

Dr hab. inż. Włodzimierz Wróblewski, Prof. PŚ
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska, Gliwice

OCENA

pracy doktorskiej **mgr. inż. Filipa Wasilczuka** pod tytułem:
„Fluidic Control of Shroud Leakage Flow in Gas Turbine”

Opinia została przygotowana na zlecenie Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku (pismo RN-421-13/16 z dnia.22.02.2021).

1. Charakterystyka pracy

Recenzowana praca napisana jest w języku angielskim. Zawiera 175 stron tekstu podzielonego na 7 rozdziałów, bibliografię i załącznik. Bibliografia obejmuje 103 pozycje, a załącznik zawiera opis wyników uzyskanych dla dodatkowej konfiguracji uszczelnienia.

Praca doktorska mgr. inż. Filipa Wasilczuka „Fluidic Control of Shroud Leakage Flow in Gas Turbine” prezentuje wyniki badań nad zastosowaniem kurtyny powietrznej do redukcji strumienia przecieku w uszczelnieniu labiryntowym turbiny gazowej.

Rozdział pierwszy zawiera ogólną motywację podejmowania prac związanych z poprawą pracy silników lotniczych. Zawiera przegląd strat w turbinach gazowych ze zwróceniem szczególnej uwagi na znaczenie strat przecieku oraz na sposoby ich redukcji. Omówiono zasadę działania uszczelnień labiryntowych, które są najczęściej stosowane w uszczelnieniach silników lotniczych. Opisano parametry geometryczne wpływające na ich efektywność. Wskazano metody, które pozwalają na zmniejszenie szczeliny w uszczelnieniu: aktywną kontrolę za pomocą odpowiedniego systemu chłodzenia kadłuba oraz wprowadzenie wypełnień typu plaster miodu, zabezpieczających przed skutkami przytarcia w zmiennych warunkach obciążenia silnika. Osobny punkt poświęcono na przedstawienie różnych istniejących koncepcji wykorzystania dodatkowego strumienia do redukcji przecieków. Wskazano na metody aktywne, ze strumieniem ze źródła zewnętrznego oraz na metody pasywne, wykorzystujące energię strumienia głównego lub strumienia przecieku. Wprowadzono wielkości, jakie są wykorzystane do oceny efektywności uszczelnienia. Na koniec rozdziału sformułowano cele pracy oraz hipotezę, że przeciek w uszczelnieniu labiryntowym może zostać ograniczony przez zastosowanie metody pasywnej z kurtyną powietrzną.

Rozdział drugi przedstawia założenia i postać modelu matematycznego oraz podstawowe informacje na temat metod zastosowanych do jego rozwiązania.

Rozdział trzeci poświęcony jest badaniu różnych wariantów koncepcji uszczelnienia. Badanie ma charakter wstępny i ma na celu wskazanie konfiguracji najbardziej obiecujących z punktu widzenia ograniczenia przecieku. Badania rozpoczęto od analizy możliwości wprowadzenia uproszczeń w geometrii uszczelnienia, które przyjęto do badań jako referencyjne. Ponieważ jest to uszczelnienie rzeczywistej turbiny gazowej, to ograniczenie obszaru obliczeniowego było podstawowym celem tych studiów. Wprowadzono koncepcje uwzględnienia spadku ciśnienia w wieńcu wirnikowym, sprawdzono wpływ prędkości wirowania na pracę uszczelnienia oraz wpływ zawirowania za kierownicą na warunki napływu na uszczelnienie wirnika.

Przeprowadzono obliczenia modelem dwuwymiarowym przepływu przez uszczelnienie z różnymi koncepcjami zastosowania kurtyny powietrznej. Na podstawie tych obliczeń został wybrany wariant kurtyny pasywnej, który poddano bardziej szczegółowej analizie modelem trójwymiarowym.

