

prof. dr hab. inż. Jacek Pozorski
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk
tel.: 58 5225145, e-mail: jp@imp.gda.pl

Gdańsk, 12 grudnia 2024

recenzja rozprawy doktorskiej

Mieszanie turbulentne w chmurach – analiza danych doświadczalnych

mgr. Stanisława Króla

Promotor: prof. dr hab. Szymon Malinowski, czł. koresp. PAN

Promotor pomocniczy: dr inż. Marta Waclawczyk

(Instytut Geofizyki, Uniwersytet Warszawski)

1. Wprowadzenie

Przepływy atmosferyczne, wskutek dużej rozpiętości skal turbulencji oraz złożoności fizycznej (obecność fazy rozproszonej, efekty konwekcyjne itd.) wciąż stanowią wyzwanie dla badaczy. W podejściu obliczeniowym, rozwiązywanie pełnych równań Naviera-Stokesa, zwane DNS, możliwe jest tylko w niewielkich obszarach przestrzennych i bywa niekiedy określane jako *Small Eddy Simulation*, w odróżnieniu od metod typu LES (ang. *Large Eddy Simulation*), wymagających modelowania/parametryzacji najmniejszych, nierozwiązywanych struktur przepływu, co może być zasadniczo trudne. Nieodzowne są zatem badania doświadczalne wraz z późniejszą analizą danych pozyskanych z kampanii pomiarowych. Przy tym metody analizy, jeśli mają być skutecznie zastosowane, wymagają – co pokazuje niniejsza rozprawa – pogłębionego rozumienia fizyki zjawiska.

Szczególnym zagadnieniem podjętym przez Doktoranta w niniejszej rozprawie jest dynamika chmur typu cumulus. Ten specyficzny obszar turbulencji atmosferycznej posiada wszystkie cechy wymienione na wstępie: wysokie liczby Reynoldsa, efekt sił wyporu, wreszcie istotna rola procesów turbulentnego makromieszania stref powietrza o różnym udziale masowym wody, która występuje w postaci pary wodnej lub fazy dyspersyjnej w formie kropeł (i może zmieniać stan skupienia). Wysoce nietrywialnym zadaniem jest określenie wielkości charakteryzujących turbulencję występującą w obszarze chmury, na jej dynamicznym brzegu i w najbliższym sąsiedztwie, a także określenie, czy i w jakim przybliżeniu jest to turbulencja izotropowa oraz równowagowa. Tematyka pracy jest aktualna, co uzasadnia sam Doktorant na podstawie przeglądu stanu wiedzy. Jego badania mają oczywistą wartość poznawczą, a przy tym mogą posłużyć do lepszej parametryzacji zjawisk drobnoskalowych w modelach obliczeniowych. Uważam zatem, że wybrany przez Doktoranta oraz jego Promotorów temat badań jest ważny oraz „dysertabilny” – podjęcie rozprawy doktorskiej jest w pełni zasadne.

Z formalnego punktu widzenia rozprawę doktorską można zakwalifikować do dyscypliny Nauki Fizyczne.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa została napisana w języku polskim – liczy 128 stron, a wykaz cytowanej literatury obejmuje 89 pozycji, w tym szereg publikacji z ostatnich kilku lat. Praca składa się z pięciu rozdziałów pokrótce opisanych poniżej, dodatków A-D, jak również streszczeń w języku polskim i angielskim (brak tytułu angielskiego). Streszczenia dobrze oddają zakres pracy oraz istotę osiągnięć przedstawionych w rozprawie.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematyki fizyki chmur typu cumulus, ich ewolucji, w tym roli procesów mieszania. Na tym tle sformułowano problem badawczy: określenie właściwości turbulencji i dynamiki chmury cumulus w jej wnętrzu, na brzegu oraz w powietrzu ją otaczającym.

