

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Kaczyńskiego

**pt.: „Intensyfikacja wymiany ciepła i redukcja strat przepływu w kanale chłodzącym łopatk
turbinowej”**

1. Charakterystyka ogólna rozprawy doktorskiej

W recenzowanej pracy doktorskiej przy wykorzystaniu metod Eksperymentalnej i Numerycznej Mechaniki Płynów analizowany jest przepływ powietrza w kanale chłodzącym łopatk ekspandera turbinowego silnika lotniczego. Pośrednim efektem tych badań ma być możliwość podwyższenia temperatury gazów na wylocie z komory spalania, co ostatecznie ma zmniejszyć jednostkowe zużycie paliwa przez turbinowy silnik odrzutowy. Badania prowadzone były w Ośrodku Przepływów i Spalania Instytutu Maszyn Przepływowych PAN (IMP PAN) w Gdańsku, który należy do wiodących jednostek badawczych w Europie. Prowadzone tam badania z zakresu aerodynamiki eksperymentalnej i numerycznej, których inicjatorem i opiekunem od wielu lat jest prof. Piotr Doerffer, charakteryzują się najwyższym poziomem naukowym, o czym m.in. świadczy udział tego ośrodka w wielu ważnych projektach europejskich, jako lider lub partner. Do takich projektów należy m.in. projekt europejski *ERICKA* realizowany w VII Programie Ramowym Komisji Europejskiej, gdzie oprócz takich firm jak Rolls-Royce, MTU Aero Engines GmbH, ONERA, Uniwersytet w Oxfordzie uczestniczył również Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Głównym założeniem projektu było obniżenie emisji dwutlenku węgla poprzez zwiększenie sprawności silnika lotniczego usprawniając system chłodzenia łopatek ekspandera. Prezentowane w rozprawie doktorskiej wyniki badań stanowią bez wątpienia ważny wkład w rozwój dyscypliny naukowej *inżynieria mechaniczna*.

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Kaczyńskiego jest obszerna i ma dość tradycyjny układ, zawiera 206 stron tekstu, rysunków, schematów i tabel, oraz załączników. Rozprawa składa się ze spisu oznaczeń i symboli, wstępu, z dodatkowych czterech głównych rozdziałów, podsumowania i wniosków, spisu rysunków i tabel, bibliografii i trzech załączników. Rozprawa jest napisana poprawnie od strony edycyjnej, z niewielką ilością błędów, co się zawsze zdarza. Wszystkie wzory, rysunki i tabele zamieszczone w rozprawie są czytelne i dobrze opisane.

Spis symboli i oznaczeń zawiera w kolejności alfabetycznej znaki opisane alfabetem łaciński, greckim oraz skróty. Spis zawiera raczej wszystkie ważniejsze oznaczenia i symbole znajdujące się w treści rozprawy. *Nie ustrzeżono się jednak paru małych błędów edycyjnych, m.in.: energia wewnątrz i entalpia powinna zawierać przymiotnik właściwa, czyli odniesiona do kg substancji; dla wszystkich wymiarów linowych powinna być podana ta sama jednostka, tj. m; zgodnie z tekstem rozprawy entropia powinna też być odniesiona do kg; jednostka czasu powinna być oznaczona małą literą; itd..*

Pierwszym rozdziałem pracy jest „Wstęp”, prawie najdłuższy rozdział w całej rozprawie, tylko o parę stron krótszy od głównego rozdziału, gdzie przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i analiz CFD. Rozdział ten zawiera wprowadzenie, rys historyczny, prezentuje metody i aktualny stan wiedzy na temat chłodzenia łopatek, oraz przedstawienie celu i zakresu pracy; *aż się prosi, żeby te elementy rozdzielić na osobne rozdziały.* We „Wprowadzeniu” Doktorant podkreślił ważność podjętej przez siebie tematyki badawczej dla poprawy efektywności turbinowych silników lotniczych i w ostateczności dla ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i tlenków azotu do atmosfery. Wspomniał On o dużym projekcie europejskim ERICKA, w którym IMP PAN był partnerem. W projekcie tym przedstawiono strategię zwiększania efektywności turbinowego silnika lotniczego, jedną z nich jest zwiększenie temperatury za komorą spalania możliwe dzięki m.in. intensyfikacji chłodzenia łopatek ekspandera. Wykazano, że wzrost temperatury za komorą spalania o 50K pozwoli na zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa o 1%.

