

Wrocław 9.01.2025

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Karoliny Gajewskiej

pt. "Sterowanie zjawiskiem oderwania warstwy przyściennej przy użyciu ciał nieopływowych"

Informacje ogólne

Przedstawiona mi do recenzji praca doktorska dotyczy badań przepływu wokół ciał opływowych i nieopływowych. Przedmiotem badań jest symetryczny profil NACA0012 oraz zjawisko oderwania warstwy przyściennej przy określonych kątach natarcia. Doktorantka skupiła się na badaniu wpływu dodatkowego elementu, zwanego w pracy mikrocyndrem, który umieszczony w otoczeniu czoła opływanego obiektu powoduje zmiany jego charakterystyki hydrodynamicznej. Jest to ciekawy obszar badań, z potencjałem na praktyczne zastosowanie. Badania są eksperymentalne. Analiza wyników pomiarów podparta jest oprogramowaniem zewnętrznym. W pracy wykorzystane są metody PIV, PIV3D oraz waga aerodynamiczna.

Dorobek naukowy

Wyniki naukowe doktorantki zostały opublikowane w czasopiśmie recenzowanym: jedna publikacja w Journal of Fluid and Structures z roku 2024 za 140pkt, Impact Factor 3.4. Z pozostałych trzech publikacji dwie to publikacje w Acta Physica

Polonica A za 70pkt i IF 0.5 oraz jedna w Journal of Physics: Conference Series za 40 pkt – wszystkie trzy są publikacjami pokonferencyjnymi. W dwóch, z wymienionych wyżej prac, doktorantka jest pierwszą autorką, co wskazuje na jej wiodący wkład w pracę (lista autorów nie jest alfabetyczna).

Struktura pracy

Praca ma charakter obszernego tekstu naukowego ze wstępem, opisem eksperymentu, wynikami pracy naukowej oraz ich analizą. Praca liczy 140 stron, w tym wstęp, opis badań eksperymentalnych, podsumowanie oraz bogatą bibliografię (154 pozycje). Praca ma odpowiednią strukturę dla pracy naukowej. Znalazły się tu zarówno ogólne wprowadzenie, przegląd literatury, opis symboli, zdefiniowany został cel i zakres pracy, przedstawione zostały podstawy działania użytych technik pomiarowych oraz samo stanowisko badawcze, a w jednej z ostatnich części wyniki badań eksperymentalnych wraz z ich analizą oraz podsumowanie.

Skład i język

Praca złożona jest w miarę poprawnie, chociaż najprawdopodobniej wykorzystany został tu program Word. Wydaje mi się, że użycie LaTeX dałoby tutaj dużo, jeśli chodzi o styl dokumentu oraz zaoszczędziłoby pewnie wiele niepotrzebnej pracy dyplomantce. Na przykład, nie rozumiem po co numerować ilustracje w taki sposób, aby zawęzać numer ilustracji do rozdziału. Czytanie dokumentu i szukanie ilustracji jest przez to utrudnione. LaTeX również zadbałby o to, aby ilustracje znajdowały się najbliżej pierwszego cytowania (i działałoby się to automatycznie). Od strony 56 rozpoczyna się bowiem problem ze składem, który polega na tym, że rysunki są o stronę dalej, niż tekst, który je opisuje. To bardzo utrudnia czytanie pracy.

Praca jest napisana poprawnym językiem polskim. Stosowana jest poprawna terminologia naukowa. Nie znalazłem zbyt wielu literówek i z obowiązku wymienię drobne błędy: str. 2, niekonsekwentna kropka w podziękowaniach, str. 38 brak nawiasu (druga linia od dołu strony), literówka: “mikrocylindery”, str. 62, mała litera “energia” w pierwszym zdaniu, strona 99. W drugim paragrafie na stronie 34 niekonsekwentnie stosowany jest zapis technik w języku angielskim - inaczej zapisane są skróty dla różnych metod badawczych.

Ocena pracy

Tematyka pracy badawczej doktorantki jest dla mnie ciekawa i moim zdaniem ważna. Badania eksperymentalne mają walor praktyczny i pozwalają badać zjawiska często niedostępne dla metod numerycznych, których sam używam w swojej pracy. Praca dotyczy badań nad opływem obiektów, które stosowane są na przykład w przemyśle lotniczym czy w turbinach wiatrowych dla których istotne są ich właściwości hydrodynamiczne - takie jak opór czy siła nośna.

