

Gliwice, 18.11.2024

Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Wróblewski
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska, Gliwice

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Karoliny Gajewskiej pod tytułem: „Sterowanie zjawiskiem oderwania warstwy przyściennej przy użyciu ciał nieoptywowych”

Opinia została przygotowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej (umowa o dzieło nr RN-UC-130/24 z dnia.05.11.2024).

1. Charakterystyka pracy

Recenzowana praca zawiera 140 stron tekstu podzielonego na 6 rozdziałów, spis oznaczeń, bibliografię oraz spis rysunków. Bibliografia obejmuje 154 pozycje, a w pracy zamieszczono 85 rysunków.

Praca doktorska mgr inż. Karoliny Gajewskiej „Sterowanie zjawiskiem oderwania warstwy przyściennej przy użyciu ciał nieoptywowych” prezentuje wyniki i wnioski z badań eksperymentalnych zjawisk zachodzących w przepływie wokół profilu NACA0012. Badania prowadzono w tunelu aerodynamicznym Katedry Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej z wykorzystaniem nowoczesnej techniki pomiarowej PIV.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie, w którym Autorka przedstawiła w zwięzły sposób informację o zawartości pracy. Podaje, co było przedmiotem badań oraz opisała ich zakres. Pod względem formalnym wprowadzenie bardziej ma formę streszczenia.

Rozdział drugi ma charakter podręcznikowy, w którym opisano rys historyczny i rodzaje turbin wiatrowych. Omówiono skrótowo formowanie się warstwy przyściennej na

profilu, zwracając uwagę na proces oderwania strugi oraz na możliwość sterowania warstwą przyścienną. Zagadnienie sterownia przepływem rozwinięto szerzej podając jego rodzaje wraz z ogólną charakterystyką i możliwymi aplikacjami. W tym zakresie dokonano dość szerokiego przeglądu literatury. Rozdział kończą definicje podstawowych współczynników aerodynamicznych.

W rozdziale trzecim podano cel i zakres pracy. Cel pracy został sformułowany jako „szczegółowa analiza wpływu mikrocyindra o zróżnicowanych kształtach przekroju na charakterystykę przepływu wokół symetrycznego profilu aerodynamicznego NACA 0012”. Choć formalnie można się spodziewać jaki problem naukowy będzie rozwiązywany, to takie sformułowanie jest jednak zbyt ogólne. Byłoby lepiej, gdyby cel był określony w formie tezy, jaką praca ma wykazać.

Rozdział czwarty poświęcono omówieniu technik pomiarowych zastosowanych do badań eksperymentalnych prowadzonych w pracy. Przedstawiono podstawowe informacje dotyczące różnych metod PIV oraz zasad prowadzenia pomiaru. Przedyskutowano niepewność uzyskiwanych wyników na stanowisku pomiarowym Katedry Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej, zarówno dla wielkości uzyskiwanych w pomiarze PIV jak i dla wielkości mierzonych wagą aerodynamiczną. Zaprezentowane wyniki wskazują, że zakresy niepewności są zadowalające. Zagadnienie analizy dokładności uzyskiwanych pomiarów dla profilu NACA, zamontowanym na stanowisku jest bardzo istotne dla uwiarygodnienia zastosowanej techniki pomiarowej oraz dla właściwej interpretacji wyników. Moim zdaniem, ten fragment pracy powinien być wydzielony i przeniesiony w miejsce w którym omawiane są wyniki oraz podawane są szczegóły geometryczne, to znaczy do Rozdziału V. Bez informacji, które podawane są w tym rozdziale trudno zorientować się w lokalizacji cylindra i położeniu linii 1-5. W ostatnim punkcie rozdziału podano ogólne informacje o tunelu aerodynamicznym, wybranych przyrządach pomiarowych oraz technice prowadzenia pomiarów.

