

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. 30 grudnia 2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Michała Rajka

pt. „Large Eddy Simulation of Turbulent Single-Phase and Dispersed Two-Phase Flows”

I. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo Zastępcy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku, Pana dr hab. inż. Grzegorza Żywicę, prof. IMP PAN, z dn. 30 października 2025 r.

II. Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Rajka dotyczy opracowania metody LES (ang. Large Eddy Simulation) na potrzeby symulacji jedno- i dwufazowych przepływów turbulentnych, cechujących się znaczną izotropowością i homogenicznością. Zagadnienia podejmowane przez Kandydata, dotyczące poprawy wiarygodności technik obliczeniowych CFD (ang. Computational Fluid Dynamics), odgrywają ważną rolę w analizie zmian pogodowych w meteorologii i mogą pomóc w zrozumieniu procesów prowadzących do powstawania ciepłych deszczy.

W ramach pracy doktorskiej Kandydat opracował autorski kod obliczeniowy, oparty na spektralnej aproksymacji równań Naviera–Stokesa w przestrzeni Fouriera, przeznaczony do symulacji przepływów turbulentnych. Dodatkowo, na potrzeby analiz przepływów dwufazowych, Kandydat zaimplementował w kodzie obliczeniowym lagranżowski model pozwalający na wyznaczanie trajektorii ruchu dyskretnych cząstek, traktowanych jako uproszczona reprezentacja kropeł wody. Zastosowanie lagranżowskiego modelu dla fazy dyskretniej umożliwiło przeprowadzenie analiz przepływów dwufazowych przy założeniu różnych wartości liczby Stokesa, zarówno z uwzględnieniem, jak i bez uwzględnienia wpływu przyspieszenia grawitacyjnego. Uzyskane wyniki badań mają istotne znaczenie w zrozumieniu procesu koncentracji dyskretnych cząstek w wybranych obszarach przepływu turbulentnego i mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w atmosferycznej warstwie przyściennej.

Praca doktorska Pana mgr inż. Michała Rajka obejmuje szereg nowych elementów, które mają istotne znaczenie do rozwoju dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. W ramach pracy opracowany został nowy model LES (ang. Large Eddy Simulation), bazujący na przyjęciu różnych wartości lepkości podsiatkowej, zależnej od liczby falowej. Wyniki uzyskane

z zastosowaniem modelu LES, są w lepszej zgodności z wynikami DNS (ang. Direct Numerical Simulation), od tych które uzyskano z zastosowaniem klasycznego modelu LES, dostępnego w literaturze. Kluczowym aspektem pracy było podjęcie tematu rozwoju wspomnianej metody LES, co pozwoliło na przezwycięzenie ograniczeń podejścia DNS w analizach przepływów turbulentnych charakteryzujących się dużą liczbą Reynoldsa. Tego typu przepływy są charakterystyczne dla procesów występujących w atmosferycznej warstwie przyściennej, a rozwój metod LES umożliwia prowadzenie analiz numerycznych dla warunków zbliżonych do tych panujących w rzeczywistości. Ze względu na duże wymagania dotyczące jakości siatki obliczeniowej, analizy dla dużej liczby Reynoldsa nie są obecnie dostępne dla podejścia DNS, dlatego też opracowanie wiarygodnej metody LES było kluczowe w ramach realizowanej pracy. Wyniki uzyskane przez Kandydata mają istotne znaczenie zarówno w zakresie lepszego zrozumienia procesów występujących w warstwach chmurowych, jak i dla zastosowań praktycznych w meteorologii.

Ważnym elementem pracy było opracowanie członu źródłowego w równaniach Naviera–Stokesa, którego celem było odtworzenie warunków przepływu charakterystycznych dla atmosferycznej warstwy przyściennej. Wykorzystany człon źródłowy zapewniał utrzymanie odpowiednich relacji między skalami przestrzennymi w trójwymiarowym obszarze obliczeniowym o kształcie sześciangu z okresowymi warunkami na przeciwległych brzegach. Dzięki zastosowaniu członu źródłowego możliwe było uzyskanie statystycznie zbieżnych wyników symulacji numerycznej dla fazy dyskretniej w analizach przepływów dwufazowych.