Do pracy napisane zostało zbyt rozbudowane i szczegółowe streszczenie, które przez to nie spełnia swojej roli. Przykładowym problemem jest definiowanie tu różnych wielkości, które w powinny być zdefiniowane dopiero w części właściwej pracy, podawanie wymiarów i innych szczegółowych informacji dotyczących wielkości badanych w pracy, jak również rozbudowany wstęp oraz podsumowanie. Zastanawiam się czy systemy archiwizacji prac dyplomowych dopuszczają tak rozbudowane streszczenie w całości?

W pracy wielokrotnie powtarzają się stwierdzenia typu: skupiono, potwierdzono, przebadano itd. Przez to dość trudno jest ocenić wkład doktorantki. Wolałbym pierwszą osobę liczby pojedynczej tam, gdzie doktorantka dokonała wyboru lub wykonała jakieś badanie i pracę. Nie wiem, czy zakres pracy doktorantki obejmuje też przygotowywanie koncepcji na stworzenie stanowisk pomiarowych, czy stanowiska pomiarowe były już gotowe? Czy pomysł na takie a nie inne umieszczenie cylindrów jest jej, czy to ona wymyśliła, aby cylindry były kształtu okrągłego trójkątnego i kwadratowego? **Proszę zatem o krótkie podsumowanie wkładu doktorantki w przeprowadzone badania i napisane prace.**

Rozdział drugi, zatytułowany przeglądem literatury, nie ma ani jednej referencji na pierwszych dwóch stronach. Czytając je, widzę wiele miejsc, w których te referencje powinny się znaleźć. Pierwsza pojawia się dopiero na stronie 16 i to w połowie paragrafu, w kontekście historycznym dotyczącym starodawnych struktur wiatrakowych (opis historii turbin wiatrowych sam w sobie jest bardzo ciekawy).

W rozprawie znajdują się rysunki i schematy pobrane bezpośrednio z innych opracowań (głównie w jej początkowej części). Pomimo tego, że doktorantka podaje tutaj referencje, nie uważam tego za dobrą praktykę. Z reguły tego typu schematy

zawierają jakieś dodatkowe elementy informacji wcale niekoniecznie potrzebne przy czytaniu konkretnego tekstu. Rysunek II.3 przedstawia profil niesymetryczny – jest to schemat zaczerpnięty z książki i nie jest on spójny z założeniami poczynionymi już na etapie streszczenia, gdzie była mowa o profilu symetrycznym. **Jaka była motywacja do użycia w badaniach profilu NACA0012 i czy dyplomantka rozważała zbadanie profilu niesymetrycznego?**

Na rysunku II.4 znajduje się wizualizacja przepływu, w którym widać wyraźnie oderwanie się warstwy przyściennej za przeszkodami oraz za wzniesieniem. W jakim sensie (podpis do rysunku II.4) oddzielenie się warstwy przyściennej jest tu związane z dodatnim gradientem ciśnienia, a nie np. zwiększoną prędkością przepływu i tym samym liczbą Reynoldsa? O jaki gradient ciśnienia tu chodzi? Na rysunku II.6 profile dobrane są w taki sposób, że wydaje się jakby różniły się kształtem i rozmiarem, a do tego przepływ może być tutaj w innych warunkach. Czy w obu przypadkach liczba Reynoldsa jest taka sama? Nie widzę dużej różnicy w kącie natarcia obu profili przedstawionych na tych rysunkach - ile one wynoszą w obu przypadkach? Na rysunku 2.12 znajduje się określenie punkt stagnacji, o którym nie ma ani słowa w opisie tekstowym.

Moją uwagę zwrócił opis pasywnego sterowania przepływem i koncepcja wykorzystania chropowatości powierzchni. Nie znam tych technik, ale może istnieją w omawianej dziedzinie koncepcje użycia struktur porowatych, które mogłyby rozpraszać energię w okolicy powierzchni ciał opływanych? Być może tego typu badania dałoby się wykonać nawet z wykorzystaniem istniejącego stanowiska badawczego - z wykorzystaniem większej ilości cylindrów na raz na czele takiego profilu?

