

**Prof. dr hab. inż. Stanisław DROBNIAK**  
**Instytut Maszyn Ciepłych**  
**Politechnika Częstochowska**

---

**ul. Armii Krajowej 21**  
**42-200 Częstochowa**  
tel.: (034) 3250507; fax: (034) 3250555  
e-mail: [drobniak@imc.pcz.czest.pl](mailto:drobniak@imc.pcz.czest.pl)

Częstochowa, 05.08.2008

## **R e c e n z j a**

**rozprawy doktorskiej mgr Piotra Korczyka:**

**„Drobnoskalowa turbulencja w procesie mieszania chmury z otoczeniem – model laboratoryjny”.**

Recenzja została opracowana na zlecenie Sekretarza Rady Naukowej IPPT PAN Doc. Dr hab. Kazimierza Piechóra, wyrażone w piśmie z 09.06.2008 r.

### **1. Ocena ogólna.**

Tematyka rozprawy dotyczy eksperymentalnego i numerycznego modelowania procesów mieszania w drobnoskalowej turbulencji atmosferycznej. **Temat rozprawy pozwala zakwalifikować ją do dyscypliny mechanika.**

Celem badań wykonanych w ramach rozprawy było zbadanie wpływu przemian fazowych na procesy turbulentnego mieszania ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk drobnoskalowych. **Tak sformułowany cel i zakres pracy jest oryginalny pod względem poznawczym i reprezentuje stopień złożoności odpowiadający zwyczajowo spotykanym w pracach doktorskich.**

Praca dotyczy badań podstawowych, ale biorąc pod uwagę nowatorski charakter i oryginalność uzyskanych wyników, jestem przekonany, że badania Doktoranta mogą mieć wartość aplikacyjną i będą przydatne w rozwoju nowych modeli meteorologicznych.

### **2. Ocena szczegółowa.**

Rozprawę rozpoczyna sformułowanie celu i zakresu pracy, dotyczących stwierdzonej przez Doktoranta luki w wiedzy dotyczącej statystyki prędkości kropeł oraz właściwości drobnoskalowej turbulencji w chmurze.

Zasadniczym celem pracy jest eksperymentalna analiza oddziaływań hydrodynamicznych i termodynamicznych zawiesiny kropeł w turbulentnym polu przepływu symulującym rzeczywiste chmury i weryfikacja tezy o istotnej roli procesu parowania w intensyfikacji produkcji energii kinetycznej turbulencji i procesów turbulentnego mieszania.

Dodatkowo, w rozdziale tym sformułowano następujące szczegółowe zadania, warunkujące realizację zasadniczego celu pracy:

- zbudowanie stanowiska laboratoryjnego umożliwiającego odwzorowanie warunków mieszania w chmurach,
- opracowanie metodyki pomiaru pól prędkości z zastosowaniem 2D i 3D PIV,
- opracowanie teoretycznego modelu zjawiska z zastosowaniem diagramu mieszania.

**Sformułowane w pracy cele są oryginalne i mają dużą wartość poznawczą, wyróżnić tu należy zwłaszcza wątek dotyczący analizy procesów mieszania z uwzględnieniem przemian fazowych w przepływach w chmurze, badania te są podejmowane po raz pierwszy i nie znajdują odpowiedników w opublikowanych do tej pory pracach.**

Rozdz.1. przedstawia bardzo syntetyczny przegląd problematyki procesów mieszania i przemian fazowych w chmurach w obecności turbulencji. Wszystkie podane tu informacje są istotne, lecz z punktu widzenia pracy szczególnie ważne jest stwierdzenie dotyczące konieczności powiązania procesów zachodzących w małych skalach (charakterystycznych dla turbulentnego mieszania) z makroskopowymi własnościami chmur. W rozdziałach 1.1 i 1.2 omówiono pokrótce podstawowe założenia i miary dotyczące struktury turbulencji występującej w chmurach, natomiast w rozdz. 1.3 i 1.4 przedstawiono najważniejsze informacje dotyczące oddziaływania kropeł wody i przepływu w chmurze. W rozdz. 1 zwraca uwagę bardzo trafna dyskusja specyfiki oddziaływania turbulencji z makroskopowymi własnościami chmur, z której wynikają ważne wnioski dla dalszych badań.

