



AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

dr hab. inż. Paweł Madejski, prof. AGH

Kraków, 23.10.2023 r.

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Katedra Systemów Energetycznych

i Urządzeń Ochrony Środowiska

al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

e-mail: pawel.madejski@agh.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Marcina Kurowskiego

zatytułowanej **"Wpływ aktywnych generatorów wirów na obszar**

oderwania przepływu" wykonanej w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN

im. Roberta Szewalskiego w Gdańsku pod opieką promotora

dr hab. inż. Ryszarda Szwaby, prof. IMP PAN

1. Podstawa opracowania

Recenzja wykonana na zlecenie Z-cy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych PAN im. Roberta Szewalskiego w Gdańsku, Pana dr hab. inż. Grzegorza Żywicy, prof. IMP PAN – zgodnie z pismem nr RN-421-18/21.

2. Zasadność podjęcia tematu

Zrealizowany temat w rozprawie doktorskiej mgr inż. Marcina Kurowskiego dotyczy analizy wpływu aktywnych, syntetycznych generatorów wirów na obszar oderwania przepływu i jest bardzo istotny z uwagi na dynamikę implementacji tych elementów w technologii najnowszej generacji. Badania koncentrują się na wpływie aktywnych generatorów wirów, wytwarzanych za pomocą syntetycznych strug powietrza (dżetów), które są generowane przez specjalnie do tego celu zaprojektowane urządzenia. W ostatnich dekadach w czasie intensywnego rozwoju elektroniki, stosowane są nowe metody sterowania przepływem, w tym oparte na materiałach piezoelektrycznych, a mianowicie syntetyczny generator wirów. Badania nad generatorem syntetycznych dżetów, jako jedna

Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 39 59

www.agh.edu.pl

Regon: 000001577 NIP: 6750001923

z niewielu metod aktywnego sterowania przepływem, dają możliwości zmiany parametrów przepływu na dużą skalę przy jednoczesnym niskim nakładzie energii dostarczanej do systemu sterowania.

Praca ma charakter numeryczno-eksperymentalny z przykładem zastosowania takiego generatora w praktyce, na zakrzywionej ścianie z silnym oderwaniem warstwy przyściennej, a wnioski wyprowadzone z przeprowadzonych analiz mogą mieć praktyczne zastosowanie zarówno w sferze nauki, jak i przemysłu. Praca i jej wyniki mogą stanowić cenny materiał dla badaczy zajmujących się zagadnieniami z zakresu nauk technicznych, szczególnie mechaniki płynów. Analizy, wnikliwe spostrzeżenia i konkluzje pozwalają na stwierdzenie, że przedstawiona praca doktorska mgr inż. Marcina Kurowskiego wnosi wkład w bibliografię przedmiotu analizowanego zagadnienia.

3. Zakres rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marcina Kurowskiego posiada 124 strony, 5 rozdziałów, które stanowią główną część pracy, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis symboli i oznaczeń, bibliografię złożoną ze 116 pozycji literaturowych oraz jeden załącznik. Rozprawa została napisana w języku polskim.

Praca składa się z pięciu numerowanych rozdziałów, zawierających treści, które można podzielić na dwie grupy tematyczne. Pierwsza grupa wprowadza w teoretyczne aspekty realizacji procesu poprawy jakości strugi powietrza, druga, będąca częścią przedstawiającą zagadnienia empiryczne, prezentuje przedmiot i cel badań, analizowany problem badawczy, metody, przedstawia techniki i narzędzia badawcze, opisuje formę przeprowadzenia badań, referuje i interpretuje uzyskane wyniki badań. Autor w sposób zwięzły, jasny i poprawny przedstawia wyniki uzyskane w eksperymencie.

Rozdział 1 „Wprowadzenie” składa się z 30 stron szczegółowego wprowadzenia dla uzasadnienia naukowego problemu przedstawionego w rozprawie. W analizie literatury przedmiotu (rozdział 1.2) autor szeroko omawia wybrane główne metody kontrolowania przepływu stosowane w celu polepszenia własności aerodynamicznych, są to m.in.: modyfikacja krawędzi natarcia oraz krawędzi spływowej profilu skrzydła samolotu, modyfikacja kształtu krawędzi spływowej profilu – Gurney flaps, odsysanie warstwy przyściennej, wydmuch powietrza realizowany stycznie do powierzchni profilu, generatory plazmy, stałe i strumieniowe generatory wirów. Najwięcej uwagi, co zrozumiałe, poświęcił metodzie której dotyczy rozprawa doktorska tj., generatorom syntetycznych dżetów, czyli pulsacyjny wydmuch powietrza przez otwór lub szczelinę znajdujące się w ścianie komory.