Uzyskane wyniki badań są wartościowe i wnoszą istotny wkład do rozwoju nauki, przyczyniając się do lepszego zrozumienia mechanizmów odpowiedzialnych m.in. za koncentrację dyskretnych cząstek w wybranych obszarach przepływu turbulentnego. Szczególne znaczenie ma przeprowadzenie analiz uzyskanych wyników badań z zastosowaniem różnych technik LES. Prace te obejmowały m.in. szczegółową analizę jakościową i ilościową, opartą na badaniach widm energii, funkcji gęstości prawdopodobieństwa oraz funkcji rozkładu radialnego (RDF) w celu oceny wybranych technik LES oraz lagranżowskiego modelu fazy dyskretniej.

Przeprowadzenie analiz wymagało dogłębnego studium literatury przedmiotu. Doktorant dokonał trafnego doboru publikacji kluczowych dla realizacji pracy doktorskiej i odwołał się w treści pracy do właściwych źródeł literaturowych.

III. Struktura rozprawy i ocena jej wartości naukowej

Praca doktorska składa się z sześciu rozdziałów, w których przedstawione zostały zastosowane metody badawcze, uzyskane wyniki badań oraz nakreślono kierunki dalszych prac badawczych. Praca zawiera również streszczenia rozszerzone w języku polskim i angielskim, syntetyczne podsumowania treści poszczególnych rozdziałów, a także podsumowanie osiągnięć Doktoranta. Praca ma liczne odniesienia do literatury, obejmujące 229 pozycji.

Tezy pracy zostały sformułowane we wstępie i w mojej ocenie, zdefiniowane są w sposób ambitny. Pierwsza teza dotyczy stwierdzenia, że zastosowanie metody LES uzupełnionej odpowiednim modelem podsiatkowym, opracowanym przez Doktoranta, może stanowić wydajne narzędzie służące do symulacji przepływów turbulentnych występujących w strukturach chmurowych. Teza ta została potwierdzona wynikami uzyskanymi przez Kandydata. Druga teza, odnosząca się do niewielkiego znaczenia modelu podsiatkowego dla fazy ciągłej w otoczeniu dyskretnych cząstek, została zasadniczo wykazana w oparciu o dane literaturowe zaprezentowane w rozdziale 4.6. Z jej analizy wynika, że opracowanie wiarygodnego modelu podsiatkowego dla fazy dyskretniej pozostaje nadal poważnym wyzwaniem badawczym, przy czym zagadnienie to nie było przedmiotem szczegółowych analiz w niniejszej pracy. Niemniej jednak, uzyskane przez Doktoranta dobre wyniki badań przy zastosowaniu modelu LES bez modelu podsiatkowego w otoczeniu fazy dyskretniej

wskazują, że rola tego modelu podsiatkowego jest drugorzędna, co pozwala stwierdzić, że druga teza pracy również została potwierdzona.

Rozdział 1 stanowi krótkie wprowadzenie do metod symulacji przepływów turbulentnych i symulacji przepływów dwufazowych z cząstkami stałymi.

Rozdziały 2 i 3 stanowią istotny element pracy, dotyczący symulacji przepływu turbulentnego dla fazy ciągłej z założeniem homogenicznej i izotropowej turbulencji. Wykonane symulacje realizowane były z zastosowaniem technik DNS i LES. Obliczenia realizowano w przestrzeni Fouriera. Człony konwekcyjne wyznaczano w klasyczny sposób w przestrzeni fizycznej i dokonano ich transformacji, z zastosowaniem szybkiej transformaty (FFT), do przestrzeni Fouriera. W celu ograniczania błędu aliasingu zastosowano metodę 3/2 (Orszag i in.). W celu uzyskania odpowiednio długiego czasu symulacji, niezbędnego do gromadzenia statystyk przepływu, zastosowano wymuszenie w postaci członu źródłowego dodanego do równań Naviera–Stokesa. Element ten zapewniał dopływ energii do układu na poziomie równoważącym dyssypację energii kinetycznej turbulencji, umożliwiając uzyskanie statystycznie zbieżnych wyników dla fazy dyskretniej. Opisywana w rozdziałach 2 i 3 metoda badawcza odpowiada powszechnie stosowanym podejściom w analizie tego rodzaju zagadnień i została przygotowana w sposób staranny i przemyślany.

