Dr hab. inż. Joanna Wilk, prof. PRz
Zakład Termodynamiki
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
al. Powstańców Warszawy 12
35 – 029 Rzeszów

Rzeszów, 29 września 2026r.

RECENZJA rozprawy doktorskiej

Experimental Research of Dual-Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle (Badania eksperymentalne dwuprzewężeniowej dyszy z fluidalnym wektorowaniem ciągu)

Autor mgr inż. Wiktor Hoffmann

Recenzja została sporządzona na prośbę Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej, pana profesora Zbigniewa Nadolnego, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej (pismo z dnia 20 lipca 2026 roku).

I. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny praca wykonana pod kierunkiem pani profesor Magdy Joachimiak jako promotora oraz pana doktora Bartosza Zieglera jako promotora pomocniczego dotyczy, zgodnie z tytułem, zagadnień związanych z działaniem dwuprzewężeniowej dyszy z fluidalnym wektorowaniem ciągu silnika odrzutowego bez poruszania elementami dyszy.
W ramach pracy wykonano szereg badań eksperymentalnych na specjalnie zbudowanym do tego celu stanowisku bazującym na tubie Ludwiega. Gdzie, m.in. wprowadzono szybkie sterowanie dla zachodzących procesów, a także wykorzystano wielokanałową akwizycję danych pomiarowych. Prowadzone badania dotyczyły stanów nieustalonych, co ma istotne znaczenie dla zastosowań sterowania – w rozpatrywanym przypadku – sterowania wektorem ciągu silnika odrzutowego. Zasadniczym celem prowadzonych badań było wyznaczenie odpowiedzi dynamicznej osiowosymetrycznej dyszy dwuprzewężeniowej oraz częstotliwości i amplitudy ciśnienia na ściankach dyszy podczas pracy ze stałymi parametrami czynnika w przekrojach wlotowych.

Podjęta w rozprawie tematyka poruszająca zagadnienia wektorowania ciągu jako techniki umożliwiającej zmianę kierunku siły ciągu statku powietrznego, a tym samym kierunku jego lotu, jest ważna i aktualna. Sterowanie wektorem ciągu bez zastosowania ruchomych elementów dyszy stanowi szczególnie istotne zagadnienie w odniesieniu do układów rakietowych i lotniczych. Rozważana problematyka jest intersująca również pod względem poznawczym, m.in. w związku z analizą stanów nieustalonych w zastosowaniach sterowania. Tematyka rozprawy doktorskiej pana mgr. inż. Wiktora Hoffmanna mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, a ściślej rzecz biorąc, w szeroko rozumianej energetyce.

Napisana w języku angielskim rozprawa liczy w swojej zasadniczej części 179 stron wraz z dodatkami oraz bibliografią, w której zamieszczono 102 pozycje literaturowe. Zasadniczą część pracy poprzedzają dwadzieścia cztery strony ponumerowane w systemie rzymskim, na które składają się głównie: streszczenie w języku polskim i angielskim, podziękowania, spis rysunków oraz tabel, a także wykaz oznaczeń i skrótów użytych w tekście. Część główna rozprawy składa się z siedmiu rozdziałów, które zawierają: wprowadzenie i przegląd stanu wiedzy, podstawy teoretyczne oraz geometrię układu do badań numerycznych, opis stanowiska eksperymentalnego, metody prowadzonej analizy, wyniki oraz wnioski. Zamieszczonych kolejno jedenaście dodatków zawiera rysunki konstrukcyjne, schematy LabVIEW, a także obszerne wydruki kodu Python.

Stanowiący wprowadzenie do tematyki rozprawy rozdział pierwszy zawiera kompleksowy przegląd literatury, w którym zaprezentowano historię systemów wektorowania w pociskach i samolotach, obecny stan wiedzy na temat różnych rozwiązań dysz z fluidalnym wektorowaniem, a także badania dotyczące dysz dwuprzewężeniowych (DTN). W rozdziale pierwszym Autor przedstawił również szczegółowe cele realizowanej pracy.

