

dr hab. Bogdan Rosa, prof. IMGW-PIB
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy
ul. Podleśna 61
01-673 Warszawa
Tel: 22 56-94-362
e-mail: bogdan.rosa@imgw.pl

Warszawa, 24 luty 2020 r.

RECENZJA

pracy doktorskiej **mgra Emanuela O. Akinlabi** wykonana na zlecenie
Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego.
Tytuł rozprawy

„Analysis and modeling of small-scale turbulence”.

Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem
prof. dra hab. Szymona Malinowskiego i dr inż. Marty Wacławczyk
z Instytutu Geofizyki, Wydziału Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego

Informacje i uwagi wstępne

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy badania drobnoskalowych procesów zachodzących w atmosferze. Praca ta ma charakter teoretyczno-obliczeniowy i łączy zagadnienia fizyki atmosfery z elementami mechaniki płynów. Rozprawa składa się z dwóch części. W pierwszej z nich Autor rozwija aparat matematyczny pozwalający precyzyjnie wyznaczać dyssypację energii kinetycznej przepływu turbulentnego na podstawie danych pochodzących z jednowymiarowych serii pomiarowych. Autor bada między innymi, jak anizotropia przepływu wywołana siłą wyporu oraz intermitencja turbulencji przekładają się na dokładność i stosowalność wcześniej opracowanych metod, a następnie proponuje oryginalne udoskonalenie metody iteracyjnej. Analiza własności tych metod została wykonana w oparciu o dane z symulacji DNS (ang. *Direct Numerical Simulations*).

Druga część pracy dotyczy modelowania struktur podskalowych w symulacjach LES (ang. *Large Eddy Simulations*), czyli przy użyciu metody tzw. dużych wirów. Stosowanie parametryzacji w modelach LES jest koniecznością, ponieważ rozdzielczość siatek obliczeniowych jest zbyt mała, aby drobnoskalowe struktury mogły być rozwiązywane. Punktem wyjścia jest standardowy model fraktalny, który następnie Doktorant udoskonala wykorzystując wyniki własnych symulacji LES, wyniki symulacji DNS i analizę danych pomiarowych.

Opisane w rozprawie metody badawcze i przeprowadzone analizy są bardzo rozbudowane i cechuje je duża skala trudności. Treść pracy jest dobrze uporządkowana i mimo że dotyczy dwóch zagadnień naukowych układa się w spójną całość. Cele pracy zostały precyzyjnie zdefiniowane i są dobrze osadzone w terminologii naukowej.

Struktura i zawartość pracy

Praca jest napisana w języku angielskim, a jej główna część liczy 133 strony. Rozprawę poprzedza streszczenie oraz spisy treści i rysunków, zajmujących łącznie 11 stron. Rozdział 1, *Introduction*, zawiera wstęp ogólny z uzasadnieniem podjęcia tematu, opis celów badawczych

Rosa

oraz przegląd rozprawy ze zwięzłym streszczeniem jej elementów nowości. W rozdziale 2 zatytułowanym *Theoretical Background* Autor przedstawił kontekst fizyczny podjętych badań oraz opisał narzędzia badawcze. Kolejne rozdziały od 3 do 5 dotyczą wyznaczania dyssypacji energii turbulencyjnej z zastosowaniem różnych modeli oraz ocenę ich dokładności dla różnych warunków przepływu. Rozdziały od 6 do 8 odnoszą się do drugiej części rozprawy i dotyczą sposobów rekonstrukcji drobnoskalowych struktur wirowych w modelach LES. Rozdział 10 zawiera wnioski i podsumowanie pracy. Tekst rozprawy zamyka bibliografia, licząca łącznie 158 pozycji. Wykaz literatury jest dość obszerny i obejmuje w większości prace opublikowane w ostatnich latach. Można zatem przyjąć, że prowadzone przez Doktoranta badania naukowe opierają się na współczesnym stanie wiedzy. Struktura pracy jest prawidłowa. Wykresy są czytelne i starannie przygotowane.

Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w dwóch renomowanych czasopismach naukowych tj. *Flow, Turbulence and Combustion* (IF 2018: 2,371) oraz *Journal of the Atmospheric Sciences* (IF 2018: 3.282). Obydwa artykuły są dziełem czterech autorów, co jest typowe w tej dziedzinie. Należy jednak dodać, że mgr Emmanuel Akinlabi jest pierwszym, wiodącym autorem tych artykułów. Dodatkowo, część wyników została opublikowana w dwóch artykułach konferencyjnych, których wiodącym autorem jest również mgr. Akinlabi.

Aktualność i wybór tematu

Analiza turbulentnych przepływów atmosferycznych to ważny temat badawczy podejmowany w ostatnich latach w licznych pracach naukowych. Chociaż wiedza w tym zakresie systematycznie się poszerza to pełny, ilościowy opis tych zjawisk nadal pozostaje niewystarczający. Głównym powodem jest duża złożoność problemu, która wynika ze sprzęgania się procesów mechanicznych, termodynamicznych oraz radiacyjnych. Z racji licznych zastosowań w meteorologii szczególnie ważna jest wiedza o przepływach w małej skali. Specyfika i tempo tych zjawisk mają zasadniczy wpływ na dynamikę formowania się opadów, a w konsekwencji na warunki pogodowe. Skala przestrzenna tych procesów jest relatywnie niewielka ($1\mu\text{m}$ - 1m), a zatem procesy te nie są i nie mogą być reprezentowane explicite w numerycznych modelach do prognozowania pogody (ang. *NWP - Numerical Weather Prediction*) takich, jak np. COSMO. W modelach NWP stosuje się zazwyczaj parametryzacje, które są głównym źródłem niepewności prognoz numerycznych. Do opracowania bardziej realistycznych parametryzacji mikrofizycznych procesów chmurowych niezbędna jest szczegółowa, ilościowa wiedza o tych drobnoskalowych przepływach. Z tego punktu widzenia podjęty temat badawczy jest bardzo ważny i aktualny.

Ocena merytoryczna rozprawy:

W **rozdziale 4** znajdujemy opis symulacji numerycznych DNS, na podstawie których Doktorant przeprowadził weryfikację metod do obliczania dyssypacji energii turbulencyjnej. Symulacje te zostały wykonane dla dwóch realistycznych przypadków. Pierwszy z nich odnosi się do górnej warstwy chmury stratocumulus. Konfiguracja tego eksperymentu numerycznego jest zgodna z danymi z kampanii pomiarowej DYCOMS-II. Druga symulacja polegała na modelowaniu swobodnej konwekcji w warstwie granicznej nad lądem. Należy dodać, że symulacje te nie zostały wykonane przez Doktoranta.

W **rozdziale 5** przedstawiona jest obszerna analiza danych z symulacji DNS. Obejmuje ona między innymi porównanie jednowymiarowych widm prędkości dla szeregu różnych cięć przez domenę. Celem tego porównania jest oszacowanie wpływu anizotropii i niejednorodności pól prędkości na kształt widm. Następnie za pomocą standardowych metod, czyli

Rosa

bezpośrednich, iteracyjnych oraz tych opartych na dopasowaniu widma Doktorant wyznacza dyssypację energii. Szczegółowej analizie poddany jest również wpływ rozdzielczości próbkowania sygnału na wartość dyssypacji. W rozdziale tym Doktorant przedstawił również autorską propozycję udoskonalenia metody iteracyjnej.

Rozdział 6 zawiera zwięzłą charakterystykę stochastycznych i strukturalnych modeli podskalowych stosowanych w symulacjach LES oraz ogólne informacje o modelu fraktalnym. Rozdział ten jest wstępem do drugiej części pracy, która dotyczy sposobów rekonstrukcji drobnych struktur wirowych w symulacjach typu LES. W **rozdziale 7** znajdujemy szczegółowy opis modelu fraktalnego ujęty w formalizm matematyczny. Autor zwraca uwagę na istotny element tego modelu, tj. parametr rozciągania, który jest powiązany z wymiarem fraktalnym. Jego wartość i sposób zadawania determinują parametryzację dynamiki w małych skalach, a w konsekwencji kształt widma energii w przedziale inercyjnym. Analiza własności modelu fraktalnego została przeprowadzona w oparciu o wyniki z symulacji LES wykonanych przez Doktoranta oraz wyniki symulacji DNS pobranych z bazy danych „JHTDB - *Johns Hopkins Turbulence Databases*”. Prowadzenie złożonych analiz i wyciąganie wniosków na podstawie różnych typów danych dowodzą wysokich kompetencji Doktoranta. Warto dodać, że symulacje LES zostały wykonane przy użyciu modelu EULAG, który jest zaawansowanym narzędziem obliczeniowym. Obecnie rdzeń dynamiczny modelu EULAG jest wykorzystywany do przygotowywania pre-operacyjnych prognoz pogody w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytucie Badawczym.

Ważnym elementem nowości pracy jest zaproponowana przez Doktoranta, oryginalna metoda wyznaczania parametru rozciągania dla modelu fraktalnego. W nowej metodzie parametr rozciągania jest generowany w sposób losowy, przy założeniu odpowiedniej funkcji gęstości prawdopodobieństwa PDF. Funkcję tę wyznacza się na podstawie wyników z symulacji DNS. Szczegółowe porównanie statystyk przepływów modelowanych za pomocą stałej wartości parametru rozciągania i tej zoptymalizowanej przedstawiono w **rozdziale 8**. Pewną niedoskonałością nowego modelu, jak słusznie zauważa Autor, jest brak poprawnej reprezentacji widma energii w przedziale dyssypacji. Dalej w **rozdziale 9** Autor przedstawia wstępne wyniki modelowania przepływów dwufazowych z wykorzystaniem parametryzacji *super-cząstki*. Faza ciągła jest reprezentowana przez „zamrożone”, czyli stałe w czasie pole prędkości obliczone za pomocą symulacji LES. Ewolucja układu jest analizowana dla różnych wariantów, w tym z filtrowanym polem prędkości oraz przy uwzględnieniu fraktalnego modelu podskalowego. Uważam, że wyniki te posiadają istotną wartość naukową i po odpowiednim przerehabilitowaniu i uzupełnieniu warto je opublikować w czasopiśmie naukowym o zasięgu międzynarodowym. Dane te będą cenną referencją w prowadzeniu podobnych badań naukowych w przyszłości.

Uwagi merytoryczne

1. W Abstrakcie Doktorant stwierdza, że analiza drobnoskalowych struktur może przyczynić się do lepszej parametryzacji modeli klimatu. W ogólności jest to prawda, ale większe znacznie ma parametryzacja dynamiki w małych skalach na modelowanie prognoz pogody.
2. Strona 13 Stwierdzenie „In general, the turbulence flows can be described as a random field” jest dużym uproszczeniem. W typowym przepływie turbulentnym są struktury, które cechują się pewną organizacją przestrzenną. Ma to bezpośrednie przełożenie na dynamikę procesów chmurowych np. średnia prędkość opadających kropeł w przepływie turbulentnym jest większa niż w powietrzu bez turbulencji. Natomiast a w polu losowym prędkość kropeł się nie zmienia.

3. Doktorant dość szczegółowo bada różnice wartości dyssypacji energii wyznaczonych za pomocą różnych metod, natomiast analiza niepewności statystycznych uzyskanych wyników jest potraktowana bardziej pobieżnie.
4. Z tekstu rozprawy trudno wnioskować, czy do wyznaczania dyssypacji energii użyto danych DNS z jednego kroku czasowego, czy też dane zostały uśrednione dla określonego przedziału czasu. To może mieć istotne znaczenie w kontekście dokładności i ogólności uzyskanych wyników.

Praca jest napisana starannie, poprawnie językowo i z zachowaniem zasad stylistycznych. Doktorant nie ustrzegł się kilku drobnych błędów redakcyjnych, które są zestawione poniżej

Błędy drukarskie, stylistyczne i niedoskonałości językowe

Strona 74 „For example, if three interpolating points ... *is* considered

Strona 6 “Statistical tools ... *is* used”

Strona 1 Autor wylicza naukowców badających turbulencją i kończy zdanie „etc”. Poprawnie było by „and others”

Strona 1 „theory on turbulence is non-existent”. W tym kontekście lepiej brzmi “theory of turbulence does not exist”

Strona 5 “The last coauthor ... provides”. Raczej “provided”

Strona 10 “Figure 2.1 shows ... $E(k)$ as a function of wave number”. Na rysunku 2.1 widmo jest przedstawione w funkcji logarytmu z liczby falowej.

Strona 15 „The humid equation”. Raczej “equation for humidity”

Strona 21 Brak wyjaśnienia co oznacza u_l w równaniu 3.2. Autor podaje definicję tego parametru, ale dopiero 2 strony dalej przy opisie funkcji struktury.

Strona 23 brak wyjaśnień parametru C_2 w równaniu 3.19

Brak jest szczegółowych wyjaśnień do jakich przypadków odnoszą się symbole (czerwone kropki i trójkąty) na rysunków 5.7 a i b

Strony 59-60 Rysunek 5.19a i rysunek 5.20a opisy osi pionowej sugerują, że na wykresach zaznaczono stosunek $\varepsilon/\varepsilon_{DNS}$, a nie dwie wielkości ε i ε_{DNS} .

Strona 96 W przedostatniej linii do jednostek Hz zastosowano pismo pochyle, a dalej w tej samej linii do innych jednostek pismo proste.

W spisie literatury brakuje w wielu miejscach znaków interpunkcyjnych po skrótach nazw czasopism.

Rekomendacja

Przedstawiona od recenzji rozprawa doktorska to dojrzałe opracowanie naukowe, które dotyczy ważnej, złożonej, ale również aktualnej problematyki. Doktorant wykazał się ugruntowaną wiedzą w zakresie fizyki atmosfery i modelowania numerycznego oraz udowodnił, że potrafi samodzielnie prowadzić skomplikowane badania naukowe. Uwagi sformułowane w niniejszej recenzji nie wpływają na pozytywną oceny dysertacji. Fakt opublikowania wyników w renomowanych czasopismach naukowych jest dodatkową, pozytywną weryfikacją jakości przeprowadzonych badań. Podsumowując recenzję, stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Emmanuela Akinlabi zatytułowana „*Analysis and modeling of small-scale turbulence*” spełnia warunki określone w ustawie o stopniach i o tytule naukowym. Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony, proponując jednocześnie rozpatrzenie wyróżnienia pracy.

Bogdan Rose