W rozdziale czwartym przeprowadzono porównanie wyników badań eksperymentalnych oraz numerycznych dla różnych szczelin i różnych stosunków ciśnień. Opisano warunki prowadzenia eksperymentu oraz założenia modelu numerycznego. Obliczenia prowadzono dla różnych modeli turbulencji i przy użyciu różnych pakietów komercyjnych do symulacji przepływów. Przedstawiono charakterystyki przepływowe analizowanych geometrii uszczelnień: referencyjnego i z kurtyną powietrzną.

Wyniki symulacji przedstawione w rozdziale 5 otrzymano za pomocą modeli turbulencji LES oraz modeli RANS: dwurównaniowego, k-omega SST, oraz jednorównaniowego, Spalarta-Allmarasa. W sposób szczegółowy przeanalizowano struktury przepływowe w obszarze uszczelnienia dla różnych wartości szczelin oraz stosunku ciśnień.

W ostatnim rozdziale przedstawiono model oraz wyniki symulacji przepływu przez stopień turbiny z uszczelnieniem wierzchołkowym wirnika. Porównano parametry przepływowe uzyskane różnymi modelami turbulencji przy założeniu modelu przepływu stacjonarnego.

W modelach obliczeniowych przedstawionych w głównej części pracy zakładano, że uszczelnienie labiryntowe jest jednostronne, proste i typu gładkiego. W miejsce struktury plastra miodu, jaka znajduje się w rzeczywistej turbinie, zastosowano model z powierzchnią gładką.

Załącznik A zawiera opis wyników badań eksperymentalnych i numeryczne efektywności uszczelnienia labiryntowego z wypełnieniem typu plaster miodu. W podsumowaniu przedstawiono możliwości zastosowania kurtyny powietrznej w uszczelnieniach takiego typu oraz kierunki dalszych koniecznych badań, aby potwierdzić pozytywny efekt działania kurtyny powietrznej.

2. Uwagi ogólne

Temat pracy jest interesujący, gdyż podejmuje próbę szczegółowego zbadania efektów pasywnej redukcji przecieku w uszczelnieniu labiryntowym. Prowadzona analiza jest kompleksowa, wykorzystuje różne modele obliczeniowe z zakresu numerycznej mechaniki płynów. Doktorant we właściwy sposób dopasowuje modele o różnej złożoności do rozwiązywanych w swej pracy zadań cząstkowych. Wyniki obliczeń uzyskiwane są z reguły dla dwóch lub więcej wariantów modeli turbulencji, co oprócz walorów poznawczych dotyczących możliwości samych metod i ich przydatności w tej klasie zagadnień technicznych, pozwala poszerzyć wiedzę o zjawiskach przepływowych zachodzących w uszczelnieniu labiryntowym.

Do rozwiązywania zastosowano zaawansowane pakiety obliczeniowe: Ansys Fluent i Numeca/Fine Turbo, które mają swoją ugruntowaną renomę w zakresie zastosowań do przepływów w maszynach wirnikowych.

Przeprowadzona w pracy szczegółowa analiza numeryczna wariantów uszczelnienia labiryntowego, połączona z badaniami eksperymentalnymi, pozwoliła na uzyskanie bardzo wartościowych wyników. Trzeba podkreślić, że takie kompleksowe podejście nie zawsze towarzyszy koncepcjom rozwiązań aktywnego i pasywnego redukowania strumienia przecieku. Koncepcjom, które są opatentowane nie towarzyszą często szersze badania i dlatego ocena ilościowa ich zastosowania jest utrudniona. Motywacja do badań u niezależnych badaczy jest z reguły niewielka ze względu na prawa własności i ochronę patentową.

W recenzowanej pracy doktorskiej przedstawione zostały rezultaty badań nowej koncepcji pasywnej kurtyny powietrznej w uszczelnieniu labiryntowym, która została wypracowana w zespole Instytutu Maszyn Przepływowych PAN przy realizacji projektu Coopernik w ramach programu sektorowego INNOLOT. Realizacja badań w ramach projektu badawczego, w którym uczestniczy partner przemysłowy branży lotniczej, wskazuje na wyraźnie utylitarny charakter recenzowanej pracy. Ten fakt wymaga szczególnego wyróżnienia.

