

Prof. dr hab. Szymon Malinowski,
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
Instytut Geofizyki
ul. Pasteura 5
02-093 Warszawa
tel. 22-5546860
e-mail malina@fuw.edu.pl

Warszawa 9 grudnia 2024

Ocena rozprawy doktorskiej mgr Ahmada Ababaei
z tytułu

**“Collision statistics of aerodynamically interacting cloud droplets
in turbulent flows”**

Tematem badań opisanych w rozprawie doktorskiej pana mgr Ahmada Ababaei, z tytułu „Collisions statistics of aerodynamically interacting cloud droplets in turbulent flows” (w języku polskim „Statystyki zderzeniowe oddziałujących aerodynamicznie kropelek chmurowych w przepływach turbulentnych”), którą napisał pod opieką dr. hab. Bogdana Rosy, prof. SGGW, jest próba pogłębienia zrozumienia procesu wzrostu rozmiarów kropelek chmurowych wskutek zderzeń w turbulentnym przepływie wewnątrz chmur.

Tzw. „ciepły” opad atmosferyczny powstaje w wyniku szeregu skomplikowanych procesów fizycznych: transportu pary wodnej przez przepływy atmosferyczne, kondensacji jej części na aerozolu atmosferycznym do postaci mikroskopijnych kropelek, a następnie zlewania, wskutek zderzeń, tych kropelek w większe krople, zwane kroplami opadowymi. W podstawowej wiedzy opisującej te procesy istnieją pewne luki, związane zarówno z niepewną znajomością przepływów turbulencyjnych w chmurach, szczególnie w skalach bliskich skali dyssypacji (najmniejszych skalach przepływu turbulencyjnego), jak i samej dynamiki zderzeń kropelek, w tym oddziaływań hydrodynamicznych pomiędzy nimi. Pan Ababaei, wykorzystując nowoczesne metody modelowania numerycznego, wykonał szereg eksperymentów numerycznych łączących techniki tzw. bezpośrednich symulacji numerycznych DNS (ang. Direct Numerical Simulations) najmniejszych skal przepływu turbulentnego powietrza z lagranżowskimi symulacjami zanurzonych w tym przepływie i oddziałujących z nim kropelek chmurowych, t.j. kropelek o rozmiarach od 10 do 60 mikrometrów. Przebieg i wyniki tych hybrydowych symulacji (HDNS), opisano w pięciu współautorskich publikacjach (w czterech z nich był pierwszym autorem) które ukazały się w latach 2021-2024 w wiodących czasopismach naukowych z obszaru mechaniki płynów i fizyki atmosfery (Journal of Fluid Mechanics, International Journal of Multiphase Flow, Physical Review Fluids, Journal of the Atmospheric Sciences). W towarzyszącej publikacji rozprawie Doktorant bardzo starannie opisał swój naukowy wkład w badania i poszczególne publikacje, tak że recenzent posiada wszystkie informacje niezbędne do oceny rozprawy.

Zawartość merytoryczna rozprawy.

Rozprawa stanowi podsumowanie szeregu eksperymentów numerycznych, których celem, jak już

wspomniałem, było zbadanie jakie oddziaływania mają znaczenie dla procesu zderzeń i zlewania kropeł powstałych w wyniku kondensacji pary wodnej w turbulentnym wnętrzu chmur.

We wstępie do rozprawy, po krótkim zarysie stanu wiedzy na temat powstawania opadu i potrzeby badania procesu zderzeń i zlewania kropeł, Doktorant podkreśla, że badane zagadnienie ma więcej zastosowań środowiskowych a także inżynierskich i technologicznych. Jednak warunki, w jakich przeprowadzono eksperymenty numeryczne jednoznacznie wynikają z postawionego głównego celu badań. W drugiej części wstępu następuje zarysowanie postępu badań numerycznych nad dynamiką cząstek zawieszonych w przepływie turbulentnym w kontekście ich możliwych zderzeń i mechanizmów fizycznych, które są ważne dla tych procesów. Omawiane są koncepcje wzrostu prędkości względnych cząstek wskutek oddziaływania przepływu, „preferential concentration” – zmiany lokalnej koncentracji cząstek bezwładnych poruszających się po innych trajektoriach niż ośrodek w którym się znajdują, a także „particle sweeping”, efektywnego przyspieszenia opadania ciężkich cząstek w polu turbulencji. Wspomniane jest kilka innych efektów, w tym związanych z oddziaływaniem aerodynamicznym kropeł między sobą, będących głównym przedmiotem badań.

