

## **Ocena rozprawy doktorskiej Dariusza Olczaka**

pt. "Optimization of Cooling Systems for Gas Turbines Based on Analysis of Internally Cooled Turbine Airfoils"

*Promotor: dr hab. inż. Maciej Jaworski, prof. PW*

Opinię wykonano na zlecenie prof. dr. hab. inż. Roberta Sitnika, przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej (pismo nr RND.IM.521.15.2024 z dn. 14.10.2024 r.).

### **1. Zawartość pracy**

Przedłożona do opinii praca liczy 148 stron i została podzielona na 5 rozdziałów, a poza tym ponumerowano takie części pracy jak wnioski i plan dalszych badań, spis literatury, wykazy rysunków i tabel oraz dwa załączniki. Pracę otwierają streszczenia w języku angielskim i polskim oraz słowa kluczowe, po czym jest spis treści i wykaz oznaczeń użytych w pracy. Praca została napisana w języku angielskim, a jej układ nie budzi zastrzeżeń.

We **wstępie** (rozd. 1) Doktorant uzasadnił powody, dla których podjął tematykę rozprawy. Podkreślił trudności związane z projektowaniem wysokowydajnych układów chłodzenia łopatek turbin gazowych. Przedstawiony przegląd literatury jest miarodajny. Nie ulega najmniejszej wątpliwości, że tematyka rozprawy jest w pełni aktualna naukowo, a także istotna ze względów praktycznych.

**Rozdz. 2** zawiera analizę trzech sposobów chłodzenia łopatek turbin gazowych, a w tym konwekcji wymuszonej w kanałkach wydrążonych w łopacie, uderzających strug powietrza generowanych przez perforowaną wkładkę oraz filmu powietrza wytwarzanego przez układ otworów. We wszystkich przypadkach funkcją celu był minimalny strumień powietrza pozwalający na utrzymanie temperatury zagrożonych obszarów poniżej temperatury krytycznej.

Każdy rozpatrywany układ chłodzenia przedstawiano w postaci jednowymiarowej sieci, dla której rozwiązywano jednowymiarowe zagadnienia przepływowe i przewodzenia ciepła, do rozwiązania których używano oprogramowania GE Flow Simulator. Warunki brzegowe niezbędne do rozwiązania zagadnienia przyjęto z literatury, podobnie jak geometrię łopatki, kanałików, otworów generujących strugi i film powietrzny. Do obliczania współczynnika przejmowania ciepła w kanałikach zastosowano korelację Dittusa-Boeltera, a w przypadku uderzających strug powietrza wykorzystano korelację Florschuetza i in. Dla układu chłodzenia filmem powietrznym zastosowano korelację Colbana i in. W przypadku chłodzenia kanałikowego do rozwiązania problemu optymalizacyjnego zastosowano algorytm ewolucyjny, natomiast dla dwóch pozostałych przypadków chłodzenia wykorzystano kombinację algorytmów Nelder-Meada i ewolucyjnego. Obliczenia wykonano z zastosowaniem oprogramowania GE Automated and Optimization Workbench.

W wyniku przeprowadzonej optymalizacji kanałikowego układu chłodzenia wykazano, że możliwe jest zmniejszenie o 24% strumienia masy powietrza w porównaniu do układu przed optymalizacją. Doktorant zaznacza jednak, że przedstawione wyniki należy traktować z ostrożnością, a zwiększenie zaufania do przedstawionego modelu wymaga rozwiązania zagadnienia trójwymiarowego.

W wyniku optymalizacji strugowego układu chłodzenia wykazano, że możliwe jest zmniejszenie o 35% strumienia masy powietrza w porównaniu do układu przed optymalizacją, opartego na równomiernym rozkładzie otworów generujących strugi. Doktorant podkreśla też, że zaprezentowany model pozwala na zwiększenie liczby parametrów układu strugowego, a przez to tworzenie nowych konfiguracji układów chłodzących.

W przypadku optymalizacji układu chłodzenia z filmem powietrza wykazano, że możliwe jest zmniejszenie o 23% strumienia masy powietrza w porównaniu do układu przed optymalizacją, zakładającego równomierny rozkład otworów generujących film. Jednocześnie rozkład temperatury jest bardziej równomierny niż dla układu przed optymalizacją.

Podane wiadomości oraz przeprowadzona analiza bardzo dobrze świadczą o przygotowaniu merytorycznym Doktoranta z zakresu zjawisk fizycznych towarzyszących przepływowi i przejmowaniu ciepła w złożonych układach geometrycznych. Doktorant wykazał dużą biegłość w posługiwaniu się nowoczesnymi narzędziami obliczeniowymi. Jednocześnie

potrafił krytycznie ocenić uzyskane wyniki co świadczy o jego dojrzałości jako badacza rzeczywistości.

**Rozdz. 3** jest poświęcony analizie wpływu zmienności parametrów wejściowych na końcowy rozkład temperatury w łopatkach turbiny. Na podstawie przeglądu literatury Doktorant ustalił, że najczęściej wpływ niepewności parametrów geometrycznych układów chłodzenia łopatek turbin gazowych jest przedstawiany w formie zmiany współczynnika przejmowania ciepła bądź efektywności chłodzenia z zastosowaniem filmu (Tab. 8). W efekcie Doktorant wybrał 5 parametrów do analizy ich wpływu na rozkład temperatury w łopatkach, którymi były średnica otworu generującego film, efektywność chłodzenia z zastosowaniem filmu, współczynnik przejmowania ciepła oraz grubość powłoki stanowiącej barierę termiczną (Tab. 9). Jako przypadek bazowy Doktorant wykorzystał opublikowane dane dla łopatki E3 S1B, przy czym najpierw porównał wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła za pomocą korelacji Colburna z danymi literaturowymi. Rozkłady różniły się diametralnie, stąd do dalszych obliczeń przyjęto dane literaturowe. Stosując metodykę modelowania układów chłodzenia w postaci jednowymiarowej sieci z użyciem oprogramowania GE Flow Simulator Doktorant opracował model przepływowy układu chłodzenia odpowiadający łopatkach E3 S1B. Zarówno w przypadku obliczonych strumieni masy, jak i efektywności chłodzenia z zastosowaniem filmu należało zastosować współczynniki korekcyjne w celu dopasowania otrzymanych wyników do danych literaturowych. Mimo zastosowania dwuwymiarowego modelu pola temperatury wyniki obliczeń odbiegały od danych literaturowych, stąd i w tym przypadku zastosowano współczynniki korekcyjne. Należy jednak dodać, że Doktorant przeprowadził solidną analizę przyczyn rozbieżności między wynikami otrzymanymi z własnych metod obliczeniowych, a danymi literaturowymi.

Mając tak przygotowane narzędzie obliczeniowe Doktorant przeprowadził obliczenia rozkładu temperatury w łopatkach zakładając zmianę 5 wymienionych wyżej parametrów w zakresie od 10% do 20%. Najważniejszy rezultat tych obliczeń to wykazanie, że najbardziej wrażliwe na zmiany parametrów geometrycznych, wynikające z błędów wykonania, to obszary krawędzi napływu i krawędzi spływu.

Ostatni podrozdział (3.3) jest poświęcony określeniu wpływu jednocześnie kilku parametrów na rozkład temperatury łopatki. W tym celu Doktorant opracował jednowymiarowy model cieplno-przepływowy układu chłodzenia łopatki E3 S1B z zastosowaniem tzw. zewnętrznych warunków brzegowych (zewnętrzny współczynnik przejmowania ciepła). Dla tak przygotowanego modelu przeprowadził szereg obliczeń (500

prób) zakładając rozkład normalny parametrów wejściowych (Tab. 14). Najistotniejsze rezultaty tych obliczeń to wskazanie obszarów najbardziej podatnych na zmianę parametrów wejściowych takich, dla których prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia jest największe.

Jako podstawowy mankament zaproponowanego podejścia Doktorant wskazuje nieuwzględnienie przewodzenia ciepła w trzech wymiarach. Argumentacja podana przez Doktoranta w rozdz. 3 świadczy o dogłębnym zrozumieniu zjawisk cieplno-przepływowych zachodzących w układach chłodzenia łopatek turbin gazowych.

**Rozdz. 4** dotyczy optymalizacji układu chłodzenia łopatki E3 S1B). Doktorant poszukiwał kompromisu pomiędzy strumieniem masy powietrza chłodzącego, a temperaturą łopatki poddając optymalizacji trzy parametry, tj. liczbę otworów w każdym rzędzie, powierzchnię szczeliny krawędzi spływu oraz średnicę otworów chłodzących wierzchołek łopatki. Przy założeniu niezależności zasilania układu chłodzącego krawędzi napływu i krawędzi spływu Doktorant ustalił, że możliwe jest zmniejszenie o 23% strumienia masy powietrza chłodzącego odpowiednio o 23% i 12% w porównaniu do układu przed optymalizacją. Jednak, jak podkreślił w dyskusji wyników, możliwości poprawy układu chłodzenia łopatki E3 S1B przy zastosowaniu przedstawionej metody są ograniczone ze względu na nieadekwatne odwzorowanie obszaru zarówno wierzchołka łopatki, jak i krawędzi spływu, które to miejsca są szczególnie narażone na przekroczenie temperatury krytycznej. Doktorant słusznie zauważa, że poza utlenianiem inną przyczyną prowadzącą do uszkodzenia łopatek może być zjawisko pełzania materiału.

W **rozdz. 5** Doktorant zaproponował metodykę określania efektywności chłodzenia z zastosowaniem filmu opartą na uczeniu maszynowym. Opracowany model odwzorowuje dostępne dane eksperymentalne ze średnim błędem kwadratowym o rząd wielkości mniejszym niż powszechnie stosowana korelacja Colbana. Z analizy rys. 116 wynika, że zaproponowany model testowano jedynie dla małych współczynników nadmuchu, a i to uzyskane wyniki nie wykazywały spodziewanej regularności wzrostu efektywności chłodzenia z zastosowaniem filmu ze wzrostem współczynnika nadmuchu (rys. 117). Sam Doktorant podkreśla, że z powodu niewielkiej liczby punktów eksperymentalnych użytych do testowania modelu przedstawione wyniki należy traktować jako wstępne.

W podsumowaniu (**rozdz. 6**) Doktorant podał wnioski końcowe, podkreślił najważniejsze, z jego punktu widzenia, wyniki badań oraz przedstawił plan dalszych badań.

## 2. Teza pracy

Doktorant nie podał tezy swojej rozprawy w sposób jawny, co ze względu na charakter pracy należy uznać za właściwe.

## 3. Oryginalność pracy

Istotne osiągnięcia Doktoranta to propozycje:

- jednowymiarowego modelu ciepłno-przepływowego, który może być wykorzystany do optymalizacji układu chłodzenia łopatek turbiny gazowej,
- metodyki określania efektywności chłodzenia z zastosowaniem filmu opartej na sieci neuronowej.

## 4. Wartości użytkowe pracy

Zaproponowany model ciepłno-przepływowy daje możliwości:

- niskokosztowego testowania złożonych układów chłodzenia łopatek turbin gazowych na początkowym etapie projektowania,
- przewidywania wpływu tolerancji wykonania poszczególnych elementów układu chłodzenia, a także warunków brzegowych na skuteczność działania układu chłodzenia.

## 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. str. 50 i dalej – w obliczeniach cieplnych pominięto składową radiacyjną co może być przyczyną znacznych niedokładności;
2. str. 50<sub>3</sub> – zamiast „convection” powinno być „conduction”;
3. str. 53 – wydaje się, że nawet do obliczeń wstępnych powinna być użyta bardziej złożona korelacja niż Dittusa-Boeltera (patrz Tab. 13);
4. str. 53 i dalej – w pracy wielokrotnie używane są mnożniki poprawkowe. Czym się kierowano przy ich doborze?;
5. str. 72, rys. 50 – powinno być odwołanie do schematu (Fig. 46) gdzie występują temperatury T1, T2 i T3;
6. str. 90<sub>4</sub> – jak należy rozumieć sformułowanie „...2D solver, which solves *the conduction equations*”;
7. str. 108 – brakuje schematu sieci ciepłno-przepływowej.

## 6. Terminologia

Praca jest napisana w języku angielskim i Doktorant nie ustrzegł się niewłaściwych terminów.

Przykładowo:

- str. 8<sup>12</sup> – jest „thermal conductivity coefficient”; na str. 46 jest “heat conductivity”; na str. 79 i str. 81 jest poprawnie *thermal conductivity*;
- str. 51 – zamiast „The overall value of heat flow” powinno być *Heat flow rate*;
- str. 55 i dalej – zamiast „mass flow” powinno być *mass flow rate*.

## 7. Uwagi redakcyjne

Podstawowa uwaga dotyczy powtórzeń tekstu. Fig. 10 jest powtórzony dwukrotnie, jako Fig. 47 i Fig. 110. To samo dotyczy Fig. 57 i Fig. 91. Tab. 10 jest powtórzona jako Tab. 15. Nie jest zachowana właściwa numeracja podrozdziałów w rozdz. 2

Doktorant nie ustrzegł się niewłaściwych czy niezręcznych sformułowań. Przykładowo:

- str. 49 – sformułowanie “total temperature” jest niezręczne;
- str. 53 – sformułowanie “a turbulent channel” jest niepoprawne.

Wielokrotnie odwołania literaturowe są niewłaściwe; np. [95] na str. 32, [1] na str. 34, [21] na str. 40, [3] na str. 80, [11] na str. 83. W tekście nie przywołano pozycji [132] i [133].

W rozdz. 2, na str. 49 numeracja wzorów Eq. 15 do Eq. 19 jest niepoprawna.

Praca jest napisana na dobrym poziomie edytorskim. Drobniejsze uchybienia redakcyjne i stylistyczne zaznaczyłem w dostarczonym egzemplarzu pracy.

Przedstawione powyżej uwagi mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i redakcyjny i w niczym nie umniejszają wartości merytorycznej pracy, którą oceniam bardzo wysoko.

## 8. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona praca zawiera oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autora naukowych metod analityczno-numerycznych stosowanych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a tym samym wyczerpuje warunki określone przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i uzasadnia dopuszczenie jej do publicznej obrony.

