

dr hab. inż. Sławomir Kubacki, prof. uczelni
Politechnika Warszawska,
Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa,
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej,
ul. Nowowiejska 24, 00-665, Warszawa
tel : +48.22.234.47.77, fax: +48.22.622.09.01
e-mail : slawomir.kubacki@pw.edu.pl

Warszawa, dn. 18 listopada 2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Mohammadsadegha Pahlavanzadeha
pt. „Assessment of the possibility of improving the momentum transfer in the flow
between rotating discs”

I. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo Pana Profesora dr hab. Krzysztofa Labusa, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Politechniki Śląskiej, z dn. 3 października 2025 r. (pismo nr RIE-BD.512.40.2025).

II. Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Mohammadsadegha Pahlavanzadeha, przygotowana jako jednolity cykl sześciu publikacji naukowych, koncentruje się na analizach numerycznych przepływu w turbinie Tesli. Praca doktorska obejmuje analizę przepływów dla różnych konfiguracji układów z wykorzystaniem kilku czynników roboczych (powietrze, woda, czynnik organiczny R1234yf oraz n-heptan), różnych modeli turbulencji tj. RANS (ang. Reynolds-averaged Navier-Stokes) i LES (ang. Large Eddy Simulation) oraz z założeniem gładkich jak i chropowatych powierzchni tarcz. Kluczowym elementem badań była poprawa sprawności turbiny Tesli, poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych struktur chropowatych na powierzchni obracających się dysków. Wprowadzenie tych elementów pozwoliło uzyskać poprawę sprawności o kilka procent, co stanowi znaczące osiągnięcie w przypadku układów o niskiej efektywności wynoszącej kilka lub kilkanaście procent. Analizy numeryczne z zastosowaniem elementów chropowatości (model Aupoix i model warstwy porowatej) do modelowania przepływu w turbinie Tesli nie są spotykane w literaturze, co czyni to podejście nowatorskim w kontekście zwiększania sprawności układu. Zastosowanie struktur chropowatych, generujących turbulentne naprężenia ścinające, w układach w których wymiana pędu jest realizowana z wykorzystaniem zjawiska adhezji i działania lepkich naprężeń ścinających było przedsięwzięciem obciążonym dużą niepewnością. Konieczne było wykonanie dogłębnego studium literatury oraz przeprowadzenie wielu testów, zanim udało się określić konfiguracje poprawiające osiągi turbiny. Kandydat wykazał się w tym obszarze dużą wiedzą i doświadczeniem. Modele powierzchni chropowatych kalibrowano na podstawie

wyników badań eksperymentalnych zarówno dostępnych w literaturze, jak i uzyskanych w zespole badawczym, w którym Doktorant realizował swoje prace.

Istotnym elementem pracy doktorskiej Pana mgr inż. Mohammadsadegha Pahlavanzadeha jest również walidacja stosowanej metody RANS w oparciu o własne wyniki LES. Walidacja ta była konieczna z powodu braku odpowiedniej jakości danych literaturowych dla przepływu przez turbinę Tesli. Analizy LES wymagały przeprowadzenia wymagających obliczeniowo symulacji ściśliwych i niestacjonarnych przepływów turbulentnych, zapewnienia odpowiedniej jakości dyskretyzacji w przestrzeni i czasie. Uzyskane wyniki LES, pozwoliły dokonać wyboru odpowiedniego modelu RANS ($k-\omega$ SST), który był kluczowy w obliczeniach przepływów z chropowatością.

Zagadnienia dotyczące modelu chropowatości Aupoixa, wyznaczania równoważnej chropowatości ziarna piasku oraz opracowania modelu struktury porowatej wymagały od Doktoranta opanowania zaawansowanych procedur programowania numerycznego takich układów, co stanowi zadanie nietrywialne.

Otrzymane wyniki symulacji numerycznych przepływu przez turbinę Tesli, zarówno bez uwzględnienia chropowatości, jak i z jej zastosowaniem, mają charakter unikatowy i wnoszą znaczący wkład w rozwój dyscyplin: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka oraz Inżynieria Mechaniczna. Wyniki prac zostały opracowane z zachowaniem wysokich standardów badawczych i opublikowano je w czasopismach naukowych, co pozwala stwierdzić duże znaczenie naukowe i aplikacyjne uzyskanych wyników badań.