Rozdział 2 to omówienie metodologii badań: rozwiązywania ruchu zespołu pojedynczych kropli w polu turbulencji. Przepływ turbulentny symuluje się z wykorzystaniem bezpośredniego numerycznego rozwiązywania równań Naviera-Stokesa (direct numerical simulations, DNS. W tak uzyskanym polu przepływu oblicza się lagranżowski ruch zanurzonych w przepływie kropli (w tym momencie mamy tzw. hybrid DNS, HDNS). Zależnie od zastosowanych przybliżeń można, wykorzystując te metodykę dodawać człony opisujące różne efekty oddziaływania kropli z przepływem, a także wpływ kropli na przepływ ośrodka w którym się poruszają. Ten aparat matematyczno-numeryczny to narzędzie, a doktorant wykorzystuje je badając kolejne własności kropli czy oddziaływania kropli-otoczenie na statystyki ich zderzeń i położen wzajemnych. W ten sposób Doktorant bada szereg hipotez:

- 1) oddziaływania aerodynamiczne między kroplami, w tym efekty lubrykacji wpływają na dynamikę ruchu kropli;
- 2) oddziaływania wzajemne dwu kropli są zakłócone przez przepływy wody wewnątrz kropli i efekty molekularne (związane z niespełnieniem założenia ośrodka ciągłego w bardzo małych skalach);
- 3) statystyka zderzeń kropełek w polu turbulencji zależy od mobilności powierzchni i wspomnianych efektów molekularnych;
- 4) uwzględnienie wzajemnej wymiany pędu między powietrzem i kropelkami wpływa na statystki zderzeń.

Dodatkowa hipoteza sformułowana przez autora o możliwości optymalizacji obliczeń aktualnych implementacji HDNS jest oczywiście prawdziwa i nie będzie w tej recenzji danej omawiana.

W pracy „On the effect of lubrication forces on the collision statistics of cloud droplets in homogeneous isotropic turbulence.” doktorant i współautorzy pokazują, że uwzględnienie zarówno długozasięgowych, jak i krótkozasięgowych oddziaływań aerodynamicznych kropeł wpływa na prędkości wzajemne i rozkłady położen na krótkich odległościach, szczególnie dla dużych koncentracji kropeł w

chmurze.

Publikacja "A novel parallel approach for modeling the dynamics of aerodynamically interacting particles in turbulent flows" poświęcona jest poprawie algorytmów numerycznych symulacji HDNS i lagranzowskich kropli. Dokumentuje biegłość doktoranta w posługiwaniu się bardzo zaawansowanymi narzędziami numerycznymi do stopnia pozwalającego na poprawę wydajności tych narzędzi.

W kolejnej pracy "Collision efficiency of cloud droplets in quiescent air considering lubrication interactions, mobility of interfaces, and non continuum molecular effects." doktorant i promotor przyglądają się szczegółowo wzajemnemu ruchowi kropli opadających w nieruchomym powietrzu. Dowodzą, że oddziaływania aerodynamiczne, w szczególności związane z uwzględnieniem efektu nieciągłości (Knudsen), bardziej wpływają na zderzenia, niż np. ruch płynu wewnątrz kropli. To ważny wynik, sugerujący możliwość pominięcia tego ostatniego zjawiska w modelowaniu zderzeń.

Czwarta publikacja "Collision statistics of droplets in turbulence considering lubrication interactions, mobility of interfaces, and non-continuum molecular effects" dokumentuje że w polu turbulencji do dobrego opisanie zderzeń wystarczy przybliżenie kropli jak sztywnych kulek. Efektywność zderzeń rośnie wraz z wodnością i liczbą Stokesa (w praktyce rozmiarem kropli).

W ostatnim artykule domykającym rozprawę "Collision statistics and settling velocity of inertial particles in homogeneous turbulence from high-resolution DNS under two-way momentum coupling" uwagę zwraca uwzględnienie oddziaływania kropli na przepływ. Okazuje się że i w tym wypadku zależności opisujące statystyki zdarzeń są podobne jak i w poprzedniej pracy, to znaczy wystarczy uproszczony opis własności kropel, a efektywność zderzeń rośnie z wodnością.

Najważniejszym wynikiem pracy jest zademonstrowanie, że krótkozasięgowe oddziaływania aerodynamiczne, w tym „smarowanie” – spadku lepkości (także wskutek efektu Knudsen) mają znaczenie dla zderzeń kropelek o rozmiarach 10-60 mikrometrów i nie powinny być pomijane w symulacjach, natomiast przybliżenie kropel jako sztywnych kulek jest wystarczająco dobre i struktura wewnętrzna oraz ruch wody wewnątrz kropel praktycznie nie wpływają na statystyki zderzeń.

Ocena rozprawy.