Należy podkreślić samodzielną implementację przez Doktoranta ww. metod numerycznych w autorskim kodzie obliczeniowym, bazującym na rozwinięciu równań w szeregi Fouriera. Kod został opracowany przez Kandydata w całości od podstaw. W podrozdziale 2.10 przeprowadzono testy dokładności rozwiązania dla symulacji procesu rozpadu struktur wirowych (bez wymuszenia), na bazie porównania uzyskanych wyników z danymi dostępnymi w literaturze. Dobra jakość wyników potwierdziła poprawność implementacji wspomnianej metody numerycznej. Następnie, Autor przedstawił interesujące wyniki analiz DNS z wymuszeniem członem źródłowym, zestawione w Tabeli 2.2 (str. 36). W Tabeli 2.1 zestawiono numery przypadków wraz z minimalną i maksymalną liczbą falową w obszarze której zastosowano wymuszenie członem źródłowym. Wyniki obejmują symulacje przepływów turbulentnych z zastosowaniem DNS, przyjmując dostatecznie duże wartości liczby Taylora, typowe dla analiz przepływu za kratą turbulizacyjną (Sreenivasan, 1995). Wyniki te potwierdziły, zgodność statystyk w sensie uzyskiwanych wartości stosunku wzdłużnej skali całkowitej L_1 do turbulentnej skali długości L_t z wynikami literaturowymi (Pope, 2000), potwierdzając skuteczność zastosowanej metody wymuszenia z pomocą członu źródłowego. Moja uwaga, dotyczy obserwacji, że uzyskiwane dla przedziału liczb Taylora (65-48, Tabela 2.2) stosunki L_1/L_t bliższe są wynikom uzyskiwanym w klasycznym opisie (Pope, 2000) dla większych wartości liczby Taylora powyżej 200-500. Analiza wyników wskazuje, że składnik źródłowy nie wywiera negatywnego wpływu na statystyki przepływu turbulentnego w rozważanym zakresie liczb Reynoldsa. Ponadto, dane zawarte w Tabelach 2.2 i 2.3 potwierdzają dobrą zgodność wyników DNS z danymi literaturowymi.

W Rozdziale 3 zaprezentowano interesujące wyniki analiz z zastosowaniem metody LES. W celu oceny jakości wybranych modeli LES, Doktorant przeprowadził filtrację danych DNS w przestrzeni Fouriera z użyciem filtru dolnoprzepustowego, uzyskując dane porównawcze określane jako *a priori* LES. Dalej, w rozdziale 3 przedstawiono podstawy teoretyczne klasycznych metod LES dla symulacji izotropowej turbulencji (metoda Métais i Lesieura, 1992), jak również pokazano wyniki obliczeń z zastosowaniem tej metody. W Tabelach 3.1 i 3.2 przedstawiono wyniki symulacji LES, które zostały uzyskane dla bardzo dużych wartości liczb Reynoldsa, bazujące na skali długości Taylora, rzędu 4000-10 000. Wskazane liczby Reynoldsa są charakterystyczne dla przepływów w atmosferycznej warstwie przyściennej. Pokazuje to zasadność stosowania metod LES do opisu ruchu turbulentnego w atmosferycznej warstwie przyściennej. Warto również zwrócić uwagę na wyniki analiz przedstawione na rys. 3.10, dotyczące wyznaczenia wartości stałej Kolmogorowa C_k , które potwierdzają, że

zastosowane metody LES umożliwiają uzyskanie wartości stałych charakterystycznych dla turbulencji w atmosferycznej warstwie przyściennej. Doktorant opracował również własną metodę LES (rozdział 3.7), uzyskując wyniki będące w lepszej zgodności z wynikami DNS (rys. 3.16), od wyników uzyskanych z zastosowaniem klasycznego modelu LES. Opracowanie techniki LES z adaptacyjnym modelem podsiatkowym, dedykowanym do symulacji izotropowej

i homogenicznej turbulencji, stanowi moim zdaniem jedno z większych osiągnięć Doktoranta.