Rozdział trzeci przedstawia cel i zakres pracy. Wskazane są tutaj badania nad profilem NACA0012 dla liczby $Re=66400$. **Czy celem głównym pracy było obniżenie oporu albo zwiększenie siły nośnej lub jakiegoś innego współczynnika dotyczącego badanego profilu?** Doktorantka wskazuje potencjalne zastosowanie omawianej modyfikacji w praktycznych rozwiązaniach, nie definiując dokładnie jakiego typu parametr jest tutaj kluczowy, aby tego typu techniki były stosowane w praktycznych rozwiązaniach inżynierskich. Na podstawie

przedstawionych wyników badań - czy i który badany układ ma największe szanse na potencjalne zastosowanie?

W rozdziale 4.1 omawiana jest technika Particle Image Velocimetry (PIV). Doktorantka pisze, że technika ta polega na porównaniu dwóch kolejnych obrazów zarejestrowanych cząstek i że kluczową rolę odgrywa tu czas między ich wykonaniem. W tym samym rozdziale omawiany jest algorytm FFT (szybkiej transformaty Fouriera) jako droga do uzyskania przemieszczeń cząsteczek. **Proszę krótkie o wyjaśnienie, jak działa w tym kontekście ten algorytm.**

Doktorantka do swojej pracy i analizy wyników używa programów zewnętrznych. W tym kontekście wspomniany jest między innymi program Dante Dynamics oraz XFOIL. Niestety brakuje jakiegokolwiek opisu tego oprogramowania - kto go stworzył, na jakiej on jest licencji, czego dokładnie dotyczy, jakimi technikami i algorytmami operuje i jakie wyniki można nim uzyskać. **Proszę zatem o krótką charakterystykę wszystkich narzędzi użytych w rozprawie. Przy okazji, gdzieś umknęła mi informacja - jakie oprogramowanie zostało użyte do wizualizacji, wykresów i linii prądu w rozprawie?**

Na stronie 42 zdefiniowana został wzór na energię kinetyczną turbulencji. Jak wybierane były tutaj wielkości do normalizacji oraz jak wielkość ta była wyznaczona z otrzymanych pól prędkości z eksperymentów? **Czy wyniki w pracy były uśredniane po niezależnych eksperymentach albo w czasie?**

Na rysunku 4.9 przedstawione są wyniki testów w zakresie niepewności pomiarowej dla profilu z mikrocyldrem o przekroju kołowym. Wydaje mi się ciekawym wynikiem, że obszarze dużych kątów natarcia można zauważyć spowolnienie wzrostu współczynnika oporu z charakterystycznym punktem przegięcia.

Na rysunku 4.10 przedstawiony jest schemat tunelu aerodynamicznego w obiegu otwartym użyty do badań. Schemat jest narysowany porządnie, opisane są wszystkie jego elementy. W opisie eksperymentów wskazane jest, że cząsteczkami znacznikowymi były krople oleju o wielkości około 1 mikrometra.

Na rysunkach 4.15 oraz 4.14 zaznaczone są najważniejsze elementy systemu pomiarowego dotyczące samego płata oraz montażu mikrocyldrów. Na ile ważne w

badaniach jest tutaj uwzględnienie trzeciego wymiaru (być może podobne wyniki dałoby tutaj zbadanie przekroju 2D)? Patrząc na sam obiekt badań oraz sposób montażu mikrocyldrów nasuwa się pomysł, aby zamontować ich kilka i zbadać wpływ takiego bardziej skomplikowanego układu na współczynniki oporu oraz siły nośnej.

