

Dr hab. Zbigniew Walenta
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Piotra Korczyka „Drobnoskalowa turbulencja w procesie mieszania chmury z otoczeniem – model laboratoryjny”.

Praca doktorska mgr. Piotra Korczyka, o objętości 119 stron, składa się z siedmiu rozdziałów, sześciu załączników oraz spisu literatury obejmującego 44 pozycje. Poświęcona jest, jak powiedziano w tytule, badaniom – głównie eksperymentalnym – nad rolą drobnoskalowej turbulencji w procesie mieszania chmury z otaczającym ją powietrzem. Wśród nierozwiązanych problemów współczesnej fizyki atmosfery jednym z bardziej istotnych jest problem powstawania t. zw. „ciepłego deszczu” – opadu powstającego bez zarodników lodu. Wszystkie znane dotychczas mechanizmy nie tłumaczą szybkości, z jaką on powstaje. Istnieje przypuszczenie, że to właśnie drobnoskalowa turbulencja przyspiesza tak silnie koalescencję kropeł w chmurach.

Celem, jaki p. mgr. Korczyk postawił przed sobą, było przeprowadzenie „analizy procesów zachodzących w małych skalach w czasie turbulentnego mieszania powietrza chmurowego z czystym powietrzem w warunkach laboratoryjnych i (w szczególności – przyp. mój) zbadanie wpływu parowania kropeł na charakterystyki przepływu”. Spodziewano się, że uzyskane wyniki umożliwią weryfikację zarówno istniejących, jak również nowo opracowywanych modeli procesów tworzenia się opadu.

Eksperymenty stanowiące przedmiot recenzowanej pracy wykonano na specjalnie w tym celu zbudowanym stoisku, składającym się z komory chmurowej (o wymiarach 1m x 1m x 1,8m) oraz układu optycznego, umożliwiającego wyznaczenie pól prędkości metodą anemometrii obrazowej (ang. Particle Image Velocimetry – PIV). Ponieważ anemometria obrazowa wymaga bardzo wyrafinowanej obróbki zdjęć badanego obszaru przepływu, koniecznym okazało się opracowanie specjalistycznego oprogramowania, dostosowanego do konkretnych warunków przeprowadzanego eksperymentu.

W pracy zamieszczono wyniki 50-ciu eksperymentów, w których rejestrowano pola prędkości w chmurze zawierającej kropelki wody; każdy eksperyment polegał na rejestracji 100 par zdjęć wykonywanych z częstotliwością 3Hz. Oprócz tego wykonano pewną liczbę eksperymentów kontrolnych, w których wodę zastąpiono syntetycznym olejem, który praktycznie nie parował. Przyniesione tu liczby świadczą o pracowitości wykonanych badań.

Efektom przeprowadzonych eksperymentów i ich analizy jest obszerna baza danych do porównań z modelami numerycznymi. Najcenniejszym jednak osiągnięciem poznawczym Autora jest, w moim przekonaniu, wykazanie, że parowanie przy niejednorodnym mieszanii mas powietrza ma istotny wpływ na turbulencję nie tylko w skali wielkiej, co od dawna było wiadome, ale również w skali małej. Albowiem właśnie w małych skalach zachodzi koalescencja kropełek, mogąca wywoływać takie zjawiska jak ciepły deszcz.

Rozdział pierwszy recenzowanej pracy, „Wstęp”, zawiera na początku oparte na cytowanej literaturze, skrótowe omówienie podstawowego problemu: powiązania zjawiska parowania kropełek wody z powstawaniem, czy też wzmacnianiem drobnoskalowej turbulencji. Dalej następują cztery podrozdziały: „Turbulencja”, „Turbulencja w chmurach”, „Chmury i opad atmosferyczny”, „Oddziaływanie kropełek z przepływem”, wprowadzające czytelnika w kolejne zagadnienia.