III. Struktura rozprawy i ocena jej wartości naukowej

Przedmiotem oceny jest pięć jednotematycznych publikacji w czasopismach naukowych i jednej publikacji, która została opublikowana równolegle ze złożeniem dokumentów do obrony.

W publikacji oznaczonej nr 1 przedstawione zostały testy wybranych modeli chropowatości z zastosowaniem metod RANS na przykładzie symulacji przepływów wzdłuż płaskich płyt, jak i uproszczonej konfiguracji turbiny Tesli, złożonej z dwóch wirujących dysków.

W autoreferacie pojawił się błąd składu wynikający z tego, że strony 86–87 zostały umieszczone w dalszej części pracy, choć ich treść powinna następować po stronie 78.

Publikacja naukowa obejmuje wstępne analizy wykonane standardowymi modelami turbulencji typu $k-\epsilon$ z założeniem modelowania przepływu w subwarstwie lepkiej (podejście dla niskiej liczby Reynoldsa), modelowaniem funkcji ściany (podejście dla dużej liczby Reynoldsa), jak i modelem $k-\omega$ SST przyjmując model chropowatości Aupoix. Analizy dla prostych konfiguracji przepływów wzdłuż płaskich płyt zostały wykonane w poprawny sposób. Jednak, nie do końca jest do mnie jasna przyczyna rozbieżności uzyskanych dla gładkiej powierzchni ściany na gęstej siatce M1 (rys. 1) pomiędzy wynikami obliczeń wykonanych z użyciem modelu $k-\epsilon$ SWF (funkcja ściany) a eksperymentem. W przypadku obliczeń prowadzonych na gęstej siatce model $k-\epsilon$ SWF powinien modyfikować warunki brzegowe dla równań Naviera-Stokesa w strefie przyściennej dla $y^+ < 11.225$ i stosować aproksymację opartą na liniowym profilu prędkości. Być może przeszacowanie współczynnika c_f wynika z niedostosowania przez model $k-\epsilon$ SWF warunków brzegowych dla równania transportu dla k (standardowo przyjmuje się warunek $dk/dy=0$). Doktorant w prawidłowy sposób podejmuje się w pracy szacowania chropowatości równoważnego ziarna piasku, k_s^+ , w oparciu o wiarygodne źródła literaturowe (Knadikar i in., 2005). Parametr ten odgrywa kluczową rolę w dalszych symulacjach przepływu przez uproszczony model turbiny Tesli, przy założeniu chropowatych powierzchni tarcz. Uzyskane wyniki są logicznie spójne i potwierdzają poprawność przyjętego podejścia. Duże znaczenie ma również wykazanie, że model Aupoix, jest wiarygodnym podejściem służącym do modelowania chropowatości, na gęstych siatkach obliczeniowych, bez

wymogu precyzyjnego umieszczania pierwszego oczka siatki w strefie logarytmicznego profilu, jak to ma miejsce w przypadku klasycznego modelu $k-\varepsilon$ SWF.

Publikacja oznaczona nr 2 obejmuje analizy przepływów turbulentnych w mikrokanałach z zastosowaniem powierzchni gładkich jak i chropowatych oraz symulacji przepływu przez szczelinę uproszczonej turbiny Tesli z zastosowaniem powierzchni gładkich i chropowatych.

W tekście, pod równaniem 2, pojawia się niewielka nieścisłość odnosząca się do sposobu zdefiniowania prędkości tarcia, określanej jako $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ (w pracy brakuje pierwiastka). Nieścisłość ta również występuje w publikacji nr 5.

