

Dr hab. inż. Piotr Lampart, prof. nadzw. IMP PAN
Kierownik Zakładu Aerodynamiki Turbin
Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN
ul. J. Fiszer 14, 80-952 Gdańsk



Gdańsk 22.05.2012

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Bochona
wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej
(pismo RIE-BD/4/409/2011/2012 z dn. 05.03.2012)**



1. Wstęp.

Opiniowana rozprawa pt. „Numeryczna ocena zjawisk ciepłno-przepływowych w wybranych węzłach stopnia turbiny gazowej” została wykonana w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej pod kierunkiem dr. hab. inż. Włodzimierza Wróblewskiego, prof. nadzw. PŚI. Rozprawa liczy 134 strony, zawiera 9 rozdziałów, spis oznaczeń, streszczenie w języku angielskim oraz spis literatury (56 pozycji). Pracę nad rozprawą prowadzono i finansowano w ramach projektu Unii Europejskiej „DREAM” oraz projektów badawczych MNiSzW.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska poświęcona jest badaniu zjawisk ciepłno-przepływowych w uszczelnieniach wierzchołkowych i komorach wirujących maszyn wirnikowych i plasuje się w ramach aktualnego nurtu badań prowadzonych w wiodących placówkach akademickich krajowych i zagranicznych. Głównym obiektem zainteresowania Autora jest obszar uszczelnienia wierzchołkowego turbiny niskoprężnej silnika turbośmigłowego.

Na wstępie obszernej pracy, w rozdziale 1 Autor nawiązuje do problematyki gospodarki paliwowej i konieczności ograniczenia emisji zanieczyszczeń w energetyce i transporcie lotniczym. Możliwości redukcji zużycia paliwa, a tym samym redukcji emisji szkodliwych substancji do atmosfery autor słusznie upatruje w poprawie sprawności urządzeń służących do konwersji energii, w tym silników lotniczych. Duży potencjał w zakresie poprawy sprawności silnika lotniczego tkwi w optymalizacji geometrii uszczelnień układów przepływowych sprężarki i turbiny silnika lotniczego.

W rozdziale 2 Doktorant wprowadza czytelnika w zagadnienia konstrukcji różnego typu uszczelnień układów przepływowych omawiając ich własności przepływowe, mechaniczne i dynamiczne. Koncentruje się tu na uszczelnieniach labiryntowych, szcztkowych, typu honey-comb i innych uszczelnieniach z modyfikacjami w postaci blaszek odchylających strumień przecieku. Autor odwołuje się do literatury przedmiotu analizując dla wszystkich typów uszczelnień możliwości ograniczenia strumienia przecieku i strat mieszania przecieku ze strumieniem głównym w kanale międzyłopatkowym. W tej części pracy Autor prowadzi także analizę literaturową zagadnień wymiany ciepła w wirujących komorach maszyn wirnikowych. Właściwy dobór cytowanych pozycji literaturowych jest dużym atutem pracy. W uzupełnieniu przedstawionej przez Doktoranta listy referencji warto także wspomnieć o pracy (poza cytowanymi pracami Rosica i Dentona):

- Wallis A.M., Denton J.D., Demargne A.A.J., 2000, The control of shroud leakage flows to reduce aerodynamic losses in a low aspect ratio shrouded axial flow turbine, ASME Pap. 2000-GT-475, przedrukowanej później w Trans. ASME J. Turbomachinery. Ma ona znaczenie historyczne. W pracy tej po raz pierwszy na bandażu wieńca wirnikowego wprowadzono blaszki odchylające dla redukcji składowej obwodowej strumienia przecieku i przeprowadzono pełną analizę tej konstrukcji.

Do podstawowych celów pracy, przedstawionych w rozdziale 3, należą:

- optymalizacja geometrii uszczelnienia wierzchołkowego w celu zmniejszenia strat przecieku, oraz
- trójwymiarowa sprzężona analiza ciepło-przepływowa obszaru uszczelnienia z uwzględnieniem wirującej komory znajdującej się nad uszczelnieniem.