Rozdział drugi zatytułowany jako „Informacje ogólne i teoria" zawiera podstawowe definicje, opis odpowiednich współczynników i parametrów charakteryzujących ocenę jakości wektorowania ciągu, a także ogólną charakterystykę przepływu przez dyszę dwuprzewężeniową bez wektorowania oraz z wektorowaniem. W rozdziale drugim Autor dołączył również krótki przegląd literatury na temat dotychczasowych eksperymentalnych badań dynamicznych dysz DTN oraz wnioski wynikające z tego przeglądu.

W rozdziale trzecim Autor przedstawił geometrię badanej dyszy oraz zawarł opis przeprowadzonych obliczeń numerycznych, które stanowią uzupełnienie badań eksperymentalnych – tym sposobem wyznaczono siłę wypadkową wytwarzaną przez dyszę. Określono również rozkład ciśnień na ściankach dyszy – co w dalszej części rozprawy zostało porównane z wynikami eksperymentu.

Rozdziały czwarty, piąty i szósty to zasadnicze elementy rozprawy, w których zawarto opis stanowiska, metodykę badań oraz dokładne opracowanie otrzymanych wyników.

W najobszerniejszym rozdziale czwartym Autor zaprezentował zbudowane stanowisko eksperymentalne oraz aparaturę pomiarową. Została tu opisana zasada działania i konstrukcja stanowiska z tubą Ludwiega oraz sekcja badawcza z rozpatrywanym modelem dyszy. Omówiono sterowanie strumieniem masy w przewodzie głównym i wtórnym, zaprezentowano zastosowany układ pomiarowy wraz z aparaturą, ze szczegółową charakterystyką przetworników ciśnienia. Autor przedstawił również procedurę, według której były

wykonywane pomiary, a także sposób kondycjonowania, kalibracji i wstępnego przetwarzania sygnałów.
W rozdziale piątym zatytułowanym „Analiza danych i wyniki eksperymentalne" zamieszczono wstępny przegląd wyników badań stanowiący analizę reprezentatywnego „surowego" przebiegu czasowego mierzonych wielkości oraz omówiono zastosowane metody analizy otrzymanych danych pomiarowych.
Rozdział szósty, zatytułowany również jako „Wyniki eksperymentalne" zawiera wyniki badań przeprowadzonych na stanowisku z tubą Ludwiega, uzyskane dla testowanej dyszy DTN. Przedstawiona analiza koncentruje się na odpowiedzi dyszy na uruchomienie wtrysku wtórnego, ze szczególnym uwzględnieniem wynikających z tego zmian ciśnienia na ściankach, dynamicznego charakteru odpowiedzi oraz występowania wahań ciśnienia. Autor porównał też eksperymentalny rozkład ciśnienia z odpowiadającymi mu wynikami obliczeń numerycznych.
Rozdział siódmy stanowi podsumowanie pracy. Zawarto w nim m.in. odniesienie do praktycznych zastosowań otrzymanych wyników badań. Autor wskazał również kierunki dalszych prac.

II. Uwagi merytoryczne

Rozprawa doktorska pana Wiktora Hoffmanna zawiera wszystkie niezbędne elementy, które kwalifikują ją do dalszego postępowania doktorskiego. Niemniej, w trakcie czytania pracy nasunęły mi się pewne zagadnienia wymagające wyjaśnienia bądź uzupełnienia.

