

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**Mgr inż. Bartosza Zacharko**  
**"Wpływ termicznego oporu kontaktowego na wymianę ciepła**  
**wybranych części turbiny niskiego ciśnienia silników lotniczych"**  
**Promotor rozprawy: dr hab. inż. Robert Smusz, prof. nzw.**  
**Promotor pomocniczy: mgr inż. Wojciech Bar**

Podstawą formalną opracowania recenzji jest powołanie mnie na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych mgr inż. Bartoszowi Zacharko w dniu 10 marca 2021 r.

#### A OCENA TEMATYKI PODJĘTYCH BADAŃ

Konieczność zdefiniowania termicznego oporu kontaktowego (TOK) pojawia się podczas analizy wielu urządzeń. W chłodnicach samochodowych należy go określić pomiędzy rurkami a nałożonymi na nie lamelami. Opór kontaktowy pojawia się pomiędzy elementami aparatury przemysłowej, które połączone są śrubami. W turbinowym silniku lotniczym występuje on w takich obszarach jak platforma zewnętrzna łopatek kierowniczych turbiny niskiego ciśnienia będąca w kontakcie z zewnętrzną obudową turbiny, połączenie śrubowe obudowy turbiny z jej kołnierzem wylotowym oraz styk łopatki wirującej z dyskiem.

Wiele prac poświęcono analizie TOK. Opracowano modele jedno i wielokontaktowe. Przeprowadzono wiele badań eksperymentalnych, na podstawie których sformułowano liczne korelacje. Dużo uwagi poświęcono na numeryczne modelowanie wymiany ciepła w obszarze kontaktu dwóch ciał. W tym celu stosowane są klasyczne makroskopowe metody CFD oparte na równaniach bilansu masy, pędu i energii oraz Metoda Sieciowa Boltzmanna (LBM) w skali mikro. LBM jest techniką numeryczną umożliwiającą rozwiązanie równania Naviera-Stokesa dla przepływów nieściśliwych lub quasi ściśliwych, gdy wartość liczby Macha jest mniejsza od 1. Istotą metody Boltzmanna jest prosty algorytm, w którym ewolucję funkcji rozkładu wykonuje się w dwóch krokach: przesunięcia i kolizji. Człon kolizji w podstawowej wersji przybliża się, zakładając liniową relaksację funkcji rozkładu prawdopodobieństwa do wartości równowagowych.

Recenzowana praca, w której badano wpływ termicznego oporu kontaktowego na wymianę ciepła wybranych części turbiny niskiego ciśnienia silników lotniczych oraz zaproponowano zastosowanie Metody Sieciowej Boltzmanna do wyznaczania TOK wpisuje się zatem w nurt w/w tematyki. Podjęcie tych badań należy zatem uznać za uzasadnione.

## B. CHARAKTERYSTYKA PRACY

Recenzowana praca doktorska jest napisana w języku angielskim, liczy 170 stron i została podzielona na 6 rozdziałów. Rozpoczyna się ona od streszczeń w języku polskim i angielskim oraz spisu oznaczeń. Praca kończy się spisem literatury oraz dwoma załącznikami.

W rozdziale pierwszym zamieszczono krótkie wprowadzenie z uszeregowaniem metod numerycznych stosowanych w analizach TOK.

Rozdział drugi poświęcono na opis litych i chropowatych powierzchni. W literaturze wyróżnia się trzy sposoby ich opisu: deterministyczny, stochastyczny i fraktalny. Każdy z nich został szczegółowo opisany, przedstawiając równania i założenia rządzące każdym z nich. Ze względu na odmienny charakter opisu powierzchni istotnym jest dobranie odpowiedniego jego typu dla konkretnej specyfiki badanego zagadnienia wymiany ciepła.

W rozdziale trzecim Autor opisał rodzaje wymiany ciepła występujące przy kontakcie dwóch chropowatych ciał stałych. Omówiono szereg czynników wpływających na TOK. Na podstawie zmian temperatury i odniesieniu ich wartości do liczby kryterialnej Knudsen, określającej odległość międzycząsteczkową, dokonano charakterystyki reżimów panujących w płynie. Przedstawiono korelacje wyprowadzane na przestrzeni lat wyznaczających wartość kontaktowej przewodności cieplnej (ang. thermal contact conductance) na granicach metal-powietrze-metal. Opisano podstawy modeli jedno- i wielokontaktowych. Dodatkowe rozdziały poświęcono rozważaniom na temat drgań i ich wpływu na dystrybucję ciepła, połączeniom śrubowym i efektowi histerezy przyczyniającemu się do nieliniowych zmian oporu cieplnego.

W rozdziale czwartym przedstawiono podstawy Metody Sietciowej Boltzmanna i jej zastosowanie do modelowania zjawisk przepływowych. Opisano schematy propagacji cząsteczek w zależności od wymiaru problemu, granice stosowalności, warunki brzegowe, sposoby postępowania z zakrzywionymi krawędziami rozpatrywanych obiektów oraz podejście do rozwiązywania zagadnień sprzężonej wymiany ciepła.

