

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Bochona: *Numeryczna ocena zjawisk cieplno – przepływowych w wybranych węzłach stopnia turbiny gazowej*



1. Przedmiot i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa zawiera wyniki badań optymalizacyjnych dla wybranych węzłów stopnia turbiny gazowej. Główny wysiłek badawczy skierowano na optymalizację wybranych cech geometrycznych uszczelnienia wierzchołkowego turbiny niskoprężnej przeciwbieżnego silnika turbośmigłowego oraz analizę sprzężonego trójwymiarowego zagadnienia cieplno – przepływowego dla uszczelnienia i wirującej komory zlokalizowanej nad uszczelnieniem. W badaniach wykorzystano różne techniki numeryczne, w tym również własne koncepcje metodologiczne autora. Tematyka pracy i stosowane przez Autora metody dotyczą numerycznej mechaniki płynów i metodologii optymalizacji konstrukcji i przynależą do dyscypliny *mechanika i eksploatacja maszyn*. Praca ma potencjał aplikacyjny, bowiem uzyskane wyniki wskazują na konkretną optymalną postać konstrukcyjną uszczelnień dla rozważanego projektu części przepływowej turbiny.

Przesłanką podjęcia badań było uczestnictwo w projekcie europejskim *Dream*, którego celem było sprawdzenie koncepcji nowej klasy silników lotniczych. Szczegółowe sformułowanie zadań badawczych przyjętych w rozprawie poprzedzono obszerną dyskusją problematyki uszczelnień zarówno w sensie konstrukcyjnym jak i obliczeniowym. Ta część pracy obok wprowadzenia w problematykę rozprawy ma także znaczenie poznawcze przez dokonanie syntezy dotychczasowych wyników badań i wskazanie wyłaniających się kierunków dalszych badań. Konstrukcję pracy przyporządkowano przyjętemu algorytmowi osiągnięcia sformułowanych w niej celów. Obejmuje on:

1. Przygotowanie modelu obliczeniowego do celów optymalizacji
2. Opis metodologii optymalizacji oraz jej podstawowe wyniki
3. Numeryczną analizę przepływu w obszarze uszczelnienia o geometrii określonej w procesie optymalizacji
4. Sformułowanie i rozwiązanie wybranych sprzężonych zagadnień cieplno – przepływowych w wirujących komorach oraz zamkniętych przestrzeniach nad uszczelnieniem wierzchołkowym

5. Analizę ciepłno – przepływową obszaru wierzchołkowego łopatki z uszczelnieniem.

Opis modelu zawiera informacje o zastosowanym podejściu do generacji siatek obliczeniowych, w tym o uproszczeniach stosowanych w obliczeniach optymalizacyjnych. W pracy przyjęto równania RANS z dwurównaniowym modelem turbulencji $k-\epsilon$ z dodatkową modyfikacją *Kato – Laundera* i poprawką dotyczącą wpływu krzywizny linii prądu. W tej części rozprawy określono funkcję celu, za którą przyjęto minimalizację strumienia przecieku przez uszczelnienie nadłopatkowe oraz zdefiniowano dziesięć parametrów geometrycznych podlegających zmianie w procesie optymalizacji. W istotnej dla oceny pracy części dotyczącej optymalizacji uszczelnienia wierzchołkowego najpierw scharakteryzowano dostępne w pakiecie ANSYS – CFX pakiety optymalizacyjne, z których do analizy sformułowanych w pracy zadań wybrano opcję *Central Composite Design*(CCD) oraz opisano jej podstawowe moduły. Do prowadzenia obliczeń wybrano dwie strategie. Pierwsza z nich polegała na poszukiwaniu optymalnych rozwiązań w jednym kroku. Ze względu na dużą liczbę poszukiwanych parametrów gwarantujących minimalizację przecieku czas obliczeń był bardzo długi. Wynosił bowiem dwa tygodnie z wykorzystaniem klastra składającego się z 5 komputerów, z których każdy był wyposażony w dwa czterordzeniowe procesory. W drugiej strategii dokonano dekompozycji procesu obliczeniowego na trzy etapy. Celem znalezienia zbioru parametrów określających optymalną geometrię wykorzystano metody *ShiftedHammersley* oraz *algorytm genetyczny*. Takie podejście umożliwiło znaczne skrócenie czasu obliczeń. Ponieważ uzyskane wyniki optymalizacji geometrii uszczelnienia dla obu strategii są bardzo do siebie zbliżone autor skłania się do rekomendacji strategii dekompozycji. W tej części rozprawy przeprowadzono optymalizację z użyciem algorytmu genetycznego opracowanego w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej. Ważną cechą kodu jest połączenie algorytmu ewolucyjnego z komercyjnym oprogramowaniem do przygotowania i wykonania obliczeń CFD. Ponadto umożliwia on poprawne połączenie oprogramowania CAD ze środowiskiem CFD. W procesie optymalizacyjnym wykorzystano klaster 10 komputerów, co przy wyborze 30 osobników pozwoliło skrócić czas obliczeń do 10 dni. Jest interesującym, że w procesie optymalizacyjnym ujawniły się dwa lokalne optima. Dla obu przeprowadzono analizę przebiegu linii prądu w obrębie badanych uszczelnień. Na podstawie dyskusji wyników uzyskanych rozwiązań z zastosowaniem algorytmów *Goal-DrivenOptimization*(GDO) i ewolucyjnego, autor dochodzi do wniosku, że mimo występujących różnic w wartościach funkcji celu, oba podejścia metodologiczne wskazują na podobne tendencje zmian cech geometrycznych charakterystycznych uszczelnienia dla rozwiązania optymalnego. Ten