Rozdział 2 zatytułowany jest „Metody analizy danych” i składa się z dwóch części. W pierwszej przedstawiono elementy wiedzy literaturowej z zakresu teorii turbulencji, na podstawie których na dalszym etapie pracy określono cechy ilościowe przepływu w obszarze chmury, takie jak szybkość dyssypacji energii kinetycznej turbulencji, jak również izotropię oraz stan (nie)równowagi turbulencji. Ta część rozdziału dowodzi dobrego rozeznania Doktoranta w zakresie dynamiki płynów, a w szczególności opisu statystycznego zjawiska turbulencji. W kolejnej części rozdziału przedstawiono elementy teorii nieliniowych, niskowymiarowych układów dynamicznych (ang. LODS), przytoczono równania uproszczonego modelu konwekcji atmosferycznej oraz cechy jego rozwiązania w postaci atraktora Lorenza, w którym występuje zjawisko rekurencji (w dużym uproszczeniu: wielokrotnego przechodzenia quasi-okresowej trajektorii układu przez niewielkie objętości przestrzeni fazowej). Na tym tle przedstawiono ilościową analizę rekurencji (IAR), stosowaną do badań różnorodnych LODS. Wreszcie, przedstawiono oryginalny pomysł zastosowania IAR do analizy przebiegów czasowych wielkości charakteryzujących turbulencję, pozyskiwanych z pomiarów samolotowych. Zdaniem Doktoranta (a także według mojej wiedzy), metody IAR nie używano wcześniej do analiz turbulencji chmurowej.

W **rozdziale 3** opisano kampanię pomiarową, używaną aparaturę/instrumenty, sposób pozyskiwania danych o turbulencji chmurowej oraz ich rodzaje: szeregi czasowe składowych prędkości i temperatury powietrza, rozkład wielkości (PSD) kropel chmurowych.

W **rozdziale 4**, kluczowym dla pracy, a przy tym najdłuższym (blisko połowa podstawowej objętości rozprawy) opisano sposób selekcji danych z pomiarów, przedstawiono wyniki przeprowadzonych analiz na pozyskanym zbiorze danych, dyskusję uzyskanych wyników oraz ich interpretację. Te analizy stanowią esencję pracy i zostaną omówione poniżej.

Rozdział 5 zawiera krótkie podsumowanie najważniejszych wyników rozprawy; cenna jest również dyskusja o możliwych ulepszeniach przy pozyskaniu większej bazy danych oraz wskazanie perspektywicznych kierunków dalszych badań.

W **Dodatk** zawarto informacje uzupełniające, między innymi podjęto kwestię dokładności pomiarów i niepewności uzyskiwanych wielkości pochodnych (**Dodatek A**); opisano pewien techniczny aspekt doboru jednego z parametrów IAR (**Dodatek B**); pokazano wyniki uzyskane poprzez zastosowanie metodyki IAR do danych, które nie pochodziły z pomiarów *in situ* lecz z obliczeń pól wielkoskalowych (LES) (**Dodatek C**, tytuł nieoczywisty); przedstawiono dalsze rysunki szeregów czasowych wielkości uzyskanych z pomiarów samolotowych (**Dodatek D**).

3. Ocena rozprawy i pytania do Doktoranta

Rozprawa doktorska została dobrze przemyślana co do kolejności przedstawianego materiału: poczynawszy od wiedzy literaturowej niezbędnej do zrozumienia dalszej, oryginalnej treści, poprzez informacje o kampanii pomiarowej, aż po własne złożone analizy pozyskanych wcześniej danych. Praca dotyczy ambitnego zamierzenia badawczego wymagającego opanowania i dobrego zrozumienia podstaw opisu statystycznego turbulencji, z naciskiem na efekty występujące w chmurach cumulus będące przedmiotem zainteresowania Doktoranta.

Kwestią podstawową podnoszoną w rozdziale 2 jest ograniczony zestaw danych pomiarowych, co wymaga stosowania metod pośrednich oraz formułowania założeń upraszczających o naturze turbulencji chmurowej. Na przykład istnienie zakresu bezwładnościowego widma energii kinetycznej turbulencji oraz stosownych relacji ilościowych (teoria K41 Kołmogorowa) jest ściśle powiązane z założeniem o izotropii turbulencji oraz występowaniu stanu równowagowego, w którym szybkość widmowego transferu energii jest równa szybkości jej dyssypacji. Jak podają źródła literaturowe, co zresztą pokazuje także sam Doktorant, w warunkach chmury cumulus oba te założenia są spełnione jedynie w przybliżeniu.