Głównymi zaletami tej techniki kontroli przepływów jakie można wymienić są: niski nakład energii dostarczanej do systemu w porównaniu do możliwości zmiany parametrów przepływu w większej skali; różnorodność możliwych do zastosowania rozwiązań, co daje możliwość stosowania tej metody – od kontrolowania oderwania warstwy przyściennej po poprawę warunków chłodzenia układów elektronicznych; możliwość kontrolowania prędkości powstających struktur wirowych w zależności od aktualnych potrzeb poprzez zmianę napięcia zasilającego lub częstotliwości wymuszającej drgania membrany. W rozdziale Doktorant umieścił 23 rysunki, a rozdział podsumował przedstawieniem celu i zakresu pracy, czyli **przeprowadzeniem analizy wpływu aktywnych generatorów wirów syntetycznych dżetów na obszar oderwania**. W badaniach Doktorant zaplanował wykorzystanie badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych.

W rozdziale 2 Doktorant przedstawił projekt generatora, stanowisko oraz metody pomiarowe. Omówił najważniejsze liczby kryterialne, przeprowadził dobór optymalnych parametrów (częstotliwość wymuszająca) związanych z parametrami geometrycznymi generatora oraz rezonansem strukturalnym membrany zastosowanej w generatorze. W tym rozdziale zostało przedstawione szczegółowo stanowisko pomiarowe wykorzystane w badaniach eksperymentalnych wraz z metodami i sprzętem pomiarowym. Opis metod oraz zastosowanych czujników pomiarowych jest właściwy i poprawny oraz omawia najważniejsze kwestie dla badań eksperymentalnych. Rozdział 2 posiada 19 stron, 18 rysunków i 3 tabele.

W rozdziale 3 przedstawione zostały wyniki eksperymentalnych badań aktuatorów, prowadzących do wyznaczenia częstotliwości charakterystycznych oraz prędkości osiąganych w syntetycznych dżetach. Badania eksperymentalne wpływu generatorów wirów na obszar oderwania przepływu zostało przeprowadzone: dla wybranych napięć, wybranych częstotliwości oraz dwóch rodzajów generatorów. W ramach tych eksperymentów uzyskano różne prędkości wypływu powietrza, a następnie przeprowadzono pomiary zmniejszenia oderwania strugi dla wartości oderwania minimalnych, średnich i maksymalnych. Zidentyfikowano kluczowe czynniki wpływające na badane zjawisko, ustalono ustawienia parametrów, oceniono wpływ różnych czynników na wyniki. W opinii recenzenta, w tym rozdziale zabrakło dokładniejszej analizy wyników. Oprócz przedstawienia wartości w punktach (minimalne, średnie, maksymalne) zabrakło np. aproksymacji uwzględniającej różne parametry realizacji procesu. Rozdział posiada 23 strony, 16 rysunków oraz 5 tabel.

Rozdział 4 w całości został poświęcony analizie numerycznej aktuatorów syntetycznych dżetów, posiada 27 stron, 23 rysunki, 3 tabele. W rozdziale Doktorant omówił podstawowe

równania modelu przepływu zastosowane w badaniach numerycznych. Przedstawił siatkę obliczeniową typu niestrukturalnego, a dla symulacji ruchu membran Doktorant wykorzystał metody deformacji siatki oraz opracowane na ten cel równanie deformacji siatki. Wyniki modelowania zestawiał w postaci tabelarycznej wykazując dokładność obliczeń na poziomie nie przekraczającym 3% błędu względnego, oraz rozkładów prędkości (struktur wirowych) oraz rozkładu prędkości w środku kanału.

Rozdział 5 to podsumowanie, które zostało przedstawione na 5 stronach, zawiera podsumowanie najważniejszych wyników eksperymentalnych i numerycznych, wnioski oraz wizję dalszych badań. Doktorant potwierdza, że na podstawie wyników badań eksperymentalnych, zaproponowany układ czternastu generatorów z pionowymi membranami z możliwością wykorzystania obu membran umieszczonych w komorze daje możliwość poprawy własności aerodynamicznych poprzez redukcję strefy oderwania. Wyniki badań numerycznych umożliwiają z kolei dobór odpowiednich częstotliwości wymuszających drgania membran poprzez wyznaczanie maksymalnych prędkości w generatorach syntetycznych dżetów.

4. Uwagi krytyczne i redakcyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne, które powinny zostać poddane dyskusji i omówieniu w trakcie obrony rozprawy.

1. Na stronie 46 został przedstawiony model sekcji pomiarowej. Lokalizacja tego modelu do generowania oderwania przepływu została wybrana zapewne ze względu na określone czynniki, które mogą wpływać na wyniki badań i w tym miejscu przeprowadzono pomiary w celu uzyskania odpowiednich informacji/wyników – jakie to czynniki?
2. Na stronie 48 przedstawiono rozmieszczenie otworów wylotowych. Wybór ilości, lokalizacji i średnic tych otworów został dokonany na pewno z pewnym uzasadnieniem. Pojawia się zatem potrzeba wyjaśnienia dlaczego takie parametry zostały przyjęte i jak wpływają na badania?
3. Użyto dwa różne generatory. Jeden z powodów dla użycia dwóch innych generatorów w skrajnych lokalizacjach może wynikać z chęci zbadania różnych ustawień i konfiguracji w celu uzyskania pełniejszego obrazu wpływu generatorów wirów na obszar oderwania przepływu. Taka różnorodność pozwala na lepsze zrozumienie zależności między parametrami a efektami badania. Ale tego nie uzasadniono – jaka była więc przyczyna użycia tych odmiennych konstrukcji?