Biorąc pod uwagę formę i strukturę pracy można ocenić ją bardzo pozytywnie. Należy podkreślić, że w rozprawie przedstawiono motywację do podjęcia tematu, zdefiniowano problem naukowy, postawiono hipotezę i sformułowano cel.

Praca napisana jest w języku angielskim bardzo starannie i ma bardzo przejrzysty układ, jest bardzo dobrze podzielona pod względem wątków tematycznych. Opisywane modele, wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych są bardzo bogato ilustrowane (praca zawiera 174 rysunki), co ogromnie ułatwia zrozumienie formułowanych wniosków i śledzenie wątków poszczególnych opisów.

Dużą wartością merytoryczną są podsumowania i wnioski umieszczane po kluczowych wynikach badań, które stanowią podstawę do decyzji o zakresie kolejnych etapów analiz. Numeryczna symulacja przepływu w uszczelnieniu labiryntowym nie jest zadaniem prostym, a wprowadzenie do modelu koncepcji kurtyny powietrznej znacząco go komplikuje. Model, który z jednej strony ma pozwolić na uzyskanie poprawnych wyników, z drugiej strony musi uwzględniać wiele kompromisów.

Z tego względu na podkreślenie zasługuje przeprowadzona bardzo szczegółowa analiza wstępna. Rozpatrywano wpływ wielu cech geometrycznych i warunków przepływowych, aby wyselekcjonować do dalszych badań odpowiednią, najbardziej obiecującą konfigurację uszczelnienia i kurtyny powietrznej.

Doktorant posługuje się narzędziami numerycznej mechaniki płynów z dużą sprawnością i wykazuje dużą wiedzę w tym zakresie. Stosuje różne programy do symulacji przepływów w wielu wariantach obliczeniowych. Sprostął wyzwaniu, jakie związane jest z dyskretyzacją obszaru uszczelnienia z takimi elementami dodatkowymi jak, szczeliny kurtyny powietrznej, czy struktura plastra miodu. Docenić należy bardzo pogłębioną analizę struktur przepływowych w uszczelnieniu. Sformułowane wyjaśnienia zachodzących zjawisk oraz wskazanie potencjalnych przyczyn uzyskiwania różnic w wynikach, czy to symulacji, czy pomiarów, świadczą o dużej wiedzy z zakresu mechaniki płynów i modelowania przepływów.

Mgr. Wasilczuk koncentrował swój wysiłek wokół badań numerycznych, jednak włączał się również w pewnym zakresie do zadań związanych z badaniami eksperymentalnymi.

Moim zdaniem praca prezentuje wysoki poziom merytoryczny, ma wiele walorów poznawczych w zakresie numerycznej mechaniki płynów oraz w obszarze badań maszyn przepływowych. Metodologię zastosowaną do badań oraz plan badań prawidłowo dopasowano do wyznaczonego celu.

Mimo wielu starań, jakie widać zarówno w sposobie rozwiązywania poszczególnych zagadnień, jak i w formie prezentacji pracy, nie udało się Doktorantowi uniknąć pewnych niejasności. Lektura pracy nasuwa również dodatkowe pytania.

Dość istotnym brakiem w pracy jest pominięcie walidacji metod obliczeniowych na zweryfikowanym przykładzie raportowanym w literaturze. Mimo, że badania mają charakter numeryczno-eksperymentalny i można oprzeć się na wynikach własnego eksperymentu, to jednak niezależny test wniosłby do pracy dodatkową wartość. Autor porównuje swoje wyniki z wynikami Waschki i innych, więc byłoby wartościowe gdyby zbadał uszczelnienie, jakie badał Waschka.

