

Politechnika Lubelska

Wydział Budownictwa i Architektury

Katedra Mechaniki Budowli

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Karoliny Gajewskiej

Sterowanie zjawiskiem oderwania warstwy przyściennej przy użyciu ciał nieopływowych

1. Podstawa formalna wykonania recenzji

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej, na podstawie Umowy o dzieło nr RN-UC-129/24 z 5 listopada 2024 r. i w odniesieniu do zapisów Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 poz. 742 z późn. zm.).

2. Przedmiot i cel recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pani mgr inż. Karoliny Gajewskiej pt. „***Sterowanie zjawiskiem oderwania warstwy przyściennej przy użyciu ciał nieopływowych***”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Renata Gnatowska, prof. uczelni, promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Paweł Niegodajew, prof. uczelni.

Ocena rozprawy została przeprowadzona w odniesieniu do wymagań Ustawy, w tym przede wszystkim: *Art. 187. 1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej. 2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.*

3. Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska liczy 140 stron i składa się z sześciu rozdziałów poprzedzonych zestawieniem dorobku naukowego Autorki, spisem treści, abstraktem w języku angielskim i streszczeniem w języku polskim oraz wykazem symboli i skrótów. Zasadnicza część rozprawy kończy się spisem rysunków, których jest 85 i bibliografią zawierającą 154 pozycje, w tym trzy w języku polskim i pozostałe w języku angielskim. Przeważająca większość cytowanych pozycji to artykuły, których

aktualność jest zadowalająca. 82 cytowane artykuły i książki zostały opublikowane po 2015 r, w tym 31 po 2020 r.

Rozdział I "Wprowadzenie" krótko opisuje przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym eksperymenty.

Rozdział II to przegląd literatury w zakresie opływu wokół ciał opływowych jakimi są profile używane w lotnictwie i w turbinach wiatrowych. Doktorantka przedstawiła to zagadnienie na przykładzie turbin wiatrowych. W dalszej części wyjaśnione zostały podstawowe zagadnienia dotyczące warstwy przyściennej, jej separacji oraz aktywnych i pasywnych metod sterowania przepływem wokół ciał opływowych. W kontekście badań opisanych w dalszej części rozprawy wyjaśniono interpretacje siły aerodynamicznej nośnej i oporu oraz momentu aerodynamicznego działających na analizowany przekrój i sposób liczenia współczynników tych wielkości.

W rozdziale III sformułowano cel pracy. Ten rozdział zastępuje sformułowanie problemu naukowego lub tezy albo tez.

Rozdział IV stanowi wstęp do wykonanych badań i zawiera opis metod badawczych zastosowanych w eksperymencie, a mianowicie: pomiaru metodą Particle Image Velocimetry (PIV) i z wykorzystaniem dwuskładnikowej wagi aerodynamicznej. Doktorantka oszacowała niepewność pomiaru wykonanego objętości metodami i opisała przygotowane stanowisko badawcze.

Zasadnicza i najobszerniejsza część rozprawy jest przedstawiona w rozdziale V zawierającym wyniki badań eksperymentalnych dotyczących opływu wokół profilu NACA0012, wokół mikrocyldrów o różnych kształtach oraz profilu NACA0012 z dołączonym od strony nawietrznej mikrocyldrem, w różnych wariantach kształtu, odległości i przesunięcia względem krawędzi nawietrznej NACA.

Rozdział VI zawiera krótkie podsumowanie przeprowadzonych eksperymentów.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Ogólny układ pracy oceniam pozytywnie, przy czym w dalszej części recenzji podałem szereg uwag dotyczących tego układu.

Przegląd literatury jest wystarczająco rozwinięty i aktualny. Oczywiście można dyskutować na temat doboru problemów przedstawionych w przeglądzie, ale jest to subiektywny wybór dokonany przez Doktorantkę i Promotorów. Doktorantka skupiła się na opisie opływu wokół przekroju opływowego stosowanego przede wszystkim w lotnictwie i w turbinach wiatrowych. Opisała opływ wokół takiego przekroju definiując pojęcie warstwy przyściennej, przepływu laminarnego i turbulentnego, oderwania i ponownego przylegania warstwy przyściennej do