W rozdz. 2. Przedstawiono analizę termodynamicznych efektów procesu mieszania z wykorzystaniem diagramu mieszania. Doktorant sformułował prosty model mieszania dwóch mas powietrza o różnych własnościach termodynamicznych (wilgotności), do opisu gęstości zastosował temperaturę gęstościową. Zakładając płaski rozkład gęstości prawdopodobieństwa stosunku zmieszania Doktorant wykazał, że prędkość opadania wydzielonej objętości mieszającego się powietrza suchego z powietrzem chmurowym rośnie wraz ze wzrostem różnicy wilgotności między dwiema masami powietrza. Doktorant wykazał również, że różnica wilgotności między masami mieszającego się powietrza wpływa na rozkład prawdopodobieństwa temperatury gęstościowej. **Model ten mimo swej prostoty prawidłowo**

**odzwierciedla wpływ parowania na intensyfikację procesu mieszania i stanowi oryginalny dorobek Doktoranta.**

Rozdział 3 rozprawy poświęcony jest opisowi PIV, która jest podstawową techniką eksperymentalną używaną w pracy. W rozdz. 3.2 Doktorant podał opis oprogramowania PIV-Kor opracowanego w środowisku MATLAB dla potrzeb analizy pól prędkości badanych techniką PIV. Konieczność opracowania własnego oprogramowania uzasadniono specyfiką przepływu w komorze chmurowej, w której występują duże gradienty koncentracji kropeł. Sformułowanie to jest jednak zbyt ogólne i oczekuję od Doktoranta podania wyjaśnień dotyczących powodów opracowania programu PIV-Kor. Zastosowana przez Doktoranta technika analizy obrazów oparta na analizie korelacyjnej nie jest nowa, oryginalnym wkładem Doktoranta jest natomiast implementacja numeryczna metody. Potwierdzeniem poprawnej implementacji numerycznej jest porównanie wyników otrzymanych z zastosowaniem programu PIV-Kor z rezultatami otrzymanymi z pomocą komercyjnego programu VidPIV. Oryginalnym dorobkiem Doktoranta są dwa nowe algorytmy wprowadzone do analizy obrazów PIV, nazwane w pracy algorytmem redukcji głównego ruchu i iteracyjną metodą deformacyjną. Algorytm eliminacji przemieszczenia nie jest ideą nową (stosowany jest w algorytmach analizy obrazów) jednak nie był on stosowany dotychczas w analizie PIV. Nowym algorytmem jest natomiast iteracyjna metoda deformacyjna, która pozwala na istotną poprawę dokładności metody PIV.

**Zarówno algorytm eliminacji ruchu głównego (zaadaptowany z technik algorytm analizy obrazów) jak i iteracyjna metoda deformacyjna (autorstwa Doktoranta) są istotnymi ulepszeniami metody PIV, należy również zauważyć że zasługą Doktoranta jest przemyślane połączenie nowych propozycji w kompletny schemat umożliwiający istotną poprawę dokładności metody PIV. Oryginalnym wkładem Doktoranta jest również numeryczna implementacja metody analizy korelacyjnej obrazów dla potrzeb techniki PIV, co nie było zadaniem trywialnym.** Zwraca uwagę bardzo logiczna struktura tego rozdziału i wyczerpująca dyskusja metodyki PIV, dokumentująca doskonałą znajomość omawianej tematyki przez Doktoranta.