W dalszej części rozdziału I przedstawiono stan wiedzy, a w nim rys historyczny rozwoju turbinowych cywilnych silników lotniczych oraz obecnie stosowane metody chłodzenia łopatek kierowniczych i wirnikowych ekspanderów turbin gazowych. Opisano w sposób wyczerpujący używane sposoby chłodzenia zewnętrznego jak i wewnętrznego łopatek, ze szczególnym zwróceniem uwagi na wewnętrzne kanały chłodzące, chłodzenie strugą i rolę żeber w chłodzeniu konwekcyjnym. Rozdział I kończy się podsumowaniem, w którym zwrócono uwagę na niejednorodność obciążenia termicznego łopatki, co stawia układom chłodzenia dodatkowe wyzwania konstrukcyjne. Ostatnim podrozdziałem rozdziału I jest przedstawienie na dwóch stronach celu i zakresu pracy. Celem pracy jest ocena przepływu i wymiany ciepła w ożebrowanym kanale chłodzącym łopatki stojanowej stopnia wysokoprężnego z wykorzystaniem metod eksperymentalnych i numerycznych. Do analizy wybrano geometrię zaproponowaną przez firmę Rolls-Royce, *tu przydałby się jakiś rysunek poglądowy, o różnej wartości współczynnika przekroju AR, czyli stosunku szerokości i wysokości kanału, ta definicja jest mocno ukryta w tekście.* Badania prowadzono dla dwóch wartości Re , *nie doszukałem się wyjaśnienia dlaczego akurat dla tych wartości*, dla trzech wartości współczynnika AR oraz różnych konfiguracji ustawień żeber, równoległych oraz krzyżowych.

W rozdziale II dokonano opisu użytego narzędzia do badań eksperymentalnych, do którego należy stanowisko eksperymentalne wraz z kanałem testowym oraz system pomiarowy składający się

z pomiaru ciśnień, prędkości, temperatur oraz pomiaru współczynnika wnikania ciepła. *Szkoda, że oprócz schematu stanowiska nie zamieszczono ani jednego zdjęcia rzeczywistego stanowiska.* Bardzo ciekawe i nowatorskie wydają się pomiary współczynnika wnikania ciepła. Badaniom poddano 10 przypadków różniących się konfiguracją żeber, wartościami AR i Re. Część przypadków, dla niższej liczby Re, zostało przebadane zarówno eksperymentalnie jak i numerycznie. Przypadki dla wyższych liczb Re przebadano tylko eksperymentalnie, *nie wyjaśniono dokładnie dlaczego.* Olbrzymie doświadczenie IMP PAN oraz samego promotora pracy doktorskiej w zakresie eksperymentalnych badań aerodynamicznych poskutkowało bardzo przemyślaną konstrukcją stanowiska oraz właściwym wyborem metod i technik pomiarowych. *Rozdział ten mógłby się kończyć zaprezentowaniem metody szacowania niepewności pomiarowych, co w przypadku pomiarów aerodynamicznych byłoby cennym elementem pracy. Zwłaszcza ciekawa byłaby analiza błędu pomiaru temperatury w przepływie.*

