

Warszawa, 10.02.2025

Prof. dr hab. inż. Marian Gieras  
Politechnika Warszawska  
Instytut Techniki Ciepłej  
ul. Nowowiejska 21/25  
00-665 Warszawa  
Marian.gieras@pw.edu.pl

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr inż. Kamila Szczerby**

***pt. Analiza eksperymentalna i numeryczna dyfuzora zakrzywionego***

Recenzja została wykonana na zlecenie prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghardta, przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukaszewicza. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Stanisław Antas, prof. PRz

### **1. Zasadność podjęcia tematu**

Wzrost efektywności technologii przyczyniającej się do obniżenia emisji CO<sub>2</sub> jest jednym z priorytetów i oczekiwanych efektów badań prowadzonych obecnie w zakresie rozwoju technologii lotniczych. Coraz szybciej rozwijający się transport lotniczy przyczynia się do wzrostu emisji gazów cieplarnianych i innych form zanieczyszczenia, które mają negatywny wpływ na nasze środowisko. Dlatego istotne stało się projektowanie coraz to wydajniejszych podzespołów silnika w celu uczynienia lotnictwa bardziej „czystym” środkiem transportu. W silnikach lotniczych głównym źródłem emisji CO<sub>2</sub> i innych zanieczyszczeń jest komora spalania. Na jakość jej pracy wpływ ma wiele czynników, wśród których jednym z ważniejszych jest sprawność dyfuzora wlotowego do komory. W swojej pracy doktorskiej Doktorant podjął się analiz ukierunkowanych na identyfikację wpływu geometrii dyfuzora wylotowego ze sprężarki promieniowej na sprawność jej pracy. Sprężarki tego typu są stosowane w silnikach odrzutowych o małym ciągu oraz w silnikach śmigłowych i śmigłowcowych. Tym samym praca wpisuje się w obszar badań o charakterze użytecznym i jest tematycznie usytuowana w zakresie działań mających wspierać poprawę czystości naszego

środowiska. Bez wątplenia tematyka dysertacji mieści się w zakresie dyscypliny naukowej – Inżynieria Mechaniczna.

## 2. Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska składa się z 10 rozdziałów, z których pierwszy jest wprowadzenie, a następnym teza i cele pracy, a ostatnim wnioski. Przed częścią zasadniczą znajduje się wykaz skrótów i symboli. Na końcu pracy Doktorant umieścił cytowaną w dysertacji literaturę, jak również streszczenie w języku polskim i streszczenie w języku angielskim. W spisie literatury zestawiono 106 pozycji literaturowych, z których 4 to prace, których Doktorant był współautorem (2 patenty oraz 2 artykuły). Dobrą praktyką w przygotowaniu prac doktorskich jest odnoszenie się do efektów prac własnych publikowanych przez autorów dysertacji w literaturze przedmiotu – co Doktorant uczynił, choć według mnie w sposób zbyt ogólny.

W rozdziale 1 autor wskazuje na motywację, jaka stała u podstaw podjęcia się wyzwania badawczego. Poruszył problem istoty dopracowania konstrukcji silników lotniczych z uwagi na ekologię, wskazując przy tym na rolę, jaką odgrywają w tym kontekście dyfuzory stanowiące znaczący element zespołu sprężarki. Przeprowadził przegląd ważniejszych rozwiązań dyfuzorów stosowanych w silnikach lotniczych. Dokonał też przeglądu literatury światowej na temat badań dyfuzora zakrzywionego.

W rozdziale 2 sformułowano tezę pracy oraz cele pracy przedstawiając jednocześnie metody i narzędzia badawcze, które wykorzystano do ich realizacji, z rozbiciem na poszczególne etapy badań.

W rozdziale trzecim zostały przeprowadzone obliczenia w celu wyznaczenia geometrii kanału dyfuzora zakrzywionego w oparciu o jednowymiarowe zależności termodynamiczne przepływu. Jako wyjście do obliczeń parametrów strumienia w przekroju wylotowym z kanału dyfuzora zakrzywionego posłużono się danymi z obliczeń termogazodynamicznych sekcji sprężarki odśrodkowej poprzedzającej dyfuzor zakrzywiony. Niestety Doktorant nie przedstawił żadnych bliższych informacji dotyczących zarówno samych obliczeń jak i parametrów sprężarki, skądinąd bardzo istotnej w kontekście doboru parametrów projektowanego dyfuzora. Stopień dyfuzorowości kanału dyfuzora zakrzywionego według równania (3.17) został wyliczony jako 1,9, według równania (5.17) jako 1.95, natomiast zgodnie z rysunkami 3.1-3.3 i podanymi wymiarami projektowanego dyfuzora stopień dyfuzorowości jest większy i wynosi ok. 2,3 – skąd te różnice?