W rozdziale 5. rozpoczyna się prezentacja wyników badań eksperymentalnych. Doktorantka zdecydowała się tutaj na ograniczenie liczby Reynoldsa do 10000 dla ciał nieopływowych. **Dlaczego nie przeprowadzono badań dla $Re=66400$?**

Na rysunku 5.2 przedstawiono jest ewolucja wirowości dla wybranych kątów natarcia. Widać wyraźnie, że zwiększenie kąta natarcia wiąże się ze zwiększoną wirowością. Opierając się na tym wyniku wybór 17 stopni jako kąta do dalszych badań uważam za poprawny. Wyniki działania programu XFOIL na danych zmierzonych przez dyplomantkę znajdują się na kolejnych rysunkach w tym rozdziale. Na rysunku 5.3 wyniki wskazują na ogromną różnicę pomiędzy badaniami własnymi oraz badaniami programu XFOIL. **Skąd mogą wynikać te różnice? Dlaczego zgodność siły nośnej z pomiarów dla $Re=66400$ w porównaniu z XFOIL jest lepsza dla większych kątów natarcia?**

Rysunek 5.3 nie jest poprawnie opisany. Powinien zawierać informację o znaczeniu wzoru linii w podpisie. Rysunek 5.4 ma błędny opis. Nie przedstawia on jedynie map konturowych, a również linie prądu w przepływie przez układ z ciałami nieopływowymi. Najciekawszy wydaje mi się tu szeroki profil prędkości powstający za przeszkodą kwadratową. Jest to szczególnie istotne w kontekście dalszych badań, gdzie właśnie profile kwadratowe mikrocyldrów wskazują na ich wyjątkowe właściwości.

Na wykresie 5.7 zamieszczone zostało porównanie wyników badań własnych opływu cylindra o przekroju trójkątnym i kącie wierzchołkowym 45 stopni z wynikami literaturowymi. Niestety, pomieszane tu zostały różne właściwości. Badania własne doktorantki w zakresie liczby $Re=10000$ zostały porównane albo z wynikami podobnego opływu dla liczby $Re=520$ albo z wynikami dla zbliżonej liczby $Re=11600$, ale za to niezgodnym kątem rozwarcia przeszkody (60 stopni w porównaniu do 45 stopni). Porównywanie wyników z referencji [125] i [129] ze sobą

nie może dawać jednoznacznej odpowiedzi, że różnice są efektem tylko liczby Reynoldsa, ponieważ może być to również po prostu różnica w kącie rozwarcia przeszkody. Na przykład rysunek 5.8 wskazuje, że liczba Reynoldsa nie ma wpływu na otrzymywanie prędkości wzdłużnej. **Proszę o wyjaśnienie co doktorantka miała na myśli pisząc, że przepływ jest bardziej rozproszony (strona 60 u dołu)?**

Ciekawym wynikiem wydaje mi się rysunek 5.9 oraz tabela V.1 na których widać wyraźnie, że wyniki dla przeszkody kwadratowej odstają najbardziej. **Co takiego wyjątkowego może być w przeszkodzie kwadratowej, że tak wyraźnie odstaje od innych, jeśli jest użyta jako mikrocyylinder?**

Dopiero na stronie 67 znalazłem rysunek ze schematem profilu użytego do eksperymentu. Czy znane są badania podsumowujące np. wytrzymałość takiej konstrukcji? Ma to szczególne znaczenie w kontekście obserwacji, z której wynika, że zbliżanie mikrocyindra do płatu polepsza jego właściwości.

Obserwując pierwsze wyniki z mikrocyindrami zaprezentowane na rysunku 5.13 i dalszych narzuca się pytanie o definicję liczby Reynoldsa. Czy do liczby Re wzięta została wzdłużna czy poprzeczna długość profilu i jak na tę wielkość wpływa dodanie mikrocyindra?

Zastanawia mnie, że na wykresach które znajdują się w tym rozdziale z wynikami eksperymentalnymi nigdzie nie widać profilu cylindra. Co więcej, na mapach konturowych 5.15 wokół obszarów, gdzie znajduje się cylinder w ogóle nie ma wyników. To może być mylące i zaburzyć obraz całości - być może tam znajdują się jakieś obszary recyrkulacji? Po raz kolejny pojawia się to pytanie o definicję liczby Reynoldsa, ponieważ mikrocyylinder jest bardzo mały w porównaniu do płata. Może dałoby się postawić pytanie w ten sposób: jaka liczba Reynoldsa efektywnie powinna opisywać opływ wokół małego mikrocyindra, jeśli dla płata jest to $Re=66400$? Czy z tej informacji, znając właściwości hydrodynamiczne ciał nieopływowych, możemy się spodziewać efektów recyrkulacji za samym mikrocyindrem czy może tam przepływ będzie tam z definicji laminarny?