Rozdział III zawiera opis modelu numerycznego, siatki numerycznej oraz wstępne obliczenia identyfikujące strukturę pola przepływu w badanych kanałach. Do obliczeń Doktorant wykorzystał komercyjny pakiet CFD ANSYS Fluent, bez modyfikacji użytej metody RANS z równaniem turbulencji RSM. *Dlatego opis równań zachowania, niezmodyfikowanych wydaje się zbędnym powtórzeniem z dokumentacji Fluent.* Obliczenia CFD przeprowadzono na trójwymiarowych siatkach niestrukturalnych przygotowanych w taki sposób, żeby zapewniały rozwiązanie stabilne i niezależne od dalszego zwiększania wielkości siatki. Następnie dokonano obliczeń dla charakterystycznych przypadków analizowanych kanałów chłodzących w celu identyfikacji struktur pola przepływu dla różnych ułożeń żeber na dolnej i górnej ścianie. Zaobserwowano zmiany struktur wirowych dla kanałów o różnej wartości współczynnika AR, zwłaszcza pomiędzy największą i najmniejszą jego wartością. *Trochę umknął mi cel tych badań numerycznych, szkoda, że nie porównano tego z wynikami wizualizacji pola przepływu podczas badań eksperymentalnych, np. zadymiając lekko kanał na wlocie.*

Rozdziały IV i V są kluczowymi rozdziałami dysertacji, w których Doktorant zaprezentował wyniki pomiarów, rozkłady ciśnień, prędkości oraz współczynnika przejmowania ciepła w analizowanym kanale w różnych konfiguracjach geometrycznych. W rozdziale IV zaprezentowano wyniki pomiarów aerodynamicznych oraz wyniki CFD uzyskane przy pomocy opisanej wcześniej metody RANS. Dokonano obszernego porównania wyników eksperymentalnych z obliczeniami CFD, zaczynając od profilu warstwy przyściennej dla konkretnej lokalizacji w analizowanym kanale, poprzez rozkład ciśnienia statycznego na wybranej ścianie kanału (dolnej). Wyniki porównań są więcej niż zadowalające. Dokładnie przeanalizowano struktury wirowe dla kanałów o różnej wartości AR. W kolejnym kroku dokonano analizy strat oraz określono sprawność izentropową. Do określenia strat przyjęto współczynnik strat ciśnienia całkowitego zapisanego wzorem (4-4), *jednak w mianowniku zapis nie jest jasny, wielkość V nie została zdefiniowana, do oznaczenia prędkości użyto*

wielkości U . W dalszej części rozdziału zebrano w tabeli wyniki obliczeń współczynnika strat i sprawności dla analizowanych przypadków badanych eksperymentalnie i numerycznie, w odniesieniu do wzorów (4-4) i (4-5) pomnożono je przez 100, *sprawność rozumiem, żeby wyrazić w procentach, ale po co pomnożono współczynnik strat przez 100?* Przedyskutowano wpływ modyfikacji geometrycznych żeber na wartość strat oraz wpływ wysokości kanału (współczynnika AR). W celu poszerzenia analizy wpływu współczynnika AR oraz zmiany ustawień żeber na strukturę przepływu w kanale użyto porównania wartości naprężeń stycznych na wszystkich czterech ścianach, otrzymanych z analiz CFD. Wykazano znaczący wpływ ustawień żeber na wartości naprężeń stycznych, m.in. krzyżowe ustawienie żeber obniża wartości naprężeń na wszystkich ścianach.

Bardzo ciekawym, w mojej opinii, elementem pracy są pomiary wymiany ciepła przy pomocy metody TLC, rozdział V. Pomiary realizowane były na wszystkich czterech ścianach kanału, z uwagi na optyczny charakter pomiarów najpierw na trzech w jednej serii pomiarowej a potem na pozostałej ścianie. W pomiarach zanotowano istotny wpływ żeber na proces wymiany ciepła, jak i struktury wirowej pola przepływu. Na podstawie otrzymanych wartości współczynnika przejmowania ciepła zaprezentowano rozkłady uśrednionej wartości liczby Nusselta na ścianach kanału. Do oceny efektywności wymiany ciepła w analizowanych konfiguracjach kanału użyto współczynnika efektywności cieplnej, określanego jako stosunek intensyfikacji wymiany ciepła do znormalizowanego współczynnika tarcia, zdefiniowanego w rozdziale wcześniejszym. Im wyższa wartość tego współczynnika tym lepiej, czyli najbardziej efektywnym rozwiązaniem wydaje się konfiguracja z najwyższym AR.

