

Prof. dr hab. inż. Stanisław DROBNIAK
Instytut Maszyn Ciepłych
Politechnika Częstochowska

ul. Armii Krajowej 21
42-200 Częstochowa
e-mail: drobniak@imc.pcz.czest.pl

Częstochowa, 12.06.2021

R e c e n z j a

rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa Wasilczuka:
„Fluidic Control of Shroud Leakage Flow in Gas Turbine”.

Recenzja została opracowana na zlecenie Z-cy Dyrektora IMP PAN , dr hab. Marcina Lackowskiego zawarte w piśmie nr RN - 356/ 2016 z dn. 15.11.2016 r.

1. Ocena ogólna.

Tematyka pracy dotyczy eksperymentalnej i numerycznej analizy procesów przepływowych w uszczelnieniach turbin gazowych i przynależy do obszarów tematycznych „termodynamika”, „maszyny przepływowe” oraz „mechanika płynów”. **Temat rozprawy i użyte metody analizy pozwalają zakwalifikować ją do dyscypliny „Inżynieria mechaniczna”.**

Celem badań wykonanych w ramach rozprawy było sprawdzenie możliwości redukcji przecieków poprzez zastosowanie nowej konstrukcji pasywnego uszczelnienia labiryntowego turbiny gazowej. Z przyjętego celu zasadniczego wynikają trzy cele szczegółowe rozprawy, z których pierwszym było numeryczna analiza porównawcza możliwych do zastosowania rozwiązań konstrukcyjnych uszczelnienia, celem drugim była numeryczna i eksperymentalna analiza wybranego rozwiązania konstrukcyjnego, natomiast trzecim celem szczegółowym było zastosowanie wyników badań do stworzenia modelu fizycznego nowej konstrukcji uszczelnienia, umożliwiające jego przyszłą optymalizację. **Tak sformułowany program pracy jest oryginalny pod względem poznawczym i reprezentuje stopień złożoności odpowiadający zwyczajowym wymaganiom przyjmowanym w pracach doktorskich. Zastosowane metody badawcze są nowoczesne i odpowiednie do analizowanych zagadnień. Zakres badań wykonanych w ramach pracy przekracza zwyczajowo**

spotykany w rozprawach doktorskich, gdyż nie tylko zakres badań jest znacznie szerszy niż w większości rozpraw doktorskich lecz także dlatego, że oprócz wartości poznawczych praca uwzględnia także aspekty aplikacyjne.

Pracę kwalifikując do badań stosowanych, uzyskane wyniki mogą jednak służyć rozwojowi metod numerycznego i eksperymentalnego modelowania przepływów i dlatego też praca ma również pewną wartość podstawową.

2. Ocena szczegółowa.

Pierwszy rozdział pracy zawiera uzasadnienie istotności tematyki rozprawy (rozdz. 1.1), przegląd stanu wiedzy dotyczący systematyki, konstrukcji i parametrów charakteryzujących efektywność uszczelnień (rozdz. 1.2 – 1.4) oraz sformułowanie celu rozprawy. Zwracam uwagę, że oprócz zwyczajowych cytowań źródeł literaturowych Doktorant omawia także opisy patentowe (dotyczy to zwłaszcza rozwiązań z kurtyną powietrzną), to aspekt wskazujący na aktualność naukową i aplikacyjną tematyki rozprawy. W rozdz. 1.5. Doktorant poprawnie formułuje hipotezę badawczą i wybiera poprawne techniki badań (eksperyment i modelowanie CFD).

Zamieszczona w rozdziale 1 dyskusja stanu wiedzy oraz wad i zalet poszczególnych rozwiązań wskazuje na aktualność naukową podjętej tematyki, dyskusja ta wykazuje również dobrą orientację Doktoranta w rozumieniu fizyki przepływu oraz w możliwościach perspektywicznych zastosowań uszczelnień z kurtyną powietrzną. Stwierdzam również, że sformułowany w pracy cel jest oryginalny i ma odpowiednią wartość poznawczą i aplikacyjną, a założony w pracy program badań odpowiada zakresowi co najmniej odpowiedniemu dla prac doktorskich i zawiera elementy nowatorskie nie tylko w skali krajowej lecz także i światowej (nowa konstrukcja uszczelnienia pasywnego opracowana w ramach projektu INNOLOT COOPERNIK).