Omawiany rozdział zawiera informacje, które, dla czytelnika dopiero zapoznającego się z zagadnieniem, są niezbędne dla zrozumienia dalszego ciągu. Niestety, czytając go odczuwałem pewien niedosyt – Autor musiał pisać go w pośpiechu, nie starając się o jasność wykładu i precyzję sformułowań. Odnosi się to w szczególności do fragmentu tekstu dotyczącego teorii Kołmogorowa (str. 14). Poza tym mam wrażenie, że w równaniu 1.4.3 pomyłono symbole – mam nadzieję, że to tylko błąd literowy.

Rozdział drugi, „Diagram mieszania – analiza termodynamicznych efektów procesu mieszania”, omawia jakościowo efekty mieszania powietrza chmurowego (mieszanie powietrza suchego i pary wodnej, z zawiesiną kropelek wody) z powietrzem czystym – bez kropelek wody. Autor argumentuje, że gdy masy powietrza o różnej zawartości wody mieszają się niejednorodnie, występują różnice wyporu między sąsiednimi obszarami i w efekcie pojawiają się fluktuacje siły wyporu w całym obszarze mieszania. Efekt jest tym silniejszy im różnice wilgotności między mieszającymi się masami są większe.

Rozdział trzeci, „Anemometria obrazowa – PIV”, zawiera informacje na temat tej techniki pomiaru. Autor opisuje szczegółowo klasyczną metodę PIV, umożliwiającą rejestrację dwuwymiarowego pola prędkości w płaskim przekroju obszaru przepływu, oraz metodę Stereo PIV, która pozwala uzyskać wszystkie trzy składowe prędkości w takimże przekroju. Omawia też szczegółowo program PIV-Kor, opracowany specjalnie dla klasycznej, dwuwymiarowej metody PIV pod kątem jej zastosowania do badania przepływu w modelu chmury, wraz z dodatkowymi algorytmami podnoszącymi dokładność uzyskanych wyników.

Rozdział niniejszy napisany jest jasno i precyzyjnie. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością metody wraz z jej wszystkimi szczegółami. Tworząc program PIV-Kor przyczynił się też niewątpliwie do jej rozwoju.

Rozdział czwarty, „Eksperyment”, składa się z czterech podrozdziałów. Zawarto w nim dokładny opis układu do pomiaru pól prędkości z podaniem jego technicznych parametrów, a następnie omówiono pomiary uzupełniające: wodności bezwzględnej (stosunku masy wody kropelkowej do objętości powietrza, w którym się znajduje) oraz widma kropel. Napisany jest na ogół jasno; zastrzeżenia budzi jedynie trudny do zrozumienia opis programu komputerowego (stworzonego przez Autora) do analizy obrazów kropel dla określania ich widma.

Rozdział piąty, najdłuższy (30 stron) „Wyniki pomiarów charakterystyk turbulentnego pola prędkości” zawiera na początku omówienie wyników pomiaru trzech składowych pola prędkości metodą Stereo PIV. Pomiar ten wskazuje na to, że przepływ w komorze chmurowej może być traktowany jako izotropowy w płaszczyźnie poziomej, natomiast występuje wyraźna anizotropia między kierunkiem poziomym i pionowym. Korzystając ze stwierdzonej izotropowości w płaszczyźnie poziomej, dalsze pomiary wykonywano klasyczną metodą PIV w płaszczyźnie pionowej.

Dalej omówiono pomiar rozkładu prędkości na wlocie do komory chmurowej. Korzystając z metody POD (Proper Orthogonal Decomposition – rozkład na empiryczne funkcje ortogonalne) stwierdzono tam obecność struktur koherentnych, powstałych w wyniku oddziaływania wpływającego powietrza z regularnym brzegiem wlotu.

