

Prof. dr hab. inż. Jan Stąsiek
Politechnika Gdańska
Wydział Mechaniczny
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
Kom: +48 666 055 618
email: jstasiek@pg.edu.pl

Gdańsk, 2020.11.26

Recenzja

Pracy doktorskiej mgr. inż. Piotra Kaczyńskiego
**pt. Intensyfikacja wymiany ciepła i redukcja strat przepływu
w kanale chłodzącym łopatk turbinowej**

Opinię pracy doktorskiej wykonano na zlecenie Z-cy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych PAN im. R. Szewalskiego w Gdańsku dr hab. inż. Marcina Lackowskiego prof. IMP PAN

1. Uwagi ogólne

Zasadniczym celem przedłożonej dysertacji była analiza eksperymentalno- numeryczna wymiany ciepła i zjawisk aerodynamicznych podczas przepływu powietrza w kanale wyposażonym w turbulizatory przepływu w postaci żeber odpowiednio skonfigurowanych. W ramach badań eksperymentalnych wykonane zostały m. innymi: pomiary parametrów spiętrzenia na wlocie do kanału, pomiary ciśnienia statycznego wzdłuż badanego kanału, ciśnienie spiętrzenia, prędkości na wlocie oraz termograficzne pomiary wymiany ciepła metodą TLC. Równolegle do badań eksperymentalnych prowadzone były obliczenia numeryczne z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania Ansys Fluent. Oceniana praca doktorska jest częścią projektu badawczego Unii Europejskiej ERICKA, którego celem było poszerzenie bieżącej wiedzy na temat procesów cieplno-przepływowych zachodzących w układzie chłodzenia łopatk turbin w trakcie jej pracy. Unikatową cechą wyróżniającą ocenianą pracę są żebra z cechami geometrycznymi dokładnie odpowiadającymi tym, jakie stosowane są w układach chłodzenia rzeczywistych silników lotniczych. Praca liczy 206 stron tekstu wliczając załączniki, a spis literatury zawiera 82 pozycje.

2. Ocena pracy

Pracę otwiera „Wprowadzenie” naświetlające istotę pracy silników lotniczych oraz systemów chłodzenia łopatek kierowniczych i wirnikowych. Przedstawiono tutaj historię powstania projektu badawczego pod akronimem ERICA realizowanego w ramach Siódmego Ramowego Programu Komisji Europejskiej a koordynowanego przez firmę Rolls-Royce z Wielkiej Brytanii. Rozdział ten omawia bardzo szczegółowo m. innymi: stan wiedzy na temat rozwoju silników lotniczych, systemów chłodzenia łopatek, roli żeber i ich geometrii w układzie chłodzenia oraz orientacji kanałów i upustów w kanale do wytwarzania filmu chodzącego. Rozdział kończy prezentacja celu i zakresu pracy, który sprowadza się do analizy wpływu parametrów przepływowych (liczbę Reynoldsa), geometrii kanału (współczynnik przekroju AR) oraz ustawienia żeber na straty w przepływie oraz wymianę ciepła wyrażoną współczynnikiem wnikania ciepła.

Stanowisko oraz metody pomiarowe przedstawione zostały w rozdziale drugim dysertacji. Stanowisko pomiarowe zostało zaprojektowane jako kopia części rzeczywistego silnika Rolls-Royce a właściwie jego kanału łopatkowego o zaokrąglonych narożach z żebrami, rozstawem i wysokością tych żeber dokładnie takich samych jak w pracujących konstrukcjach. Pomiary wykonano dla liczby Reynoldsa 63 000 i 120 000. Współczynniki wnikania ciepła wyznaczone były metodą stanów nieustalonych (z ang. transient method) wykorzystując do pomiaru temperatury cholesteryczne ciekłe kryształy (TLC). Pomiary i spadki ciśnienia wykonywane były sondami pneumatycznymi, rurką Pitota oraz jednowłóknową sondą anemometryczną CTA firmy DANTEC Streamline.