ważny wniosek jest dostatecznie w rozprawie uzasadniony. Potwierdzają go także interesujące wyniki analizy wrażliwości. W rozprawie wiele uwagi poświęcono numerycznej analizie przepływu przez uszczelnienia o optymalnej konfiguracji. Przyjęty model obliczeniowy w zakresie obszaru obliczeniowego różni się od zastosowanego w algorytmach optymalizacyjnych dokładniejszym odwzorowaniem geometrii uszczelnienia w postaci plastra miodu i górnej części całego kanału przepływowego. Pozwoliło to na pełniejsze uwzględnienie trójwymiarowych przepływów w przepływie głównym i w kanałach uszczelnienia. Uzyskane wyniki oraz przeprowadzona analiza parametryczna wpływu istotnych parametrów na pracę uszczelnienia są świadectwem złożoności przepływu oraz źródłem ważnych informacji o procesach konwersji w przepływach w tej strefie układu przepływowego stopnia turbiny.

Dwa ostatnie rozdziały(7 i 8) pracy dotyczą analizy zagadnień sprzężonych dla geometrii charakterystycznych dla stopni turbin gazowych. W pierwszej części rozdziału 7 przeprowadzono obliczenia dla dwóch układów wirujących komór, których geometrię wzięto z badań innych badaczy. Ich celem było sprawdzenie poprawności identyfikacji struktur wirowych w przestrzeniach komór oraz ilościowa ocena liczby *Nusselta* na zewnętrznej powierzchni wirujących komór. Badano zarówno przepływy laminarne jak i turbulenty. Wzięto pod uwagę dwa modele turbulencji dla niestacjonarnego i stacjonarnego stanu przepływu(modele RNG – $k-\epsilon$ i SST). Dyskusja przeprowadzona w tej części rozprawy wskazała na lepszą zgodność z eksperymentem wyników obliczeń przeprowadzonych z modelem SST. Warto w tym miejscu zauważyć, że wyniki obliczeń intensywności wymiany ciepła uzyskane przez autora są bliższe eksperymentowi niż przedstawiane dla tej samej geometrii w literaturze. W drugiej części tego rozdziału dokonano obliczeń cieplno-przepływowych w komorze nad optymalizowanym w pracy uszczelnieniem stopnia. Przeprowadzona analiza była pomocna w sformułowaniu i rozwiązaniu znacznie bardziej złożonego zadania sprzężonego, co przedstawiono w rozdziale 8. Podjęta próba rozwiązania sprzężonego dotyczy całego układu uszczelnienia i części wierzchołkowej układu łopatkowego. Zadanie takie obok znaczenia dla metodologii analizy numerycznej ma ważne znaczenie aplikacyjne, choćby w kontekście intensywności wymiany ciepła w tym obszarze stopnia i ewentualnej potrzeby jego wentylacji dla uniknięcia wysokiej temperatury i wysokich naprężeń. Uzyskano interesujące wyniki dla dwóch wartości współczynnika przewodzenia ciepła w ciele stałym. Stwierdzono istotny wpływ struktury plastra miodu jako elementu uszczelnienia na rozkład temperatury w badanym obszarze. Prace zamyka część

podsumowująca oraz spis literatury. Obejmuje on 56 pozycji. Jest ściśle specjalistyczna literatura przedmiotu, uwzględniająca głównie pozycje ostatnich lat.

2. Ocena rozprawy

Badania podjęte w rozprawie są aktualne i mieszczą się w nurcie badań światowych, podejmowanych w analizowanym obszarze. Nie ulega wątpliwości, że zarówno, biorąc pod uwagę ich oryginalność jak i przyjętą w pracy metodologię badawczą, mogą one stanowić przedmiot pracy doktorskiej.