W Rozdziale 4 zaprezentowano matematyczny model służący do opisu trajektorii ruchu cząstek dyskretnych w ujęciu lagrażowskim. Zastosowane równania ruchu mają klasyczną postać. Uwzględniony został wpływ gradientu ciśnienia, masy dodanej, naprężeń lepkich, efektu historii przepływu oraz siły grawitacji na dynamikę ruchu cząstek. Do lagrażowskiego opisu ruchu cząstki (równ. 4.1) konieczna jest znajomość prędkości fazy ciągłej w położeniu dyskretnej cząstki. Doktorant przedstawia implementację procedury estymacji prędkości płynu w położeniu cząstki z wykorzystaniem interpolacji metodą B-splajnów. Jednym z głównych wniosków, wynikającym również z analizy danych literaturowych, jest stwierdzenie, że w lagrażowskim opisie ruchu fazy dyskretnej, możliwe jest pominięcie wpływu skal podsiatkowych. Autor uzasadnił pominięcie wpływu podsiatkowych składowych fluktuacyjnego pola prędkości ograniczonym poziomem rozwoju dostępnych modeli. Uwzględniając zakres oraz stopień złożoności pozostałych zagadnień badawczych realizowanych w pracy w obszarze symulacji przepływów dwufazowych, przyjęte założenie można uznać za w pełni zasadne.

W Rozdziale 5 przedstawiono wyniki analiz numerycznych przepływu dwufazowego, w którym rozpatrywany jest ruch dyskretnych cząstek inercyjnych w turbulentnym polu prędkości. W rozdziale tym, przedstawiono zarówno analizy DNS i LES dla izotropowej i homogenicznej turbulencji. Obliczenia DNS wykonano dla niskiej wartości liczby Reynoldsa, bazującej na skali długości Taylora, wynoszącej 100. Analizy LES wykonane zostały zarówno dla niskich jak i dużych wartości liczb Reynoldsa (100 oraz z przedziału 251-680). Celem było porównanie wyników LES i DNS. Doktorant rozpoczyna rozdział od przedstawienia ogólnej motywacji dotyczącej symulacji złożonych procesów zachodzących w dolnych warstwach troposfery, w szczególności procesów prowadzących do powstawania ciepłych deszczy i niejasnej w tym kontekście roli skal turbulentnych z zakresu 20-80 μm . Należy jednak zauważyć, że przedstawiona motywacja nie w pełni koresponduje z zakresem realizowanej rozprawy doktorskiej, która skupia się na analizie trajektorii ruchu cząstek, bez uwzględnienia procesów kondensacji pary wodnej oraz koalescencji kropeł wody (cząstek aerozoli). Należy przy tym podkreślić, że uzyskane przez Doktoranta wyniki dotyczące analizy ruchu dyskretnych cząstek w turbulentnym polu prędkości stanowią istotne osiągnięcie badawcze. W tym kontekście zrozumiałe jest, że na obecnym etapie badań rozszerzanie zakresu analiz o zjawiska, których rola nie jest jednoznacznie określona, mogłoby wiązać się z ryzykiem nieuzyskania satysfakcjonujących rezultatów. Z tego względu decyzję Doktoranta o ograniczeniu zakresu pracy do analiz ruchu cząstek dyskretnych, bez uwzględnienia złożonych procesów fizycznych, oceniam pozytywnie. Doktorant prezentuje interesujące wyniki badań, związane z analizą wpływu liczby Stokesa, bez i z obecnością przyspieszenia grawitacyjnego na grupowanie się dyskretnych cząstek w wybranych obszarach przepływu (rys. 5.3). Na uwagę zasługują także analizy rozkładu funkcji gęstości prawdopodobieństwa kryterium Q w położeniach cząstek, z których wynika, że cząstki wykazują tendencję do lokalizowania się w obszarach charakteryzujących się dużymi wartościami modułu prędkości deformacji oraz niewielkimi wartościami modułu tensora rotacji. W dalszej części Autor dowodzi, że zastosowanie metody LES, z właściwie zdefiniowanym modelem podsiatkowym, umożliwia uzyskanie rezultatów porównywalnych z wynikami symulacji DNS. Szczególnie dobre rezultaty osiągnięto przy użyciu modelu LES opracowanego przez Doktoranta. Warto