W rozdziale piątym, który stanowi najważniejszą część pracy zaprezentowano i omówiono uzyskane wyniki badań eksperymentalnych. W pierwszej kolejności omówiono rozkłady parametrów uzyskane dla izolowanego profilu NACA 0012 dla różnych kątów natarcia oraz dla izolowanych cylindrów o różnych profilach. Szczegółowe

wyniki pomiarów dla profilu zaprezentowano dla kątów natarcia 13, 15, 17, 19deg. Pręty walcowe (cylindry) miały kształt profilu kołowego, kwadratowego oraz trójkątnego. Ten ostatni występował w trzech wersjach. Dla izolowanych prętów walcowych opisano niestacjonarne struktury przepływu uzyskane za pomocą techniki PIV. Następnie omówiono struktury przepływu uzyskane dla różnych konfiguracji profilu NACA oraz cylindrów. Ten podrozdział jest najobszerniejszy i został podzielony na kilka punktów. W pierwszym analizowano wpływ walca o przekroju kołowym na separację przepływu oraz parametry aerodynamiczne profilu NACA 0012. Zaproponowano i przebadano różne lokalizacje walca w okolicy krawędzi natarcia. Macierz lokalizacji walca zawierała dziewięć pozycji, a średnica względna walca zmieniała się od $d/c=0.005$ do 0.025 . W drugim analizowano to samo zagadnienie dla walców o przekroju niekołowym. W tym przypadku, kierując się uzyskanymi wcześniej wynikami, do badań wybrano dwa profile, kwadratowy i kołowy o wymiarze $d/c=0.015$, które umieszczano w trzech pozycjach przed profilem NACA na przedłużeniu jego cięciwy. Dla wszystkich przypadków przedstawiono kontury parametrów kinematycznych i rozkłady parametrów wzdłuż wybranych linii prostopadłych do powierzchni profilu. W dalszej części rozdziału V przeanalizowano problem lokalizacji oderwania strugi oraz przedstawiono wyniki pomiarów metodą wolumetryczną PIV w wybranej strefie zlokalizowanej w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi sptywu. Rozdział kończy się wnioskami z badań eksperymentalnych, który należy potraktować jako wnioski całej pracy.

Część opisową pracy kończy podsumowanie, w którym Doktorantka skupiła się głównie na wskazaniu potencjalnych obszarów zastosowania cylindrów w celu poprawy charakterystyki przepływu.

2. Uwagi ogólne

Badania prowadzone i opisane przez doktorantkę mają charakter badań eksperymentalnych zjawisk zachodzących w opływie ciała, czyli dotyczą problemów w obszarze mechaniki płynów. Wybrane przypadki przepływu ściśle odpowiadają problematyce, jaka rozwiązywana jest w procesach konstruowania i analizy różnego typu maszyn i urządzeń oraz w badaniach nad poprawą charakterystyk opływowych obiektów

poruszających się w płynie lub stacjonarnych omywanych płynem. Ten zakres tematyczny mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Zagadnienie opływu ciał jest z punktu widzenia przepływowego zagadnieniem złożonym, jeżeli chcemy je potraktować kompleksowo tzn. interesują nas różne warunki opływu. Mamy tu do czynienia ze strefami w których formuje się odpowiednio laminarna i turbulentna warstwa przyściennej, między którymi występuje strefa przejścia laminarno-turbulentnego. Mogą pojawiać się strefy oderwania strugi od powierzchni, powodujące formowanie się przepływu wstecznego. Strefa oderwania może być izolowana, gdy struga ponownie przylgnie do powierzchni. Implikacje takich zjawisk mogą być, z punktu widzenia technicznego, bardzo istotne dla efektywności maszyn, urządzeń czy dla działania obiektów technicznych. Coraz większe wymagania wytrzymałościowe, bezpieczeństwa oraz wydajnościowe powodują, że istnieje potrzeba coraz dokładniejszego poznania zjawisk przepływowych, aby zaproponować rozwiązania, które umożliwią kontrolę nad ich przebiegiem.

Praca doktorska mgr Karoliny Gajewskiej dobrze wpisuje się w to zapotrzebowanie, które również jest widoczne w aktualnie ukazujących się publikacjach naukowych. W pracy zaprezentowano podejście mające na celu zrozumienie złożonych zjawisk przepływowych poprzez dekonstrukcję omawianego problemu na podzbiór przypadków kanonicznych, takich jak: przepływ wokół izolowanego profilu, przepływ wokół izolowanego cylindra o różnym kształcie przekroju i wreszcie przepływ wokół profilu z interakcją z przepływem wokół cylindra w pobliżu przedniej krawędzi profilu. Doktorantka w swojej pracy zastosowała nowoczesną, zaawansowaną technikę pomiarową. Koncepcja zastosowana do badań oraz plan badań prawidłowo dopasowano do wyznaczonego celu.