Na uwagę zasługuje rozdział piąty, w którym pokazano stochastyczną analizę chropowatych powierzchni. Uwzględniono i zaimplementowano podstawowe parametry opisujące powierzchnię takie jak: średnia arytmetyczna wysokość profilu chropowatości, średnie nachylenie bezwzględne, a także czynniki geometryczne, takie jak grubość obiektu i odległość separacji między dwoma powierzchniami. Rozpatrzono przypadek czystego przewodzenia dla pięciu różnych, stochastycznie wygenerowanych geometrii par kontaktowych z powietrzem jako medium pomiędzy obiektami. Celem była analiza rozkładu wartości TOK na granicy medium w wyniku równoczesnej zmiany profilu chropowatości powierzchni i wartości temperatury zdefiniowanej na średniej płaszczyźnie arytmetycznej. Uwzględniono wpływ temperatury na zmienność właściwości materiałowych, takich jak przewodnictwo, ciepło właściwe i gęstość. Autor pokazał, że Metoda Sietciowa Boltzmanna jest w stanie rozwiązać zaawansowane problemy przemysłowe nawet w przypadku skomplikowanych geometrii. Przedstawiona metodologia wykazała, że metoda ta

może być z powodzeniem stosowana w przypadku mikroprzepływów termicznych. Przeprowadzone analizy numeryczne wykazały zgodność z danymi literaturowymi.

Podsumowanie wyników badań, a także wnioski końcowe zawiera rozdział szósty. Główny cel doktoratu, którym było opracowanie korelacji umożliwiającej wyznaczenie termicznego oporu kontaktowego na podstawie średniej arytmetycznej chropowatości i odległości separacji pomiędzy powierzchniami dla wybranych danych, został zrealizowany. Dodatkowo opracowano skrypt w Pythonie, który umożliwia swobodne tworzenie chropowatych powierzchni w sposób stochastyczny i zamieszczono go w załączniku.

## C. UWAGI DYSKUSYJNE

### Pytania do pracy

a) W obliczeniach oporu kontaktowego przyjęto założenia upraszczające polegające na założeniu procesu ustalonego oraz braku przepływu ciepła w kierunku stycznym do powierzchni kontaktu (4 linia na stronie 115). Czy charakter pracy silnika oraz jego złożona geometria pozwala na takie założenia?

b) Analizy burzliwego przepływu czynnika wykonano przy wykorzystaniu jedno równaniowego modelu Spallart-Almaras aby uprościć model i ze względu na jego dostępność w obu wykorzystywanych programach: AcuSolve i XFlow. Ten model wymaga odpowiedniego zagęszczenia siatki w warstwie granicznej ( $y^+$  około 1). Niestety jest mało skuteczny w przypadku przepływów 3D lub przepływów z oderwaniem warstwy przyściennej. Czy analizowano inne modele turbulencji?

c) W modelowaniu uwzględniono też promieniowanie cieplne (strona 119). Jakie wartości przyjęto dla współczynników emisyjności obu powierzchni kontaktu?

d) W jaki sposób określono siły nacisku działające na pary kontaktowe? Czy nie warto byłoby opracować modelu cieplno-wytrzymałościowego, który opisałby zachowanie powierzchni par kontaktu?

e) Czy nie warto byłoby uwzględnić w analizie oporu kontaktowego drgań występujących w turbinie niskiego ciśnienia silnika lotniczego?

f) Opisana w pracy Metoda Sieciowa Boltzmana może służyć w analizie mikro lub nawet nano-przepływów termicznych. Czy próbowano ją zastosować dla takich przypadków?

### Uwagi redakcyjne

- str. 17-18 wielkości wymiarowe powinny być podane wraz z jednostkami
- str. 25 Fig. 2.3 wielkość bezwymiarowa  $\bar{z}$  pokazana na rysunku powinna być wymiarowa
- str. 29 równanie (2.18) wielkość wymiarowa  $d$  powinna być bezwymiarowa
- str. 35 błędne powołania na równania (2.17), (2.42), (2.14)

- str. 59 Fig. 3.6 nie zdefiniowano bezwymiarowego współczynnika wnikania ciepła i bezwymiarowego ciśnienia
- str. 61 Fig. 3.7 błędne powołania na literaturę, jednostki powinny być w układzie SI
- str. 63 Fig. 3.8 błędne powołania na literaturę, nieczytelne równania, niepotrzebna kropka w podpisie
- str. 67 błędne powołania na rysunki 3.8 i 3.9
- str. 68-69 Fig. 3.11 i Fig. 3.12 brak odpowiednich jednostek w podpisie
- str. 87 błędne powołanie na rysunek 7
- str. 107-110 brak powołań w tekście na rysunki 5.1 do 5.5
- str. 126 "Montecarlo model" powinno być napisane " Monte Carlo model"
- str. 68-69 i str. 126 kolizja oznaczeń dla zmiennej k
- str. 140-141 Fig. 5.23, Fig. 5.24, Fig. 5.25 brak jednostek

#### D. OCENA KOŃCOWA

W recenzowanej rozprawie Doktorant podejmuje bardzo istotną problematykę określenia termicznego oporu kontaktowego w wybranych częściach turbiny niskiego ciśnienia silników lotniczych przy zastosowaniu dostępnych metod siatkowych CFD oraz Metody Sietkowej Boltzmanna. Praca ma zatem duże walory zarówno teoretyczne jak i użyteczne. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że w wyniku zaproponowanej stochastycznej analizy chropowatych powierzchni utworzono skrypt, który interpoluje ostre krawędzie i automatycznie rozpoznaje nakładające się obszary. Dodatkowo, używając metody triangulacji Delanuay, skrypt pozwala na utworzenie siatki, która może być eksportowana do innych komercyjnych programów.

Mgr inż. Bartosz Zacharko w ocenianej rozprawie wykazał się szeroką wiedzą w zakresie modelowania numerycznego procesów wymiany ciepła przy wykorzystaniu dostępnych programów komercyjnych CFD jak również dostępnych algorytmów Metody Sietkowej Boltzmanna. Doktorant opracował korelację umożliwiającą wyznaczenie termicznego oporu kontaktowego na podstawie średniej arytmetycznej chropowatości i odległości separacji pomiędzy powierzchniami dla wybranych danych dzięki czemu osiągnął założony cel pracy.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie o stopniach i tytule naukowym i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

