

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

Gdańsk, 2024-02-12

Recenzja pracy doktorskiej

mgra inż. Kacpra Pałkusa

pt.: „Low Pressure Turbine efficiency increase by developing new concept of Outer Air Seal”

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej oraz pisma, nr RM-530-27-03/2023 z dnia 22.11.2023, przesłanego przez Pana dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta prof. PRz, Przewodniczącego Rady Dyscypliny.

1. Wstęp

Praca doktorska Pana mgra inż. Kacpra Pałkusa została wykonana w ramach programu doktorat wdrożeniowy we współpracy z MTU Aero Engines Polska. Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. Piotr Strzelczyk, prof. Politechniki Rzeszowskiej, a opiekunami pomocniczymi, Panowie mgr inż. Wojciech Bar i Dr Karl Engel.

Wobec intensywnego rozwoju transportu lotniczego i jednoczesnej konieczności ograniczania emisji zanieczyszczeń atmosfery, do których lotnictwo znacząco się przyczynia, należy poszukiwać nowych rozwiązań spełniających stawiane wymagania dotyczące redukcji zużycia paliwa i wpływu na środowisko. Cele strategiczne dla lotnictwa zostały określone przez ACARE (Advisory Council for Aviation Research in Europe) w dokumencie „Flight Path 2050 Europe’s Vision for Aviation” i one wyraźnie wskazują na potrzebę poszukiwania nowych koncepcji umożliwiających poprawę sprawności napędów lotniczych. Obecnie prowadzone prace badawcze dotyczące napędów lotniczych mają na celu opracowanie nowych rozwiązań poprawiających sprawność układu lub redukcję emisji poprzez zastosowanie napędów elektrycznych, lub różnego rodzaju układów hybrydowych, zastosowanie nowych paliw ogólnie określanych jako SAF (Sustainable Aviation Fuel), a w przyszłości być może także wodoru. Od lat są rozwijane technologie typu: Contra Rotative Open Rotor, Open Fan lub Geared Turbofan, a w ostatnim czasie Water Enhanced Turbofan. W każdym z powyższych przypadków, niezależnie od koncepcji, poprawa sprawności turbiny może być istotnym wkładem w poprawę efektywności całego układu napędowego.

Zjawiska przepływowo-ciepne w stopniach turbiny gazowej charakteryzują się szerokim spektrum skal czasowo-przestrzennych i bardzo silną nierównomiernością rozkładu parametrów, co pomimo intensywnego rozwoju metod numerycznych i eksperymentalnych wciąż wpływa na trudności poprawnego modelowania. Pomimo tych trudności, dostępne metody stwarzają szerokie możliwości analizy i testowania nowych koncepcji. W swojej pracy doktorskiej Pan mgr inż. Kacper Pałkus omawia przyczyny spadku sprawności w stopniach turbin gazowych i koncentruje się na metodach obniżenia strat w obszarze nieszczelności na

zewnątrznym obwodzie wirnika. Praca jest wykonywana w ramach programu „doktorat wdrożeniowy”, co jednoznacznie wskazuje na jej istotny aspekt aplikacyjny.

Wobec powyższego można stwierdzić, że wybrana tematyka ma istotne znaczenie nie tylko poznawcze, ale także aplikacyjne oraz spełnia kryteria prac w ramach dyscypliny „inżynieria mechaniczna”.

2. Charakterystyka pracy i uwagi ogólne

Praca doktorska Pana mgra inż. Kacpra Pałkusa została zredagowana na 145 stronach i jest napisana w języku angielskim. Materiał dyskutowany w pracy ujęto w 8 rozdziałach. Pierwszy rozdział poprzedzony jest spisem symboli. Natomiast na końcu pracy zostały dołączone kopie dwóch rozwiązań patentowych, a następnie spis literatury (110 pozycji) oraz spis rysunków i tabel.

W pierwszym rozdziale Doktorant krótko przedstawia motywację podjętej pracy, znaczenie zagadnienia poprawy sprawności części niskoprężnej turbiny oraz charakteryzuje cele pracy doktorskiej, które są sformułowane następująco:

- rozwój nowej koncepcji uszczelnienia umożliwiającej poprawę sprawności minimum 0.1%
- ocena wrażliwości i możliwości optymalizacji rozważanych koncepcji ze względu na sprawność układu
- rozwój wiedzy w zakresie zjawisk przepływu w uszczelnieniach.