Przyjęcie metody opartej o Grid Convergence Index nie w każdym przypadku się sprawdza. W obliczeniach przepływu przez szczelinę uszczelnienia istotne jest modelowanie efektów przyściennych i kontrakcji. Operowanie wartościami średnimi rozmiarów komórek może być niewystarczające. Dla takich geometrii nie ma jednak uniwersalnej metody przeprowadzenia studiów niezależności rozwiązania od siatki i na coś trzeba się zdecydować. Z tą uwagą wiąże się jeszcze jedna która dotyczy wprowadzanych zmian w geometrii uszczelnienia. Testy siatki są prowadzone dla zębów referencyjnych, a później zostają trzykrotnie pogrubione. Zmienia to w sposób istotny obszar nad szczeliną i musi wymagać odpowiednich korekt siatki. Nie podano jakie zasady zastosowano dla zmienionej geometrii.

W pracy wprowadzono dualny system opisu charakterystyki przepływowej uszczelnienia. W połowie pracy, do rozdziału 3 włącznie, stosuje się bezwymiarowy współczynnik przepływu C_D , a później prawie wyłącznie strumień masy (wyjątek stanowi rys.4.12). Szczególnie brakuje takich charakterystyk dla uszczelnienia z plastrem miodu. W analizie uszczelnień przyjęte jest operowanie wielkościami bezwymiarowymi. Doktorant nie wyjaśnił co jest przyczyną takiego prezentowania wyników.

W rozdziale 5 w którym prowadzono symulacje LES dla różnych przypadków podano, że zmieniono typ warunków brzegowych i zadaje się strumień masy na wlocie a w wyniku obliczeń wyznaczany jest stosunek ciśnień. Niestety nie podano jego wartości. Brak jest więc odniesienia warunków pracy uszczelnienia do poprzednich analiz. Dla wyników symulacji RANS, które podano w tym rozdziale, można te strumienie podać.

Szkoda, że Autor nie wykazał chęci porównania obliczeń numerycznych z wynikami uzyskanymi w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej. Myślę, że mogłoby to być interesujące i pożyteczne dla obu grup badawczych. To samo dotyczy porównania wyników badań eksperymentalnych.

Przy opisie pola przepływu płynu ściśliwego przyjmuje się, że podstawową wielkością charakterystyczną jest liczba Macha. Doktorant używa wielkości bezwymiarowych prędkości, które niewiele mówią, jeśli na każdym rysunku prędkość maksymalna może być inna. Można się domyślać, że przyczyną może być konieczność zachowania poufności danych. Jednak w ogólnych przypadkach charakterystyk, badanych dla różnych stosunków ciśnień to ograniczenie jest trudne do przyjęcia.

Problem naukowy jaki analizował Doktorant w efekcie końcowym jest ważny z praktycznego punktu widzenia, gdyż pozwala wytyczyć dalsze kierunki postępowania nad wprowadzeniem kurtyny powietrznej do rozwiązań uszczelnień w turbinie gazowej.

3. Uwagi szczegółowe

W czasie czytania pracy pojawiło się kilka niejasności oraz natknąłem się na kilka błędów:

- Autor wspomina, że większość symulacji została przeprowadzona jako stacjonarna. Czy w przypadku takich symulacji, jak przepływ przez uszczelnienie typu plaster miodu nie pojawiały się trudności z uzyskaniem odpowiedniego poziomu residuów? Jak to wyglądało w poszczególnych typach modeli i pakietów?

- nie do końca jest jasne, dlaczego do dyskretyzacji plastra miodu nie zastosowano siatki strukturalnej i pakietu Numeca/Fine Turbo (wyjaśnienie na str.31). Czy nie dało się jej przygotować?

- Fig.3.4 zastosowanie uproszczenia uszczelnienia łopatką w postaci kanału tylko z uszczelnieniem nie odpowiada warunkom w rzeczywistym uszczelnieniu. Takie uproszczenie najczęściej jest porównywane z kanałem badanym w eksperymencie. Wtedy istnieje pełna odpowiedniość. Warunki brzegowe w stopniu odbiegają od warunków w prostym kanale.