przekroju. Opisała również sposoby sterowania warstwą przyścienną, począwszy od metody wprowadzonej przez Prandtla i przez lata rozwijanej. Krótko przytoczyła sposoby aktywnego i pasywnego sterowania opływem mające na celu przesunięcie punktu oderwania warstwy przyściennej, które prowadzić ma do zwiększenia siły nośnej, przy równoczesnej redukcji siły oporu. Skupiła się głównie na sposobach pasywnych, bo takie też zastosowała we własnym eksperymencie. W szczególności przedstawiła: różne sposoby modyfikacji chropowatości powierzchni opływającego ciała, w tym za pomocą generatorów wirów, klapy Gurneya montowane na krawędzi zawietrznej przekroju oraz wprowadzenie od strony nawietrznej dodatkowych elementów pozwalających na sterowanie opływem. Wskazała problemy występujące przy opływie ciał nieopływowych, które dotyczą obiektów realizowanych głównie w inżynierii lądowej. Warto podkreślić, że Doktorantka zwróciła uwagę na wpływ liczby Reynoldsa na charakter przepływu, co wiąże się z koniecznością stosowania różnych rozwiązań zależnych od specyfiki wykorzystania danego przekroju w praktycznych zastosowaniach. Na podstawie przeglądu rozwiązań wykorzystywanych w sterowaniu przepływem wokół ciał opływowych Doktorantka zidentyfikowała zagadnienie badawcze, którego opisu podjęła się w dalszej części rozprawy. Podsumowując tę część, przegląd literatury uważam za wystarczający i pozwalający Autorce na zaplanowanie własnego eksperymentu.

Cel pracy został przedstawiony w sposób jasny i jest to "szczegółowa analiza wpływu mikrocyindra o zróżnicowanych kształtach przekroju na charakterystykę przepływu wokół symetrycznego profilu aerodynamicznego NACA0012".

Doktorantka opisała wykorzystane techniki pomiarowe. Pierwszą z nich jest PIV. W tym zakresie oszacowała niepewność pomiarów wykorzystując profile unormowanej składowej podłużnej średniej prędkości przepływu zmierzonej w pięciu lokalizacjach pod dolną powierzchnią przekroju NACA. Badania PIV zostały również zweryfikowane za pomocą pomiarów termooanemometrem. Doktorantka dość dużo miejsca poświęciła opisowi postępowania w programie DANTEC DYNAMICS umożliwiającym wyznaczenie składowej wzdłużnej prędkości średniej U_x , składowej poprzecznej prędkości średniej U_y oraz energii kinetycznej turbulencji TKE. Drugi rodzaj badań przeprowadzono wykorzystując wagę aerodynamiczną dwuskładnikową, pozwalającą zmierzyć dwie składowe siły aerodynamicznej działającej na cały analizowany model, a mianowicie siłę oporu i siłę nośną i w konsekwencji określić efektywność aerodynamiczną. W przypadku tych badań również została określona niepewność pomiaru. Po przedstawieniu technik pomiarowych i oszacowaniu niepewności pomiarów, Doktorantka opisała stanowiska badawcze przygotowane w Laboratorium Aerodynamiki Środowiska Katedry Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej, na których

wykonała pomiary. Przedstawiła problemy, które napotkała w fazie wstępnej eksperymentu dotyczące przestrzeni pomiarowej tunelu, materiału, z którego wykonano model, rozbłysku na powierzchni modelu oraz mocowania mikrocyldrów do przekroju NACA. Podsumowując tę część, uważam że założenia dotyczące przeprowadzonych eksperymentów zostały przedstawione w sposób klarowny, a uwagi krytyczne, które mi się nasunęły przedstawiłem w dalszej części recenzji. Najobszerniejsza część pracy zawiera opis przeprowadzonych eksperymentów. Całość badań dotyczyła przekroju NACA0012 i tego samego przekroju wraz z modyfikacjami mającymi zwiększyć jego stabilność aerodynamiczną. Doktorantka wykonała następujące eksperymenty:

- badanie przepływu wokół NACA0012, dla kątów natarcia 13° , 15° , 17° i 19° , dla $Re = 6,64 \cdot 10^4$;
- badanie przepływu wokół cylindrów o przekroju kołowym, kwadratowym i trzech przekrojach trójkątnych, dla $Re = 5 \cdot 10^3$ i $Re = 10^4$;
- badanie przepływu wokół NACA0012 z mikrocyldrem o przekroju kołowym umieszczonym przed krawędzią nawietrzną NACA. Analizowano trzy różne odległości mikrocyldrów od powierzchni NACA i cztery różne przesunięcia względem krawędzi nawietrznej. Uwzględniono pięć rozmiarów mikrocyldrów, dla których stosunek d/c wynosił 0,005, 0,01, 0,015, 0,02, 0,025, gdzie d to średnica mikrocyldra, c to rozpiętość profilu NACA. Badania wykonano dla kąta natarcia 17° i dla $Re = 6,64 \cdot 10^4$;
- badanie przepływu wokół NACA0012 z mikrocyldrem o przekroju kwadratu i trójkąta równobocznego, umieszczonym w trzech pozycjach wybranych na podstawie poprzednich badań i jednej pozycji z dodatkowym odsunięciem od krawędzi nawietrznej. Przyjęto rozmiary cylindrów odpowiadające wybranemu cylindrowi z przekrojem kołowym o $d/c = 0,015$. Badania wykonano dla kąta natarcia 17° i dla $Re = 6,64 \cdot 10^4$;
- badania Volumetric PIV przekroju NACA bez mikrocyldra i z mikrocyldrem o przekroju kołowym i $d/c = 0,015$ dotyczące tylnej części profilu NACA;
- badania na wadze aerodynamicznej dotyczące siły aerodynamicznej nośnej i oporu dla profilu NACA0012 i tego profilu z mikrocyldrami, dla różnych kątów natarcia.

Doktorantka we wszystkich badaniach wykorzystujących PIV analizowała znormalizowane wartości: składowej wzdłużnej średniej prędkości przepływu U_x , składowej poprzecznej pionowej średniej prędkości przepływu U_y , energii kinetycznej turbulencji TKE i wirowości ω . Dodatkowo analizowała przesunięcie punktu oderwania warstwy przyściennej z dolnej powierzchni przekroju NACA w celu oszacowania zmniejszenia lub zwiększenia obszaru separacji w przypadku zainstalowania mikrocyldra. W ramach pomiarów na wadze analizowała współczynniki aerodynamiczne siły oporu i nośnej oraz stosunek tych sił. Moim zdaniem kolejność

przeprowadzonych eksperymentów PIV jest logiczna. Jako wartości referencyjne potraktowano wartości wyznaczone dla profilu NACA0012, dla którego zidentyfikowano krytyczny kąt natarcia wynoszący 17° , przy którym obserwowano wyraźne zjawisko oderwania warstwy przyściennej. Kolejne pomiary wykonano dla tego kąta dla profilu NACA z mikrocyldrem o przekroju kołowym. Na tej podstawie wybrano najkorzystniejsze rozmiary mikrocyldra i jego położenie względem krawędzi nawietrznej NACA. Następnie, porównano wpływ zmiany kształtu mikrocyldra z przekroju kołowego na kwadratowy i trójkątny o takich samych wymiarach charakterystycznych na opływ wokół NACA. Równolegle prowadzono badania na wadze aerodynamicznej, które pozwoliły na uzyskanie informacji uzupełniających wyniki PIV. Badania przeprowadzone na wadze posłużyły do porównania wyników z danymi literaturowymi. Podsumowując tę część pracy, uważam że Doktorantka przeprowadziła badania w sposób logiczny i poprawny, a wyniki przedstawiła dość przejrzystie. Moje uwagi odnośnie badań znajdują się w kolejnym rozdziale niniejszej recenzji.

5. Uwagi krytyczne

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy mam dość liczne uwagi, które sformułowałem poniżej i podzieliłem na trzy grupy: odnośnie merytorycznej zawartości, odnośnie języka i redakcji oraz szczegółowe. Poniższe uwagi nie wpływają zasadniczo na moją pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy. Wszystkie komentarze krytyczne, zwłaszcza odnośnie merytorycznej zawartości rozprawy, zostały podane w charakterze dyskusji z nadzieją, że mogą być przydatne i zostaną przez Doktorantkę wykorzystane w przyszłych badaniach i publikacjach.