Realizacja postawionych celów badawczych nie jest zadaniem trywialnym. Jest oryginalnym zadaniem badawczym charakteryzującym się dużym stopniem trudności. Wymaga szerokiego spojrzenia na konstrukcję układów przepływowych maszyn wirnikowych. Autor jest dobrze zorientowany w literaturze przedmiotu. Umie dokonać trafnego wyboru rodzaju uszczelnienia, które zostanie poddane badaniu. Zajmuje się uszczelnieniem typu honeycomb, które pozwala na znaczącą redukcję masowego natężenia strumienia przecieku, redukcję składowej obwodowej strumienia przecieku i strat mieszania przecieku z przepływem głównym oraz posiada korzystny wpływ na zwiększenie stabilności dynamicznej wirnika. Przyjęty cel i zakres pracy wymagają od Doktoranta biegłego posługiwania się aparatem matematycznym i obliczeniowym numerycznej mechaniki płynów oraz znajomości zagadnień optymalizacji problemów technicznych.

W rozdziale 4 opisano model obliczeniowy skonstruowany dla celów optymalizacji wartości strumienia przecieku. Zdefiniowano zbiór 10 optymalizowanych parametrów geometrycznych uszczelnienia. Wybór parametrów wydaje się trafny. Można też zastanowić się nad dołączeniem rozmiaru charakterystycznego komórki plastra miodu (w końcu optymalizacji podlega uszczelnienie typu honeycomb), choć nie wydaje się to zbyt celowe w świetle przyjętych do optymalizacji ograniczeń geometrycznych obszaru obliczeniowego. Kanał międzyłopatkowy zastąpiono komorami na wlocie i wylocie z uszczelnienia, gdzie zdefiniowano warunki brzegowe. Obszar obliczeniowy uszczelnienia w kierunku obwodowym ograniczono do rozmiarów odpowiadających grubości pojedynczej warstwy struktury plastra miodu z zastosowaniem warunków periodyczności. W obrębie plastra miodu komórki o podstawie sześciokątnej zastąpiono kwadratowymi. Należy zwrócić uwagę, że powyższe ograniczenia (brak geometrii kanału międzyłopatkowego i przybliżenie kwadratowego plastra miodu) stosowane są jedynie w trakcie optymalizacji na siatkach o mniejszych rozmiarach. Weryfikacja otrzymanych rezultatów optymalizacji przeprowadzana jest na siatkach o dużych rozmiarach (ponad 4 mln objętości) z uwzględnieniem geometrii kanału międzyłopatkowego i sześciokątnych komórek plastrów miodu.

Niniejszy recenzent nie podważa powyższego podejścia. Co więcej, uważa, że jest ono słuszne. Brakuje jednak w pracy wyraźnego określenia konsekwencji takiego podejścia i zastosowanych uproszczeń geometrycznych przy optymalizacji. Jako funkcję celu do minimalizacji przyjęto wartość strumienia przecieku. Wartość strumienia przecieku jest często decydująca, lecz nie przekłada się bezpośrednio na wielkość strat przepływu w obszarze wpływu przecieku. Ważne są też straty w komorze wlotowej i wylotowej oraz straty mieszania przecieku ze strumieniem głównym. Warto też wspomnieć, że praktycznie nie ma możliwości kontroli składowej obwodowej, a zmiana prędkości obwodowej strumienia przecieku jest jedną z zalet uszczelnienia typu honeycomb.

Stosownie do przyjętego modelu turbulencji zgęszczenia siatki przy ściankach dobrano tak, aby wartość y^+ nie przekraczała 1. Ważnym elementem tego rozdziału jest właściwie przeprowadzona analiza wpływu rozmiarów siatki na wyniki obliczeń. Dla celów optymalizacji wybrano siatkę o rozmiarach powyżej 400 000 objętości.

