

Prof. dr hab. inż. Andrzej J. Panas  
Wojskowa Akademia Techniczna  
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa  
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa

Warszawa, 16 grudnia 2024 r.

[Andrzej.Panas@wat.edu.pl](mailto:Andrzej.Panas@wat.edu.pl)  
tel. 261 839 543

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Olczaka p.t.

**Optimization of Cooling Systems for Gas Turbines Based on Analysis of Internally Cooled Turbine Airfoils** (Optymalizacja systemów chłodzenia turbin gazowych w oparciu o analizę wewnątrznie chłodzonych profili lotniczych turbin; tł. własne)

### I. Przedmiot i charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy badania wymiany ciepła w chłodzonej łopatkę turbiny gazowej i ma charakter metodologiczny. Zamiarem Autora – celem pracy - było sprawdzenie możliwości przeprowadzenia analizy procesów wymiany ciepła przy wykorzystaniu podejścia hybrydowego oraz wykorzystania uzyskanych wyników do określenia możliwości poprawy wydajności systemu chłodzenia łopatki. Zaproponowany hybrydowy model analizy cieplno-przepływowej zasadza się na sprowadzeniu modelowanego obiektu do układu o parametrach skupionych ze sprzężeniem zjawisk cieplnych i przepływowych w węzłach modelu numerycznego. Do określenia intensywności przyływu energii oraz masy wykorzystywane są zależności doświadczalne – tak zwane wzory kryterialne. Opracowanie i uruchomienie modelu stanowi jednak dopiero pierwszy etap analizy. W następnym etapie opracowany model jest poddawany optymalizacji parametrycznej algorytmem ewolucyjnym z minimalizacją funkcji celu jaką jest masowe natężenie przepływu wewnętrznego przy zachowaniu ograniczenia górnej temperatury pracy materiału łopatki.

Zarówno do opracowania modelu numerycznego jak i do optymalizacji Autor zastosował oprogramowanie obce. Same modele mają już jednak charakter w pełni autorski, a zastosowane procedury sprawiają wrażenie samodzielnie opracowanych. Zjawiska wymiany ciepła i masy dla modelowej łopatki zostały przeanalizowane dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych łopatki. We wszystkich przypadkach przyjęto podobne warunki graniczne wzorując się na danych projektu Energy Efficient Engine NASA E3 S1B (por. pozycje 84 i 105 wykazu literatury recenzowanej rozprawy). Ze względu na metodologiczny charakter pracy rozbieżność w stosunku do konstrukcji rzeczywistych nie ma większego znaczenia.

W ramach rozprawy została przetestowana dodatkowo również możliwość wykorzystania innego typu algorytmów sztucznej inteligencji, a mianowicie sieci neuronowych, do określenia zależności kryterialnych chłodzenia błonowego. Z punktu widzenia tematu głównego jest to wątek poboczny, ale ogólnie rzecz biorąc całość można potraktować jako sprawdzenie efektywności popularnych w rozwiązaniach sztucznej inteligencji metod do poprawy sprawności chłodzenia łopatki lotniczego silnika turbinowego.

Przeprowadzone analizy charakteryzują się zróżnicowaniem środków metodologicznych: do wspomnianej powyżej analizy zastosowano kod własny, w odróżnieniu od poprzednio

wspominanego oprogramowania komercyjnego. Wszystkie zastosowane narzędzia są nowoczesne, aktualny jest również problem badawczy.

W zgodzie z obowiązującymi obecnie przepisami i popularnym trendem rozprawę zredagowano w języku angielskim.

Indywidualny i oryginalny wkład Doktoranta zaznacza się przede wszystkim w opracowaniu modeli numerycznych, a wybranym przypadku opracowaniu kodu, wykonaniu obliczeń, opracowaniu wyników i przeprowadzeniu analizy porównawczej. Głównym osiągnięciem Autora jest wykazanie skuteczności zaproponowanego podejścia do analizy wstępnej zjawisk wymiany ciepła i masy dla rozważanego przypadku.

Zarówno ze względu na konkretny cel i przedmiot działań, jak i charakter rozważań metodologicznych, rozprawę można zakwalifikować do dziedziny nauk inżyniersko-technicznych ze wskazaniem jako właściwej dyscypliny inżynierii mechanicznej.