podkreślić, że Doktorant nie ogranicza się jedynie do jakościowego zestawienia wyników DNS i LES, lecz przeprowadza również ich ilościowe porównanie w funkcji liczby Stokesa. Szczegółowe analizy obejmują prezentacje widm energii, funkcji rozkładu radialnego oraz funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Uzyskane rezultaty stanowią solidną podstawę do dalszej publikacji wyników badań w czasopismach naukowych.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań oraz zarys kierunków dalszych prac. Jak wskazuje Kandydat, kluczowymi obszarami przyszłych badań mogą być opracowanie modelu podsiatkowego dla fazy dyskretnej i zrównoleglenie kodu obliczeniowego. Pozwoli to na bardziej wydajną realizację symulacji LES dla wyższych liczb Reynoldsa. Kolejnym potencjalnie istotnym kierunkiem rozwoju, który nie został wyraźnie podkreślony przez Doktoranta, wydaje się być również uzupełnienie metody analiz o mechanizmy kondensacji pary wodnej oraz koalescencji kropeł (aerozoli), zwłaszcza w kontekście zastosowań do badań zjawisk zachodzących w strukturach chmurowych.

Pod względem edytorskim praca prezentuje bardzo wysoki poziom, zarówno równania, jak i rysunki zostały opracowane z dużą starannością, a całość jest czytelna w odbiorze.

IV. Mocne i słabe strony pracy

Do mocnych stron pracy należy fakt, że Doktorant przeprowadził szczegółowe analizy wyników badań dla szerokiej gamy przepływów jedno- i dwufazowych z obecnością fazy dyskretnej z założeniem izotropowej i homogenicznej turbulencji z wykorzystaniem autorskiego kodu obliczeniowego wykorzystującego spektralną aproksymację równań. Na szczególne wyróżnienie zasługuje również opracowanie modelu LES, służącego do aproksymacji składowych tensora naprężeń podsiatkowych w przestrzeni Fouriera. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem tego modelu wykazują lepszą zgodność z wynikami DNS, od tych otrzymywanych przy zastosowaniu klasycznego modelu LES Métais i Lesieura. Opracowanie autorskiego kodu obliczeniowego przeznaczonego do symulacji DNS i LES wymagało rozwiązania szeregu problemów numerycznych. Jednym z kluczowych zagadnień było sformułowanie i implementacja odpowiedniego członu źródłowego w równaniach Naviera–Stokesa, którego rolą było zapewnienie oraz utrzymanie warunków charakterystycznych dla izotropowej i homogenicznej turbulencji przez odpowiednio długi czas symulacji. Wymieniony składnik źródłowy miał fundamentalne znaczenie dla poprawności i wiarygodności analiz prowadzonych w odniesieniu do fazy dyskretnej.

Trudno jest znaleźć słabe strony pracy. W mojej ocenie analiza jakości metod LES oparta na porównaniu wyników symulacji z rezultatami odfiltrowanego DNS, przeprowadzona na podstawie analiz funkcji gęstości prawdopodobieństwa kryterium Q, nie dostarcza pełnej informacji na temat roli naprężeń podsiatkowych. Zasadne wydaje się rozszerzenie badań o ocenę wpływu modelowanych naprężeń podsiatkowych, na przykład poprzez porównanie funkcji rozkładu prawdopodobieństwa wielkości, dla których możliwe jest łatwiejsze zdefiniowanie ich odpowiedników podsiatkowych, takich jak charakterystyczne skale długości lub prędkości w ruchu fluktuacyjnym. Zaprezentowane w pracy analizy metod LES oparte na kryterium Q umożliwiają w istocie ocenę wpływu jedynie symulowanego (rozwiązywalnego) pola prędkości, co pozwala na przybliżenie uzyskiwanych wyników do odfiltrowanego DNS. Z punktu widzenia metod LES istotne jest jednak, aby metoda ta prowadziła do rezultatów porównywalnych z DNS, traktowanym jako numeryczny odpowiednik eksperymentu. Moim zdaniem, uzupełnienie analiz o bardziej szczegółową ocenę wpływu naprężeń podsiatkowych mogłoby stanowić kierunek dalszych badań prowadzonych przez Doktoranta.