W rozdziale 4 z uwagi na brak możliwości zapewnienia parametrów strumienia

powietrza adekwatnych do wyników obliczeń dokonano przeskalowania dyfuzora zgodnie z zasadami podobieństwa przepływu. Powiększono model tak, aby wymiary geometryczne oraz przepływowe były możliwe w realizacji praktycznej. Zważywszy na fakt, że oryginalny wlot ma tylko 15 mm średnicy takie działanie jest racjonalne, z punktu widzenia dokładności wykonywanych pomiarów pola prędkości, gdyż zainstalowanie sond pomiarowych w tak małym obszarze mogłoby stwarzać duże zaburzenie przepływu. Rozdział ten kończy rysunek 4.1 przedstawiający model eksperymentalny dyfuzora – niestety nigdzie nie udało mi się znaleźć wymiarów tego dyfuzora, a w szczególności wymiarów jego wylotu.

Rozdział 5 stanowi jeden z najważniejszych rozdziałów dysertacji. Przybliży metodykę prowadzenia badań, jak również stosowane w badaniach techniki pomiarowe. Metody wykorzystywane w badaniach są w zasadzie metodami standardowo stosowanymi w obszarze badań przepływów, jednakże warto zauważyć że Doktorant zaprojektował i wykonał autorski osprzęt pomiarowy - dedykowane grzebieniowe mikro sondy pomiarowe, skanery ciśnień i mikro sondę pomiaru kierunku powietrza na wylocie z dyfuzora. Do przeprowadzenia badań doktorant zaprojektował i wykonał od podstaw specjalizowane stanowisko do badań dyfuzorów. Przedstawiono także technologię wykonania modelu dyfuzora zakrzywionego, który następnie został poddany szczegółowym badaniom prowadzonym w kilku etapach. W pierwszej części badań eksperymentalnych przeprowadzono badanie profilu pola prędkości na wlocie do dyfuzora oraz rozkładu turbulencji. Dzięki temu określony został współczynnik profilu prędkości średniej. Parametry te posłużyły jako warunki brzegowe rzeczywiste do modelowania numerycznego. Po przeprowadzeniu kalibracji skanera ciśnień i skanera punktowego do sondy kierunkowej, w kolejnym etapie testów wykonano badanie rozkładu ciśnień w dyfuzorze, a następnie pomiar prędkości na wylocie dyfuzora również w wersji kierunkowej. Proces pomiarowy został zautomatyzowany, stosując środowisko pomiarowe DasyLab, wykorzystano napędy inteligentne manipulatora kartezyjańskiego programowane w oparciu o dedykowane oprogramowanie FTC firmy festo. Wszystkie operacje przeliczeniowe, zostały zaimplementowane w tym środowisku i w ten sposób w czasie rzeczywistym wyświetlano wszystkie parametry na bieżąco. Program w czasie rzeczywistym wyznaczał współczynniki strat przepływowych oraz współczynnik wzrostu ciśnienia statycznego dyfuzora. Autor opisał zastosowany duży modułowy system pomiarowy DaqBook 2001 z kartami rozszerzeń DBK41 i DBK80, który gwarantował odpowiednią szybkość oraz dokładność przetwarzania mierzonych wielkości.

W rozdziale 6, który według mnie powinien zostać włączony do rozdziału 5, przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych profilu prędkości wykonanej średnicowo co

30 stopni, oraz rozkładu turbulencji wzdłuż średnicy kanału na wlocie do dyfuzora.