1. Wielkości bezwymiarowe

W rozdziale szóstym wprowadzono wielkości bezwymiarowe: czas t^*, stałą czasową τ^* oraz liczbę Strouhala. W definicji bezwymiarowego czasu oraz bezwymiarowej stałej czasowej pojawia się prędkość nazwana przez Autora „referencyjną prędkością izentropową", jest ona równa $\sqrt{RT}$. Czy rzeczywiście chodzi o prędkość izentropową? Podany wzór wyraża raczej tzw. prędkość izotermiczną. Czy wyrażenia pod pierwiastkiem nie należałoby przemnożyć przez wykładnik izentropy? Czy też może rozważaną prędkość zdefiniować jako umowną prędkość odniesienia?
Podana w pracy liczba Strouhala oznaczona symbolem S jest odwrotnością klasycznej liczby Strouhala, która to pozwala określić podobieństwo przepływów w warunkach nieustalonych, wraz z liczbą Reynoldsa, z którą jest ściśle powiązana. W związku z tym czy nie lepiej byłoby pozostać przy nazwie „bezwymiarowa stała czasowa", tym bardziej, że nie ma wyznaczonego pola prędkości – nie pojawia się liczba Re. Nazwanie τ^* liczbą Strouhala może być mylące.

2. Badania eksperymentalne

Przeprowadzone przez Autora badania eksperymentalne stanowią bardzo istotny i wartościowy wkład w rozszerzenie wiedzy dotyczącej rozważanej tematyki wektorowania ciągu w dyszy dwuprzewężeniowej. W wykazie literatury Autor podaje publikację o numerze [58], stanowiącą klasyczny przykład literatury o tematyce planowania eksperymentu. W tekście nie znalazłam odniesienia do tej pozycji. Nie do końca jest czytelny plan prowadzonych przez Autora eksperymentów (sama procedura badań jest szczegółowo opisana w rozdziale 4.5), nie ma informacji odnośnie liczby wykonanych i odrzuconych prób (chociaż Autor używa pojęcia

„each experimental run" co należałoby rozumieć jako „każdą próbę"). Jaki zatem był bardziej uszczegółowiony przebieg prowadzonych badań eksperymentalnych ?
Badania eksperymentalne wymagają zasadniczo przeprowadzenia analizy niepewności pomiarowej. W prezentowanej pracy nie uwzględniono takiej analizy. Ponieważ końcowe rezultaty badań zależne od wyników wykonanych pomiarów to wartości czasu rzędu tysięcznych części sekund, jak niepewność pomiaru ciśnienia będzie wpływała na końcowy wynik? Wydaje się słusznym przeprowadzenie choćby uproszczonej analizy.
Przeprowadzony na specjalnie skonstruowanym stanowisku eksperyment dotyczył pomiaru ciśnień w wyznaczonych punktach pomiarowych. Autor również wykonał próbę w rurze uderzeniowej. Dodatkowym atutem pracy byłoby wykonanie bezpośredniego pomiaru siły, a tym samym kąta odchylenia. Czy Autor rozważał takie badania? Interesującym byłoby również zbadanie zjawisk przepływowych przy użyciu anemometrii stałotemperaturowej lub PIV.

3. Obliczenia numeryczne
W zaprezentowanej pracy znaczącą część badań zajmują symulacje numeryczne, których wyniki wykorzystano w analizie porównawczej, ale również stanowią one niezbędny człon docelowej analizy ze względu na uzyskane na drodze CFD wartości siły wypadkowej i odchylenia wektora ciągu. W prowadzonych symulacjach, domena obliczeniowa została przygotowana jako półmodel z pionową płaszczyzną symetrii – zachowano w ten sposób istotne cechy osiowosymetrycznego przepływu i symetrii płaszczyzny wektorowania, przy jednoczesnym zmniejszeniu nakładu obliczeniowego. Wprowadzono dodatkowe zagęszczenie siatki w wymagających tego elementach układu. Nie zostały jednak przeprowadzone badania wpływu zagęszczenia siatki w całym analizowanym obszarze, jak w związku z tym można by oszacować błąd dyskretyzacji przestrzennej? Prowadzone symulacje CFD wykonane w programie ANSYS Fluent dotyczyły procesów nieustalonych. Ile wynosił krok czasowy?

4. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i numerycznych
W ramach prowadzonych badań otrzymano rozkład ciśnienia na ściankach wewnątrz rozpatrywanej dyszy DTN. Pomiary były wykonywane za pomocą czujników piezorezystancyjnych. Punkty pomiarowe, w których mierzono ciśnienie ponumerowano odpowiednio od 11 do 15 oraz od 21 do 25 – zgodnie z rysunkiem 4.10. W tabeli 4.2 podano położenie p22 jako x = 21,1 mm. Taka sama wartość występuje w dodatku K, który stanowi utworzony kod w języku Python, służący do wyliczenia ciśnień na podstawie danych pomiarowych. Natomiast w dodatku C zawierającym kod w języku Python do obliczeń rozkładu ciśnień na podstawie symulacji CFD, położeniu p22 odpowiada wartość x = 28,2 mm. Jak w związku z tym rozumieć porównanie wyników przedstawione na rysunku 6.9 oraz spójność wykresów na rysunkach 3.6 i 6.9?

5. Wyniki badań - analiza czasowa
W rozdziale 6.3.1 zostały zestawione szczegółowe wyniki badań analizy czasowej przeprowadzonej dla wszystkich punktów pomiarowych ciśnienia na ściankach dyszy. Autor podaje w tekście rozdziału, że wartości τ mieściły się w zakresie od 0,00079 do 0,00244 s. Natomiast w tabeli 6.1 najmniejsza wartość τ wynosi 0,00072 s i dotyczy ona punktu p25, dla którego współczynnik dopasowania $R^2 = 0,44$. Podobnie w tekście podany jest zakres R^2 jako

0,87 – 0,98 (wyłączając punkt p25), a w tabeli 6.1 i 6.2 jest podane iż dla punktu p14 $R^2 = 0,83$. Najprawdopodobniej są do błędy edytorskie, niemniej wprowadzają pewne zamieszanie, tym bardziej, że punkt p25 charakteryzujący się niskim współczynnikiem dopasowania i skomentowany przez Autora jako sygnał, którego nie można było opisać zastosowaną metodą, jest podawany w tabelach i na wykresie – rys.6.8. Czy nie lepiej byłoby wynik dla p25 uznać jako nieważny i nie interpretować go liczbowo?

6. Temperatura

W obliczeniach numerycznych, zgodnie z deklaracja Autora, zostało wzięte pod uwagę równanie energii. Jakie zatem, w rozpatrywanym przypadku, występowały różnice temperatur? Jaki mógłby być wpływ temperatury na wartości lepkości czy przewodności cieplnej, które zostały przyjęte jako stałe – tabela 3.2. Dla zakresu pracy eksperymentu takie założenie jest prawdopodobnie akceptowalne, należałoby jednak uzasadnić zakres temperatur.

Inne zagadnienie związane z temperaturą dotyczy jej pomiaru. W rozdziale 4.5 Autor podaje, że po napełnieniu układu, dla zapewnienia powtarzalności początkowych warunków spiętrzenia, układ pozostawał w spoczynku, aż temperatura mierzona w pobliżu obu końców rury zrównała się z temperaturą otoczenia w granicach przyjętej tolerancji („accepted measurement tolerance"). O jaką tolerancję chodzi? Problem ten jest związany ze wspomnianym wyżej brakiem analizy niepewności pomiarowej.

Zagadnienie temperatury dotyczy również wartości przyjętych w obliczeniach. Autor podaje w tekście (rozdział 6.2) warunki przepływu scharakteryzowane przez temperaturę otoczenia oraz temperaturę przed dyszą równą 300K, jak zatem wyjaśnić przyjętą w dodatku H (który stanowi skrypt języka Python zawierający procedurę przetwarzania danych pomiarowych) temperaturę gazu równą 290K?

III. Uwagi redakcyjne i edytorskie

Rozprawa doktorska pana mgr. inż. Wiktora Hoffmanna została napisana w języku angielskim. Pełniąc funkcję recenzenta tejże rozprawy nie poczuwam się do gruntownej oceny poprawności użytego języka. Niemniej, należy stwierdzić, że praca napisana jest w sposób klarowny i czytelny. Zauważyłam nieliczne błędy językowe i interpunkcyjne.

