszechnie znanej liczby Macha. W jaki? Ta informacja powinna się znaleźć w pracy. W rozdziale tym opisano metodykę tworzenia siatki obliczeniowej dla przepływu w palisadzie łopatkowej. Siatkę pokazano na Rys. 3.1. Jest to bardzo starannie przygotowana blokowo-strukturalna siatka obliczeniowa, która wg mojej wiedzy dla analizowanego typu przepływu zapewnia uzyskanie najdokładniejszych wyników. Proszę o informację w jaki sposób określono wielkość elementów siatki zapewniających $y^+ < 1$ nie znając wyników symulacji. Tak to wynika z tekstu. Ponadto, co należy rozumieć przez stwierdzenie, że „współczynnik turbulentnej lepkości wynosi 10” na str. 35? W tabeli 3.2, podającej parametry metody rozwiązania napisano, „Dyskretyzacja czasowa – obliczenia stacjonarne” oraz „Schemat numeryczny – jawny Runge-Kutta”. Nie rozumiem tego, jedno wyklucza drugie. Proszę o wyjaśnienie.

Pierwsze wyniki symulacji pokazano na Rys. 3.2. Bardzo dobrze ilustrują one strukturę przepływu pomiędzy łopatkami. Wyniki symulacji uzyskane przez doktoranta z wykorzystaniem modelu EARSM stosunkowo dobrze zgadzają się z wynikami uzyskanymi przy pomocy modelu MISES przez „producenta silników lotniczych”. Cokolwiek by to nie znaczyło, przedstawione porównanie potwierdza poprawność przyjętej metody symulacji.

Na str. 38 napisano, że aby uprościć model zrezygnowano z modelowania przejścia L-T. Czym to było podyktowane wiedząc, że poprawna lokalizacja przejścia L-T jest kluczowym elementem badań? W rozdziale 3.3 opisano metodykę redukcji przepływów w narożach poprzez odsysanie i podano parametry otworów odsysających. Czym się sugerowano przy doborze ich parametrów, tj. wielkości i położenia? Co znaczy, że ciśnienie statyczne w otworze było dobrane tak, że przepływ w nim był zdławiony? W jaki sposób dobrano to ciśnienie w otworze? Wyniki uzyskane dla tych konfiguracji pokazały, że jest to skuteczna metoda kontroli rozmiaru poprzecznego przepływów narożnych.

W rozdziale 4 opisano projekt stanowiska badawczego na bazie wyników symulacji przedstawionych w rozdziale 3. Omówiona koncepcja budowy kanału, rozmieszczenia łopatek i ich zmiennego położenia są precyzyjnie opisane. Wyniki symulacji 2D bardzo dobrze pokazują zmienną strukturę przepływu w poszczególnych sekcjach kanału. Szkoda, że na Rys. 4.3 nie pokazano szczegółów budowy siatki wokół łopatek. Nie wiadomo, czy jest ona niestukturalna (jak napisano w pracy), czy też blokowo-strukturalna jak w dalszej części pracy (model 3D). Nie rozumiem sensu ostatniego zdania na str. 47, tj. „Dlatego też należy uwzględnić ten aspekt w finalnym projekcie gdzie będzie można sterować grubością warstwy przyściennej w okolicy dolnej ścianki.” To dotyczy przyszłości, tak więc, czy to stanowisko powstało czy dopiero powstanie? Tego typu „wrzutki” sprawiają, że jako recenzent odnoszę wrażenie, że niektóre rozdziały pracy zostały poskładane z fragmentów raportów tworzonych w trakcie realizacji kilkuletnich badań.

Rozdział 4.2 to bardzo dobry fragment pracy, choć ponownie na stronie 51 jest w nim mowa o pracach w niezdefiniowanej przyszłości. Przedstawione w tym rozdziale rysunki i schematy są bardzo dobrze przygotowane z czytelnymi oznaczeniami poszczególnych części łopatek i kanału.

W rozdziale 5 analizowano oddziaływanie fali uderzeniowej z warstwą przyścienną z naturalnym przejściem L-T. To też bardzo dobra część pracy. Siatki obliczeniowe przygotowano z dużą starannością, zakładam, że musiało to być czasochłonne zadanie. Niewątpliwie opłacało się, bo zgodność wyników symulacji z danymi eksperymentalnymi pokazana na Rys. 5.4 jest bardzo dobra. Zwrócono uwagę, że fala uderzeniowa oscyluje i obliczenia wykonywano z krokiem czasowym zapewniającą wystarczającą rozdzielczość rozwiązania w czasie. Jak należy to rozumieć w świetle podanych uprzednio parametrów wykonywanych obliczeń „Dyskretyzacja czasowa – obliczenia stacjonarne”.

Nie rozumiem jednak co doktorant ma na myśli pisząc na str. 59, że w zakresie $y=(-40,40)$ prędkość ma charakter liniowy. To by znaczyło, że zmienia się wg takiej zależności $u=\text{const} \cdot y$, a na Rys. 5.4 (trawers 1) widoczne jest, że prędkość w tym obszarze jest w zasadzie stała. Porównanie wyników symulacji z wizualizacją olejową (Rys. 5.8) potwierdza dobrą zgodność wykonanych symulacji. Podobne wnioski można wyciągnąć na podstawie wyników pokazanych na Rys. 5.10. Wyniki CFD opisano jako „EARSIM with transition”. Czy chodzi tu o model przejścia L-T? Przecież wcześniej napisano, że z niego zrezygnowano. Proszę o wyjaśnienie. Na Rys. 5.11 pokazano rozkłady ciśnienia zmierzone i uzyskane na bazie wyników CFD. Dlaczego w tych drugich nie widać efektu odsysania?