W drugim rozdziale zostały omówione istniejące koncepcje uszczelnień stosowanych w stopniach turbin gazowych oraz aktualny stan badań. Doktorant przedstawił systematycznie i wnikliwie opracowany materiał omawiając cechy uszczelnień, możliwości i trudności w modelowaniu i analizie struktur przepływu w tym obszarze stopnia turbiny oraz wpływ nieszczelności na sprawność turbiny z podziałem na poszczególne przyczyny strat. Na tle podsumowania aktualnego stanu prac nad omawianym zagadnieniem zostały sformułowane dwie zasadnicze tezy pracy.

1. Istnieje nowe rozwiązanie dla uszczelnień w turbinie niskiego ciśnienia, które spełnia multidyscyplinarne wymagania i umożliwia poprawę sprawności o 0.1%.
2. Istnieje rozwiązanie dla uszczelnień w turbinie niskiego ciśnienia, które umożliwia:
 - obniżenie masowego natężenia przepływu w uszczelnieniu lub,
 - redukcję strat mieszania lub intensywności procesów dysypacyjnych poprzez zmianę geometrii uszczelnienia lub wpływ na dalsze stopnie.

Metodologia badawcza i charakterystyka wykorzystanych modeli została przedstawiona w rozdziale trzecim. Doktorant w analizie wykorzystał kryteria podobieństwa, analizę bezwymiarową oraz modele obliczeń przepływu trójwymiarowego w układzie stopni turbiny gazowej. Obliczenia przepływu trójwymiarowego zostały wykonane dla różnych geometrii układu przepływowego. Różne kombinacje testowanych rozwiązań uszczelnień były analizowane dla 3-stopniowej turbiny niskiego ciśnienia zainstalowanej na stanowisku testowym w Institute of Aircraft Propulsion Systems (ILA) w Stutgarcie. Doktorant wykorzystał dwa programy obliczeniowe: (a) TRACE (Turbomachinery Research Aerodynamics Computational Environment), który jest rozwijany przez DLR Institute of Propulsion Technology we współpracy z MTU Aero Engines AG oraz (b) Ansys/CFX. Ten drugi został wykorzystany do analiz wybranych przypadków w układzie przepływowym ograniczonym do 1.5 stopnia turbiny. Siatki obliczeniowe zostały przygotowane w programach AutoGrid/Numeca i Ansys ICEM. Doktorant zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami poprawnej

dokumentacji modeli obliczeniowych prezentuje ich szczegóły: cechy siatki obliczeniowej, wybór schematów numerycznych i modelu turbulencji, warunki brzegowe oraz kryteria zbieżności. Ten fragment pracy wskazuje na szeroki zakres prac obliczeniowych jakie zostały wykonane przez Doktoranta. Dobór parametrów modelu obliczeniowego nie budzi zastrzeżeń, natomiast nasuwa się pytanie dlaczego w przestrzeni uszczelnienia zastosowano mniejszą rozdzielczość siatki przy ścianie i funkcję ścianki. Autor argumentuje ten wybór mniejszym wpływem warstwy przyściennej w tej strefie. Ta strefa charakteryzuje się silnie trójwymiarowym przepływem z istnieniem obszarów oderwania i przylgnięcia, a intensywność dużych struktur wirowych jest zależna między innymi od efektów dyssypacyjnych w strefie przyściennej.

W tym rozdziale omówione są także szczegóły modelu w przypadku modyfikacji w obszarze uszczelnienia. Obliczenia wykonano w ramach przepływu stacjonarnego z wykorzystaniem mixing-plane do modelowania interakcji palisad wirnikowych i stacjonarnych.

W rozdziale czwartym, poświęconym walidacji modeli obliczeniowych, zostały przedstawione wyniki obliczeń przepływu niestacjonarnego dla 1.5 stopnia turbiny i porównano z danymi pomiarowymi ze stanowiska Leibniz University Hannover. Tutaj zabrakło szczegółów dotyczących chociażby kroku czasowego. Niemniej jednak warto podkreślić dobrą zgodność wyników obliczeń i danych eksperymentalnych. Ponadto, Doktorant przedstawił porównanie obliczeń stacjonarnych z wynikami pomiarów na stanowisku w Stuttgarcie, a także obliczenia dla różnych wariantów modelu i uszczelnienia bez i z wkładkami typu „honeycomb”. Przedstawione porównania wskazują na dobrą zgodność i poprawność przewidywania nie tylko trendów, ale także ilościowych zmian. Doktorant analizuje uzyskane podobieństwa i różnice, co oczywiście ma dużą wartość poznawczą. Zastanawia jednak stwierdzenie na stronie 60, gdzie różnice na rys. 4.13 wyjaśnia możliwymi efektami aeroakustycznymi. Czy rzeczywiście problemem są efekty aeroakustyczne, czy może samo założenie stacjonarności przepływu i czy pomimo uzyskanej globalnej zbieżności procesu obliczeniowego, rozwiązanie lokalnie wciąż wykazuje oscylacje. A to z kolei silnie zależy od rozdzielczości siatki w komórkach „honeycomb”.