W rozdz. 2 Doktorant przedstawił najważniejsze informacje o metodach analizy przepływów, w tym podsumowanie własności turbulentnego transportu energii (rozdz. 2.1.1.) W rozdz. 2.3. Doktorant scharakteryzował aktualny stan wiedzy w zakresie metod numerycznego modelowania przepływów, natomiast w rozdz. 2.4. przedstawił metody numeryczne użyte w recenzowanej rozprawie. **Stwierdzam, że zarówno użyte kody obliczeniowe jak i metody numeryczne zastosowane w badaniach są nowoczesne i poprawnie dobrane do analizowanych zagadnień.**

W rozdz. 3 przedstawiono wyniki badań nazwanych przez Doktoranta wstępnymi, które jednak (ze względu na obszerność) są czymś więcej niż zwyczajowe badania o

charakterze rozpoznawczym. Pierwszym wątkiem tego rozdziału są badania wpływu uproszczeń modelu numerycznego na wiarygodność uzyskiwanych wyników, w tym warunków brzegowych, geometrii modelu uszczelnień oraz zawirowania wywołanego ruchem obrotowym wirnika. Kolejnym wątkiem tej części rozprawy jest analiza parametryczna geometrii szczelin i ich rozmieszczenia, co pozwoliło Doktorantowi na sformułowanie ważnego wniosku, że zastąpienie pojedynczego kanału układem kilku szczelin jest rozwiązaniem bardziej korzystnym przepływowo i energetycznie. W tej części badań używano zarówno uproszczonych modeli 2D (studia parametryczne geometrii szczelin) jak i rzeczywistej geometrii 3D (badania parametryczne przepływu w kurtynie powietrznej), co pozwoliło na redukcję czasu obliczeń bez negatywnego wpływu na jakość uzyskanych wyników. Wartościowym uzupełnieniem badań wstępnych jest analiza skuteczności kurtyny powietrznej w uszczelnieniu typu „plaster miodu” zamieszczona w dodatku A. Wszystkie etapy przeprowadzonych badań tworzą logiczny ciąg, zwraca również uwagę poprawność metodyki badań, czego przykładem może być analiza niezależności wyników od siatki zamieszczona w rozdz. 3.3. **Stwierdzam, że zawartość rozdz. 3 stanowi wzorowe rozwiązanie postawionego przed Doktorantem problemu, wybór przeznaczonych do badań konfiguracji jest przekonująco uzasadniony w rozdz. 3.4.3 a wyniki zamieszczone w dodatku A wskazują perspektywiczne kierunki badań.**

Badania eksperymentalne i numeryczne wybranych konfiguracji uszczelnień przedstawiono w rozdz. 4, Doktorant zaprojektował unikatowe stanowisko badawcze do pomiaru natężenia przepływu i rozkładu ciśnień w uszczelnieniach, **ten element pracy oceniam bardzo wysoko.** Z punktu widzenia eksperymentu wartościowe jest podanie nie tylko zakresu pomiarowego poszczególnych mierników lecz także ich niepewności pomiarowej, jest to szczególnie istotne przy uzasadnieniu wyboru modeli turbulencji w badaniach numerycznych. Zwraca uwagę bardzo szeroko zakrojony program eksperymentu i badań numerycznych, w których Doktorant przeanalizował cztery wysokości szczeliny, dziesięć wartości stosunku ciśnień, dwóch zestawów warunków wlotowych, dwóch typów geometrii żeber oraz wpływ kurtyny powietrznej. Zwykła analiza wszystkich możliwych wariantów przekraczałyby możliwości badawcze nawet licznego zespołu, lecz Doktorant w sposób logiczny ograniczył liczbę analizowanych wariantów i przeprowadził taką ich selekcję, która pozwoliła na uzyskanie wiarygodnej weryfikacji założonej hipotezy badawczej. **W mojej ocenie obszerność podjętych badań (rozumiana jako liczba analizowanych aspektów zagadnienia) przekracza zakres zwyczajowo spotykany w rozprawach.** Dodatkowo, porównanie wyników eksperymentu i analizy numerycznej