Praca napisana jest poprawnie, Autorka sprawnie posługuje się nomenklaturą fachową. Prezentowane rysunki i schematy są staranne i dobrane we właściwy sposób do treści opisów. Układ pracy w swej strukturze jest poprawny, jednak kilka fragmentów opisów mogłoby być umieszczonych w bardziej odpowiednich miejscach. Informacje o stanowisku, ocenie niepewności czy przyrządach pomiarowych są wymieszane. Jest to uwaga bardziej techniczna, bo same opisy w pracy się znajdują, a ich rozmieszczenie jedynie utrudnia płynność czytania.

Opis tak obszernego zestawu wyników nie jest sprawą trywialną i można go zredagować na bardzo wiele sposobów. W pracy zastosowano koncepcję opisu w którym porównuje się kontury parametr (lub zestaw) po parametrze. To dla czytelnika jest bardzo schematyczne i utrudnia śledzenie zachodzących zjawisk. Budowanie narracji, w której temat struktury opływu profilu jest pierwszoplanowy byłoby bardziej przejrzyste. Można by pewne stwierdzenia na temat tego, co się dzieje w przepływie popierać ilustracjami różnych wielkości. Pozwoliłoby to również uniknąć powtórzeń.

Literatura jaką wykorzystano w pracy jest obszerna i obejmuje ważne i aktualne pozycje. Szkoda, jednak, że w analizie literatury nie uwzględniono publikacji wyników badań o sterowaniu przepływem prowadzonych w innych ośrodkach krajowych.

Przedstawione w pierwszej części informacje o podstawowych wielkościach do opisu zjawisk zachodzących w przepływie pozwalają na łatwiejsze śledzenie analiz omawianych w pracy. Pewne fragmenty opisów są jednak zbyt ogólne, bez istotnego związku z pracą, jak np. informacje o turbinach wiatrowych.

W pracy brakuje wyjaśnienia dotyczącego motywacji wyboru profilu, doboru jego parametrów geometrycznych i liczby Reynoldsa. Szczególnie widoczne jest to w kontekście rys.V.3 i jego opisu. Dane z literatury są dla innej liczby Re , a program XFOIL pokazuje na znaczne różnice. Należałoby sprawdzić jakie rozkłady daje program dla przytoczonych pomiarów z literatury dla $Re=100000$ i 120000 . Moim zdaniem brakuje dyskusji tych rozbieżności. Tym bardziej, że oderwanie wg eksperymentu przesuwana się w stronę większych kątów dla większych liczb Reynoldsa. Czy stosunek wymiaru kanału do wymiaru profilu może mieć na to wpływ? Opis w tekście stwierdza jedynie fakty, nie zawiera próby interpretacji.

Z poprzednią uwagą łączą się również pytania dotyczące Rys.IV.16 na którym pokazano obszar objęty badaniem. Czym kierowano się przy doborze tego obszaru, jakie były ograniczenia? Co zdecydowało, że nie obejmuje on całej powierzchni ciśnieniowej? Czy nie rozważano obserwacji dodatkowych obszarów, jak krawędź splotu czy strona ciśnieniowa?

Dość powszechne w opisie jest stwierdzenie, że nastąpiło pogorszenie, zwiększenie, zgodność jest mniejsza lub większa itp. W analizie wyników powinny pojawiać się

informacje zawierające wielkości liczbowe np. o ile procent, zmiana od wartości x1 do wartości x2 itp.

W badaniach opływu profilu w obecności cylindrów, umieszczanych przed profilem dochodzi do generacji sił poprzecznych działających na cylinder (jak pokazują to badania izolowanych cylindrów). Czy przy stosunkowo długim przecie nie wywoływało to jego drgań i ewentualnie, jak sobie z tym radzono.