Model z warstwą porowatą jest oczywiście lepszym rozwiązaniem, jednak czy w takim modelu uwzględniano zmianę kierunku przepływu w kanale głównym?

- w kontekście powyższego punktu nie jest jasne, dlaczego zdecydowano się na pozostawienie kawerny na wylocie (str.41, rys.3.9) skoro w badaniach eksperymentalnych takiej kawerny nie ma?

-Rys.A.1 - jak wyglądał plaster miodu przy ścianach, skoro jest on umieszczony w ramce?

- Str. 47 – przyjęcie do definicji izentropowego strumienia masy wartości ciśnienia statycznego niepotrzebnie komplikuje sprawę. Celem jest wyznaczenie liczby bezwymiarowej i zasada, że przyjmujemy jako odniesienie strumień masy dla wartości ciśnienia spoczynkowego jest tu jednoznaczna.

- Str.49 – przyjęcie metody Grid Convergence Index nie w każdym przypadku się sprawdza. W przypadku szczeliny istotne jest modelowanie efektów przyściennych i kontrakcji. Operowanie wartościami średnimi rozmiarów komórek może być niewystarczające. Jednak rozumiem, że nie ma dla takich geometrii uniwersalnej metody przeprowadzenia studiów niezależności rozwiązania od siatki i na coś trzeba się zdecydować.

- Fig.3.33 – nie jasne są oznaczenia in, out

- Str.82 – podkreślono trudności w interpretacji ciśnienia całkowitego ze względu na straty na przepływomierzu. Czy jego lokalizacja za stanowiskiem nie była możliwa? Czy dokonywano dodatkowego pomiaru strumienia masy za stanowiskiem?

- Str.84 – w modelu referencyjnym są uwzględniane ściany boczne, a w modelu z kurtyną nie są. Czy jest jakaś przyczyna takiego zróżnicowanego podejścia?

- Str.87 – Dlaczego przyjęto, że intensywność turbulencji wynosi 0.05%.

- Rys.4.11 Czym można wytłumaczyć, że na wykresach dla wyższych ciśnień strumienie niewiele się od siebie różnią? Podobna sytuacja jest na rys. 4.12. Linie charakterystyk są prawie takie same, a można by się spodziewać, że będą różnice. Większość charakterystyk współczynnika przepływu spotykanych w literaturze ma przebieg prawie liniowy. To widać dla wyższych stosunków ciśnień w warunkach otoczenia. Czy są jakieś przyczyny że dla warunków Cold są takie różnice?

- Rys.4.17 b – nie zawiera rozkładu ciśnienia.

- Rys.4.20 - Te rysunki są identyczne. Czy nie ma tu jakiejś pomyłki?

4. Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że temat podjęty przez mgr. inż. Filipa Wasilczuka jest tematem, aktualnym i bardzo interesującym z punktu widzenia poznawczego. W założonym zakresie Doktorant osiągnął postawione w pracy podstawowe cele i sformułował dalsze kroki jakie należy podjąć dla sprawdzenia efektu kurtyny powietrznej w rzeczywistej turbinie gazowej. W swojej pracy dał dowód na znajomość badanych zagadnień i zaprezentował materiał obliczeniowy i eksperymentalny, który świadczy o umiejętnościach wykorzystania nowoczesnych, zaawansowanych narzędzi badawczych. Uzyskane wyniki można uznać za wartościowe pod względem naukowym oraz pod względem aplikacyjnym. Przedstawione w recenzji uwagi nie zmniejszają walorów naukowych pracy i nie wpływają na moją pozytywną opinię o całości pracy.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do opinii praca mgr. inż. Filipa Wasilczuka spełnia wymagania ustawowe o stopniach naukowych i tytule naukowym i może stanowić podstawę do przeprowadzenia publicznej obrony.