Pozyskanie danych o jednej z fundamentalnych wielkości charakteryzujących przepływ – szybkości dyssypacji – jest zasadniczo trudne (za wyjątkiem pełnoskalowych symulacji numerycznych typu DNS), gdyż dominujący wkład do tej wielkości mają najmniejsze skale przestrzenne przepływu, niedostępne w raportowanym w pracy eksperymencie. Stąd wybór metody pośredniego określenia szybkości dyssypacji poprzez inne, łatwiej mierzalne statystyki przepływu. Te metody są znane w literaturze, niemniej jednak należy docenić duży wkład pracy Doktoranta i przeprowadzone przez niego obszerne analizy danych. W połączeniu z dostępnymi z pomiarów informacjami o profilu wodności chmury (ang. LWC), pozwoliło to ocenić jakość/przydatność analiz szybkości dyssypacji jako „indykatora chmurowego”, w tym także służącego do przybliżonego określenia dynamicznego brzegu chmury. Różnice w wartościach szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji wyznaczonych dwiema metodami (z widma energii oraz z funkcji struktury) wynoszą ok. 20% (str. 55), co wydaje się być dobrym rezultatem zważywszy na wszelkie niepewności, w tym co do spełnienia założeń leżących u podstaw stosowanych zależności teoretycznych. Użyteczny byłby w tym miejscu komentarz Autora na ten temat, ewentualnie także przywołanie informacji literaturowych co do uzyskiwanych dokładności w procedurze wyznaczania szybkości dyssypacji, jak również makroskal długości i mikroskali Taylora.

Wysoko oceniam oryginalną ideę Doktoranta, aby dynamikę turbulencji chmurowej potraktować w przybliżeniu LODS i zastosować do tego układu specyficzną technikę analizy rekurencji. Być może idea ta powstała w analogii do sformułowania niskowymiarowego układu dynamicznego Lorenza, w którym także kluczowe są zjawiska konwekcji swobodnej. Przeprowadzone badania z zastosowaniem IAR pozwoliły uzyskać wykresy rekurencji oraz zestaw ilościowych miar rekurencji, które – jak pokazano – mogą dostarczyć informacji o charakterze turbulencji chmurowej w skali lokalnej.

Istotną trudnością w prowadzonych analizach danych pomiarowych był dobór szeregu parametrów kontrolnych, takich jak szerokość „okna” do uśredniania statystyk (typu *moving average* – średnia bieżąca) pozyskanych szeregów czasowych oraz okres uśredniania w dekompozycji Reynoldsa; obie te wielkości są z konieczności z pewnym zakresem arbitralne. Doktorant poświęcił tym kwestiom dużo uwagi stwierdzając, że sposób postępowania przy wyborze wartości tychże parametrów może zauważalnie wpłynąć na finalny wynik.

W kontekście podstaw opisu statystycznego turbulencji powstaje wątpliwość co do sposobu uśredniania: dekompozycję Reynoldsa wprowadzono w równaniu (6) z wykorzystaniem średniej po czasie (oznaczanej symbolem nadkreślenia), natomiast w tekście poniżej równania (7) mowa o średniej po zespole statystycznym (oznaczonej symbolem $\langle \cdot \rangle$). Wątpliwość ta wymagałaby wyjaśnienia (**Pytanie 1**): czy i kiedy te wielkości są równe? czy i jak można stosować średnią po czasie dla przepływów nieustalonych?, itd. Skądinąd Autor dotyka tej kwestii od strony praktycznej przy wyznaczaniu średnich biegnących (str. 59). Proszę także o wyjaśnienie (**Pytanie 2**): nie zauważyłem, czy w tekście pracy wprowadzono oznaczenia ε_u , ε_v , ε_w – czy te wielkości występujące w równaniu (20) są przybliżeniem wartości szybkości dyssypacji przy użyciu odpowiednich skal prędkości fluktuacyjnych u' (dla poszczególnych składowych prędkości)? Sformułowania podane w opisie rys. 4.1.8 („ ε dla wszystkich składowych”) oraz w rozdziale 4.1.3 (czwarta linia) mogłyby nawet sugerować, że chodzi o składowe tensora szybkości dyssypacji. Niezależnie od tej drobnej niejasności, samo określenie stopnia anizotropii turbulencji chmurowej na bazie wskaźnika A_u (zamiennie zwanego też A_v), jak również trójkąta Lumleya jest z pewnością wartościowe, podobnie jak próba określenia, że w obszarze chmury występuje turbulencja nierównowagowa.