Warunki brzegowe przyjęto na podstawie obliczeń przepływu głównego Avio S.p.A. W opinii niniejszego recenzenta dane z obliczeń przepływu głównego przeprowadzone przez Avio S.p.A. powinny zostać obdarzone odpowiednim cytowaniem.

W rozprawie zdefiniowano model matematyczny – RANS z modelem turbulencji $k-\omega$ SST, dostępne w kodzie komercyjnym ANSYS-CFX. Opracowanie wzorów matematycznych w tej części pracy niestety budzi liczne zastrzeżenia. Równania zachowania (str. 46-48) zawierają niezręczne i zdaniem niniejszego recenzenta właściwie nieuprawnione połączenie notacji wskaźnikowej i operatorowej w jednej formule. Ponadto, warto przynajmniej hasłowo omówić zastosowane korekcje modelu turbulencji na przypadki dużej krzywizny linii prądu i wirowania układu (str. 50).

Wypadkiem przy pracy należy określić nieścisłości występujące w obu przedstawionych formach równania zachowania energii – (4.11) i (4.15). Pomińmy w tym momencie enigmatyczne

oznaczenie i objaśnienie członu źródłowego. W pierwszym równaniu zamiast energii wewnętrznej e (brak symbolu na liście oznaczeń) powinna wystąpić energia wewnętrzna wraz z energią kinetyczną $e_0 = e + u_i u_i / 2$. Z kolei w sformułowaniu dla entalpii spoczynkowej $h_0 = h + u_i u_i / 2$ błędny pozostaje ostatni człon po prawej stronie. Powinno być: $\nabla \cdot (\tau \mathbf{u})$, bowiem w porównaniu z równaniem (4.11), część ciśnieniowa tensora naprężeń trafiła tu do członu konwekcyjnego po lewej stronie, podobnie jak pochodna ciśnienia, która słusznie znalazła się po ~~prawej~~ lewej stronie.

W rozdziale V przedstawiono wyniki optymalizacji geometrii uszczelnienia wierzchołkowego. W pierwszej części rozdziału przedstawiono wykorzystywane narzędzia optymalizacji, tj. procedury Goal-Driven Optimisation dostępne w środowisku ANSYS Workbench. W skrócie przedstawiono stosowane algorytmy optymalizacyjne – Shifted Hammersley, Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) oraz Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian (NLPQL). Przedstawiono też metody planowania eksperymentu, które głównie służą optymalizacji wielopunktowej lub wielocelowej, co wydaje się nie jest jednak wykorzystywane przez Autora. Optymalizacja dotyczy jednego punktu pracy, lecz co cenne, późniejsza weryfikacja otrzymanych rozwiązań prowadzona jest dla danego zakresu obciążeń układu.

Optymalizację uszczelnienia prowadzono na dwa sposoby: w jednym kroku dla wszystkich parametrów i sekwencyjnie w trzech krokach po podziale parametrów na trzy grupy. Dla porównania do optymalizacji wykorzystano także inny algorytm – Single Objective Genetic Algorithm, pochodzący z kodu akademickiego pracującego w środowisku równoległym. Kod ten jest stosownie opisany. Należy chyba rozumieć, że jest to kod własny, choć recenzent nie doszukał się wyraźnej informacji w rozdziale 5.2.