Jak już wcześniej stwierdzono tematyka pracy i stosowane przez Autora metody dotyczą numerycznej mechaniki płynów i metodologii optymalizacji konstrukcji i przynależą do dyscypliny *mechanika i eksploatacja maszyn*.

W rozprawie, mimo spójności metodologicznej w zakresie stosowanych technik numerycznych, można wyróżnić dwie odrębne klasy rozwiązywanych zadań. W pierwszej, podstawowej dla rozprawy, mieszczą się zagadnienia optymalizacji geometrii nadłopatkowego uszczelnienia i identyfikacji struktur przepływu odpowiadających znalezionym w procesie optymalizacji geometriom. Druga grupa zadań dotyczy poszukiwań rozwiązań początkowo – brzegowego ciepłno-przepływowego zadania sprzężonego dla wierzchołkowego rejonu stopnia turbiny gazowej. W obu grupach zadań uzyskano ważne poznawczo i aplikacyjnie wyniki.

Do głównych osiągnięć doktoranta w pierwszej części pracy, dotyczącej optymalizacji, zaliczam:

- Sformułowanie zadania optymalizacyjnego i przedstawienie odpowiedniej dla przyjętych celów strategii jego rozwiązania.
- Sprawdzenie efektywności przyjętej metodologii rozwiązania zadania przez wykonanie obszernych testów numerycznych, w tym także dla algorytmu ewolucyjnego
- Wykonanie obliczeń weryfikacyjnych dla geometrii optymalnych i wykonanie analizy wrażliwości
- Przeprowadzenie obliczeń numerycznych z dokładną identyfikacją geometryczną uszczelnienia w strefie jego ukształtowania w postaci plastra miodu, ich dyskusję oraz ocenę wpływu na efektywność uszczelnienia stosunku ciśnień i wartości szczeliny. Uzyskane wyniki poszerzają wiedzę o rodzajach występujących w strefie uszczelnień strukturach przepływowych oraz istocie konwersji energii w tej klasie przepływów.

W drugiej grupie zagadnień rozpatrywanych w rozprawie za ważne uważam głównie sformułowanie i rozwiązanie zadania sprzężonego cieplno-przepływowego charakterystycznego dla strefy wierzchołkowej stopnia turbiny. Przeprowadzone badania są ważne nie tylko w aspekcie uzyskania umiejętności rozwiązania złożonego zadania z wykorzystaniem zaawansowanych algorytmów obliczeniowych, ale także z aplikacyjnego punktu widzenia. Mogą, bowiem służyć do właściwej organizacji chłodzenia w tej strefie stopnia.

Strona edytorska rozprawy nie budzi zastrzeżeń. Podkreślenia wymaga staranność w przedstawianiu wyników obliczeń.

Do zagadnień, które wymagałyby bardziej szczegółowych wyjaśnień zaliczam m.in.:

Podjęcie do wyboru modeli turbulencji. Autor wprowadzie omawia to zagadnienie w punkcie 4.5.2, informując, że wykorzystuje model zaproponowany przez Mentera, tym niemniej, brak jest informacji o przesłankach takiego wyboru oraz wyjaśnień dotyczących modyfikacji tego modelu w zastosowanych w algorytmach obliczeniowych. Ponadto w w rozdziale 7 stwierdza się, że obliczenia wykonano także z wykorzystaniem modelu RNG $k - \epsilon$, bez dodatkowych komentarzy. Brak jest informacji, jaki model zastosowano w obliczeniach, których wyniki przedstawiono w punkcie 7.2.

Pojawia się także pewna niejasność związana z porównaniem wyników uzyskanych w obliczeniach przepływu w wirujących komorach z wynikami do których autor nawiązuje w rozprawie. Chodzi tu głównie o porównanie struktur wirowych i ocenę efektywności zastosowanych przez autora algorytmów obliczeniowych.

3. Wnioski końcowe

Mgr inż. Krzysztof Bochon podjął wysiłek poszukiwania optymalnej geometrii uszczelnienia wierzchołkowego stopnia turbiny gazowej, będącej modulem silnika lotniczego nowej generacji. Sformułował i rozwiązał odpowiednie zadanie optymalizacyjne. Zrealizował w całości zakres planowanych badań i osiągnął założone w recenzowanej rozprawie cele. Wykazał się przy tym szeroką wiedzą i umiejętnościami w zakresie modelowania matematycznego i algorytmów numerycznych charakterystycznych dla badań trójwymiarowych złożonych przepływów. Uzyskał wiele oryginalnych rozwiązań zarówno w zakresie metodologicznym jak i poznawczym.

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 Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