Następnie poddano analizie przepływ we wnętrzu komory chmurowej. W pierwszej kolejności wyliczono średnią prędkość opadania powietrza chmurowego. Zauważono jej spadek ze wzrostem wilgotności powietrza w komorze, co tłumaczy się tym, że przy mniejszej wilgotności parowanie kropel, a więc i wywołany nim spadek temperatury i wzrost gęstości są intensywniejsze. Wyliczono też szereg parametrów charakteryzujących turbulencję, m.in. mikroskalę Taylora, współczynnik dyssypacji lepkiej, skalę Kołmogorowa. By stwierdzić jaki

wpływ na powyższe parametry ma parowanie kropelek przeprowadzono eksperyment kontrolny, w którym kropelki wody zastąpiono kropelkami oleju DEHS ($C_{26}H_{50}O_4$) o bardzo niskim ciśnieniu pary nasyconej, a więc praktycznie nieparującym. Dla tego oleju prędkość opadania była co najmniej o rząd wielkości mniejsza niż w przypadku wody i dodatkowo szybko malała przy oddalaniu się od wlotu do komory; współczynnik dyssypacji lepkiej, który może stanowić miarę intensywności turbulencji, blisko wlotu był o dwa rzędy mniejszy niż dla wody i z oddalaniem się od wlotu szybko malał. Pragnę tu podkreślić, że wynik ten uważam za najbardziej istotny w recenzowanej pracy.

Nieoczekiwanie, po sprawdzeniu kryterium izotropowości przepływu (iloraz wariancji fluktuacji prędkości w kierunku pionowym i poziomym) dla wody i oleju stwierdzono, że odstępstwo od izotropowości jest w obu przypadkach niemal takie same. Można zatem przypuszczać, że parowanie kropelek nie ma na nie wpływu.

Omawiany rozdział, niewątpliwie najistotniejszy z całej pracy, zawiera bardzo dużą ilość materiału. Najprawdopodobniej by się zmieścić w sensownej objętości Autor potraktował pewne rzeczy może nazbyt skrótowo, co niestety nie ułatwia czytania. Poza tym sędzę, że najważniejszy wynik, o którym mówiłem wyżej, należało chyba bardziej uwypuklić.

Chciałbym jeszcze zwrócić uwagę na to, że we wzorze 5.3.3.2 na stronie 63 jest pomyłka – mam nadzieję, że to tylko błąd literowy w dostarczonym mi egzemplarzu pracy.

Rozdział szósty, „Badania numeryczne” zawiera wyniki obliczenia programem FLUENT 6.3.26 oddziaływania pojedynczych kropelek wody z powietrzem zawierającym nienasyconą parę wodną. Pole prędkości powietrza w chwili początkowej zadane jest wirem o poziomej osi wirowania. Obrazy pól prędkości po upływie skończonego czasu (0,1s) są wyraźnie asymetryczne – prędkość skierowana ku dołowi została zwiększona, ku górze – zmniejszona. Jest to jakościowo zgodne z wykonanymi eksperymentami. Parowanie kropelek obniża temperaturę a tym samym zwiększa gęstość powietrza, przyspieszając jego opadanie i opóźniając wznoszenie się.

Moja krytyczna uwaga odnosi się do równania 6.1.11. Wydaje mi się, że znowu pomyłone są w nim symbole. Dodatkowo świadczyłaby o tym niezgodność z (również błędnym) równaniem 1.4.3, którego jest uproszczoną wersją. Mam nadzieję, że jest to znowu tylko błąd literowy, a nie merytoryczny.

Wydaje mi się, że w Rozdziale siódmym, „Podsumowaniu” należałoby silniej uwypuklić najistotniejszy moim zdaniem wynik pracy, mianowicie wykazanie, że parowanie kropelek przy niejednorodnym mieszaniu mas powietrza intensyfikuje również turbulencję drobnoskalową.

Sformułowane przeze mnie uwagi krytyczne nie umniejszają wartości pracy. Traktuję je jako pomoc dla Autora, mającą mu ułatwić ewentualne przygotowanie jej do druku.

Uważam, że praca w pełni odpowiada warunkom określonym w Art. 11 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Zbigniew Walenta