Rozdział 7 dotyczy obliczeń numerycznych, które wykonano w środowisku Ansys Fluent. Omówiono wybór modelu turbulencji, sposób dyskretyzacji modelu dyfuzora oraz przyjęte warunki brzegowe. W tym przypadku pewien niedosyt może budzić brak szerszej analizy wpływu gęstości przyjętej siatki obliczeniowej na dokładność uzyskanych wyników – przyjęto siatkę złożoną z 42700 elementów – na jakiej podstawie dokonano tego wyboru?. W rozdziale tym zamieszczono bardzo istotne wyniki obliczeń rozkładu ciśnienia statycznego na ściankach kanału dyfuzora, rozkładu prędkości wzdłuż kanału dyfuzora, a także rzuty wektorów prędkości na płaszczyzny przekrojów, w tym na przekrój wylotowy. Trzeba jednak zaznaczyć, że prezentując kolejne przekroje poprzeczne nie została w wielu przypadkach zachowana skala wymiarowa – można przez to odnieść wrażenie, że przekrój wlotowy ma większą powierzchnię niż przekrój wylotowy (np. rysunek 7.15).

W rozdziale 8 przeprowadzona została walidacja eksperymentalna wyników badań numerycznych w odniesieniu do prędkości na wylocie dyfuzora, ciśnienia spiętrzenia na wylocie dyfuzora oraz rozkładu ciśnienia statycznego na ściankach kanału dyfuzora. Wyniki numeryczne wykazują generalnie dużą zbieżność z wynikami eksperymentalnymi. Znaczące różnice zostały zaobserwowane jedynie dla rozkładu składowej  $C_y$  prędkości w kierunku poprzecznym przekroju wylotowego dyfuzora. W rozdziale tym przeprowadzono także bardzo wartościową analizę niepewności badań eksperymentalnych, tworząc niezbędne formuły uwzględniające zarówno niepewności przetwarzania torów pomiarowych, jak i niepewności standardowe poszczególnych przyrządów.

W rozdziale 9 przeprowadzono optymalizację numeryczną kształtu dyfuzora w celu poprawy profilu prędkości na wylocie oraz przedstawiono otrzymane wyniki. Optymalizację kształtu kanału dyfuzora wykonano w module Adjoint Solver, będącym specjalistycznym narzędziem, które rozszerza system CFD o możliwość modyfikacji „geometrii przepływu”, zapewniając szczegółową analizę wrażliwości, w odniesieniu do zdefiniowanej funkcji celu. W wyniku przeprowadzonej optymalizacji uzyskano nieznaczną korektę kształtu, która spowodowała znaczącą poprawę profilu prędkości na wylocie. Takie potwierdzenie metody numerycznej jest o tyle obiecujące, że jest przy tym szybsza i tańsza niż optymalizacja eksperymentalna, którą można przeprowadzić tylko za pomocą złożonych badań na wielokrotnie budowanym modelu eksperymentalnym. Analizując uzyskane wyniki można zauważyć, że choć wynikająca z przeprowadzonej optymalizacji zmiana kształtu w postaci wyraźnego przewężenia na wlocie dyfuzora spowodowała korzystną zmianę profilu prędkości na wylocie z dyfuzora, to jednak istnieje możliwość, że mogła się też przyczynić do wzrostu

strat przepływu przez dyfuzor, co nie jest korzystnym zjawiskiem w kontekście ogólnej sprawności komory spalania. Stąd nasuwa się wniosek, że pełne kształtowanie kanału dyfuzora zakrzywionego wymaga optymalizacji wieloparametrowej. Jednocześnie pokazuje jak z trudnym zagadnieniem z punktu widzenia projektowania mamy w tym przypadku do czynienia.

W ostatnim rozdziale dysertacji Doktorant formułuje szereg wniosków o charakterze zarówno ogólnym jak i szczegółowym odnoszących się do wybranych rezultatów wykonanych prac. Rozdział tym samym pozwala czytelnikowi na uszeregowanie zakresu przeprowadzonych przez Doktoranta wieloaspektowych badań.