Analiza czynników wpływających na poziom strat energetycznych w stopniu turbiny ze względu na przepływ w nieszczelnościach i mieszanie tego strumienia z przepływem międzyłopatkowym jest prezentowana w rozdziale piątym. Tutaj jest także przedstawiona analiza wymiarowa i dyskusja wrażliwości i wzajemnej zależności wybranych parametrów: liczby Reynoldsa zdefiniowanej w oparciu o wysokość szczeliny i składową osiową prędkości, krętu w przekroju wylotowym oraz parametry określającego nagrzewanie wskutek wentylacji w szczelinie.

Koncepcje nowych rozwiązań proponowanych w pracy przedstawiono w rozdziale szóstym. Do dalszej analizy zostały wybrane dwie oraz ich kombinacja. Pierwsza „front deflector” charakteryzująca się zmianami geometrii przed wlotem do uszczelnienia labiryntowego, głównie poprzez wprowadzenie elementu odchylającego strumień w obszarze przed uszczelnieniem. Druga, której zasadniczą elementem są otwory i kanały nad palisadą kierowniczą, których zadaniem jej odprowadzenie strumienia masy ze strefy za uszczelnieniem wirnika i skierowanie go do kanału międzyłopatkowego w palisadzie kierowniczej. Natomiast trzecie rozwiązanie jest połączeniem obu wcześniejszych rozwiązań. W tej części pracy przeprowadzona jest krótka analiza wskazująca na aspekty multidyscyplinarne, gdzie Doktorant wymienia zagadnienia strukturalne, technologii materiałowych czy wykonawczych, a także kosztów, przypisując określone oceny z zakresu -5 do 5. Niestety brakuje wyjaśnienia w oparciu o jakie kryteria przypisano poszczególne wartości.

W przedostatnim rozdziale (7) Doktorant zamieścił wyniki obliczeń dla wybranych konfiguracji i analizę wpływu na poszczególne składniki strat. To bardzo interesujący materiał.

Pierwsza część rozdziału dotyczy wpływu modyfikacji w przedniej części uszczelnienia, w kawernie wlotowej i wpływie deflektora z lub bez dodatkowego żeberka. Widać wyraźnie, że wprowadzenie zmiany kierunku napływu do szczeliny na pierwszym żeberkiem uszczelnienia labiryntowego prowadzi do poprawy sprawności, a skuteczność może być zwiększona poprzez dodanie odpowiednio długiego żeberka w przestrzeni wlotowej. Analiza czynników wpływających na poprawę sprawności (Fig. 7.7) wskazuje na osłabienie efektów mieszania przepływu w nieszczelnościach ze strumieniem w kanale głównym w przestrzeni między wirnikiem a kierownicą. Doktorant stwierdza na stronie 92, że wprowadzona zmiana nie wpływa na zmniejszenie strumienia masy w nieszczelności, ale brakuje wyjaśnienia co w takim razie jest przyczyną zmniejszenia strat mieszania.

W drugiej części rozdziału prezentowany jest wpływ zastosowanych otworów i bypassu nad kierownicą. To interesująca koncepcja, która skutkuje redukcją strat mieszania w strefie między palisadami i obniżeniem intensywności przepływów wtórnych w kanale kierowniczym, ale powoduje straty w efekcie wydmuchu do palisady w kanale międzyłopatkowym. Doktorant stwierdza, że takie rozwiązanie jest skuteczne, ale jednocześnie wykorzystuje uproszczony model i przedstawia analizę wrażliwości tego rozwiązania na wartość liczby Macha na wylocie z otworów, masowe natężenie przepływu, położenie otworów wylotowych oraz kątów wypływu strumienia z otworów. Dla wybranych konfiguracji zostały wykonane obliczenia przepływu trójwymiarowego dla trzech stopni turbiny, a uzyskane wyniki potwierdzają możliwość poprawy sprawności. Badane konfiguracje zostały porównane na rys. 7.32, gdzie pokazano uśrednioną obwodowo energię kinetyczną turbulencji. Dostępny materiał jest bardzo bogaty i pozostaje niedosyt, że nie ma nieco szerszej analizy struktury przepływu w tej strefie przepływu. Interesującą byłaby także ocena przyjętego modelu mixing-plane pomiędzy palisadami i jaki jest wpływ uśrednienia obwodowego na rozwój struktur przepływu, a w konsekwencji na interakcję z wypływającym strumieniem z otworów w palisadzie kierowniczej i sprawność układu. W podsumowaniu pracy Doktorant zwraca uwagę, że to jest jeden z problemów, który powinien być przeanalizowany nie tylko numerycznie, ale także zweryfikowany eksperymentalnie w ramach przyszłych prac.