Rozdz. 4 zawiera opis stanowiska badawczego i ważniejszych technik pomiarowych, zawarte w nim informacje dokumentują duży stopień złożoności użytej techniki PIV. Zwraca uwagę staranność Doktoranta w prowadzeniu eksperymentu i szacowaniu dokładności użytych metod pomiarowych, przykładem może być pomiar średnicy kropeł i uwiarygodnienie uzyskanych wyników poprzez porównanie z rezultatami uzyskanymi przy pomocy innych technik pomiarowych. Na uwagę zasługuje również pomysłowy sposób określania wodności

powietrza z redukcją do przypadku idealnego filtra, zwracam jednak uwagę na brak wyjaśnienia symbolu LWC. Brakuje również wskazania lokalizacji termopar i czujników wilgotności o których mowa na str. 46.

Wyniki badań omówiono w rozdz. 5, zawierającym opis trzech serii badań zróżnicowanych rodzajem zawiesiny i zastosowaną metodą pomiaru. Zasadnicze badania dla zawiesiny kropeł wody wykonano z użyciem 3D-PIV i 2D-PIV, natomiast pomiary dla zawiesiny kropeł oleju DEHS ograniczono dla 2D-PIV. Omówione w rozdz. 5.1 pomiary wykonane techniką 3D-PIV posłużyły do określenia anizotropii przepływu, uzyskane wyniki (rys. 5.1.1) wykazały dwukrotnie większe wartości fluktuacji wzdłużnych w porównaniu z amplitudą fluktuacji w kierunkach prostopadłych. Najważniejszym jednak wnioskiem sformułowanym w rozdz. 5.1. jest stwierdzona izotropowość fluktuacji w płaszczyźnie poziomej co umożliwiło ograniczenie dalszych badań do znacznie mniej złożonej techniki 2D-PIV. Doktorant nie podał lokalizacji punktu pomiarowego z rys. 5.1.1, brakuje też informacji o obszarze objętym pomiarami 3D-PIV, w efekcie nie jest jasne w jakim obszarze przepływu ważne są wnioski dotyczące izotropii w płaszczyźnie poziomej.

Rozdz. 5.2 poświęcony analizie wlotowego pola prędkości zawiera ciekawą analizę POD, której wyniki pozwoliły zidentyfikować tworzące się w tym obszarze struktury koherentne. Użycie tej ciekawej techniki analizy pozwoliło określić udziały energetyczne poszczególnych modów, zrozumienie i zastosowanie tej złożonej techniki wystawia bardzo dobre świadectwo przygotowaniu matematycznemu Doktoranta. Odnoszę jednak wrażenie że wyniki te nie są powiązane z zasadniczym tematem rozprawy, Doktorant winien przedstawić powody, dla których wykonano te złożone i pracochłonne analizy, przykładowo wyniki te mogą mieć istotne znaczenie dla planowanych w przyszłości eksperymentów numerycznych (DNS, LODS). Poparcie stwierdzenia ze strony 58, że w początkowym obszarze przepływu tworzą się struktury koherentne, które zapoczątkowują tworzenie się kaskady wirów można było przecież osiągnąć znacznie prostszymi środkami. Zwracam również uwagę, że przyczyną tworzenia się struktur koherentnych nie jest tarcie płynu o krawędź otworu, lecz procesy utraty stabilności przepływu (patrz komentarz ze str. 57).

**Oryginalnym osiągnięciem Doktoranta są wyniki badań struktury przepływu w komorze chmurowej omówione w rozdz. 5.3. Wartym podkreślenia jest, że Doktorantowi udało się odtworzenie w warunkach laboratoryjnych charakterystyk turbulencji panujących w rzeczywistych przepływach chmurowych, dzięki czemu możliwe było wykonanie pomiarów charakterystyk turbulencji chmurowej z rozdzielczością poniżej skali Kolmogorowa. Najważniejszymi nowymi wynikami pomiarów są:**

- wyznaczenie średniej prędkości opadania i wykazanie jakościowej jej zgodności z wynikami analizy diagramu mieszania,
- rozkłady mikroskal Taylora dla składowych  $u'$  i  $w'$  prędkości fluktuacyjnych dla różnych odległości od wlotu do komory i dla różnych wartości wilgotności,
- określenie wartości turbulენტnej liczby Reynoldsa,
- określenie wartości prędkości dyssypacji i mikroskali Kolmogorowa i wykazanie ich zależności od położenia punktu pomiarowego i wilgotności powietrza,
- wyznaczenie statystyk i funkcji struktury pola fluktuacji prędkości.