W rozdziale VI dokonano w sposób rzeczowy podsumowania, wyciągnięto wnioski i przedstawiono wizję dalszych badań.

Dysertację zakończono spisem literatury, który zwiera większość istotnych pozycji w przedmiocie prowadzonych analiz, oraz wartościowymi załącznikami, które dobrze uzupełniają treść pracy.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Doktorant w swojej rozprawie dokonał analizy efektywności wymiany ciepła w kanale do chłodzenia konwekcyjnego łopatk turbiny gazowej. Analiza ta opierała się na własnych badaniach eksperymentalnych na przygotowanym do tego celu stanowisku pomiarowym oraz na obliczeniach numerycznych przy wykorzystaniu komercyjnego pakietu ANSYS Fluent. Algorytmy, sposoby i założenia do badań eksperymentalnych i modelowania zostały w pracy opisane bardzo dobrze.

W pracy można znaleźć niewielkie pomyłki, powstałe moim zdaniem raczej przy redagowaniu pracy. Na podstawie przeprowadzonych analiz dowiedzieliśmy się m.in, że:

- struktury wirowe w kanałach o współczynnikach przekroju 1:4 i 1:6 są bardzo podobne, nieco inaczej wyglądają struktury wirowe dla $AR=1:2$, gdzie duży wpływ ma oddziaływanie żeber;
- zwiększenie wysokości kanału przy zachowaniu tej samej liczby Reynoldsa prowadzi do zmniejszenia strat w przepływie;
- wymiana ciepła w analizowanych kanałach jest ściśle związana ze strukturą przepływu;
- najkorzystniejsze z punktu widzenia intensywności wymiany ciepła jest stosowanie kanałów o możliwie najwyższym współczynniku przekroju, czyli $AR=1:2$, natomiast najmniej korzystne są kanały o $AR=1:6$. Liczba Reynoldsa jak i modyfikacja ustawienia żeber nie ma dużego wpływu na proces wymiany ciepła;
- w celu zmniejszenia strat aerodynamicznych w przepływach przez kanały o $AR=1:2$ zmodyfikowano ustawienie żeber z równoległego na krzyżowe;

Jak Doktorant wykazał, w literatury przedmiotu brak jest prac analizujących proces wymiany ciepła w kanałach chłodzących o współczynniku przekroju mniejszym niż 1:4. Dlatego, przedstawione wyniki analiz dla $AR=1:2$ stanowią oryginalny wkład autora, oprócz oczywiście systematycznego omówienie wyników oraz powiązania wyników badań przepływowych z pomiarami wymiany ciepła. Z tego też względu uważam, że wkład Doktoranta w badania zmierzające do poprawy efektywności wymiany ciepła w konwekcyjnie chłodzonych łopatkach silników turbinowych, i pośrednio do zmniejszenia jednostkowego zużycia paliwa jest nie do pominięcia. Bardzo wysoko oceniam część eksperymentalną pracy, zaproponowane stanowisko eksperymentalne oraz techniki pomiarowe.

3. Uwagi szczegółowe

Poza drobnymi uwagami natury redakcyjnej, zaznaczonymi tekstem pochyłym w części pierwszej niniejszej recenzji, z lektury dysertacji nasuwają się następujące spostrzeżenia:

- Jak dalece różnią się wymiary badanego kanału chłodzącego od rzeczywistych wymiarów kanału w łopatce silnika Rolls-Royce?
- Czy przyjęte wartości AR i Re odpowiadają rzeczywistym geometriom? Jaki wymiar charakterystyczny był użyty to określenia liczby Reynoldsa?
- Do podgrzania powietrza wlotowego do komory mieszania użyto 4kW grzałek elektrycznych, czy one dobrane były na podstawie bilansu energetycznego, uwzględniając m.in. strumień entalpii powietrza wlotowego i wylotowego, czy moc grzałek dobrano arbitralnie?
- W tabeli 2.1 według moich obliczeń wychodzą nieco niższe wartości średnicy hydraulicznej (4 razy pole przez obwód), skąd się mogą brać te różnice?