Autor zamieścił streszczenie pracy w języku polskim, nie ma natomiast tytułu pracy w języku polskim, wydaje się, że taki tytuł byłby wskazany.

W trakcie czytania pracy nasunęło się kilka ogólnych uwag związanych z konstrukcją pracy, użytymi oznaczeniami, a także zauważono nieliczne błędy edytorskie.

Jeśli chodzi o układ pracy, jest on poprawny, rozprawa ma logiczny układ rozdziałów. Autor zachował odpowiednie proporcje co do ilości i objętości poszczególnych rozdziałów. Może trochę zbyt rozbudowana jest część historyczna. Niekoniecznym wydaje się zamieszczenie spisu rysunków oraz tabel. Szeroko rozbudowane dodatki stanowiące zapisy kodów w języku Python, z jednej strony mogą wydawać się zbędne, z drugiej jednak strony mogą służyć szerokiej weryfikacji otrzymanych wyników.

Uwagi szczegółowe zostały zamieszczone poniżej.

1. Nomenklatura – oznaczenia

– symbol ciśnienia – ma być „p" czy „P" (jest ΔP);
– Strouhal number – jednostka „same as –"?
– symbol kąta rozpiętości rys.3.1 – ma być „φ" czy „ϕ"?
– niepoprawne symbole „w_s", „w_p"(rys.1.9, 3.1, J.1).
2. Jednostki
– kąty w „°" czy w „deg" (np. str.17, 32)?
– jak rozumieć "barG" (tabela 3.1), czy to ciśnienie względne? W tabeli 4.1 jest „bar G" i „bar A" (użyto spacje) ;
– str.11 i 12 – udziały wtrysku oraz przepływu mają być w „%", nie w „°";
– jednostka lepkości dynamicznej – „Pa s" w Nomenklaturze, „kg/(m s)" w tabeli 3.2 – to oczywiście to samo, ale należałoby użyć jednej formy.
3. Równania
– (2.1) i (2.2) – niepotrzebne jednostki po równaniu;
– (2.4) i (3.3) – dlaczego inny zapis matematyczny? Forma równań jest taka sama;
– (1.1) jest zdublowane, należałoby się zdecydować czy ułamek czy procenty, tym bardziej że w (3.2) – MFR musi być w procentach;
– η jest w °/% (Nomenklatura), w związku z tym równanie (2.7) nie jest do końca jasne, jak z tym 100%?
4. Rysunki
– na wykresach w opisie osi są podawane albo symbole wielkości fizycznych, albo ich nazwy (np. t albo *time*), należałoby to ujednolicić;
– jednostki tych wielkości są albo po przecinku, albo w nawiasach kwadratowych, albo okrągłych (np. rys.4.9);
– niektóre rysunki są mało czytelne, np.: rys.4.1 – należałoby go szerzej opisać, nie wystarczy powołanie na literaturę, również rys. 4.11 – mało czytelny, powinno być „membrane" a nie „membrana";
– rys. A.1 mógłby znaleźć się w głównej części pracy, przy rys.4.6, który jest mało czytelny.
5. Tabele
– tabela 3.3 – nie są jasne parametry β_i, β_∞, α_∞ – nie koniecznie trzeba je podawać;
– ogólnie w tabelach – jednostki wielkości zapisane są albo kursywą albo pismem prostym;
– tabela 6.2 – w opisie jest „from the shortest" (dotyczy kolejności danych od najkrótszego opóźnienia Δt_0), natomiast w tabeli punkt p13, dla którego Δt_0 = 0,00061s jest przed p25, dla którego Δt_0 = 0,00060s.
6. Tytuły rozdziałów
– część tytułów jest napisana w formie – każdy wyraz z wielkiej litery, inne tytuły – wszystkie wyrazy z małej litery – należałoby ujednolicić;
– podobnie w tytułach dodatków - niekonsekwentnie wielkie lub małe litery;
– tytuły rozdziałów 5 i 6 dublują się i są mylące, w obu przypadkach jest „expeimental results".
7. Literatura
– wykaz pozycji jest w kolejności alfabetycznej, może czytelniej byłoby podać ten wykaz w według kolejności cytowania w tekście;
– wydaje się, że nie wszystkie pozycje literaturowe zostały zacytowane w tekście rozprawy.