Kandydat posiada stosunkowo niewielką liczbę publikacji prezentujących wyniki przeprowadzonych badań. Odnotowałem jedną publikację w *Journal of Physics: Conference Series* z 2022 roku oraz jeden rozdział w monografii, przy czym nie jest jasne, czy zestawienie to obejmuje pełny dorobek publikacyjny Doktoranta, gdyż dorobek ten nie został jednoznacznie

wyszczególniony w pracy. Moim zdaniem, uzyskane wyniki mają znaczącą wartość naukową i zasługują na szersze upowszechnienie, na przykład poprzez ich zgłoszenie do czasopism naukowych.

V. Szczegółowe pytania do Autora rozprawy

Poniżej znajdują się szczegółowe pytania do Autora rozprawy:

1. W rozdziale 1.2 (str. 5) Doktorant wskazuje, że jedną z przewodnich motywacji pracy było pogłębienie wiedzy na temat mechanizmów formowania ciepłych deszczy oraz roli przyspieszenia grawitacyjnego w procesach kondensacji pary wodnej i koalescencji kropel. W rozprawie nie zaprezentowano jednak analiz odnoszących się do procesu kondensacji, ani zagadnień związanych z wymianą ciepła, które są kluczowe dla kondensacji i koalescencji kropel. Zasadne wydaje się więc pytanie, czy nadrzędna motywacja pracy nie powinna zostać jednak sformułowana w sposób bardziej adekwatny, tj. skoncentrowana na analizie ruchu turbulentnego fazy ciągłej i dyspersyjnej, bez odwoływania się do procesów, które nie były bezpośrednio przedmiotem badań. Ponadto w przedstawionym planie dalszych badań (rozdział 6.2) Autor rozprawy nie odnosi się do możliwości rozszerzenia opracowanej metody badawczej o elementy pozwalające na modelowanie procesów kondensacji pary czy koalescencji kropel. Proszę o odniesienie się do tej kwestii.
2. W Tabeli 2.2 zestawiono wyniki analiz statystycznych dla różnych konfiguracji wymuszenia realizowanego członem źródłowym w Równ. 2.33. Dla konfiguracji oznaczonych jako case 1, case 2, case 12 oraz case 28 otrzymano wartości stosunku wzdluznej skali całkowitej L_1 do turbulentnej skali długości L_t równe odpowiednio 0.31, 0.33, 0.246 oraz 0.41. Uzyskane wyniki pozostają w zgodzie z danymi prezentowanymi w literaturze (Pope, str. 244), przy czym należy zauważyć, że w pracy Popa dotyczą one przepływów o znacznie większych liczbach Reynoldsa, opartych na skali długości Taylora, rzędu $Re_\lambda > 200$ –500. Dla tak dużych liczb Reynoldsa analizy teoretyczne oraz symulacje numeryczne wskazują na wartość stosunku $L_1/L_t \approx 0.43$. Tymczasem w Tabeli 2.2 Doktorant prezentuje zbliżone wartości tego stosunku, uzyskane dla istotnie mniejszych liczb Reynoldsa, mieszczących się w zakresie $Re_\lambda = 31$ –65. W pracy Popa dla tego przedziału liczb Reynoldsa raportowane są wartości L_1/L_t rzędu 0.8. Proszę o interpretację tych wyników. W szczególności chciałbym zapytać, czy obserwowana zbieżność wyników dla $Re_\lambda = 31$ –65 z rezultatami uzyskiwanymi dla $Re_\lambda > 200$ (Pope, 2000) może wynikać z zastosowanego wymuszenia poprzez człon źródłowy?
3. Na rys. 3.6 przedstawiono widmo energii uzyskane dla analiz DNS i LES z teoretycznym modelem lepkości turbulentnej (odfiltrowany DNS, Równ. 3.23) i ze standardowym modelem danym związkiem 3.22. Doktorant wskazuje, że lepsza zgodność z wynikami DNS z zastosowaniem modelu LES + $v_{e,th}$, wynika z większej podsiatkowej lepkości w obszarze liczby falowej odcięcia (rys. 3.6, prawy). To stwierdzenie wydaje się być prawdziwe i stało się zapewne, podstawą opracowania przez Doktoranta własnego modelu podsiatkowego. Zastanawia mnie jednak, czy zwiększony udział lepkości podsiatkowej dla modelu LES + $v_{e,s}$ w zakresie $k/k_c = 0.0$ –0.6 (rys. 3.6, prawy) nie przyczynia się do stłumienia symulowanych (ang. resolved) struktur wirowych w tym obszarze. Pośrednio, może się to przyczynić do obniżonego poziomu energii na rys. 3.6 (lewy) w odniesieniu do wyników DNS. Na ile ten efekt jest istotny? Proszę o informację, czy bardziej istotne jest poprawne opisanie samej lepkości podsiatkowej w sąsiedztwie liczby falowej odcięcia, która bezpośrednio odpowiada za tempo dyssypacji energii kinetycznej turbulencji w tym obszarze czy