Badania opływu profili dla różnych wielkości, kształtów oraz ułożeń mikrocyldrów są bardzo szerokie i trudno tutaj wyróżnić jeden wynik. Bardzo ciekawe wydaje się porównanie wyników na rysunku 5.23 i 5.24, gdzie przedstawione są mapy konturowe ewolucji wirowości dla liczby $Re=66400$ w dwóch przypadkach - dla lokalizacji na linii L2 oraz dla lokalizacji na linii L1 (chodzi o mikrocyliner kołowy). Widać tutaj wyraźnie, że umieszczenie mikrocyindra na linii L1 potrafi zredukować wirowość za profilem w przypadkach umieszczenia na liniach P1 oraz P2 tylko w przypadku L1. To ciekawa i wartościowa obserwacja. W ogólności na wielu wynikach widać, że wirowość na wykresach wykazuje duże zmiany strukturalne w małych skalach, a wiry z wizualizacji liniami prądu są raczej duże i wyglądają na stabilne.

Proszę o dokładniejsze wyjaśnienie co dokładnie widzimy na obu wizualizacjach?

Na wykresach na rysunku 5.33 przedstawione są wyniki współczynników siły nośnej i oporu dla przypadków z cylindrami i bez nich. Dla dużych kątów natarcia oraz pozycji P1 oraz P4 duży efekt osiąga się zmieniając promień mikrocyindra. Być może tu warto byłoby powtórzyć wyniki dokładniej dla szerszego zakresu promienia mikrocyindra i zaprezentować je w funkcji jego promienia. Wyniki z rysunku 5.34 dla linii L2 wskazują nawet, że efekt ten może być nieliniowy.

Na rysunku 5.37 przedstawione są wyniki dla różnych profili i tu znów ciekawe wydaje się to, że profil kwadratowy daje odmienne wyniki (powtarza się znów na rysunku 5.38 i 5.39). Wyniki potwierdzają też, że zbliżanie się mikrocyindra do powierzchni profilu płata powoduje zmniejszenie śladu za profilem. Czy nie można byłoby tego ekstrapolować dalej i na przykład doczepić mikrocyliner do czoła profilu NACA?

Wyniki przedstawione na rysunku 5.50, czyli wartości pola powierzchni oderwania warstwy przyściennej są bardzo ciekawe. Szkoda, że tak dokładnych wyników nie ma dla profili kwadratowych i trójkątnych. Jest to szczególnie interesujące w kontekście rysunku 5.51 gdzie wyraźnie profil kwadratowy ma tutaj przewagę nad resztą w przypadku linii L2 i pozycji P2.

W podrozdziale V.3.4 przedstawiona jest technika trójwymiarowego PIV, która jest bardzo interesująca. Nie ma tu informacji o tym, kto zbudował stanowisko

pomiarowe oraz jaką rolę w pomiarach wykonała doktorantka. Z wykresów na rysunkach 5.53 i 5.54 widzę, że doktorantce udało się uchwycić redukcję struktur wirowych z mikrocyndrem, ale nie wiem jaki jest rozmiar obserwowanego pola prędkości. **Nie widzę tutaj np. geometrii profilu. Domyślam się, że jest to jakiś wycinek układu, ale jakiej wielkości?**

Na stronie 116 doktorantka pisze, że wyniki uzyskane na tym etapie były kluczowe dla dalszych badań nad optymalizacją geometrii mikroturbulatorów. Które wyniki z przedstawionych badań zostały wykorzystane w optymalizacji geometrii mikroturbulatorów?

Podsumowanie

Przedmiot rozprawy doktorskiej i omówione w rozprawie wyniki są oryginalnym rozwiązaniem postawionego problemu naukowego. Składające się na rozprawę prace naukowe, w których doktorantka wykazała wiodący udział (niektóre z nich z pierwszeństwem autorstwa) zawierają oryginalne wyniki badań. Moja konkluzja na temat pracy jest pozytywna - spełnia ona wymagania Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. Wnoszę o dopuszczenie doktorantki do dalszych etapów postępowania w celu nadania jej stopnia naukowego doktora w dyscyplinie inżynierii mechanicznej.

dr hab. Maciej Matyka, prof. UWr
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki i Astronomii
Uniwersytet Wrocławski