Walidacja zastosowanego modelu dla powierzchni chropowatych została przeprowadzona w oparciu o dostępne dane literaturowe, jak również z wykorzystaniem wyników badań eksperymentalnych przepływu przez minikanal (z założeniem różnych liczb Reynoldsa), zrealizowanych w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechniki Śląskiej. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na stwierdzenie zgodności wyników symulacji numerycznych przepływów dla powierzchni chropowatych z zastosowaniem modelu Aupoix, przyjmując wysokość chropowatości $60\mu\text{m}$. Otrzymano dobrą zgodność wyników symulacji numerycznych dla powierzchni gładkich, zarówno przy niskich, jak i wysokich liczbach Reynoldsa, jeśli chodzi o wartości współczynnika Fanninga. Wyniki te potwierdzają prawidłowość przyjętej metody modelowania przepływu turbulentnego w przypadku powierzchni gładkich i chropowatych.

Prace oznaczone numerami 3 i 4 obejmują analizy numeryczne bardziej złożonych układów turbin Tesli. W badaniach uwzględniono różne konfiguracje układów dolotowych. W publikacji nr 3 zastosowano układy z sześcioma oraz czterdziestoma dyszami, a w publikacji nr 4 układ z sześcioma dyszami, doprowadzającymi czynnik roboczy do przestrzeni międzydyskowej. Przepływ w przestrzeni międzydyskowej był symulowany w obracającym się układzie współrzędnych, podczas gdy pozostałe elementy turbiny (układ dolotowy) zdefiniowane były w inercjalnym układzie odniesienia. Aby ograniczyć koszty obliczeń, szczególnie dla metody LES, w publikacji 3 symulacje wykonano dla wycinka przestrzeni międzydyskowej obejmującego odpowiednio 1/6 lub 1/40 całej domeny, w zależności od zastosowania sześciu lub czterdziestu dysz, stosując okresowe warunki brzegowe. Podejście to upraszczało rzeczywistą pracę układu, jednak przyjęty poziom uproszczenia był w pełni uzasadniony. Do opisu ruchu płynu zastosowano w publikacji nr 3 metody RANS i LES, natomiast publikacja nr 4 dotyczy wyłącznie analiz LES z zastosowaniem dwóch różnych konfiguracji dysz dolotowych w których czynnik (woda) był doprowadzony do szczeliny międzydyskowej przez dyszę o takim samym rozmiarze w kierunku z jak głębokość kanału międzydyskowego (jeden-do-jednego) i konfigurację obejmującą szerokość dyszy o większym rozmiarze w kierunku z od szerokości kanałów międzydyskowych (jeden-do-wielu). Celem wykonania, kosztownych obliczeniowo analiz numerycznych z pomocą metody LES, z zastosowaniem gładkich powierzchni dysków, było uzyskanie referencyjnych wyników służących do oceny dokładności metod RANS. Podejście to było w pełni uzasadnione, biorąc pod uwagę relatywnie niskie liczby Reynoldsa (bazujące na szerokości szczeliny), wynoszące między 1000 a 7000. Wybór metody LES (z modelowaniem subwarstwy lepkiej) był prawidłowy, bo zastosowano tłumienie lepkości podsiatkowej w pobliżu ścian z pomocą modelu Piomelli i in. Tłumienie to było konieczne celem uzyskania odpowiedniej jakości struktury przepływu w turbulentnych warstwach przyściennych rozwijających się w pobliżu obracających się z dużymi prędkościami dysków. Obliczenia metodą LES zostały wykonane z zachowaniem odpowiednich rozdzielczości siatki obliczeniowej w przestrzeni (parametr LES_IQ i stosunek całkowitej skali turbulencji do rozmiaru oczka siatki) i z zastosowaniem odpowiednio drobnego kroku w czasie. Wyniki uzyskane metodą LES, wykazały, zgodnie z oczekiwaniami, większe niestacjonarności od tych uzyskiwanych metodą RANS, widoczne m.in. na polu wirowości w publikacji 3 (rys. 9), ale pozwoliły ocenić przydatność narzędzi

RANS (model $k-\omega$ SST) w szacowaniu pól prędkości i ciśnień, naprężeń ścinających, oraz sprawności, mocy i momentów obrotowych dla badanych układów turbin Tesli. Analizy LES pozwoliły również ocenić jakość i przydatność zastosowanych układów dolotowych oraz stwierdzić, że zastosowany model RANS jest wiarygodnym narzędziem służącym do symulacji przepływu w turbinie Tesli. Miało to kluczowe znaczenie w realizacji dalszych prac, związanych z zastosowaniem elementów chropowatości powierzchni w połączeniu z metodą RANS.