modelowana lepkość pośrednio wpływa na pole prędkości uzyskiwane w obszarze niskich liczb falowych?

4. Na rys. 3.4 przedstawiono rozkłady funkcji gęstości prawdopodobieństwa (PDF) kryterium Q dla analiz DNS i dla metody LES (Równ. 3.22). Podobne wyniki przedstawiono również na rysunku 3.7 na podstawie symulacji DNS, odfiltrowanego DNS (FDNS) oraz dwóch modeli LES. Jak wskazuje Doktorant na str. 59, analiza rozkładów PDF wykazuje zauważalne różnice wartości parametru Q pomiędzy DNS, a metodą LES. Rozbieżności występują w obszarze wysokich wartości Q (ujemne i dodatnie wartości), natomiast dla niskich wartości ($Q \cong 0$) obserwuje się dobrą zgodność wyników LES z DNS. Różnice te wynikają z odfiltrowania wartości tego parametru w metodzie LES, w związku z tym, że gradienty prędkości uzyskane są z odfiltrowanego pola prędkości. Proszę o informację, dlaczego do analiz wybrano kryterium Q , dla którego trudno jest określić udziały modelowane (podsiatkowe) tych wielkości? Wygodniej byłoby analizować rozkłady PDF dla prędkości fluktuacji czy skal długości turbulentnych dla których łatwiej można by oszacować udziały podsiatkowe. Symulacje DNS są często traktowane jako numeryczny odpowiednik eksperymentu. Z tego względu metody symulacji turbulentnych przepływów powinny prowadzić do wyników możliwie zbliżonych do danych eksperymentalnych lub rezultatów DNS. Na podstawie wyników przedstawionych na rysunkach 3.4 oraz 3.7 ocena stopnia takiej zgodności nie jest jednak jednoznaczna. Wydaje się, że uzyskane wyniki LES mogą być poprawne (pokazano to na rys. 3.6 lewy), niemniej trudno jest ustalić poziom zgodności z wynikami DNS z powodu braku możliwości oszacowania wielkości podsiatkowych (modelowanych) dla kryterium Q . Proszę o komentarz lub uzupełnienie ww. analiz?
5. Na stronie 66, powołując się na pracę Sreenivasana [138], Doktorant wskazuje przedział wartości stałej Kołmogorowa C_k od 1.4 do 2.1. Analizy jednowymiarowych widm energii przedstawione w pracy [138] prowadzą do wartości stałej C_1 w zakresie 0.33–0.60. Przyjmując, za pracą Popa (2000), wartość stałej 55/18, można na tej podstawie oszacować wartość stałej Kołmogorowa dla trójwymiarowej turbulencji w przedziale $C_k = 55/18C_1 = 1.01\text{--}1.83$. Górny zakres wartości tych stałych ($C_k = 1.83$) jest mniejszy od założonego w pracy ($C_k = 2.1$). Z drugiej strony, w literaturze dostępne są również prace, w których wskazane są wyższe wartości C_k , rzędu 2.0–2.1, m.in. w badaniach przepływów w atmosferycznej warstwie przyściennej (Jabbari i in., 2020, Dissipation of Turbulent Kinetic Energy in the Oscillating Bottom Boundary Layer of a Large Shallow Lake), co sugeruje na zasadność wyboru ww. zakresu wartości stałych. Niemniej jednak, zasadne wydaje się doprecyzowanie, w jaki sposób, w oparciu o wyniki zaprezentowane w publikacji [138], została przyjęta górna wartość stałej Kołmogorowa $C_k = 2.1$?
6. Na rys. 5.10 pokazane są wyniki uzyskane dla przepływu z fazą dyspersyjną, bez oddziaływania przyspieszenia grawitacyjnego. Autor realizuje testy z zastosowaniem modelu LES przyjmując w jednym z testów wartość stałej Kołmogorowa wynoszącą 2.5. Jak Doktorant wskazuje na str. 125, podobne analizy zostały wykonane, bez uzasadnienia przyczyny wyboru wartości tej stałej, w pracach [37, 40, 66, 82]. Zwiększenie wartości stałej Kołmogorowa do wartości 2.5, może nie być do końca uzasadnione dla symulacji LES przyjmując małe wartości liczby Reynoldsa $Re_\lambda = 100$ (patrz ref. 138). Proszę o uzasadnienie wyboru tak dużej wartości stałej? Czy nie byłoby lepszym rozwiązaniem, w kontekście proponowanych metod LES, opracowanie pewnych funkcji, pozwalających korygować poziom lepkości podsiatkowej, jak zostało to zaproponowane w przypadku modelu LES + $\nu_{e,ar}$. Autor rozprawy ma świadomość tej kwestii, niemniej wyniki te zostały w pracy zaprezentowane. Proszę o komentarz.