### **3. Uwagi o charakterze ogólnym**

Praca w mojej opinii jest bardzo interesująca i dobrze wpisuje się w potrzeby obecnie prowadzonych prac rozwojowych w obszarze projektowania lotniczych silników niskoemisyjnych. Praca obejmuje swoim zakresem zarówno badania eksperymentalne jak również badania numeryczne. Jednakże według mnie to część eksperymentalna dotycząca projektowania i budowy stanowiska, metodyki prowadzenia badań, jak również stosowanych w badaniach nowatorskich technik pomiarowych stanowi najbardziej wartościową część pracy. Dzięki solidności i dokładności prowadzonych badań eksperymentalnych Doktorant otrzymał wiarygodne i wartościowe wyniki, które zostały w dużej mierze potwierdzone przeprowadzonymi symulacjami numerycznymi dla warunków ustalonych. Wykorzystując w obliczeniach numerycznych metodę optymalizacji sprzężonej, dla zadanej funkcji celu polegającej na minimalizacji różnicy prędkości na wylocie dyfuzora, Doktorant uzyskał korektę kształtu testowanego dyfuzora zakrzywionego, która spowodowała poprawę profilu prędkości na wylocie. Czytając pracę, trudno jednak oprzeć się wrażeniu, że wykonanie tunelowego modelu dyfuzora o kształcie skorygowanym zgodnie z obliczeniami i przeprowadzenie na nim podstawowych badań przepływu stanowiłoby dużą wartość merytoryczną niniejszej dysertacji. Nie mniej przedstawiona do oceny dysertacja stanowi dowód na to, iż Doktorant posiada wszelkie predyspozycje do prowadzenia prac naukowych na wysokim poziomie.



#### 4. Uwagi o charakterze szczegółowym

- Autor stwierdza (str. 29), że kąt wypływu z dyfuzora zakrzywionego powinien wynosić  $\alpha_5=75\div 90$ , skąd to wiadomo?
- Na rys 1.6a brak opisu znaczenia cyfr 1,2,3.
- W niektórych wzorach ciśnienie statyczne oznaczono dużą literą - niezgodnie z wykazem oznaczeń np. (3.36), (3.38).
- W równaniu (4.4) powinno być  $1,529e^{-5}$ .
- Niedokładne obliczenie wartości pola powierzchni wlotowej dyfuzora - jest  $7,5 \cdot 10^{-3}$ , a powinno być  $7,85 \cdot 10^{-3}$  (str. 43), podobnie na str.44 jest  $S_4 = 74,4 \cdot 10^{-3}$ , a powinno być  $S_4 = 77,93 \cdot 10^{-3}$
- Na rys.3.3 użyto określenia prostokąt z dwoma promieniami – formalnie nie bardzo wiadomo co to oznacza.
- W równaniu (6.2) brakuje nawiasu, podobnie jak w równaniu (6.4)
- Na niektórych rysunkach wartości liczbowe na osiach poziomych są niesymetryczne względem wartości „0” - co trochę utrudnia odczytywanie wartości z tych wykresów (np. Rys. 8.1, 8.2, 8.3 itp.)
- Na niektórych kolorowych rysunkach opis jest mało czytelny np. na rys. 1.10, 1.11, 5.44, 7.8, 7.9, 7.17
- W kwestii edytorskiej Autor niestety nie uniknął sporej ilości tzw. „literówek”. Prawdopodobnie większość z nich wynika z faktu automatycznej adjustacji tekstu realizowanej przez edytor, który często samoistnie dokonuje korekty tekstu. Np. str. 9 pierwszy wiersz „Od kilku lat obserwuję się ekstremalne...”, str. 10 piąty wiersz „Dzięki temu następuję zmniejszenie ...” itd.

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z pracą doktorską przygotowaną przez Pana Kamila Szczerby uznaję, iż Doktorant ma wszelkie predyspozycje do prowadzenia wysokojakościowych prac badawczych. Przeprowadzenie analizy eksperymentalnej i numerycznej dyfuzora zakrzywionego, zważywszy na bardzo skromną bazę literaturową w tym zakresie, wymagało od Doktoranta posiadania dużej wiedzy oraz umiejętności. Uzyskane rezultaty nie budzą zastrzeżeń. Uważam, że główny cel pracy został osiągnięty, a uzyskane rezultaty stanowią materiał o dużym znaczeniu użytkowym.

Pomimo sformułowania uwag krytycznych przedstawioną pracę oceniam wysoko. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Szczerby pt. *Analiza eksperymentalna i numeryczna dyfuzora zakrzywionego* spełnia wymogi określone w Art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023, poz. 742). W związku z powyższym stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Marian Gieras

Zakład Silników Lotniczych

Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska