

Dr hab. inż. Marta Waclawczyk
Wydział Fizyki,
Uniwersytet Warszawski,
ul. Pasteura 5,
02-093 Warszawa

Warszawa 30.12.2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr. inż. Michała Rajka
pt. "Large Eddy Simulations of Turbulent Single-Phase and Dispersed Two-Phase Flows",
(pol. "Symulacje wielkowirowe przepływów turbulentnych
jednofazowych oraz dwufazowych z fazą rozproszoną")**

**wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Jacka Pozorskiego
W Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Rajka została zgłoszona do oceny decyzją Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnień numerycznego opisu przepływów turbulentnych z fazą rozproszoną, z wykorzystaniem połączonego podejścia eulerowskiego dla fazy ciągłej oraz lagrange'owskiego dla fazy rozproszonej. Do modelowania fazy ciągłej zastosowano metodę bezpośrednich symulacji numerycznych (Direct Numerical Simulation, DNS), polegającą na rozwiązywaniu wszystkich skal przepływu, od największych aż po najmniejsze, dyssypatywne, oraz metodę dużych wirów (Large Eddy Simulation, LES), w której wpływ najmniejszych struktur wirowych zastępowany jest odpowiednim modelem podsiatkowym. Ruch fazy rozproszonej opisano poprzez rozwiązanie równań ruchu w przybliżeniu cząstek punktowych.

Szczególny nacisk położono na możliwość wykorzystania zaproponowanego opisu w kontekście modelowania przepływu kropel chmurowych, intensyfikacji ich zderzeń oraz związanego z tym procesu inicjacji opadu deszczu.

Powstawanie opadu atmosferycznego stanowi jedno z kluczowych, a zarazem najbardziej złożonych zagadnień fizyki chmur. W początkowej fazie rozwoju chmury dominującym mechanizmem wzrostu kropli jest kondensacja pary wodnej na tzw. jądrach kondensacji, prowadząca do stopniowego zwiększania ich promienia. Proces ten jest najbardziej efektywny dla małych kropli, ponieważ szybkość wzrostu ich promienia maleje wraz z jego zwiększaniem się, $dr/dt \propto 1/r$. Po osiągnięciu średnic rzędu 20 μm istotne stają się różnice prędkości opadania kropli, co prowadzi do ich zderzeń, z których część kończy się koalescencją (łączeniem się) kropli. W przypadku zderzeń grawitacyjnych mechanizm zderzeń i koalescencji umożliwia szybki wzrost największych kropli kosztem mniejszych, ponieważ szybkość wzrostu kropli jest proporcjonalna do czwartej potęgi ich promienia, $dr/dt \propto r^4$.

Efektywność procesów zderzeń i koalescencji jest silnie uzależniona zarówno od różnic prędkości opadania, jak i od wpływu turbulencji, która może zwiększać częstość zderzeń, lokalnie zmniejszać lub zwiększać koncentrację kropli, a także modyfikować ich trajektorie i prędkości. Zrozumienie wzajemnych powiązań pomiędzy transportem dyspersyjnym a procesami zderzeń i łączenia się kropli pozostaje jednym z głównych wyzwań współczesnych badań nad dynamiką chmur oraz inicjacją opadu.

W szczególności Autor pracy skupił się na zakresie rozmiarów kropel od 20 do 60 μm . Jest to zakres przejściowy, w którym ani wzrost na skutek kondensacji, ani wzrost wynikający ze zderzeń grawitacyjnych nie są mechanizmami dominującymi. W tym przedziale rozmiarów szczególnie istotną rolę odgrywa turbulencja.

W tym kontekście podjęta w pracy tematyka badawcza jest aktualna i w pełni uzasadnia realizację rozprawy doktorskiej. Autor podjął się zadania wymagającego zarówno pogłębionej wiedzy teoretycznej, jak i zaawansowanych umiejętności w zakresie numerycznego modelowania przepływów. Z formalnego punktu widzenia rozprawę doktorską, opisującą zagadnienia przepływowe o szerokim spektrum potencjalnych zastosowań (nieograniczonych wyłącznie do modelowania przepływów chmurowych), można zakwalifikować do dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Rajka liczy łącznie 170 stron i została napisana w języku angielskim; zawiera również rozszerzone streszczenie w języku polskim. Praca podzielona jest na sześć rozdziałów, po których zamieszczono obszerny wykaz literatury związanej z podjętą tematyką, obejmujący 229 pozycji.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do zagadnień przepływów turbulentnych w ujęciu ogólnym, jak również przepływów turbulentnych z fazą rozproszoną (dyspersyjną), ze szczególnym uwzględnieniem zakresu parametrów charakterystycznych dla przepływów kropel chmurowych.

Rozdział 2 poświęcony jest modelowaniu fazy ciągłej metodą bezpośrednich symulacji numerycznych (DNS) i zawiera pogłębioną analizę stosowanych metod numerycznych, warunków brzegowych oraz przyjętych założeń, w szczególności dotyczących siły wymuszającej. Na początku rozdziału Autor przedstawia równania Naviera-Stokesa w przestrzeni fizycznej oraz w przestrzeni Fouriera, a także omawia związany z przybliżeniem pseudospektralnym problem aliasingu. Następnie zaprezentowane zostało wyprowadzenie równania bilansu energii w przestrzeni Fouriera. Rozdział 2 obejmuje również omówienie zagadnień związanych z całkowaniem równań w czasie, zadawaniem warunków początkowych, szacowaniem niepewności w wyznaczaniu statystyk oraz wpływem błędów zaokrągleń, prowadzących do naruszenia symetrii hermitowskiej modów Fouriera. Autor przedstawił wyniki symulacji DNS dla przypadków zanikającej turbulencji homogenicznej i izotropowej oraz turbulencji homogenicznej, izotropowej i stacjonarnej w sensie statystycznym, wymuszanej zewnętrzną siłą. Szczegółowo przedyskutowano również problem doboru rozmiaru obszaru obliczeniowego oraz zakresu liczb falowych, w których realizowane jest wymuszenie.

W **rozdziale 3** Autor omawia zagadnienia związane z metodą dużych wirów (LES), w tym filtrowaną postać równań ruchu oraz stosowane modele podsiatkowe, poświęcając szczególną uwagę modelom spektralnym. W podrozdziale 3.7 zaproponowano nowy schemat adaptacyjnej parametryzacji skal podsiatkowych w przestrzeni spektralnej, umożliwiający uzyskanie lepszej zgodności pomiędzy modelowanym a zakładanym kształtem spektrum energii, zwłaszcza w zakresie największych rozwiązywanych liczb falowych. Wyniki obliczeń LES z wykorzystaniem różnych modeli porównano z wynikami DNS oraz z wynikami filtrowanych symulacji DNS.

Rozdział 4 rozprawy doktorskiej dotyczy lagrange'owskiej metody rozwiązywania równań ruchu cząstek fazy rozproszonej oraz jej sprzężenia z metodami LES lub DNS stosowanymi do opisu fazy ciągłej. Autor przedstawia szczegóły zastosowanych metod numerycznych, w tym interpolacji z

wykorzystaniem funkcji sklejanych, a także opisuje algorytm wyznaczania spektrum gęstości liczbowej cząstek fazy rozproszonej.

Wyniki symulacji cząstek o niezerowej bezwładności, z uwzględnieniem działającej na nie siły grawitacji, w homogenicznym i izotropowym przepływie turbulentnym, przedstawione są w **Rozdziale 5**. Na ich podstawie Autor przedyskutował zagadnienia związane z preferencyjną koncentracją oraz preferencyjnym 'unoszeniem' (ang. preferential sweeping) cząstek przez struktury wirowe, które skutkuje zmianą prędkości opadania. Poza tym porównane zostały wyniki obliczeń metodami DNS i LES z różnymi modelami podsiatkowymi. W szczególności, Autor badał które statystyki związane z cząstkami fazy rozproszonej, i z jaką dokładnością, mogą zostać odtworzone w metodzie LES.

Ostatni, **6 rozdział** zawiera podsumowanie i omówienie planów dalszych badań.

Praca doktorska mgr. inż. Michała Rajka została napisana bardzo starannie, wnikliwie oraz z dużą dbałością o szczegóły. Jej struktura jest logiczna i przejrzysta. Każdy rozdział zakończony jest podsumowaniem zawierającym dyskusję oraz omówienie najważniejszych osiągnięć. Na szczególną pochwałę zasługuje dokładna analiza istniejących modeli numerycznych, ukierunkowana na identyfikację źródeł ich niedoskonałości i błędów. Doktorant w wielu przypadkach zastąpił stosowane dotąd schematy własnymi, udoskonalonymi rozwiązaniami.

W szczególności Autor zwrócił uwagę na degradację rozwiązań otrzymywanych metodą DNS, związaną z niezachowaniem symetrii hermitowskiej, i w celu korekty tego efektu opracował własny kod obliczeniowy. Interesujące są również analizy dotyczące postaci siły wymuszającej oraz minimalnego rozmiaru obszaru obliczeniowego. Na stronie 41 Autor trafnie zauważa, że zwiększanie liczby Reynoldsa poprzez zadawanie siły wymuszającej na zbyt małych liczbach falowych prowadzi do powstawania skal długości nieadekwatnie dużych w stosunku do rozmiaru obszaru obliczeniowego, co skutkuje wprowadzeniem sztucznej korelacji pól prędkości.

W części pracy poświęconej metodzie dużych wirów Autor zaproponował nowy model adaptacyjnej parametryzacji skal podsiatkowych i wykazał, że jego zastosowanie pozwala uzyskać statystycznie poprawne wyniki preferencyjnej koncentracji cząstek fazy dyspersyjnej na skalach należących do zakresu bezwładnościowego widma energii. Nie umniejszając pozostałych osiągnięć pracy, za szczególnie interesujące uznaję wyniki zaprezentowane w ostatnim rozdziale, dotyczące obliczonych widm koncentracji cząstek, w których ruch fazy ciągłej wyznaczono metodą LES, a następnie porównano z wynikami symulacji DNS przedstawionymi w pracy Matsuda i in. [Phys. Rev. Lett., 132, 2024]. Zgodność wyników w zakresie skal rozwiązywanych metodą LES jest bardzo dobra. Zaproponowany model poprawia również zgodność radialnej funkcji dystrybucji cząstek (ang. *radial distribution function*, RDF) z wynikami referencyjnymi uzyskanymi metodą filtrowanego DNS.

Na uwagę zasługuje również omówienie literatury dotyczącej symulacji ruchu cząstek metodą Lagrange'a, zamieszczone na stronie 89. Autor przedstawia tam zarys historyczny rozwoju formułowania równań opisujących przyspieszenie cząstek fazy rozproszonej. Bardzo pozytywnie należy ocenić także przegląd literatury poświęcony dynamice fazy rozproszonej, przedstawiony w rozdziale 5.4. Dogłębna i starannie przeprowadzona analiza literatury umożliwia zainteresowanemu czytelnikowi pełniejsze zapoznanie się z zagadnieniami podejmowanymi w pracy oraz stanowi cenne wprowadzenie do aktualnego stanu badań w tej dziedzinie.

Pytania oraz drobne uwagi krytyczne do pracy przedstawione są poniżej.

W rozdziale 3.7 Autor proponuje nowy model adaptacyjnej parametryzacji skal podsiatkowych, który wymaga zdefiniowania postaci spektrum energii, uzyskanego na przykład z eksperymentu lub obliczeń numerycznych. Byłaby to zapewne „równowagowa” postać spektrum, która przy dużych liczbach Reynoldsa wykazuje skalowanie typu $k^{-5/3}$. Szereg niedawnych prac, m.in. [Vassilicos, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2015, 47:95–114] oraz - w szczególności [Bos i Rubinstein, *Phys. Rev. Fluids*, 2, 022601, 2017], porusza jednak zagadnienie turbulencji „nierównowagowej”, w której np. po wyłączeniu siły wymuszającej spektrum energii przez pewien czas odbiega od równowagowego skalowania $k^{-5/3}$, również w zakresie bezwładnościowym widma. W związku z tym nasuwa się pytanie, czy metoda zaproponowana przez Autora mogłaby zostać rozszerzona o uwzględnienie zjawisk chwilowej „nierównowagi”, na przykład poprzez odpowiedni dobór skali czasowej w równaniu (3.29).

Autor wielokrotnie nawiązuje w pracy do zagadnienia inicjacji opadu oraz zderzeń kropel chmurowych. W tym kontekście rozdział 5 pozostawia jednak pewien niedosyt. Krople chmurowe charakteryzują się bowiem szerokim zakresem rozmiarów, podczas gdy Autor rozważa wyłącznie przypadki monodispersyjne, choć dla różnych liczb Stokesa. Na podstawie przedstawionych wyników trudno jest wyciągnąć wnioski dotyczące wpływu struktury koncentracji fazy rozproszonej na częstość zderzeń kropel.

W pracy nie znalazłam również odniesień literaturowych dotyczących typowych koncentracji kropli w chmurach typu *cumulus*, do których Autor wielokrotnie się odwołuje. Przyjęto udział objętościowy fazy rozproszonej równy 10^{-5} , co ma uzasadniać pominięcie oddziaływań między cząstkami oraz wpływu fazy rozproszonej na ruch fazy ciągłej. W dalszej części pracy Autor posługuje się jednak zadaną liczbą cząstek równą 10^7 , w celu poprawy zbieżności statystycznej wyników. Nie jest jasne, jakim wartościom udziału objętościowego fazy rozproszonej odpowiadają wyniki przedstawione, na przykład, na rysunku 5.3. Bez jednoznacznego odniesienia do warunków panujących w chmurach typu *cumulus* trudno ocenić, na ile zaprezentowane rezultaty dobrze odzwierciedlają procesy typowe dla tego rodzaju chmur.