5.1. Uwagi odnośnie merytorycznej zawartości rozprawy

1. Doktoranta analizowała przekrój NACA0012 bez i z mikrocyldrami. Rozmiary mikrocyldrów przyjęła na podstawie stosunku ich wymiaru charakterystycznego do rozpiętości przekroju NACA. Nigdzie w rozprawie nie jest podane skalowanie modelu w stosunków do wymiarów rzeczywistych. Jaki wpływ skalowanie przekroju miało na wyniki? Warto podkreślić, że ten aspekt w związku z zakresami liczby Reynoldsa w warunkach rzeczywistych ma zasadnicze znaczenie dla interpretacji wyników. Inny zakres liczby Reynoldsa będzie dla przekrojów lotniczych, inny dla turbin wiatrowych, a jeszcze inny dla modelu w tunelu. Wiadomo, że w różnych zakresach liczby Reynoldsa oderwanie warstwy przyściennej i ścieżka wirowa oraz ślad aerodynamiczny mają różne cechy. Ponadto, przedstawione w rozprawie badania były prowadzone przy różnych zakresach Re. Jaki był wobec tego wpływ liczby Reynoldsa na wyniki samego eksperymentu?

2. Jak była blokada przepływu w tunelu i czy mogła wpływać na wyniki?

3. Z czego wynikały przyjęte lokalizacje linii L_1 - L_3 i przesunięć p_1 - p_4 ?
4. Z rozprawy nie wynika jasno jak zostały mikrocyndry zamontowane. Mam tu na myśli, czy obracały się wraz z przekrojem, czy pozostawały zawsze prostopadłe do przepływu? Podejrzewam, że obracały się wraz z przekrojem, wobec tego w przypadku przekrojów kwadratowego i trójkątnego przy kącie natarcia równym 17° nie był to napływ na założony kształt przekroju.
5. Jakie jest uzasadnienie badań wykonanych w rozdziale V.2 dotyczących mikrocyndrów o różnych kształtach? Oczywiście doceniam walory poznawcze przedstawione w tej części rozprawy, ale nie widzę związku z jej dalszą częścią. Jak informacje uzyskane z tych pomiarów wpłynęły na dalsze eksperymenty? Badania pojedynczych mikrocyndrów były realizowane przy liczbie Reynoldsa niższej niż w przypadku profilu NACA z mikrocyndrami. Czy modele mikrocyndrów miały takie same wymiary jak w następnych badaniach, w których były dołączone do profilu NACA? Ponadto, jaki sens miał pomiar mikrocyndrów trójkątnych z różnym kątem wierzchołkowym, gdy w dalszych analizach uwzględniono tylko przekrój trójkąta równobocznego?
6. W badanych zakresach liczby Reynoldsa może powstać wzbudzenie wirowe za mikrocyndrami, zwłaszcza o przekrojach kołowych. Spowoduje to ich drgania poprzeczne i w konsekwencji poszerzenie ścieżki wirowej. Czy w trakcie eksperymentu zaobserwowano drgania poprzeczne mikrocyndrów? Jak w rzeczywistej realizacji można zapobiec temu zjawisku uwzględniając możliwość wystąpienia lock-in, czyli synchronizacji częstotliwości odrywania się wirów i drgań własnych mikrocyndrów? Wiąże się to z dodatkową kwestią praktycznego połączenia mikrocyndra z przekrojem NACA. Jak można to w rzeczywistości zrealizować?
7. Brak mi jest w całej pracy konkretnej rekomendacji jakie kształty mikrocyndrów stosować, w jakiej odległości je umieścić i jak je przesunąć od krawędzi nawietrznej przekroju NACA. Biorąc pod uwagę kąt natarcia, który był analizowany, czy można definitywnie stwierdzić, że konkretny kształt i położenie mikrocyndra jest optymalne?
8. W nawiązaniu do poprzedniej uwagi najobszerniejsze badania przeprowadzono dla kąta natarcia 17° . Doktorantka stwierdziła, że dla tego kąta i wyższych mikrocyndry pozytywnie wpływają na stabilizację aerodynamiczną przekroju. Z wykresów na rys. V.35, V.36 i V.49 wynika jasno, że przy kątach większych niż ok. 13 - 15° większość lokalizacji i kształtów mikrocyndrów poprawia stosunek L/D , ale przy niższych kątach skuteczność ich działania spada, często dość dramatycznie. Jak rozumiem proponowane rozwiązanie będzie operowało we wszystkich kątach napływu, niezależnie czy zostanie zastosowane w lotnictwie, czy w energetyce. Wobec powyższego, czy Doktoranta, uwzględniając ten fakt jest w stanie ocenić całkowitą efektywność proponowanego rozwiązania?