## **II. Ocena rozprawy i uwagi o charakterze merytorycznym**

Podjęty przez Doktoranta problem badawczy wpisuje się w główny nurt szeroko obecnie prowadzonych badań dotyczących zmniejszenia zużycia energii. Zarówno ekologicznego jak i ekonomicznego kontekstu zagadnienia nie trzeba dokładnie omawiać. Pod względem projektowym dotyczy skomplikowanego problemu optymalizacji konstrukcji. Złożoność problemu jest uwarunkowana tym, że ograniczeniom technicznym, głównie materiałowym, a także technologicznym wytwarzania łopatek, towarzyszą trudności teoretycznego i doświadczalnego pozyskania danych dotyczących procesów wymiany ciepła i masy (przepływu), które zachodzą w analizowanym elemencie konstrukcyjnym – łopatce turbiny wysokiego ciśnienia silnika turbinowego. Charakterystyki zagadnienia dopełnia stosunkowo mały margines możliwości podwyższenia sprawności termodynamicznej czy to procesu cząstkowego, czy całej konstrukcji. W aspekcie konkurencyjności rodzi to dodatkowe wyzwania. Z drugiej jednak strony trudno liczyć na to, że przy obecnym stanie rozwoju technologii lotniczych pominięto jakiś istotny aspekt fizyczny lub badawczy problemu. W dziedzinie modelowania numerycznego dostępne są możliwości bardzo dokładnego odtworzenia przepływu z uwzględnieniem zjawisk wymiany ciepła w wysokociśnieniowych sekcjach turbin gazowych. Specjalizowane hamownie silników lotniczych oraz zaawansowane układy badawcze pozwalają na przeprowadzanie dokładnych badań zjawisk ciepłno-przepływowych zarówno w skali globalnej, jak i przy analizie procesów cząstkowych. W obydwu jednak przypadkach koszty: czy to obliczeń numerycznych wymagających dedykowanych serwerów obliczeniowych, czy to eksperymentów z użyciem drogiej aparatury, są niezwykle duże. Wyklucza to szanse prowadzenia działań optymalizacyjnych szerokiej skali i wymaga wstępnego wyznaczenia kierunków możliwej poprawy.

Właśnie analiza wstępna zjawisk wymiany ciepła i masy w chłodzonej łopatce wysokociśnieniowej sekcji turbiny gazowej jest przedmiotem recenzowanej rozprawy. Aktualność rozważanego problemu nie budzi zatem wątpliwości. Bardzo trafne jest skorelowanie analizowanego problemu z możliwościami badawczymi, zarówno pod względem organizacyjnym jak i czasowym. Wykorzystanie do badań numerycznych uproszczonego modelu parametrów skupionych – sprowadzenie problemu do zagadnienia jednowymiarowego lub pseudo dwuwymiarowego – dało sposobność przeprowadzenia obliczeń przy stosunkowo niskim ich koszcie. Właściwe skojarzenie części numerycznej z modelowaniem analitycznym zjawisk cząstkowych z zastosowaniem zależności kryterialnych, pozwoliło na zachowanie stosunkowo niskich kosztów obliczeniowych. Wszystko razem zadecydowało o skuteczności zaproponowanego podejścia badawczego.

Natomiast uzyskane wyniki wskazują na to, że przedstawiona koncepcja analizy wstępnej jest poprawna.

Przy opracowywaniu modelu numerycznego i wykonywaniu obliczeń opisywanych w głównej części rozprawy Doktorant posiłkował się nowoczesnymi narzędziami programistycznymi. Dobre przygotowanie merytoryczne i sprawność programistyczną wykazał także opracowując kod do analizy przepływu błonowego z zastosowaniem sieci neuronowych. Zagadnienie opisano w Rozdziale 5. Właściwego poziomu wiedzy specjalistycznej dowiódł analizując i opisując stan zagadnienia – problem chłodzenia łopatek turbin gazowych w Rozdziale 1. Są to dodatkowe elementy wpływające na pozytywny odbiór treści rozprawy.

Do głównych pracy zalet zaliczam zatem aktualność tematyki, zasadność zastosowania podejścia hybrydowego, numeryczno-analitycznego, i wiarygodność uzyskanych wyników obliczeń w aspekcie możliwości ich wykorzystania do analizy porównawczej. Ważną zaletą zaproponowanego podejścia jest również jego uniwersalność – różne sposoby zwiększenia skuteczności chłodzenia można uwzględnić nie tylko w ramach jednolitego podejścia, ale nawet jednego modelu. Dobór literatury przedmiotu w analizie stanu zagadnienia jest trafny i wyczerpujący w zakresie omawianego zagadnienia szczegółowego.