W rezultacie przeprowadzonych procesów optymalizacyjnych otrzymano kilka nowych geometrii, z redukcją strumienia przecieku od 10 do ponad 16 %. Weryfikacja najlepszej geometrii w modelu bez uproszczeń i na siatce o dużej rozdzielczości (rozd. 6) potwierdza z nadkładem uzyskaną redukcję strumienia przecieku. Uzyskane nowe geometrie to prawdopodobnie pewne lokalne minima 10-cio parametrowej funkcji celu lub punkty z ich pobliskiego sąsiedztwa. W pracy nie określono warunku zbieżności dla algorytmu ANSYS Workbench, z kolei dla kodu własnego podano informację, że obliczenia przerywano, gdy strumień przecieku dla dwustu iteracji nie zmienił się o więcej niż 0.2%. Teoretycznie, stosowane algorytmy genetyczne pozwalają na wyjście z sąsiedztwa ekstremum lokalnego i osiągnięcie ekstremum globalnego, m.in. poprzez odpowiednio dobrane parametry procesu mutacji. W praktyce osiągnięcie ekstremum globalnego może być trudne, szczególnie kiedy ekstrema lokalne różnią się nieznacznie wartością funkcji celu. Z punktu widzenia projektanta urządzeń, już samo osiągnięcie ekstremum lokalnego jest korzystne, gdyż oznacza, że uzyskaliśmy nową geometrię charakteryzującą się lepszą wartością funkcji celu niż geometria wyjściowa.

Dużym walorem pracy jest szczegółowa analiza struktur przepływowych występujących w komorach nowych rozwiązań uszczelnienia wierzchołkowego, ilustrowana liniami prądu (kolorowanymi wg wartości prędkości), konturami ciśnienia całkowitego, entropii oraz energii kinetycznej turbulencji. Na uwagę zasługuje przeprowadzona równolegle analiza wrażliwości. Pozwala ona, niezależnie od aktualnych zmian parametrów względem konstrukcji oryginalnej, uszeregować optymalizowane parametry wg ich wpływu na wartość funkcji celu. Doktorant dostarcza konstruktorom uszczelnień cennych informacji, jak kształtować elementy uszczelnienia, aby zminimalizować strumień przecieku nadłopatkowego.

W rozdziale 7 przedstawiono zagadnienie sprzężone cieplno-przepływowe w wirujących komorach. Stanowi ono wstęp do właściwej analizy cieplno-przepływowej obszaru rozważanego uszczelnienia wierzchołkowego (rozd. 8). Badania zagadnień wymiany ciepła w wirujących komorach zachowują aktualność z uwagi na konieczność chłodzenia elementów sprzężarek silników lotniczych. Opracowano model obliczeniowy, wykonano obliczenia oraz porównano otrzymane wyniki z eksperymentem dla dwóch przypadków komór wirujących opisanych w literaturze – Bohn, Ren oraz Sun i in. Wykorzystano kod akademicki – należy chyba rozumieć, że jest to kod własny Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych PŚI. (brak cytowania). Przepływ w komorze charakteryzuje się obecnością charakterystycznych struktur wirowych. Najlepszą zgodność z eksperymentem w zakresie

rozwoju struktur wirowych i liczby Nusselta otrzymano przy wykorzystaniu modelu turbulencji $k-\omega$ SST. W drugim wypadku dobrą zgodność otrzymano przy zastosowaniu modelu RNG $k-\epsilon$.

W analizie cieplno-przepływowej komory uszczelnień obszar obliczeniowy rozciąga się na część przepływową (kanał międzyłopatkowy i uszczelnienie nadbandażowe) oraz na obszar metalu. W obszarze metalu rozwiązywane jest równanie przewodnictwa cieplnego – jest to w zamysłach Autora prawdopodobnie brakujące równanie (8.1). Połączenie obszarów o różnych właściwościach w programie ANSYS odbywa się za pomocą interfejsów. Wyniki obliczeń zilustrowano w postaci rozkładów temperatur w przepływie i metalu, linii prądu w komorze wirującej oraz liczby Nusselta na powierzchni wymiany ciepła wzdłuż ograniczeń komory wirującej. Doktorant stwierdza dużą rolę struktury plastra miodu w procesie wymiany ciepła w obszarze uszczelnienia i małą prędkość konwekcyjnego przepływu wirowego w komorze. Może warto byłoby wykorzystać w obliczeniach sprzężonej wymiany ciepła model turbulencji termicznej?

Dużym walorem rozprawy jest rozdział 9 zawierający dobrze zredagowane podsumowanie skupiające się na otrzymanych wynikach pracy i oryginalnych elementach badań.