Artykuł oznaczony nr 5 dotyczył numerycznego modelowania turbiny Tesli z układem dolotowym odzwierciedlającym działanie sześciu dysz w układzie jeden-do-wielu. Analizy wstępne przeprowadzono metodami LES oraz RANS, przyjmując w obliczeniach gładkie powierzchnie dysków. Analizy te pozwoliły stwierdzić dobrą zgodność wyników RANS, uzyskanych modelem $k-\omega$ SST, z wynikami LES. W kolejnej części pracy przeprowadzono szczegółowe analizy wpływu chropowatości powierzchni tarcz na parametry pracy turbiny, wykorzystując zarówno model Aupoix, jak i nowe podejście oparte na modelu warstwy porowatej. Kalibracje modeli dla opisu chropowatości powierzchni zostały przeprowadzone w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych (mikrokanal) uzyskanych w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Doktorant w przystępny i ciekawy sposób przedstawia wyniki badań na rys. 6 i 7, analizując wpływ chropowatości ($k=30, 60$ i $120\ \mu\text{m}$) na zmiany składowej obwodowej prędkości oraz liczb Macha. Uzyskano interesujące wyniki badań, potwierdzające duży wpływ chropowatości powierzchni na sprawność turbiny, moc i moment obrotowy. Opracowany przez Kandydata model warstwy porowatej pozwolił uzyskać rezultaty zbliżone do tych otrzymanych przy użyciu modelu Aupoix, bez konieczności wyznaczania równoważnej chropowatości ziarna piasku, co stanowi istotną zaletę podejścia opartego na modelu warstwy porowatej. Uzyskanie dobrej zgodności wyników symulacji numerycznych dla dwóch odmiennych podejść do modelowania chropowatości stanowi istotne osiągnięcie Doktoranta.

Praca oznaczona nr 6, dotyczy zastosowania opracowanego modelu warstwy porowatej do symulacji przepływu przez uproszczony model turbiny Tesli (sześć dysz, model z okresowymi warunkami brzegowymi) z zastosowaniem czynników organicznych R1234yf oraz n-heptan, przyjmując model gazu rzeczywistego (para przegrzana). Celem pracy była ocena wpływu zaproponowanych przez Doktoranta modyfikacji struktury powierzchni dysków na sprawność, moc oraz moment obrotowy turbiny przy zastosowaniu innego czynnika roboczego niż powietrze, a także określenie nominalnych warunków pracy układu. Model warstwy porowatej skalibrowano na podstawie ww. danych eksperymentalnych dla przepływu przez minikanal. Doktorant uzyskał interesujące wyniki prac badawczych, wskazując na znaczące różnice w uzyskiwanych parametrach pracy turbiny dla ww. czynników roboczych. Dla wybranych prędkości obrotowych dysków zastosowanie struktur chropowatych na ich powierzchniach pozwoliło uzyskać poprawę sprawności turbiny o 7–9% w porównaniu z powierzchniami gładkimi, co przełożyło się na relatywny wzrost sprawności rzędu 50–80%. Doktorant wykazał, że opracowany przez niego model warstwy porowatej umożliwia wiarygodne i efektywne odwzorowanie wpływu struktur chropowatych na dynamikę przepływu czynników roboczych o złożonych właściwościach fizycznych.

IV. Mocne i słabe strony pracy

Do mocnych stron pracy należy zaliczyć uzyskanie wiarygodnych i spójnych wyników analiz numerycznych przepływów z zastosowaniem chropowatych powierzchni tarcz, których zastosowanie wpłynęło na wyraźny (kilkuprocentowy) wzrost sprawności badanych układów z zastosowaniem różnych czynników roboczych. Podjęcie zagadnienia poprawy efektywności turbin poprzez zastosowanie powierzchni chropowatych nie było oczywiste na początku badań, ponieważ ich działanie opiera się na zjawisku adhezji oraz oddziaływaniu lepkich naprężeń ścinających. Tym bardziej, wartościowe jest opracowanie odpowiednio zdefiniowanych modeli

chropowatości, przygotowanie procedur służących wyznaczaniu równoważnej chropowatości ziarna piasku, oraz opracowanie i kalibracja modelu struktury porowatej (parametr porowatości K) na podstawie wyników badań eksperymentalnych uzyskanych w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Wszystkie te aspekty potwierdzają duże znaczenie naukowe i praktyczne pracy doktorskiej Pana mgr inż. Mohammadsadegha Pahlavanzadeha.