W ocenie recenzenta praca Pana Ahmada Ababaei spełnia wszystkie wymagania stawiane ustawowo i zwyczajowo rozprawom doktorskim. Symulacje numeryczne które przeprowadził doktorant są bardzo kunsztowne, wpisują się we współczesny nurt badań nad mechanizmami powstawania opadu. Fakt opublikowania wyników w czasopiśmie o bardzo dobrej reputacji, wiodącym w dziedzinie mechaniki płynów i fizyki atmosfery dobrze to dokumentuje. Część opisowa pracy jest krótka i zwarta, ale zawiera wszystkie niezbędne informacje. Pokazuje biegłość autora nie tylko w prowadzeniu badań, ale także opisywania ich wyników, a także umiejętność selekcji najważniejszych informacji, co nie jest częstą cechą młodego naukowca. Redakcja rozprawy jest staranna, wnioski i wyniki sformułowane przejrzysto.

Mimo tych wszystkich zalet, po przeczytaniu rozprawy i wchodzących w nią publikacji, jako badacz eksperymentator czuję pewien niedosyt. Zarówno ta dysertacja, jak i wiele innych artykułów na podobne tematy są oderwane od rzeczywistości w tym sensie, że nie dają żadnych sugestii

eksperymentatorom jak sprawdzać i weryfikować doświadczalnie uzyskane rezultaty. Prac eksperymentalnych w tym obszarze jest stosunkowo niewiele – są trudne, niewdzięczne i kosztowne, ale nawet one nie są cytowane i nie ma prób ich zweryfikowania numerycznego. Ogromne możliwości jakie dają stosunkowo łatwe (pisze „stosunkowo”, bo obiektywnie to są symulacje numeryczne z najwyższej półki) prowadzone są w wyidealizowanych, trudnych do powtórzenia eksperymentalnego warunkach. Jedynym w zasadzie parametrem turbulencji jaki jest zmieniany jest dyssypacja energii kinetycznej, a sytuacjami odniesienia są warunki nieosiągalne laboratoryjnie (np. bez grawitacji). To fascynujące eksperymenty numeryczne, ale bardzo powoli przybliżają nas do celu jakim jest zrozumienie procesu powstawania opadu. Szkoda, że w dyskusji wyników i w rozprawie i w składających się na nią publikacjach ten wątek, jak i odniesienia do nielicznych, ale jednak obecnych w literaturze wynikach eksperymentalnych praktycznie nie występują. Pytanie jakie mam w tym momencie do doktoranta, na które odpowiedź chciałbym usłyszeć na obronie jest takie: jak wyobraża sobie eksperyment numeryczny na temat zderzeń kropli w polu turbulencji, który można by powtórzyć w laboratorium lub obserwować w naturze i porównać wyniki? Odpowiedzią może być też uzasadnienie dlaczego tego nie da się na razie zrobić, ale w takim razie chciałbym usłyszeć jak starać się tak rozwijać symulacje w tym obszarze tak żeby raczej zamykać niż rozwijać jeszcze bardziej lukę między eksperymentem a rzeczywistością wirtualną symulacji HDNS.

To pytanie i uwaga są raczej z dziedziny filozofii współczesnej nauki i sposobu jej uprawiania, niż zarzutem do doktoranta i jego dysertacji. To bardzo dobra rozprawa, dokumentująca nieprzeciętne umiejętności badawcze kandydata do stopnia doktora, umiejętność zaprojektowania, przeprowadzenia i analizy wyników skomplikowanych eksperymentów numerycznych, a następnie ich sprawnego, syntetycznego opisanie. Uzyskane wyniki stanowią ważny przyczynek w zakresie tematyki badań i posuwają nas o krok w kierunku zrozumienia procesu powstawania opadu w atmosferze. Pod względem rzemiosła naukowego to jedna z najlepszych rozpraw doktorskich jakie miałem okazję oceniać. Już w tym miejscu stawiam wniosek o jej wyróżnienie, zdecydowanie za całokształt (świetnie zaplanowane, przeprowadzone badania, solidnie udokumentowana, dobrze opisane i opublikowane wartościowe wyniki) a nie za jakąś szczególną cechę – te w pracy naukowej są często dziełem przypadku.

Rekomendacja.

Z przyjemnością stwierdzam, że rozprawa doktorska pana Ahmada Ababaei spełnia wszystkie wymagania ustawowo i zwyczajowo stawiane rozprawom doktorskim. Praca Jest zdecydowania ponadprzeciętna, co stanowi podstawę wniosku o jej wyróżnienie. To przykład solidnej nauki, a doktorant w rozprawie i składających się na nią publikacjach udowodnił, że jego aspiracje do stopnia naukowego doktora są uzasadnione. Z pełnym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie Pana Ahameda Ababaei do dalszych części przewodu doktorskiego.