9. W jaki sposób Doktorantka określała obszar, w którym przepływ odrywa się od powierzchni NACA? Czyli jak został określony punkt oderwania warstwy przyściennej? Wydaje mi się również, że w tym kontekście powinno się użyć odległości zamiast powierzchni, albo ograniczyć się tylko do podania położenia punktu oderwania. Jakie kryterium odnośnie U_x/U_∞ zastosowano?
10. Dlaczego do szczegółowych badań wybrano cylinder o $d/c = 0.015$? Większa poprawa była dla mniejszego walca. Brak jest jasnego uzasadnienia tej kwestii.
11. Często w rozprawie, zwłaszcza w rozdziale V, Doktorantka używa sformułowań odnośnie pola wirowości, składowych prędkości i energii kinetycznej turbulencji, że w danej konfiguracji wpływają pozytywnie lub negatywnie na opływ wokół NACA. Oczywiście rozkłady powierzchniowe pól prędkości, wirowości czy TKE są ciężkie do skwantyfikowania, ale niektóre parametry jak położenie punktu oderwania warstwy przyściennej, wartości w profilach wzdłuż linii 1-5, czy wreszcie współczynniki aerodynamiczne albo efektywność aerodynamiczna takiej ocenie podlegać mogą. Reasumując brak mi jest wartości liczbowych i ich relacji względem wariantu referencyjnego.
12. Jaką liczbę zdjęć wykonywano w badaniach PIV? Raz jest podane 3000 zdjęć na sekundę (str. 45), dalej 3000 zdjęć w odniesieniu do 5 s (str. 47).
13. W przypadku wyników prezentujących pole wirowości Doktorantka podaje, że odstęp czasu między kolejnymi zdjęciami wynosił 0.004 s. Jakiego czasu od początku pomiarów te wyniki dotyczą?
14. Na rys. V.3 Doktorantka porównała współczynniki oporu i siły nośnej z badaniami innych autorów i programem XFOIL. Jak można uzasadnić inny trend zmian, zwłaszcza współczynnika C_L przy wysokich kątach natarcia, w porównaniu do badań innych autorów? Czy może być to wpływ różnicy w wartościach liczby Re , przy której odbywały się eksperymenty? Czy badania własne na wadze odbywały się dla innych kątów natarcia niż pomiary PIV jak wynika z wykresu?
15. Na rys. V.7. Doktorantka porównuje zmiany podłużnej składowej prędkości przepływu za cylindrem o przekroju trójkątnym z innymi badaniami. Dlaczego w porównaniu wykorzystano przekrój trójkątny o kącie wierzchołkowym 45° , a nie 60° jak w badaniach Aksoy et al. [129]? Ponadto uważam, że druga z prac, Gandhi et al. [125] nie najlepiej nadaje się do porównania z powodu liczby Re równej 520, a więc badań przeprowadzonych w zupełnie innych warunkach przepływu. Te same uwagi dotyczą rys. V.8.
16. Do wyznaczenia liczby Strouhala Doktorantka wykorzystwała wartości z punktu za cylindrami o współrzędnej $x/D = 2$, czyli w osi przekroju, a nie na ścieżce wirowej. Czy ten punkt był również

przesunięty w kierunku y ? Z tym pytaniem wiąże się kolejne – jak Doktorantka obliczyła częstotliwość odrywania się wirów, f w równaniu V.1?

17. Prezentacja wyników w rozdziale V dotycząca składowych prędkości, TKE i wirowości nie obejmuje przedniej części profilu NACA i mikrocyldrów. Na podstawie rys. IV.16 można się spodziewać, że PIV obejmuje ten obszar. Trochę mnie to dziwi, ponieważ ten obszar jest ważny w analizie, a w pracy są wyciągane wnioski odnośnie mieszania się wirów generowanych przez mikrocyldry i profil NACA, tak jak na rysunkach dotyczących wirowości V.23-V.32.