3. Błędy redakcyjne

Praca jest zredagowana starannie. Napisana jest dobrym stylem, przy użyciu poprawnej terminologii. Opracowanie graficzne rysunków i tabel nie budzi zastrzeżeń. W obszernych dysertacjach zwykle jednak znajduje się pewną ilość błędów, przeoczeń i nieścisłości. W recenzowanej pracy jest ich stosunkowo mało.

- Na str. 20 funkcjonuje niezgrabna i myląca w treści fraza: „... redukcja kąta zawirowania strumienia przecieku wierzchołkowego może ograniczyć o 1.5% przyrost entalpii w wyniku strat w stopniu.”
- Na str. 21 - autor pracy [20] to Giboni.
- Str. 29 - należy unikać wyrażen typu „obrotowa liczba Reynoldsa”, „osiowa liczba Reynoldsa”.
- Str. 45 – lapsus słowny – „Właściwości gazu zostały przyjęte zgodnie z równaniem stanu gazu doskonałego dla powietrza.” Modelowana jest część LP turbiny, więc wymagane są parametry ekspandującego gazu – można oprzeć się o równanie stanu gazu doskonałego, potrzebna jest indywidualna stała gazowa i wykładnik adiabaty.
- Oznaczenie symetrycznych warunków brzegowych na rys. 4.10 jest niefortunne. Dotyczy tylko wąskich krawędzi (tu niewidocznych), a może sugerować co innego.
- Wzór (4.1) wymaga cytowania.
- Rozdz. 4.5.2 – dopuszczalne jest różne nazewnictwo wielkości ω . Najczęściej stosuje się określenie „częstotliwość”. Ważna jest konsekwencja w stosowaniu określeń, która w przypadku tej wielkości nie została w pracy zachowana: str. 48 – „częstość turbulencji”, str. 51 – „częstotliwość turbulencji”. Wielkość ϵ to raczej „szybkość dyssypacji”.
- Wzór (5.8) jest niezrozumiały w świetle przyjętej symboliki – N to przecież liczba punktów.
- Str. 94 – lapsus słowny - „...ilość powietrza (?) zasysanego..”.
- Str. 119 – „... Od góry, na zewnętrznej powierzchni ciała stałego, założono konwekcję wymuszoną.” (?) –po prostu przyjęto stałą temperaturę.
- Rys. 8.2 – współczynnik przejmowania ciepła może być tylko wartością wynikową, nie warunkiem brzegowym.
- Rys. 8.5 – w podpisie brakuje informacji, że chodzi o rozkład w kierunku osiowym. Ponadto w podpisie używa się informacji „na zewnętrznej ścianie”, w tekście „na wewnętrznej powierzchni bębna”. Oba określenia dotyczą tej samej powierzchni. Może lepiej byłoby „na zewnętrznej powierzchni komory”.
- Rys. 8.8 i 8.9 – w podpisie brakuje informacji, że chodzi o rozkład w kierunku osiowym.

4. Wniosek końcowy.

Przedstawiona rozprawa doktorska charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym. Problematyka pracy mieści się w zakresie ważnego kierunku badań prowadzonych w wiodących

ośrodkach naukowych w kraju i za granicą. Autor wykazał się dużą erudycją. Nie obca jest mu umiejętność samodzielnego rozwiązywania złożonych zagadnień cieplno-przepływowych w maszynach wirnikowych. Posiada umiejętność rzetelnego prezentowania i interpretacji wyników swojej pracy. Zamieszczone w recenzji uwagi krytyczne i zauważone nieścisłości nie rzutują na podstawowe walory pracy, jakimi są samodzielne rozwiązanie trudnego zagadnienia badawczego, oryginalność wyników oraz ich duża wartość użytkowa. Nie podważają także wysokiej oceny rozprawy.

W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. K. Bochona spełnia wymagania zapisane w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65 poz. 595 ze zm. w Dz. U z 2005 Nr 164 poz. 1365) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