Podstawowe równania modelu numerycznego, siatkę obliczeniową oraz strukturę przepływu przedstawiono w rozdziale trzecim. Jak już wspomniano wcześniej obliczenia numeryczne zostały wykonane z wykorzystaniem oprogramowania Ansys Fluent jako uzupełnienie badań termograficznych dla wyższych współczynników przekroju AR. Proces walidacji modelu numerycznego przez badania eksperymentalne przeprowadzono dla kanałów o współczynniku przekroju $AR=1:4$ i $AR=1:6$. Dla współczynnika przekroju $AR=1:2$ struktury przepływu zostały wyznaczone tylko numerycznie.

W rozdziale czwartym przedstawione zostały eksperymentalne i numeryczne badania związane z aerodynamiką i strukturą przepływu. Wyniki obliczeń numerycznych oraz ich kolorowa wizualizacja jest unikatowa, oryginalna i godna uznania dla profesjonalizmu Doktoranta. Mapy poziomu prędkości i turbulencji wykonane zostały w wyniku pomiarów eksperymentalnych i obliczeń numerycznych dla wszystkich współczynników przekroju AR i dwóch liczb Reynoldsa. Kolejnym i ważnym parametrem mającym wpływ na strukturę przepływów są naprężenia styczne na ścianach kanału. Do ich wyznaczenia wykorzystano obliczenia numeryczne również za pomocą programu Ansys Fluent.

Wyniki badań termograficznych wymiany ciepła zostały opisane w rozdziale piątym przy użyciu niestacjonarnej metody TLC, gdzie zmiana temperatury była wyznaczana za pomocą

folii ciekłokrystalicznej umieszczonej na wewnętrznej powierzchni ściany kanału pomiarowego. Niestacjonarne badania termograficzne wykonano w kanałach $AR=1:4$ oraz $AR=1:6$ przy liczbach Reynolds 63 000 oraz 120 000 dla ustawienia równoległego i krzyżowego żeber. Przeprowadzono również stacjonarne obliczenia numeryczne wymiany ciepła (współczynniki wnikania ciepła) dla kanałów $AR=1:2$, $AR=1:4$ oraz $AR=1:6$ dla liczby Reynoldsa $Re=63\ 000$ i ustawienia równoległego i krzyżowego żeber. Rozdział piąty kończą obliczenia współczynnika efektywności cieplnej oraz zestawienie tablicowe i graficzne współczynnika efektywności cieplnej, znormalizowanej liczby Nusselta oraz znormalizowanego współczynnika tarcia.

Końcowy, szósty rozdział pracy zawiera wnioski oraz propozycje dalszych badań. Potwierdzone zostały cele pracy które dotyczyły badań optymalizacji geometrii fragmentu systemu chłodzenia kanału łopatkowego turbiny gazowej. Praca stanowi nowe wyniki dotyczące metod usprawniania konstrukcji maszyn energetycznych, w których zachodzą wysokotemperaturowe procesy konwersji energii. Planowane są dalsze prace modelowe dotyczące przepływów niestacjonarnych w kanałach o rozwiniętych powierzchniach wymiany ciepła.

3. Uwagi końcowa i ocena pracy

Praca od względem formalnym jest napisana jasno i starannie. Mało jest błędów edycyjnych a nieliczne zostały przekazane bezpośrednio Doktorantowi. Podczas czytania pracy zauważony został brak analizy błędów, dokładności wielkości mierzonych i obliczonych numerycznie (z ang: data reduction and uncertainty analysis). Zdaniem recenzenta należy to przeoczenie wyjaśnić podczas publicznej obrony. Doktorant rozwiązał zadanie naukowe postawione w rozprawie. Wykazał się dużą wiedzą w zakresie modelowania fizycznego i numerycznego złożonych problemów z wymiany ciepła i mechaniki płynów. Wykazał się także dużymi umiejętnościami stosowania skomplikowanych kodów numerycznych i trudnych zadań praktycznych.

Moim zdaniem zostały osiągnięte zarówno cele poznawcze jak i użyteczne. Wnioski sformułowane w rozprawie odpowiadają jej zawartości i prowadzonych w niej dyskusji. Na podstawie powyższych stwierdzeń uważam, że recenzowana praca doktorska mgr. inż. Piotra Kaczyńskiego pt: Intensyfikacja wymiany ciepła i redukcja strat przepływu w kanale chłodzącym łopatki turbinowej, w pełni odpowiada warunkom art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2013 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789) w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.). Na tej podstawie wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej dyskusji.