18. Na rys. V.33 i V.34 dotyczących profilu NACA z mikrocyldrami kołowymi, niektóre przypadki odbiegają znacznie od pozostałych i wydaje mi się, że nie ma w tym określonego trendu. Tak znaczne różnice w wartościach współczynników aerodynamicznych rzutują na efektywność aerodynamiczną przedstawioną na rys. V.35 i V.36. Czy Doktorantka stwierdziła jakąś charakterystyczną tendencję? Podobna uwaga dotyczy rys. V.48 i wynikającego z niego rys. V.49.

19. W przypadku pomiarów Volumetric PIV nie opisano obszaru, dla którego prowadzono pomiary. Oczywiście wynika to z rys. V.52, ale brak jest uzasadnienia dlaczego ten obszar wzięto pod uwagę.

5.2. Uwagi szczegółowe dotyczące układu, języka i redakcji rozprawy

1. W rozdziale III Doktorantka podała cel rozprawy, którym, w skrócie, jest analiza wpływu mikrocyldra na aerodynamikę przekroju NACA. Zabrakło mi konkretnego sformułowania problemu naukowego lub tez, które miały zostać udowodnione.

2. Rozdziały przedstawiające prezentację wyników czyta się dość ciężko. Doktorantka stosuje bardzo wiele powtórzeń tekstu, np. na rysunku przedstawiono znormalizowaną poprzeczną składową prędkość średniej U_y/U_∞ , powtarzane wymienianie linii L_1-L_3 i przesunięć p_1-p_4 , w których były położone cylindry, kształtów, etc. Powtarzane są również opisy zawartości rysunków, np. w kolumnie 1 pokazano to i to. Opisywanie w tekście kolorów linii lub znaczników wykresów również uważam za zbędne. Oczywiście należy mieć na uwadze, że Doktorantka prezentuje powtarzalne analizy wyników odniesione do kolejnych kształtów i rozmiarów przekrojów cylindrów, odległości między nimi i głównym przekrojem i to było głównym powodem przyjęcia takiego stylu opisywania rezultatów. Moim zdaniem zdecydowanie bardziej skuteczne dla zwiększenia czytelności i przejrzystości prezentacji wyników byłoby wprowadzenie wariantów, skrótów oraz usunięcie powtórzeń i zbędnego tekstu. Podkreślam, że jest to ocena subiektywna.

3. Bardziej kompaktowa analiza wyników pozwoliłaby na opis rysunków w tekście w ich bezpośredniej bliskości, a nie 2-3 strony od niego, co znacznie utrudniało analizę rysunków.

4. W rozdziale IV opisano techniki i stanowiska badawcze. W rozdziale V są również dodatkowe informacje na ten temat. Jest to np. opis stanowiska do badań wykorzystujących Volumetric PIV, czy rys. V.12 przedstawiający schemat profilu NACA z pozycjami mikrocyldrów. Wydaje mi się zasadne umieszczenie tych fragmentów w Rozdziale 4. Z drugiej strony analizy dotyczące dokładności pomiarów PIV i na wadze aerodynamicznej z powodzeniem mogłyby się znaleźć w rozdziale prezentującym wyniki. Zastosowane w rozprawie rozwiązanie powoduje, że Doktorantka analizuje wykresy bez podania wszystkich danych, które znajdują się dalej w tekście (są to np. informacje o lokalizacji linii 1-5, lokalizacji mikrocyldrów, y').
5. Odniosłem wrażenie, że Doktorantka wprowadziła trochę chaosu, głównie w przeglądzie literatury w sprawie stosowania proponowanego w rozprawie rozwiązania. Podrozdział z opisem historii i rodzajów turbin wiatrowych wydaje się trochę oderwany od głównego wątku rozprawy.
6. W wielu miejscach rozprawy Doktorantka pisze np. „... co może wynikać z mniejszej turbulencji”. Nie stosowałbym słowa „może”, które w takim kontekście dość „zmiękcza” wnioski.
7. Brak jest sformułowania wniosków na końcu rozdziału IV.2, w rozdziale V, na stronie 86 po analizie wirowości, na stronie 90 po wynikach z wagi aerodynamicznej, na stronie 110 po analizie punktu oderwania. Oczywiście na bieżąco w trakcie analizy są wyciągane wnioski, ale brak mi ogólniejszych podsumowań poszczególnych zestawów badań.
8. W tekście pracy są złe odwołania, np. na rys V.3. jest Zhang i in. i McKinney i in. Dlaczego odwołania są do drugiego z autorów danego artykułu? Taki sam sposób cytowania powtarza się na kolejnych rysunkach i w tekście.
9. Na rysunkach prezentujących prędkości przepływu, wirowość i TKE dla przypadków NACA z mikrocyldrami warto było dodać wariant referencyjny, czyli sam profil NACA. Znacznie ułatwiłoby to interpretację wyników.
10. Zestawienie literatury jest zrobione niestarannie. Po pierwsze, zastosowano przedziwny sposób cytowania oddzielając tylko dane ostatniego autora przecinkiem. Ponadto ten styl stosowany jest niekonsekwentnie. W niektórych cytowanych pracach brak jest pełnych danych. Brak jest konsekwencji w stosowaniu czcionki prostej i pochyłej i w zestawieniu danych poszczególnych artykułów. Brak jest dużych liter w nazwach, np. Springer, PIV, Reynolds, LES. Niewątpliwie ten fragment pracy mógł zostać przygotowany starannie, zwłaszcza że dysponujemy obecnie narzędziami takimi jak Mendeley czy Zotero.
11. Praca zawiera dość dużą liczbę błędów stylistycznych i gramatycznych. Wydaje się jakby Doktorantka nie wprowadziła ostatecznej korekty tekstu.