- Czy niepewność pomiarowa współczynnika wnikania ciepła rzędu $\pm 10\div 12\%$ to dużo czy mało? Ja to wygląda na tle innych metod?
- Jak oceniany jest przez Doktoranta algorytm wyznaczania współczynnika wnikania ciepła zaproponowany przez prof. Ryszarda Białeckiego i jego zespół z Politechniki Śląskiej? Czy mógłby być on użyty w prowadzonych w dysertacji badaniach eksperymentalnych?
- Czy rozwijane swego czasu w IMP PAN metody eksperymentalne PSP/TSP nie były brane pod uwagę w planowanych eksperymentach?
- Czy wybór modelu turbulencji RSM w prezentowanych analizach CFD był podyktowany własnym doświadczeniem, obawą braku uchwycenie anizotropowości struktur wirowych, czy raczej sugestią zaczerpniętą z literatury? Jakie i czy inne modele turbulencji brane były pod uwagę?
- Czy w analizowanych przypadkach testowych przy numerycznej identyfikacji struktur wirowych próbowano dokonać weryfikacji obliczeniami niestacjonarnymi?
- Doktorant pisze „Jako warunek brzegowy na wlocie do obszaru obliczeniowego zastosowano masowe natężenie przepływu, natomiast na wylocie ustawiono warunek ciśnieniowy”. Co z temperaturą? Z opisu równań zachowania nie wynika, że przepływ jest izotermiczny.
- Użyty współczynnik strat ciśnienia całkowitego (wzór 4-4), lepiej byłoby moim zdaniem zapisać jako $\xi = \frac{p_{01} - p_{02}}{p_{01} - p_2}$, ponieważ w przedstawionym zapisie dla przepływu ściśliwego konieczne jest użycie gęstości na wylocie, a wielkość ta nie jest mierzona. Czy przy wartościach prędkości przepływu w kanale można przyjąć stałą wartość gęstości?
- Na wykresie ekspansji na stronie 129 można było zaznaczyć ciśnienie statyczne na wlocie, pozwoliłoby to na zaznaczenie prędkości (energii kinetycznej), co ułatwiłoby lepsze zrozumienie zapisu równań w dalszej treści pracy.

4. Wnioski końcowe

Mgr inż. Piotr Kaczyński podjął wysiłek analizy eksperymentalnej i numerycznej przepływu powietrza w kanałach chłodzących łopatek turbinowych silników lotniczych, do której wykorzystał własne stanowisko eksperymentalne oraz komercyjny program ANSYS Fluent. Zrealizował On z nawiązką zakres planowanych badań i osiągnął wszystkie założone przez siebie cele. Wykazał się przy tym szeroką wiedzą na temat systemów chłodzenia łopatek turbinowych, metod pomiarowych i obliczeń CFD. Przygotowany przez niego warsztat może być z powodzeniem używany do dalszych badań nad analizą procesów wymiany ciepła w przepływach wewnętrznych powietrza.

Uwagi przedstawione w tej recenzji w żaden sposób nie umniejszają ogromnego wkładu pracy doktoranta jak i dużej wartości naukowej jego rozprawy doktorskiej. Dlatego, biorąc

powyższe pod uwagę, z pełnym przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie o Stopniach i Tytułach Naukowych i wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych PAN o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ponadto stwierdzam, iż tematyka badawcza, obszerny zakres prowadzonych badań, złożoność prowadzonych pomiarów oraz obliczeń CFD, opis użytego warsztatu badawczego i zrealizowanych prac, prezentacja rezultatów analiz oraz celne wnioski stanowią zespół cech charakterystycznych dla wyróżniających rozpraw doktorskich.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Dyln'.