Do słabszych stron pracy można zaliczyć nieco uproszczoną analizę wyników LES przedstawioną w publikacji nr 3, która nie w pełni wyjaśniała różnice widoczne na widmach fluktuacji ciśnień na rys. 10, uzyskane przy zastosowaniu różnych kroków czasowych. Pewne wątpliwości budzi także nie zawsze jednoznaczne omówienie tzw. symulowanych (ang. *resolved*) fluktuacji pola prędkości w podejściu RANS. W klasycznym ujęciu (stacjonarny RANS) modele RANS całkowicie modelują fluktuacyjne pole prędkości (ściślej mówiąc tensor naprężeń turbulentnych), dlatego konkluzje dotyczące nadmiernego tłumienia symulowanych fluktuacji prędkości (w tym pola wirowości) nie zawsze wydawały się jasne. Wydaje się również, że w publikacji nr 6 można było szerzej omówić różnice w osiąгах turbiny Tesli dla czynników organicznych R1234yf oraz n-heptanu. Moim zdaniem warto było pogłębić analizy, dotyczące wpływu odmiennych właściwości fizycznych czynników (o ile to one były główną przyczyną zaobserwowanych różnic), na moc i sprawność turbiny Tesli dla różnych prędkości obrotowych.

V. Szczegółowe pytania do Autora rozprawy

W niniejszym rozdziale znajdują się szczegółowe pytania do Autora rozprawy:

1. Rysunek 14 w publikacji 2 pokazuje profile energii kinetycznej turbulencji oraz jej dyssypacji dla powierzchni gładkiej oraz dla powierzchni chropowatej w zakresie $ks^+ = 2-10\%$ h. Dla powierzchni gładkiej i dla małych chropowatości profil dyssypacji wykazuje pojawienie się lokalnego minimum na ścianie i wartości szczytowej w pewnej odległości od ściany. Obserwowany rezultat odbiega od wyników uzyskanych w analizach DNS dla warstwy w pełni turbulentnej, gdzie wartość maksymalna dyssypacji uzyskiwana jest na samej ścianie. Czy niedoszacowanie dyssypacji w pobliżu ściany jest wynikiem błędu jaki wykazuje model RANS (tutaj model SST $k-\omega$), czy jest to wynik mający pewne uzasadnienie fizyczne? Lardeau i in. (Modelling Bypass Transition with Low-Reynolds-Number Nonlinear Eddy-Viscosity Closure, Flow, Turbulence and Combustion 73: 49–76, 2004) wskazują, że w laminarnej warstwie występuje znacznie niższy poziom dyssypacji na ścianie w odniesieniu do tego co uzyskiwane jest w warstwie turbulentnej. Proszę o interpretację danych zaprezentowanych na rys. 14. Czy różnice wynikają z różnic w strukturze warstwy czy są wynikiem niedoszacowania dyssypacji przez model RANS?
2. W artykule 3 pokazano, że szacowanie rozmiaru oczka siatki Δ do analiz LES może być przeprowadzone w oparciu o kryterium $l_0/\Delta=4.8$, gdzie l_0 jest całkową skalą turbulencji. Proszę o wskazanie źródła literaturowego na podstawie którego ww. oszacowanie przyjęto dla metody LES. W pracy Popa (2000), (str. 240, Tabela 6.2 i rys. 6.19) wskazuje się, że dla izotropowej turbulencji zachodzi związek $l_0/L = 2.38$ i $l_0/L = 6.25$ (dla liczby Taylora wynoszącej 600), zakładając, że odpowiednio 80 i 90% energii jest symulowanych (ang. *resolved*). Zakładając, że skale L , związane są z najmniejszymi symulowanymi skalami i odpowiadają rozmiarowi oczka siatki Δ , to oszacowanie może być podstawą wyboru rozdzielczości siatki obliczeniowej, zakładając znikomy udział produkcji energii kinetycznej turbulencji (izotropowa turbulencja). Proszę o wyjaśnienie znaczenia tego kryterium. Czy w pracy zastosowano również inne kryteria oszacowań rozdzielczości siatki obliczeniowej? Jeśli tak, to jakie to były kryteria i jakie były wyniki tych analiz.