Jak pisze Doktorant (str. 21), do wyznaczenia szybkości dyssypacji należy skorzystać z metod pośrednich, między innymi wykorzystując funkcję struktury. Dobrze byłoby wyraźnie określić (**Pytanie 3**), jaki jest obszar stosowalności zależności (15)-(17) – chodzi o zakres wartości argumentu r , opisując przy tym bardziej szczegółowo przebieg funkcji struktury drugiego rzędu D_2 (nazywanej S_2) na prawym panelu rys. 4.1.1 oraz podając charakterystyczne wielkości wymiarowe r (obok wartości wyrażonych w jednostkach umownych) dla pomiarów chmurowych, odpowiadające poszczególnym fragmentom wykresu, skądinąd bardzo ciekawego; na str. 56 podano jedynie krótką wzmiankę o praktycznym kryterium wyboru obszaru inercyjnego. I jeszcze pytanie bardziej ogólne (**Pytanie 4**): na str. 28 Doktorant stwierdza, że „nie istnieje jedna teoria opisu turbulencji” – zatem czym byłaby taka teoria, czego od niej oczekujemy?

Za bardzo ciekawą i nowatorską uważam ideę zastosowania do przypadku turbulencji chmurowej metody ilościowej analizy rekurencji, znanej dla niskowymiarowych układów dynamicznych. Pouczające są ilustracyjne wyniki dla kilku układów fizycznych przedstawione w Tabeli 1 (jak rozumiem, uzyskane przez Doktoranta). Natomiast przepływ turbulentny, mimo swego chaotycznego charakteru (na poziomie opisu jego pojedynczych realizacji) jest układem o bardzo dużej liczbie stopni swobody, zatem kluczowy jest dobór parametrów do analizy rekurencji: możliwie niewielu (aby móc ją zastosować), a zarazem reprezentujących istotę fizyki przepływu. Doktorant proponuje tu wybór trzech wielkości: składowej pionowej fluktuacji prędkości, temperatury oraz energii kinetycznej turbulencji, przekonująco uzasadniając taki wybór. Także uzyskane wyniki, przynajmniej w sensie jakościowym, wydają się go potwierdzać. Można tu jednak pokusić się o **Pytanie 5**: w modelowaniu przepływów turbulentnych do zastosowań inżynierskich często wykorzystuje się domknięcia dwurównaniowe (np. k - ε) oparte na równaniach transportu dla skali prędkości i skali długości (lub wielkości pochodnych). Czy zatem sensowne byłoby uzupełnienie wektora (63) do badań rekurencji o pewną skalę długości (całkową, Taylora)?

Podobnie jak w przypadku poprzednim (wyznaczenie szybkości dyssypacji z pomiarów składowych prędkości w czasie lotu), także w analizie rekurencji występują pewne parametry, które wymagają doboru (próg rekurencji, rozmiar macierzy rekurencji) pod kątem optymalnej eksploracji danych z szeregów czasowych. Analizy IAR to najbardziej złożone badania opisywane w rozprawie; Doktorant wykazuje korelację występujących tam wskaźników (LAM, RR itd.) z określonym na bazie wodności obszarem występowania chmury. Należy

nadmienić, że uzyskane przez Doktoranta i zespół nowe wyniki zostały niedawno opublikowane w czasopiśmie naukowym *Geophysical Research Letters* (2024).

Ostatnim elementem pracy jest określenie statystyk warunkowych (rozdział 4.3), jako że wybrane wielkości wyznaczane w IAR, w szczególności wskaźnik LAM, korelują się, jak pokazuje Doktorant, z występowaniem w chmurze cumulus lokalnych obszarów intermityencji, co pozwala w przybliżeniu określić dynamiczny brzeg chmury. Są to nowe, interesujące wyniki i wydaje się, że jest tu pole do dalszych badań. Natomiast należy zauważyć, że badania już opisane w rozprawie cechuje komplementarny (kompleksowy) charakter prowadzonych analiz: statystyki turbulencji (szybkość dyssypacji, całkowita skala długości), parametry/wskaźniki IAR, a także statystyki warunkowe są zasadniczo spójne i użyteczne do określenia właściwości chmur cumulus.

Uwagi redakcyjne. Praca jako całość jest napisana przejrzysto, staranną polszczyzną (co nie jest obecnie tak częste) i czyta się ją z przyjemnością. Układ rozprawy jest naturalny i logiczny, używane pojęcia i terminy są należycie wprowadzone, stosowane narzędzia wyjaśnione w niezbędnym zakresie, a uzyskane wyniki i wypływające z nich wnioski dobrze przedstawione. Poniższe drobne uwagi nie wpływają na ogólny odbiór i ocenę pracy – dotyczą one tłumaczenia anglojęzycznych terminów naukowych, pomyłek w równaniach i nielicznych usterek językowych. Podobnie jak w przypadku sformułowanych wyżej pytań, prosilibym Doktoranta o odpowiedź i zwięzłe ustosunkowanie się do tych uwag.