Na podstawie pomiarów eksperymentalnych, m.in. [Bony i in., *Surv. Geophys.*, 38, 1529–1568, 2017] oraz [Arabas, Pawłowska i Grabowski, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L11803, 2009], wodność w chmurach *cumulus* wynosi około 0,5–1 g/kg, co odpowiada udziałowi objętościowemu rzędu 10^{-6} . Sugeruje to, że w rzeczywistych przepływach atmosferycznych wpływ fazy rozproszonej na ruch fazy ciągłej jest znikomy. Tymczasem na stronie 122 Autor omawia zagadnienia związane z oddziaływaniami dwukierunkowymi (*two-way coupling*) oraz ich wpływem na prędkość opadania kropel. Trudno również potwierdzić, aby preferencyjna koncentracja cząstek mogła w istotny sposób oddziaływać na modele fazy ciągłej w warunkach atmosferycznych. W konsekwencji, w niektórych fragmentach pracy nie jest jednoznaczne, które rozważania odnoszą się bezpośrednio do przepływów atmosferycznych, a które mają charakter ogólny i dotyczą innych przypadków przepływów dyspersyjnych.

W pracy przydałaby się również szersza dyskusja dotycząca obecnie stosowanych modeli parametryzacji zderzeń kropel, uwzględniających wpływ turbulencji, na przykład [Lian-Ping Wang i in., *New J. Phys.*, 10, 075013, 2008]. W tym kontekście otwarte pozostaje pytanie o kierunki dalszych badań związanych z metodami zaprezentowanymi w rozprawie oraz o to, w jaki sposób

mogłyby one przyczynić się do udoskonalenia istniejących parametryzacji dla kropeł chmurowych o rozmiarach z zakresu 20-60 μm w modelach LES dla chmur typu cumulus.

Na str. 5 Autor stwierdza, że przepływy w chmurach cumulus można z dobrym przybliżeniem uznać za homogeniczne i izotropowe w pewnym zakresie skal. Jest to oczywiście uproszczenie, które nie jest prawdziwe w pobliżu brzegów chmury, gdzie zachodzą procesy mieszania i „wciągania” powietrza suchego do wnętrza chmury.

W kilku miejscach pracy, np. na str. 24–25, dyskusja wyników wcześniejszych badań innych autorów ma charakter krytyczny. Trzeba jednak pamiętać, że problemy zidentyfikowane w poprzednich pracach często mogą być rozwiązane w inny, lepszy lub bardziej optymalny sposób. Na tym właśnie polega rozwój nauki i bardzo dobrze, że Autor zaproponował własne metody. Niemniej, niektóre sformułowania używane w pracy mogą być źle odbierane; moim zdaniem rozprawa doktorska nie powinna służyć za krytyczną recenzję prac innych badaczy.

Na str. 150–151 Autor wspomina o metodzie *super-particle*. Nie jest jasne, czy tekst na str. 151 „as proposed in (4)” odnosi się do numeru równania, czy do pozycji literaturowej. Pozycja [4] w bibliografii to praca Reynoldsa z 1984 roku dotycząca turbulencji. Być może Autor miał na myśli metodę *super-droplet*, opisaną np. w: [Arabas, S., and S. Shima, 2013: Large-Eddy Simulations of Trade Wind Cumuli Using Particle-Based Microphysics with Monte Carlo Coalescence. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 2768–2777, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0295.1>.], [Shima, S., Kusano, K., Kawano, A., Sugiyama, T. and Kawahara, S. (2009), The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 135: 1307-1320. <https://doi.org/10.1002/qj.441>]. Przydałoby się krótkie wyjaśnienie na czym polega wspomniana przez Autora metoda.

Drobne uwagi redakcyjne:

Pod równaniem (2.82) brakuje oznaczenia po jakich $\mathbf{k}$ sumowane jest spektrum energii. W kolejnym równaniu (2.83) to samo oznaczenie wykorzystane jest do sumowania po wszystkich $\mathbf{k}$.

W równaniu (3.25) $E(\mathbf{k})$ powinno być pomnożone przez $k^{5/3}$.

Na str. 74, 6 linia „is should be once again empasized”, powinno być „it should be once again empasized”

Mimo wymienionych powyżej uwag ktytycznych rozprawę doktorską mgr inż. Michała Rajka oceniam bardzo pozytywnie. Praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, podejmując istotny temat symulacji przepływów turbulentnych z fazą rozproszoną. Praca dokumentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej – spełniając tym samym warunki określone w Ustawie z dn. 20 lipca 2018 r – *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2024 poz. 1571 ze zm.). Wnioskuje o dopuszczenie Doktoranta do dalszych czynności przewodu doktorskiego.

Marta Wacławczyk