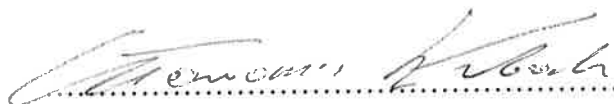
VI. Podsumowanie

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Rajka, stanowi istotny wkład do rozwoju metod obliczeniowych CFD służących do analiz jedno- i dwufazowych przepływów turbulentnych cechujących się dużą izotropowością i homogenicznością. Podejmowane zagadnienia dotyczą analiz ruchu fazy ciągłej (gaz) jak i dyskretnych cząstek (reprezentujących uproszczony model kropel wody czy aerozoli) z założeniem warunków przepływowych typowych dla układów chmurowych. Otrzymane przez Kandydata rezultaty istotnie poszerzają zrozumienie mechanizmów koncentracji dyskretnych cząstek w przepływach turbulentnych, co w perspektywie może umożliwić poprawę stosowanych modeli pogodowych.

Istotnym osiągnięciem Kandydata jest opracowanie nowego modelu LES do analiz swobodnych przepływów turbulentnych, opartego na rozwiązaniu równań Naviera–Stokesa zdefiniowanych w przestrzeni Fouriera. Modele LES, w tym rozwiązanie zaproponowane przez Kandydata, umożliwiają prowadzenie symulacji przepływów turbulentnych przy założeniu dużych liczb Reynoldsa, co ma kluczowe znaczenie dla opisu dynamiki turbulencji oraz procesów koncentracji dyskretnych cząstek występujących w warunkach rzeczywistych, takich jak atmosferyczna warstwa przyścienna. Otrzymane rezultaty znajdują bezpośrednie zastosowanie w obliczeniowej mechanice płynów, badaniach turbulencji oraz analizach przepływów dwufazowych, wnosząc istotny wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

Wysoka jakość uzyskanych wyników, rzetelność przeprowadzonych analiz oraz skuteczność Kandydata w opracowaniu wiarygodnego narzędzia obliczeniowego CFD i modelu LES świadczą o jego znaczącej samodzielności naukowej. Predysponuje to Kandydata do prowadzenia samodzielnych badań w zakresie numerycznych analiz przepływów turbulentnych oraz przepływów dwufazowych, a osiągnięte rezultaty stanowią solidną podstawę do dalszego rozwoju naukowego w tym obszarze.

W konkluzji stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Michała Rajka pt.: „Large Eddy Simulation of Turbulent Single-Phase and Dispersed Two-Phase Flows” spełnia wymagania określone w ustawie z dn. 20 lipca 2018 r – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, jakie stawia się pracom doktorskim, i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania doktorskiego.



dr hab. inż. Sławomir Kubacki, prof. uczelni