pozwoili Doktorantowi ocenić przydatność modeli turbulencji i wybrać modele turbulencji pozwalające na prawidłowe odwzorowanie natężenia masowego przecieku i rozkładu ciśnień w uszczelnieniu. Zarówno badania eksperymentalne jak i numeryczne wykazały skuteczność kurtyny powietrznej w redukcji przecieku, przy czym uzyskane wartości liczbowe są wyższe niż niepewność pomiaru co weryfikuje poprawność sformułowanej przez Doktoranta hipotezy badawczej. Wartościowym wynikiem badawczym jest również analiza przydatności metod RANS do modelowania numerycznego przepływów w uszczelnieniach. **Podobnie jak w ocenie badań wstępnych z rozdz. 3 także i w przypadku badań zasadniczych omówionych w rozdz. 4 stwierdzam, że stanowią one wzorowe rozwiązanie postawionego przed Doktorantem problemu a wyniki omówionych tu badań są przekonującym potwierdzeniem sformułowanej w rozprawie hipotezy badawczej.**

W trakcie lektury rozdz. 4 rozprawy zauważyłem następujące niedociągnięcia:

- brak wyjaśnienia skrótu SLMP (rozdz. 4.2.2), mimo iż w wykazie skrótów wyjaśniono wiele dobrze rozpoznawalnych skrótów z dziedziny CFD,
- w przeciwieństwie do opisu przetworników natężenia przepływu nie podano typu przetworników ciśnienia (rozdz. 4.2.2),
- mylący podpis rys. 4.10, w tekście nie znalazłem wyjaśnienia oznaczeń przypadków pomiarowych oznaczonych REF (ten zarzut dotyczy także rys. 4.12),
- Doktorant poprzestaje na stwierdzeniu, że model $k - \omega$ SST lepiej opisuje natężenie przepływu w szczelinie a model Spalart – Almaras z większą dokładnością odzwierciedla rozkład ciśnienia, myślę że pożądana byłaby próba wyjaśnienia przyczyn tej bardzo ciekawej obserwacji.

Bardzo ciekawe są wyniki badań dotyczących fizykalnego wyjaśnienia oddziaływania kurtyny powietrznej i ich dyskusja, które zawarto w rozdz. 5. Podobnie jak w rozdziałach poprzednich zastosowano tutaj poprawną metodykę badań a Doktorant wykazał dobrą orientację zarówno w metodach numerycznych jak i w analizie struktury przepływu. Szczególnie warte podkreślenia jest tutaj zastosowanie symulacji LES, które pozwoliło odtworzyć złożone struktury wirowe tworzące się w szczelinie nad żebrami i wykazać, że blokowanie przecieku jest efektem zwiększonej dysypacji energii, znajdującej odzwierciedlenie w widmach energii kinetycznej fluktuacji prędkości. Doktorant nie poprzestał na analizie struktury przepływu przez pojedynczy segment uszczelnienia lecz pokazał także wpływ kolejnych żeber i wyjaśnił możliwe przyczyny zmiany struktury wirowej i kształtu widma energii turbulentnych fluktuacji prędkości. **Uzyskane wyniki wyjaśniają mechanizm redukcji przecieku i stanowią oryginalne osiągnięcia Doktoranta**

oraz mogą być podstawą dla dalszych analiz. Mimo bardzo starannie opracowanych rysunków część z nich (np. 5.8 i 5.9) nie jest wystarczająco jasno skomentowana w podpisach.

W rozdz. 6 przedstawiono wyniki badań numerycznych przepływu przez uszczelnienia nie w konfiguracji eksperymentalnej lecz w pełnym stopniu o rzeczywistej geometrii, którą dostarczył partner przemysłowy projektu INNOLOT COOPERNIK. Ze względu na czasochłonność obliczeń modelowanie przeprowadzono dla stanu ustalonego, zmodyfikowano również geometrię uszczelnienia zgodnie z sugestią partnera przemysłowego. Uzyskane wyniki potwierdziły skuteczność zaproponowanej przez Doktoranta metody redukcji przecieku, w podsumowaniu wskazano także możliwe kierunki dalszych badań, które mogłyby wskazać możliwe drogi optymalizacji nowego typu uszczelnień. Badania przedstawione w rozdz. 6 są wartościowym uzupełnieniem badań przedstawionych w poprzednich rozdziałach, które potwierdziły zasadność sformułowanej przez Doktoranta hipotezy. Rozszerzenie badań na przypadek stopnia i to w rzeczywistej konfiguracji jest kolejnym uzasadnieniem stwierdzenia, że zakres przeprowadzonych przez Doktoranta badań przekracza zwyczajowo spotykany w rozprawach doktorskich, badania te pozwoliły ponadto Doktorantowi na sformułowanie przyszłościowych analiz optymalizujących zaproponowane rozwiązanie uszczelnienia. **Zawartość rozdziału 6 oraz zamieszczona tam dyskusja dodatkowo potwierdza sformułowany wcześniej wniosek o bardzo szerokim zakresie merytorycznym rozprawy. Rozdz. 6 wykazuje również dobrą orientację Doktoranta w formułowaniu opisu procesów przepływowych nie tylko w uszczelnieniach lecz także w stopniu maszyny przepływowej.**