3. Artykuł 3, strona 13. W opisie wirowości pokazanej na rys. 8 i 9 (przekrój) znajduje się informacja że model $k-\omega$ SST może symulować (ang. resolved) struktury wirowe. Proszę o wyjaśnienie, jak należy rozumieć to stwierdzenie, biorąc pod uwagę, że w modelach RANS i w niektórych symulacjach URANS większość energii kinetycznej turbulencji podlega modelowaniu. Nie jest dla mnie również jasne czy prezentowane dla metody LES i RANS kontury wirowości to wynik uśrednienia ich w czasie czy pokazano wartości chwilowe. Ma to znaczenie w sensie lepszego zrozumienia nieregularności obserwowanych dla modelu LES na rys. 9 (linia 1). Czy badano również udział podsiatkowych fluktuacji w metodzie LES? Jeśli tak, to czy był on duży?
4. Artykuł 3, strona 13. Na rys. 10 przedstawiono widma amplitudowe ciśnienia na ścianie dla przypadku bez chropowatości uzyskane metodą LES przyjmując odpowiednio kroki czasowe $\Delta t = 1e-6$ i $1e-7$ s. Amplitudy wykazują różnice jakościowe na rys. 10 a i b, w tym sensie że dla $\Delta t = 1e-7$ s (rys. 10b) cechują się bardziej „jednorodnym” przebiegiem wskazując na większe zróżnicowanie skal turbulentnych w odniesieniu do wyników znajdujących się na rys. 10 a. Jakie były liczby CFL odpowiadające tym symulacjom i w jakim stopniu wpłynęły one na wynik. Jak należy rozumieć różnice między tymi widmami? Czy i w jakim stopniu na widmach powinny być widoczne częstotliwości związane z obrotem dysków?
5. Publikacja 3, Konkluzje (rozdział 5). We wnioskach stwierdzono, że model $k-\omega$ SST przeszacowuje moment obrotowy o 4.25%. Proszę o wyjaśnienie w odniesieniu do jakich wyników obserwowane jest to przeszacowanie? Dalej napisano, że model SST tłumy fluktuacje pewnych wielkości. Model RANS w zasadzie powinien modelować fluktuacje pola prędkości. Z czego wynika ta konkluzja i w jaki sposób należy ją rozumieć?
6. Publikacja nr 4, rozdział 3.2. Na rys. 3 pokazano wskaźnik opisujący jakość siatki obliczeniowej do analiz LES, gdzie wysoka wartość podsiatkowej lepkości skutkuje niskimi wartościami wskaźnika LES_IG. W konkluzji (ostatnie zdanie w tym rozdziale) znajduje się informacja, że wykresy konturowe tej wielkości oznaczają, że dyssypacja uzyskiwana z modelu LES stanowi co najwyżej 20% całkowitej dyssypacji. Proszę o wyjaśnienie tego stwierdzenia.
7. Artykuł 4, strona 7. W opisie przypadku N60-M znajduje się stwierdzenie, że profil prędkości średniej (składowa radialna) zależy od sił bezwładności w ruchu po okręgu, ciśnieniowych i sił lepkich. W dalszej części artykułu stwierdza się, że dla przypadku N60-M wartości szczytowe naprężeń turbulentnych (Reynoldsa) wynoszą w punktach 1, 2 i 3 (rys. 5 środek) odpowiednio 1.67×10^4 , 1.71×10^4 i 1.68×10^4 [Pa?]. Siły pochodzące od naprężeń Reynoldsa wydają się być dosyć istotne, bo są porównywalne z siłami ciśnieniowymi pokazanymi na Rys. 6 a (punkt 3). Czy w pracy szacowano jak duży jest udział sił lepkich i sił bezwładności? Jeśli tak, to jak duże są to siły? Czy siły wynikające z ruchu fluktuacyjnego płynu (naprężenia turbulentne) nie należałoby również uznać za dosyć znaczące w analizowanym przepływie?
8. Artykuł 4, strona 8. Na rys. 7 pokazano rozkłady naprężeń turbulentnych dla przypadków N60-O i N60-M. Różnice w rozkładach tych wielkości są znaczące. Profile zostały znormalizowane maksymalnymi wartościami tych wielkości obserwowanymi w tych dwóch przypadkach. Uniemożliwia to ustalenie jak duży jest udział tych naprężeń w poszczególnych przypadkach. Proszę o uzupełnienie tego wyniku, informacjami o ilościowych udziałach naprężeń Reynoldsa w analizowanych przypadkach (bez normalizacji) i wyjaśnienie w jaki sposób wielkości te wpływają (o ile wpływają) na pracę turbiny.
9. Artykuł 5, strona 37. W Tabeli IV przedstawiono wyniki analiz RANS dla różnych poziomów chropowatości powierzchni. Wyniki dla struktur chropowatych uzyskano