3. Uwagi szczegółowe

Układ logiczny pracy oraz podział materiału na poszczególne rozdziały nie budzi zastrzeżeń. Przedstawiona praca doktorska jest napisana w języku angielskim w jasny sposób. Materiał jest bogato ilustrowany i można mieć jedynie uwagi odnośnie rozmiaru niektórych rysunków np. Fig. 7.13, gdzie zamieszczono dużo szczegółów, ale one są słabo widoczne.

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

1. Proszę o podanie szczegółów obliczeń niestacjonarnego przepływu: krok czasowy, liczbę kanałów międzyłopatkowych, czy stosowano uproszczenia liczby kanałów, a jeśli tak, to jak zmieniła się siatka obliczeniowa.
2. Fig. 4.10 – Proszę o wyjaśnienie, co było przyczyną wykonania obliczeń dla różnych wymiarów obszaru w kierunku obwodowym, czy rozdzielczość siatki w przekroju merydionalnym jest taka sama we wszystkich przypadkach. Jaka jest rozdzielczość w kierunku obwodowym i jaki jest krok czasowy?
3. Fig. 4.1.6 i 4.18 – Proszę o pokazanie zmian ciśnienia w obszarze uszczelnienia tak, aby można było dostrzec szczegóły i porównać wyniki obliczeń i pomiarów w tym obszarze.

4. Fig. 6.4 i 6.6 - Proszę o wyjaśnienie na podstawie jakich kryteriów przypisano poszczególne wartości/oceny.
5. Str. 90 i Fig. 7.7 - Doktorant stwierdza, że wprowadzona zmiana nie wpływa na zmniejszenie strumienia masy w nieszczelności, ale brakuje wyjaśnienia co w takim razie jest przyczyną zmniejszenia strat mieszania. Proszę o komentarz.
6. Na rys. 7.9 i 7.11 pokazano względną energię kinetyczną turbulencji i zmianę sprawności. Proszę o przedstawienie różnic profilu prędkości w dowolnym trawersie nad pierwszym żeberkiem dla omawianych czterech konfiguracji. Jaki jest wpływ zmian geometrii na prędkość w szczelinie nad żeberkiem?
7. Proszę o komentarz jak zmiana punktu pracy turbiny może wpływać na skuteczność rozwiązania „vane bleed holes”. Jaka jest, o ile to można stwierdzić na tym etapie, wrażliwość rozwiązania na zmienne warunki pracy i zmianę przepływu w kanale międzyłopatkowym kierownicy?
8. Koncepcja „vane bleed holes” przedstawiona na rys. Fig. 6.5 wskazuje na konieczność zastosowania dodatkowego uszczelnienia nad łopatką kierowniczą, a pod korpusem silnika, aby na skutek niskiego ciśnienia na zewnątrz gaz roboczy nie wypływał przez otwory poza silnik. Czy ten aspekt był również rozważany w trakcie analizy, czy takie ryzyko nie istnieje?

4. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Pan mgr inż. Kacper Pałkus przedstawił interesujące wyniki, istotne dla rozwoju turbin niskiego ciśnienia silników lotniczych i poprawy ich sprawności. W ramach przedstawionych prac przedstawił koncepcje umożliwiające poprawę efektywności uszczelnień nadłopatkowych w stopniach turbin, a wybrane konfiguracje zostały opatentowane. Należy podkreślić bardzo szeroki zakres wykonanych analiz numerycznych w ramach przedstawionej pracy doktorskiej, analizę wrażliwości rozwiązania na wybrane parametry oraz analizę struktury przepływu w obszarze uszczelnienia i kanału międzyłopatkowego. Wykonane prace są częścią zadań realizowanych w MTU Aero Engines Polska, co wyraźnie wskazuje na istotny charakter aplikacyjny pracy doktorskiej.

Wobec powyższego stwierdzam, że Doktorant osiągnął założone cele pracy, proponowane rozwiązania mogą być wykorzystane w nowych konstrukcjach turbin niskiego ciśnienia, a uzyskane wyniki wskazują na możliwość poprawy sprawności całego układu przepływowego.

Uważam, że praca Pana mgra inż. mgra inż. Kacpra Pałkusa pt.: „Low Pressure Turbine efficiency increase by developing new concept of Outer Air Seal” odpowiada warunkom określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Pawł Kaczyński