W rozdziale piątym zaprezentowano szczegółowe wyniki pomiarów dla izolowanego profilu NACA dla kątów napływu 13,15,17,19deg. Z rys.V.3 wynika, że wykonywano też pomiary dla innych kątów. Nie ma na nim jednak wyników dla kąta 13deg i 19deg. Czy to wynika z faktu, że pomiary PIV i pomiary wagą aerodynamiczną były prowadzone niezależnie?

Prezentowane wykresy rozkładów parametrów w kierunku y_{prim} zaczynają się od zera. Wiadomo, że pomiar dokonywany jest w pobliżu ściany. Wydaje mi się, że powinno to się uwzględnić na rysunkach. z założenia na ścianie prędkość powinna być równa zero i wykres powinien to pokazywać. Nie znalazłem rzeczywistych wartości odległości od ściany, w których dokonywany był pomiar. Duże wartości prędkości dla niektórych rozkładów sugerują, że ta odległość mogła być znaczna.

Podpunkt V.3.4 - Opis przedmiotu badań metodą objętościową PIV jest bardzo skromny. Nie podano dlaczego wybrano ten fragment przestrzeni, jakie są ograniczenia w wyborze objętości itp. Trochę nieszczęśliwie się złożyło, że analizowany fragment nie pokrywa się z fragmentem badanym za pomocą dwuwymiarowego PIV. Można przypuszczać, że bardziej chodziło o przetestowanie możliwości metody i opanowanie techniki pomiarowej dla dalszych pogłębionych badań.

Podsumowując uwagi ogólne można stwierdzić, że zastosowany przez Doktorantkę układ pracy, mimo, wymienionych uwag, pozwala prześledzić metodologię i wyniki badań. Moim zdaniem praca ma wiele walorów poznawczych w zakresie mechaniki płynów a szczególnie aerodynamiki. Problem naukowy jaki analizowała Doktorantka jest ważny z praktycznego punktu widzenia, gdyż wskazuje metodę skutecznego postępowania mającego na celu zmianę charakterystyki przepływowej profilu NACA0012. Kompleksowe i systematyczne analizy pozwalają widzieć w prezentowanych

wynikach wartościowy materiał służący do walidacji metod numerycznych opisu przepływu. Poziom merytoryczny pracy i uzyskane wyniki oceniam jako odpowiedni dla pracy doktorskiej.

3. Uwagi szczegółowe

W czasie czytania pracy pojawiło się kilka wątpliwości, które wymagałyby wyjaśnienia oraz zauważyłem kilka pomyłek i nieścisłości:

Co było podstawą zastosowania nazwy „mikrocylinder”?

Str.19 - Ślad jest burzliwy a nie wzburzony. W tym kontekście słowa burzliwy i turbulentny należy traktować jako synonimy, więc umieszczanie ich obok siebie jest niepotrzebne.

Str.19 - Płyn raczej się odrywa niż odłącza.

Str.20 - Raczej linie prądu oddalają się od powierzchni ciała niż opuszczają ciało

Str.21, przedostatni akapit. Chyba powinno być: F-104 firmy Lockheed oraz MIG-21

Str.22 - Raz w opisie jest natrysk, a raz nadmuch.

Str. 24 – Co to jest skala długości lepkiej?

Str. 24, ostatnie zdanie. To zdanie jest niejasne.

Str. 26, linia 9 od dołu. Niejasne zdanie

Str.31 - W turbinie ważna jest prędkość względna, która zależy od prędkości wirowania. Liczba Macha w tym kontekście powinna być oceniona dla prędkości względnej a nie prędkości wiatru.

Rys.V.1. i inne – Szkoda, że nie zdecydowano się na dodanie do rozkładów i konturów rozkładu modułu prędkości. Intencja podawania składowych jest jasna ale dla interpretacji opływu jest bardziej intuicyjna.

Str.59/60 - Dlaczego rozkłady porównuje się z wynikami dla różnych liczb Reynoldsa?

Rys.V.7 - Należałoby wyjaśnić dlaczego, jak wynika z opisu, porównuje się wyniki dla kąta 45deg z wynikami dla kąta 60deg z literatury skoro przypadek 60deg też był mierzony?

Str.68 - Opis rys.V.13. Obszar objęty analizą nie obejmuje całego profilu. Czy mamy pewność, że dla p2 nie ma oderwania w pobliżu krawędzi spływu?