4. Na stronie 50 przedstawiono parametry, które zostały zastosowane w badaniach i przedstawiono je w tabeli. Tabela stanowi podstawę do porównania wyników i wnioskowania na temat wpływu poszczególnych parametrów na obszar oderwania przepływu. W jaki sposób i w jakich celach został dokonany wybór tych konkretnych parametrów?
5. Na stronie 72 przedstawiono wyznaczenie rozmiaru minimalnego oderwania, jednak można by sugerować wykonanie kilku dodatkowych pomiarów dla wyższych lub niższych prędkości w celu zweryfikowania spostrzeżeń z tabeli nr 5. To mogłoby pomóc w pełniejszym zrozumieniu zależności między prędkościami a oderwaniem strugi, czy umożliwić wykonanie aproksymacji. Chwilowe pola prędkości dla każdego przypadku pomiarowego również bardzo pomagałyby w interpretacji zagadnienia generacji wirów.
6. Na stronie 75 nie określono jasno, jakie są prędkości wylotowe z generatorów. Wskazanie tych prędkości byłoby istotne dla pełniejszego zrozumienia wyników i możliwości porównania ich z innymi badaniami.
7. Bibliografia przedstawiona w pracy jest bogata, a materiały są aktualne. Jednak warto zauważyć, że w ostatnich 5/10 latach powstało więcej publikacji w tym zakresie, co mogłoby stanowić dodatkowe źródło informacji i wskazówek dla dalszych badań.

Wszystkie wymienione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy. W pracy można spotkać kilka literówek, brakujących znaków interpunkcyjnych i niedociągnięć redakcyjnych. Ilość ich jest jednak niewielka i nie wpływa w żaden sposób na ocenę pracy.

5. Ocena rozprawy i wnioski końcowe

Przedstawiony przez doktoranta temat jest sformułowany zgodnie z wymaganiami stawianymi pracom doktorskim. Doktorant wykazuje się dogłębną znajomością zarówno krajowej, jak i zagranicznej literatury związanej z analizowaną tematyką. Wśród autorów cytowanych publikacji można znaleźć uznanych autorytetów z zakresu badanej problematyki. Metody badawcze użyte przez Autora są odpowiednie dla prowadzonych badań. Doktorant sformułował cel pracy w sposób precyzyjny i zrealizował go w pełni. Zastosowane metody badawcze skutecznie umożliwiły osiągnięcie postawionego celu pracy.

Struktura pracy tworzy spójną i logiczną całość. Praca jest klarowna i przejrzysta dla czytelnika. Formalna struktura pracy doktorskiej została zachowana zgodnie z wymogami

edycji prac doktorskich. Poziom językowy i stylistyczny pracy jest poprawny. Myśli i rozważania są prezentowane w sposób jasny i zrozumiały, a specjalistyczne terminy zostały właściwie dobrane i wykorzystane.

Jako główne osiągnięcia Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy, moim zdaniem, wskazać:

1. Propozycję modyfikacji konfiguracji generatora syntetycznych dżetów z możliwością umieszczenia w jednej pionowej komorze jednej lub dwóch membran, które działają w trybie fazowym.
2. Przeprowadzenie badań zmodernizowanego syntetycznego generatora dżetów, które wnoszą nową wiedzę do tematu metod aktywnego sterowania przepływem.
3. Przeprowadzenie analizy numerycznej aktuatorów syntetycznych dżetów z wykorzystaniem modeli CFD

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny całej rozprawy. Doktorant zrealizował postawione sobie podstawowe cele, przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dla założonego celu **przeprowadzenia analizy wpływu aktywnych generatorów wirów syntetycznych dżetów na obszar oderwania.**

Autor rozprawy, mgr inż. Marcin Kurowski, wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie zagadnień mechaniki płynów, problematyki poprawy charakterystyk aerodynamicznych, badań eksperymentalnych oraz modelowania numerycznego turbulentnych przepływów płynu z zastosowaniem Komputerowej Mechaniki Płynów CFD, niezbędnych do przygotowania pracy doktorskiej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kurowskiego pt. „*Wpływ aktywnych generatorów wirów na obszar oderwania przepływu*” będąca przedmiotem recenzji i oceny, **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Mechaniczna wraz z umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

W oparciu o powyższe stawiam wniosek do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych PAN Gdańsku o dopuszczenie doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