IV. Ocena pracy i wniosek końcowy

Autor podjął w swojej pracy, istotny w zagadnieniach współczesnych problemów szeroko rozumianej energetyki, temat dotyczący dysz DTN. Dysza DTN jako zaawansowany komponent układu napędowego umożliwiający zmianę wektora ciągu statku powietrznego bez użycia ruchomych mechanicznych elementów, stanowi istotny element w ogólnym systemie przemian energetycznych zachodzących w rozważanym układzie.

Przedstawiona do oceny praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim było wyznaczenie odpowiedzi dynamicznej osiowosymetrycznej dwuprzewężeniowej dyszy DTN pracującej przy przejściowym wtrysku wtórnym, a także scharakteryzowanie nieustalonego pola ciśnienia wewnątrz dyszy. Postawiony problem został rozwiązany na bazie badań przeprowadzonych na specjalnie skonstruowanym stanowisku eksperymentalnym typu tuba Ludwiega zawierającym opracowaną modułową sekcję badawczą DTN wraz z kompletnym układem pomiarowym z rozbudowanym torem akwizycji danych. Dodatkowo, Autor opracował własne narzędzia numeryczne, przeprowadzone zostały symulacje CFD, wyniki których porównano z odpowiednimi rezultatami eksperymentalnymi otrzymując dobrą zgodność. Mocną stroną formalną prezentowanej pracy jest duża liczba informacji konstrukcyjnych oraz pokazanie utworzonych algorytmów obliczeniowych.

Wyniki uzyskane w pracy posiadają walor zarówno praktyczny jak i poznawczy. Analizy przedstawione przez Autora mogą stanowić podstawę do dalszego rozbudowanego projektowania układów ze sterowaniem wektorem ciągu bez ruchomych elementów dyszy.

Doktorant wykazał się adekwatną wiedzą na temat zagadnień teoretycznych dotyczących postawionej problematyki, m.in. podstaw przepływu zdławionego czy też parametrów związanych ze sprawnością DTN.

Za szczególne osiągnięcie i znaczący wkład Doktoranta w rozwój nauk inżynieryjno-technicznych uważam wyznaczenie stałych czasowych badanego układu, a także opracowanie i konstrukcję stanowiska badawczego wraz z zastosowaniem szybkiego sterowania, modułowym modelem, wielokanałową akwizycją danych, które to tworzą wartościową bazę do dalszych badań.

Zawarte w recenzji uwagi natury merytorycznej, mające w znacznym stopniu charakter dyskusyjny, a także pozostałe uwagi nie przesłaniają istotnych wartości pracy i znaczenia dla możliwości zastosowań praktycznych.

Praca doktorska pana mgr. inż. Wiktora Hoffmanna spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Tematyka zawarta w pracy mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Przedstawione wyniki badań wraz z utworzonym rozbudowanym stanowiskiem eksperymentalnym są oryginalne. Doktorant wykazał się adekwatną wiedzą teoretyczną w rozważanej tematyce. Uzyskane wyniki mogą mieć znaczenie praktyczne, mogą znaleźć zastosowanie w projektowaniu i optymalizacji systemów wykorzystujących sterowanie wektorem ciągu silnika odrzutowego bez poruszania elementami dyszy.

Moja ocena pracy jest pozytywna. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie pana mgr. inż. Wiktora Hoffmanna do publicznej obrony swojej rozprawy doktorskiej.