Pozytywna ocena rozprawy jako całości wskazuje na to, że nie mam zasadniczych zastrzeżeń do jej części merytorycznej. Niemniej jednak podczas lektury opracowania nasunęły mi się pewne uwagi krytyczne. Przede wszystkim brakuje mi odniesienia się przy analizie stanu zagadnienia do alternatywnych sposobów analizy właściwości konstrukcji: zaawansowanych analiz zagadnień wymiany ciepła i masy z modelowaniem numerycznym problemu opisanego pełnym układem równań różniczkowych cząstkowych pola temperatury i pola przepływu z jednej strony, oraz badań doświadczalnych z drugiej. Uważam, że wskazanie takich możliwości pozwoliłoby na lepsze uzasadnienie celowości zastosowanego podejścia hybrydowego.

Mam również zastrzeżenie dotyczące zdawkowego przedstawienia metodyki budowy modelu uproszczonego z wykorzystaniem parametrów skupionych. Z przedstawionego w punktach 2.2.2 – 2.2.3 (w pracy ostatni z wymienionych występuje z błędną numeracją 2.2.1) trudno się zorientować w istocie przyjętych przybliżeń. W szczególności dotyczy to sposobu określania parametrów elementów łączących węzły, gdzie występuje pozorna, jak się domyślam, sprzeczność pomiędzy izentropowym charakterem przepływu gazu [por. np. zależności (21) i (22)] i wzrostem jego entalpii spowodowanym doprowadzaniem ciepła. W pracy nie dostrzegłem zależności przedstawiającej bilans entalpii w węźle dla czynnika chłodzącego.

Za zbyt fragmentaryczne uważam również prezentacje założeń kolejno analizowanych zagadnień jednostkowych. Już przy pierwszym modelu, przedstawionym na Rys. 26, Autor nie odniósł się do problemu pominięcia różnicy temperatury pomiędzy częścią wklęsłą łopatki i częścią wypukłą. „Analog” zobrazowany na Rys. 28 nie uwzględnia ewentualnych różnic, w tym różnic uwarunkowanych różnicą parametrów przenikania ciepła. Możliwości takich można się domyśleć po dyskusji problemu chłodzenia strumieniowego z punktu 2.3.

W odniesieniu do modelu z Rys. 26 muszę także zwrócić uwagę na to, że przyjęte milcząco założenie zmiany architektury kanału serpentynowego (część lewa ilustracji) na modelowy wielokierunkowy (część prawa) nie jest oczywiste. Dopiero omówienie wyników w punkcie 2.2.5 (Rys. 36) rzuca więcej światła na intencje Autora.

Za uchybienie merytoryczne uważam również brak wyraźnego uzasadnienia wyboru modelowanego obiektu do wykonania analiz cząstkowych. Łopatki o innej geometrii są opisywane w Rozdziale 2, inne rozwiązanie konstrukcyjne wykorzystano do analizy

wrażliwości i rozważań przedstawionych w Rozdziale 3. Podkreśla to wprawdzie uniwersalność zastosowanej metodyki, ale budzi jednocześnie niepokój o brak spójności.

Niezależnie od powyższych uwag uważam, że zawartość merytoryczna pracy dowodzi tego, że Doktorant posiadał umiejętności i wykazał się kompetencjami właściwym realizacji projektów doktorskich. W podsumowaniu oceny merytorycznej podkreślę, że rozprawa jest pracą oryginalną, zawiera niezbędne elementy nowości oraz, że wyniki mają znaczenie dla praktyki projektowej i eksploatacyjnej. Uważam zatem iż przedstawione do recenzji opracowanie może stanowić podstawę procedowania przewodu doktorskiego.

### III. Uwagi dotyczące redakcji pracy

Recenzowaną rozprawę zredagowano w klasycznym układzie treści przedstawiając opracowanie w języku angielskim. Sprzyja to rozpowszechnieniu oryginalnych wyników badań zarówno bezpośrednio, jak i przy ewentualnym przygotowywaniu publikacji pochodnych. Szatę graficzną przygotowano starannie i takie samo jest pierwsze odczucie dotyczące redakcji tekstu. Niestety, w miarę zagłębiania się w lekturę czytelnik musi się zmierzyć zarówno z problemami właściwego wyważenia oraz spójności treści, jak i błędami edycji tekstu.

Jeżeli chodzi o wyważenie treści i ich spójność, to zwrócę uwagę na to, że większość pracy dotyczy klasycznego zagadnienia optymalizacji, natomiast tylko w Rozdziale 4 omawiany jest problem zastosowania algorytmów uczenia maszynowego do analizy przepływu dyszowego. Dotyczy on zatem zagadnienia cząstkowego, a zastosowana metodyka oraz narzędzia w postaci kodów własnych różnią się od poprzednich. Trudno nie odnieść wrażenia, że jest to pretekst do dodatkowego wykazania umiejętności i sprawności Autora w ich stosowaniu.

Po zapoznaniu się z treścią pracy pojawia się również wrażenie pewnej jej rozbieżności z anonsowaną w tytule zawartością. Optymalizacja dotyczy wyłącznie układu chłodzenia łopatk, czyli części całego systemu chłodzenia turbiny. Zgodnie z brzmieniem tytułu można byłoby się spodziewać przedstawienia w rozprawie wyników obliczeń termogazodynamicznych z określeniem wpływu poprawy efektywności chłodzenia łopatk na wydajność całego systemu. Brak tego nie umniejsza jednak wartości uzyskanych wyników, co podkreśliłem wcześniej w ocenie merytorycznej opracowania.

Skoro o tytule mowa, to zgłoszę jeszcze swoje zastrzeżenie dotyczące określenia „airfoil” czyli profil. W mojej opinii chłodzeniu podlega łopatk, ang. blade, podczas gdy profil odnosi się do kształtu.

Do najbardziej uciążliwych błędów redakcji zaliczam przede wszystkim niekompletność wykazu oznaczeń. Przykładem może służyć symbol  $v$  ze wzoru (18),  $M$  z tej samej zależności,  $l_m$  ze wzoru (28),  $m$  z innych równań, brak w wykazie wyjaśnienia skrótowców PS i SS określających odpowiednio wklęsłą i wypukłą część łopatk itd. Do błędów redakcji tekstu zaliczam również przeskok myślowy przy wprowadzaniu kolejnych zależności. Na przykład przy omówieniu problemu sprawności chłodzenia na stronie 85 nie jest jasny sposób przejścia od rozkładu powierzchniowego  $\eta(x,y)$  do wartości średniej  $\bar{\eta}$ . Wspomnieć również należy o zbyt małym rozmiarze czcionki części ilustracji. W szczególności dotyczy to Rys. 29 i 77.

Powyżej wskazane przykłady nie wyczerpują wszystkich dostrzeżonych przeze mnie uchybień. Ponieważ recenzja nie jest korektą pracy, to rezygnując z drobiazgowego ich wyliczenia deklaruje możliwość przekazania stosownego wykazu bezpośrednio Autorowi rozprawy.

Zauważone przeze mnie i wskazane tylko przykładowo nieścisłości i błędy redakcyjne nie dają podstaw do podważenia treści merytorycznych opracowania. Nie wymagają również odpowiedzi bezpośredniej, jedynie może zwrócenia uwagi przez Doktoranta większej uwagi na dokumentowanie badań w dalszej Jego pracy. Innych uwag bądź zastrzeżeń dotyczących strony redakcyjnej nie mam.

#### **IV. Wniosek końcowy**

Podsumowując stwierdzam, że w recenzowanej pracy przedstawiono rozwiązanie zagadnienia badawczego oryginalnego i dysertabilnego. Ważnymi atutami rozprawy są: aktualność problemu, oryginalne potraktowanie tematu, nowoczesność warsztatu naukowego oraz oryginalność uzyskanych wyników. Dopełniając obowiązków recenzenta powinienem jeszcze odnieść się do poziomu rozprawy. Samą treść oraz uzyskane wyniki oceniam wysoko. Osobiście uważam, że już samo skuteczne zastosowanie modelowania hybrydowego wymaga dobrego przygotowania merytorycznego i pewnej finezji warsztatowej. Brak spełnienia przez Doktoranta kryteriów formalnych zwalnia mnie jednak z obowiązku rozważania ewentualnego wyróżnienia pracy. Wymagałoby to dokładniejszego wyważenia wszystkich argumentów za i przeciw, a tych drugich też, niestety, nie brakuje. Stwierdzam jednak jednoznacznie, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2021 r. poz. 478). Wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Dariusza Olczaka do publicznej obrony.