modelem Aupoix (zmiana warunków brzegowych dla k i ω na powierzchni) i z pomocą modelu PML (model struktury porowatej). Proszę o ocenę różnic uzyskanych z pomocą modeli Aupoix i PML. Czy można powiedzieć, że jeden z tych modeli daje bardziej wiarygodne wyniki lub lepiej oddaje fizykę procesu, który ma miejsce w rzeczywistym układzie turbiny Tesli? Na czym polega przewaga pierwszego lub drugiego podejścia (o ile ona występuje)?

10. W pracy rozważano różne modele powierzchni chropowatych (model Aupoix, model struktury porowatej), przyjmując wysokość chropowatości m.in. w zakresie 30-120 μm . Proszę o informację czy przyjęcie większych rozmiarów warstwy chropowatości prowadziło do pogorszenia osiągnięć turbiny? Jakie czynniki wpłynęły na wybór, takich, a nie innych, wysokości chropowatości?

VI. Podsumowanie

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska, obejmująca pięć publikacji naukowych oraz jedną dodatkową pracę opublikowaną równolegle ze złożeniem dysertacji do obrony, świadczy o wysokich kompetencjach Kandydata w zakresie modelowania ściśliwych przepływów turbulentnych i tworzenia numerycznych modeli struktur chropowatych, a także o biegłości Kandydata w przeprowadzeniu kompleksowej analizy wyników obliczeń numerycznych i formułowaniu spójnych wniosków.

Recenzowane publikacje naukowe wyraźnie potwierdzają znaczący wkład Kandydata w realizację złożonych badań oraz Jego przygotowanie do prowadzenia samodzielnych prac badawczych w obszarze szeroko pojętej numerycznej mechaniki płynów i w szczególności w zakresie badań przepływów turbulentnych w układach wirujących.

Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mohammadsadegha Pahlavanzadeha wnosi znaczący wkład w rozwój nauki, w istotny sposób poszerzając wiedzę dotyczącą pracy turbiny Tesli oraz możliwości zwiększenia jej efektywności. Rezultaty uzyskane przez Doktoranta stanowią również wartościowy wkład w rozwój praktycznych zastosowań tego typu urządzeń, zwłaszcza dzięki przeprowadzonej analizie i wdrożeniu modeli chropowatych powierzchni tarcz. Otrzymane wyniki badań mają duże znaczenie dla rozwoju dyscyplin Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka oraz Inżynieria Mechaniczna.

W konkluzji stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Mohammadsadegha Pahlavanzadeha pt.: „*Assessment of the possibility of improving the momentum transfer in the flow between rotating discs*” spełnia wymagania określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym, jakie stawia się pracom doktorskim, i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

dr hab. inż. Sławomir Kubacki, prof. uczelni