Począwszy od str. 66 analizowane są całkowite parametry warstwy przyściennej. Proszę pamiętać, że nie ma czegoś takiego jak grubość straty przekroju, tu chodzi o stratę wydatku. Analizę przeprowadzono dla 5 trawersów (3 przed falą uderzeniową, 2 za falą). Należało podać ich precyzyjną lokalizację we współrzędnych x/c. Na Rys. 5.13 pokazano profile prędkości w tych trawersach oraz profil Blasiusa i Prandtla jako referencyjne dla przepływu laminarnego i turbulentnego. Proszę wyjaśnić co charakterystycznego jest w profilu prędkości dla trawersu 3, co pozwala twierdzić, że naprężenia styczne maleją w tym miejscu. Należało pokazać zmienność τ_w wzdłuż profilu i sprawa byłaby jasna. Proszę o przedstawienie takiego wyniku. W tabeli 5.1 podano wartości parametru kształtu dla poszczególnych profili. Żadna z przedstawionych wartości nie przypomina typowych, tj. 2.6 - przepływ laminarny, 2.7 - turbulentny w okolicy punktu oderwania, 1.3 – turbulentny w okolicy przejścia L-T. Proszę, aby doktorant spróbował wyjaśnić, dlaczego tak jest. Na Rys. 5.14 pokazano porównanie profilu z symulacji CFD i wyników eksperymentalnych za łopatką. Rozbieżność jest duża. Proszę spróbować podać tego przyczyny mając na uwadze, że wyniki pokazane uprzednio znacznie lepiej zgadzają się z danymi eksperymentalnymi.

Rozdział 6 dotyczy bardzo ważnego zagadnienia poruszanego w pracy, a mianowicie oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną z wymuszonym przejściem L-T. To bardzo ważny i dobrze opracowany fragment pracy, choć dyskusja wyników jest trochę chaotyczna. Z punktu widzenia poprawności symulacji CFD moje jedyne wątpliwości budzi jakość siatki w okolicy krawędzi natarcia stopni umieszczonych na profilu łopatkki (Rys. 6.1). Uważam, że siatka przed i w początkowym obszarze stopnia powinna być zagęszczoną wzdłuż łopatkki. Jest to szczególnie ważne, gdy stopień jest wysoki (model 1c, 2b, 2a). Być może dlatego wyniki symulacji i dane eksperymentalne pokazane na Rys. 6.9 tak bardzo

AT

odbiegają od siebie. Niemniej, uzyskane wyniki pokazują, że poprzez umiejscowienie odpowiednio wysokiego stopnia w obszarze przed falą uderzeniową można diametralnie zmienić charakter przepływu w dalszej części łopatki. Szkoda, że doktorant nie pokusił się o analizę szerszego zakresu wielkości i lokalizacji stopni, tak aby uzyskać pożądany efekt. Na bazie uzyskanych wyników wiemy jedynie, że sterowanie przepływem wykorzystujące tę technikę jest możliwe.

W podsumowaniu zawarto dość szczegółowy opis uzyskanych wyników. W moim odczuciu niepotrzebnie. Proszę pamiętać, że zmiana parametru o 825% to nie jest zmiana o rząd wielkości, jak napisano w pracy. Jako przyszłe kierunki badań doktorant wskazuje, że należy:

- przeanalizować wpływ różnej turbulencji na wlocie do sekcji pomiarowej
- zbadać wpływ liczby Reynoldsa na oddziaływanie fali uderzeniowej z warstwą przyścienną.

Nie rozumiem co miałoby znaczyć „wpływ różnej turbulencji”, ani o jakim zakresie liczb Reynoldsa jest mowa. W niniejszej pracy nie ma zupełnie o tym mowy. Proszę o wyjaśnienie co doktorant ma na myśli w powyższych dwóch punktach.

Praca jest napisana w sposób jasny i komunikatywny. Zauważyłem kilka błędów gramatycznych i interpunkcyjnych, które niestety wielu z nas popełnia. Jako miejsce dziesiątne używany jest przecinek i kropka. Niektóre wykresy są nieczytelne. Odwołania do literatury, pozycja [47] na str. 32 oraz [5] str. 59 są nieprawidłowe. Fragmenty tekstu się powtarzają, np. dotyczące wykorzystywanego oprogramowania. Niektóre pozycje literatury podano bez pełnych danych bibliograficznych. Błędy te nie wpływają jednak na moją merytoryczną ocenę pracy. **Bez wątpienia przedstawiona praca wystawia pozytywne świadectwo wiedzy i umiejętnościom doktoranta. Uzyskane przez niego wyniki stanowią wartościowy wkład w zrozumienie mechanizmu oddziaływania fali uderzeniowej z warstwą przyścienną oraz możliwość kontroli tego procesu.**

3. Konkluzja

Reasumując, przedstawiona do recenzji rozprawa jest w mojej ocenie rozwiązaniem złożonego zadania naukowego. Uzyskane przez doktoranta wyniki będą z pewnością wykorzystywane w przyszłości, a opracowane na ich stanowisko eksperymentalne stanowi doskonałą bazę do kontynuowania badań. Pozwala to stwierdzić, że zrealizowane zostały założone cele pracy. Przedstawiona rozprawa doktorska dowodzi wiedzy doktoranta w zakresie modelowania numerycznego przepływów i wykorzystania komercyjnych narzędzi obliczeniowych oraz stanowi potwierdzenie umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Piotrowicza spełnia wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Artur Tyliśszczak