5.3. Uwagi szczegółowe

Poniżej zamieszczam tylko część uwag redakcyjnych, które zauważyłem w trakcie czytania.

Str.8. „Wyniki te wzbogacono ...” Chyba zły sens zdania.

Str.10. Jednostka TKE.

Str. 13, koniec akapitu 2. Jest „kołowego, kwadratowego, trójkątnego”, powinno być „kołowym, kwadratowym, trójkątnym”. Ostatnie zdanie. „Ponadto wpływu ...”. Zdanie jest niegrammatyczne.

Str.14, ostatnie zdanie. „Gdy prędkość ...”. Zdanie jest niegrammatyczne.

Str.15, wiersz 1. Co to jest jednostka wiatrowa? Akapit 2, wiersz 9. „Zwiększenie kąta ...”. Zdanie jest niezrozumiałe. „Należy jednak ...” Zdanie jest również niezrozumiałe. W tym samym akapicie jest niepoprawne określenie „losowość wiatru”.

Str.17, akapit 2, wiersz 5. Co oznacza „fizyka żagli wiatraków” i „właściwości geometryczne żagli”?

Str.18, akapit 2, wiersz 5. Jest „smaganej”, co w odniesieniu do oddziaływania wiatru jest określeniem bardzo potocznym.

Str.21, wiersz 2. Jest powtórzenie słowa „nawet”. Akapit 1 w II.2.2, wiersz 1. „Proces ...”. Zdanie jest niegrammatyczne.

Str.22. Brak jest rozwinięcia w tekście przejścia z opisu BLC do opisu VG i komentarza do rys.II.8.

Str.24, akapit 3, wiersz 2. Co to jest „skala długości lepkiej” i „logarytmiczno-liniowy obszar”?

Akapit 3, wiersz 8. „W przepływach...”. Zdanie jest niepoprawne.

Str.26. Brak odniesienia w tekście do rys.II.11. Akapit 1, wiersz 10. Należałoby wyjaśnić słowo „reżimy” w odniesieniu do Re. Akapit 1, wiersz 14. „Główną różnicą...”. Zdanie jest niepoprawne.

Wiersz 23. „W związku z ...”. Zdanie jest niepoprawne. To samo dotyczy ostatniego zdania na stronie.

Str.27, wiersz 11. Co to jest „współczynnik średnic”? Wiersz 16. „wysokiego Reynoldsa” jest sformułowaniem dość potocznym. Wiersz 19. Co oznacza opóźnienie oderwania warstwy przyściennej o 2° ?

Str.28, wiersz 3. Jest „ 23° stopni” i „ 19° stopni”. Koniec akapitu 2. Czego dotyczą „negatywne skutki”?