- a) Doktorant podaje, że chmury są zjawiskami (str. 1) ale jednak też obiektami/obszarami („procesy w chmurze”, rys. 1.4.1; także str. 49 u dołu), co może wprowadzać pewną konfuzję;
- b) angielskie słowo „rate” Doktorant tłumaczy jako „tempo”, natomiast dobrze ugruntowany jest termin „szybkość” (zmian wielkości w czasie), np. *dissipation rate* to szybkość dyssypacji (energii kinetycznej turbulencji), tensor szybkości (ewentualnie prędkości) odkształcenia itp. Podobnie, termin „całkowa skala turbulencji” (albo „makroskala”) wydaje się trafniejszy niż używana w pracy „skala integralna”. Z drugiej strony, słowo „budżet” używane w znaczeniu „bilans” (np. energii, radiacyjny) zostało już chyba oswojone w polszczyźnie naukowej;
- c) opis cech turbulencji (str. 17, punkt 1): jest prawdą, że przepływy turbulentne „posiadają niezerową wirowość”, ale cecha ta dotyczy także wielu przepływów lepkich w zakresie laminarnym. Należałoby ten punkt doprecyzować (nieustalone pole wirowości występującej w różnych skalach przepływu itd.);
- d) tekst poniżej równania (9): ν to lepkość kinematyczna;
- e) str. 18, 20 i dalsze: mówimy raczej o zakresie inercyjnym lub bezwładnościowym widma (ewentualnie: spektrum) energii, a nie o „skali” inercyjnej;
- f) str. 25: czy współrzędne punktów 2 i 3 są poprawne (por. rys. 2.1.2)? I obok: raczej „ściskanie” niż „skurczenie” (w opozycji do rozciągania struktur turbulentnych);
- g) czy w równaniu (46) określającym elementy macierzy rekurencji nie ma pomyłki w znaku?
- h) czy w równaniu (50) sumy w mianowniku nie powinny startować od wartości l_{min} i ν_{min} ?
- i) str. 42: czym jest „konsekwentna pokrywa chmurowa”?
- j) str. 53, sformułowanie hipotezy Taylora: mówi się raczej o zamrożeniu turbulencji lub jej struktur wirowych – określenie „zamarznięte wiry” jest niefortunne;
- k) str. 53 u dołu: „mieszane” oznaczenie indeksu $i - \tau/2$ jest w sumie jasne (ale oryginalne);
- l) rys. 4.2.2 (także tekst poniżej: „tworzące krzywą”) – same punkty nie dają jednoznacznego obrazu trajektorii;
- m) równanie (65): lepiej oznaczyć liczby NN oraz NN_b pojedynczymi symbolami;
- n) podpis pod rys. 4.2.11 jest niepoprawny;
- o) Dodatek D zawiera 6 uzupełniających rysunków – dobrze byłoby, poza samym odniesieniem na str. 51, podać do nich krótki opis w tekście (interpretacja, wnioski).

4. Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa dokumentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie Fizyka, w szczególności w zakresie fizyki atmosfery oraz turbulencji przepływów, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Jej przedmiotem jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W pracy wyczerpująco przedstawiono własne badania Doktoranta wykorzystujące materiał eksperymentalny; zostały one przeprowadzone z użyciem zaawansowanych metod analizy danych, powiązanych z naturą badanych zjawisk. Ponadto opisano i zinterpretowano uzyskane nowe wyniki wnoszące wkład w lepsze rozumienie procesów chmurowych w atmosferze.

Jestem w pełni przekonany, że opiniowana praca spełnia wymagania stawiane zwyczajowo rozprawom doktorskim oraz odpowiada warunkom określonym w stosownych przepisach obowiązującej Ustawy. W konkluzji **wnioskuje o dopuszczenie mgr. Stanisława Króla do publicznej obrony**. Ponadto, zważywszy na oryginalność pomysłu zastosowania metody analizy rekurencji, znanej z badań nieliniowych układów dynamicznych, do eksploracji danych eksperymentalnych z zakresu turbulencji przepływu i charakterystyki chmur, a także z uwagi na kompleksowy charakter prowadzonych w pracy analiz, proponuję rozważenie **wyróżnienia rozprawy doktorskiej**.