W rozdziale 7 Doktorant przedstawił wnioski i sugestie dotyczące dalszych kierunków badań, biorąc pod uwagę bardzo szeroki zakres rozprawy i mnogość wartościowych wyników z pewnością nie było to zadanie łatwe. Doktorant sformułował tu również wartościowe sugestie dotyczące kierunków dalszych badań, które wynikają z uzyskanych wyników.

Praca jest napisana w sposób jasny i komunikatywny, język angielski i redakcja pracy nie budzą żadnych zastrzeżeń, układ pracy jest jasny i logiczny. Materiał graficzny jest w zdecydowanej większości opracowany bardzo starannie, przykładem mogą być rysunki z rozdz. 1, które zostały zaczerpnięte z oryginalnych zgłoszeń patentowych i zmodyfikowane przez Doktoranta w taki sposób, aby uzyskać większą czytelność.

Edycja tekstu jest staranna, w trakcie lektury znalazłem pojedyncze błędy stylistyczne i literowe, przykładem może być nieprawidłowa pisownia nazwiska Spalart w polskim streszczeniu, czy też literówka w opisie osi rzędnych na rys. 1.16.

3. K o n k l u z j a

Reasumując, przedstawiona do recenzji rozprawa jest samodzielnym rozwiązaniem złożonego zadania naukowego. Doktorant wniósł oryginalny wkład w rozwój wiedzy o procesach przepływowych w uszczelnieniach labiryntowych maszyn przepływowych proponując nowe rozwiązanie uszczelnienia turbin gazowych z pasywnym nadmuchem. Uzyskane wyniki badań mają dużą wartość poznawczą i praktyczną a ich analiza pozwala stwierdzić, że zrealizowane zostały założone cele pracy. Przeprowadzone badania dowodzą wiedzy Doktoranta w zakresie eksperymentu i modelowania numerycznego i stanowią potwierdzenie umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Filipa Wasilczuka spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

Lektura pracy i analiza wyników upoważniają mnie do sformułowania wniosku o wyróżnienie rozprawy, uzasadnieniem są poniższe stwierdzenia:

- Doktorant zaproponował oryginalne rozwiązanie konstrukcyjne pasywnego uszczelnienia do turbin gazowych, które zostało wszechstronnie przebadane w ramach międzynarodowego projektu badawczego z udziałem czołowych wytwórców turbin gazowych, praca zawiera elementy nowatorskie nie tylko w skali krajowej lecz także i światowej,
- zakres badań jest znacznie szerszy niż w większości rozpraw doktorskich także dlatego, że oprócz wartości poznawczych praca uwzględnia także aspekty aplikacyjne,
- Doktorant wykonał szeroki zakres badań nie tylko numerycznych (co jest spotykane w większości rozpraw doktorskich) lecz także potwierdził poprawność hipotezy badawczej ciekawym eksperymentem przeprowadzonym w zaprojektowanym samodzielnie stanowisku badawczym,
- obszerność podjętych przez Doktoranta badań (rozumiana jako liczba analizowanych aspektów zagadnienia) przekracza zakres zwyczajowo spotykany w rozprawach,
- Doktorant nie poprzestał na badaniach modelowych, lecz rozszerzył je na przypadek stopnia maszyny przepływowej w rzeczywistej konfiguracji,
- uzyskane przez Doktoranta oryginalne wyniki nie tylko wyjaśniają mechanizm redukcji przecieku lecz także wskazują kierunki dalszych, obiecujących badań.