Str.70, przedostatni akapit. Omawiany przepływ jest turbulentny, więc używanie w opisie stwierdzenia, że przepływ jest bardziej laminarny nie jest właściwe.

Str.79, druga linia. Zamiast V.22, powinien być V.21.

Str.83, ostatni akapit. Błędne odniesienie do rysunku w opisie.

Str.87 opis - Na rys.V.33 widać, że linia referencyjna dla CL leży w większości powyżej pozostałych przypadków. Ze względu na małe różnice w wartościach CL trudno jest wnioskować na temat tendencji. Bardziej widoczne są różnice w CD, szczególnie dla dużych kątów. Wyjaśnienia wymagałaby charakterystyka dla $d/c = 0.015$ i L1p4 która odbiega od tendencji zmian w pozostałych przypadkach. Rys.V.34 - Czym można wytłumaczyć bardzo znaczne zmiany w charakterystyce dla $d/c=0.005$ i L2p3 oraz L2p4. Porównanie rozkładów na rys. V.24 nie daje podstaw do wyjaśnienia takich różnic.

Rys.V35 i V.36 - w opisie podano, że w większości przypadków następował wzrost wartości L/D dla mikrocyldrów. Wydaje się że sytuacja jest bardziej złożona. Maksymalne wartości są dla przypadku bez mikrocyindra (szczególnie dla L1), natomiast charakterystyki dla mikrocyindra w p1 są bardziej płaskie.

Rozdział V.3.2. Analiza wpływu mikrocyindra o przekroju niecyndrycznym.... Tytuł rozdziału nie jest prawidłowy bo analizowane kształty są cylindryczne (walcowe) ale o profilu niekołowym.

Str.91. - Jakie względy techniczne, co podano w tekście, zdecydowały że wybrano do porównań cylinder o $d/c=0.015$?

Wzór V.2 - Gdy w konfiguracji referencyjnej jest oderwanie a z mikrocyldrami nie ma, to A_c wynosi 0. Czy możliwa jest sytuacja odwrotna? Czy 'brak oderwania' na rysunkach oznacza $A_c=0$ czy również to, że nie ma oderwania i go nie było, co daje $A_c=0/0$? Nie podano, w jaki sposób określano powierzchnię obejmującą oderwanie. Z pewnością wymagało to oszacowania położenia punktu oderwania. Wydaje się, że lokalizacja tego punktu byłaby wystarczającym parametrem do opisu zjawiska.

Podsumowanie - W stwierdzeniu, że cylindry "stabilizują przepływ powietrza wokół profilu, umożliwiając dłuższe utrzymanie laminarnych warstw przyściennych" chodziło o warstwę laminarną czy o oderwanie. Skąd wiadomo, że warstwa przyścienna była laminarna?

4. Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że temat podjęty przez mgr inż. Karolinę Gajewską jest tematem aktualnym i ważnym z punktu widzenia aerodynamiki i generalnie mechaniki płynów.

Doktorantka osiągnęła postawiony w pracy podstawowy cel stosując zaawansowane narzędzia eksperymentalne. Wykazała się umiejętnością analizy wyników i formułowania wniosków. W swojej pracy wykazała znajomość badanych zagadnień. Uzyskane wyniki można uznać za wartościowe pod względem naukowym. Rejestracja i szczegółowa analiza struktur przepływowych dla różnych konfiguracji geometrycznych opływu profilu stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe pracy. Wyniki pracy mogą być wykorzystane przy planowaniu sposobu kontroli opływu ciał oraz mogą być wartościowe do walidacji różnych modeli symulacji przepływów.

Przedstawione w recenzji uwagi dotyczą w części strony redakcyjnej pracy, co oczywiście mieści się w zakresie dyskusji jaka forma jest najlepsza, w części mają na celu zwrócenie uwagi na szczegóły, których wyjaśnienie poprawiłoby jakość pracy. Nie zmniejsza to jednak wartości jej końcowego wyniku naukowego.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do opinii praca doktorska mgr inż. Karoliny Gajewskiej spełnia wymagania ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 ze zm.) i może stanowić podstawę do przeprowadzenia postępowania o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.