Str.31, wiersz 4. „W przypadku ...”. Zdanie jest niepoprawne. Wzór II.3. jest niepoprawny.

Str.32, linia 11. Jest „ocena”, powinno być „ocenę”.

Str.37, akapit 1 od dołu, wiersz 1. „Niepewność ...”. Zdanie jest niepoprawne. Wiersz 6. Brak domknięcia nawiasu. Wiersz 7. Jest „zarówno wartościach”, powinno być „zarówno w wartościach”. Wiersz 10. Jest „prędkości fluktuacji”, powinno być „fluktuacji prędkości”.

Str.38, akapit 2, wiersz 8. Podana jest zła wartość $\gamma'/c=-0.5$.

Str.39, akapit 1, wiersz 6. „Dla tych profili ...”. Zdanie jest niepoprawne.

Str.40. Co to jest „współczynnik skali” i „punkt zerowy”?

Str.43, wiersz 1. Czy chodzi o kwadraty odchylenia standardowego fluktuacji prędkości, czyli o wariancję?

Str.52, wiersz 2 od dołu. W tym miejscu i na kolejnych stronach jest używana współrzędna „x/d”, a powinna być „x/c”.

Str.56, akapit 2, wiersz 2. Jest " U_y/U_∞ ", powinno być " U_x/U_∞ ".

Str.61, wiersz 2 od dołu. Jest "dla dwóch dwóch".

Str.62, akapit 2, wiersz 3. Jest "mikrocylindery".

Str.63, wiersz 8. "Cylinder o ...". Zdanie jest niepoprawne.

Str.77, podpis rys. V.20. Wydaje mi się, że zostały podane złe punkty.

Str.79, wiersz 2. Jest "na rysunku V.22", powinno być "na rysunku V.21".

Str.82, wiersz 8. Jest "nie zostało opóźniona", powinno być "nie została opóźniona".

Str.85, wiersz 4 od dołu. Złe odniesienie do rysunku dla L_2 .

Str.86, akapit 2, wiersz 1. Złe odniesienie do rysunku.

Str.88, wiersz 7 od dołu. "Natomiast ...". Zdanie jest niepoprawne.

Str.92, akapit 1, wiersz 4 nad rysunkiem. Jest "widocznea, wskazuje", powinno być "widoczna. Wskazuje".

Str.93, akapit 1, wiersz 11. Jest "w czwartej kolumnie", powinno być "w trzeciej kolumnie".

Str.99, wiersz 2. Powinno być "Energia", zbędna jest też definicja TKE w tym zdaniu. Akapit 1, wiersz 13. Jest "mikrocylinder", powinno być "mikrocylindry".

Str.103, wiersz 3 od dołu. Niefortunne stwierdzenie: "bardziej optymalnego".

Str.109, akapity 2 i 3. Zła kolejność i błędy gramatyczne. W podpisie tabeli V.5. jest "pole", powinno być "pola".

Str.113, wiersz 4. Jest "nad przepływ", powinno być "nad przepływem". Ostatni wiersz. Moim zdaniem dynamiki struktur wirowych nie analizowano.

Str.115, wiersz 1. "Analiza...". Zdanie jest źle sformułowane. Akapit 2, wiersz 8. Jest "poprawie", powinno być "poprawę". Akapit 3, wiersz 11. Niefortunne sformułowanie "mikrocylindrów cylindrycznych".

Str.118, akapit 1, wiersz 3 od dołu. Jest "profile", powinno być "profili". Wiersz 2 od dołu. Zła interpunkcja.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Karoliny Gajewskiej pt. „*Sterowanie zjawiskiem oderwania warstwy przyściennej przy użyciu ciał nieopływowych*” jest obszernym i spójnym dziełem. Doktorantka, w mojej ocenie, zrealizowała postawiony cel, do czego użyła wykorzystanych w logicznej kolejności metod badawczych. W kontekście art. 187 Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiot pracy zdecydowanie można zakwalifikować jako problem naukowy właściwy dla dyscypliny inżynieria mechaniczna. Moim zdaniem, Autorka zaproponowała jego oryginalne rozwiązanie. W związku z powyższym uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wymagania Ustawy, oceniam ją pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie Doktorantki do publicznej obrony.