**Znaczenie tych wyników polega nie tylko na ich nowości lecz także wynika z faktu, że potwierdzają one zasadniczą tezę pracy o istotnej roli procesu parowania w intensyfikacji produkcji energii kinetycznej turbulencji i procesów turbulენტnego mieszania.**

Wartościowym uzupełnieniem rozdz. 5 jest eksperyment eliminacyjny z zastosowaniem oleju DEHS, charakteryzującego się bardzo niskim ciśnieniem nasycenia a więc eliminującym wpływ parowania na przebieg procesów mieszania. Ten pomysłowy eksperyment w sposób niezależny również potwierdził zasadniczą tezę pracy, gdyż zawiesina kropeł DEHS wykazywała znacznie mniejszą intensywność procesów mieszania i znacznie mniejszą prędkość opadania niż zawiesina kropeł wody. Niefortunne jest zatem sformułowanie Doktoranta ze str. 78, że „...*mimo dołożenia wszelkich starań przebieg eksperymentu nie był identyczny jak z użyciem wody...*”. Skoro prawdziwa jest zasadnicza teza pracy to przecież żadne starania nie mogły doprowadzić do innego niż uzyskany wynik eksperymentu. Zwracam również uwagę, że nie podano informacji o lokalizacji punktów pomiarowych pokazanych na rys. 5.4.2 i 5.4.3 i w związku z tym nie wiadomo z którymi wykresami z rys. 5.3.5.4 i 5.3.5.5 należy te wyniki porównywać.

Bardzo wartościowym elementem pracy jest dyskusja wiarygodności wyników eksperymentu, zamieszczona w rozdz.5.5. Zawartość tego rozdziału wystawia dobre świadectwo staranności Doktoranta w prowadzeniu eksperymentu. Zwracam jednak uwagę, że niedopatrzaniem Doktoranta jest podawanie wykresów w postaci nie zredukowanej, czego negatywnym skutkiem jest ograniczona uniwersalność wyników badań. Identyfikacja podstawowych parametrów decydujących o przebiegu badanych procesów i odpowiednia redukcja osi wykresów jest przecież podstawowym wymogiem formułowanym we wszystkich pracach naukowych ( w tym zwłaszcza w pracach eksperymentalnych).

Uzupełnieniem wyników eksperymentu jest omówiona w rozdz. 6 analiza numeryczna prostego geometrycznie dwuwymiarowego wiru, w którym uwzględniono jednak dość złożoną fizykę badanych zjawisk. Mimo bardzo uproszczonej geometrii w tym prostym lecz

pomysłowym eksperymencie numerycznym uzyskano kolejne potwierdzenie zasadniczej tezy pracy o istotnej roli procesu parowania na generację TKE i intensyfikację procesu mieszania (patrz rys. 6.1.2). Rozdział ten nie zawiera elementów nowości, jednak potwierdza dobrą orientację Doktoranta nie tylko w technice eksperymentu lecz także i w zagadnieniach modelowania numerycznego. Zwracam jednak uwagę, że wbrew stwierdzeniu Doktoranta ze str. 84 obliczenia kodem FLUENT nie były wykonywane metodą elementów skończonych. Uważam, że zupełnie zbędne są „usprawiedliwienia” Doktoranta ze str. 89, że nie przeprowadził w pracy symulacji DNS badanego przepływu, gdyż byłoby to zagadnienie o stopniu złożoności porównywalnym z przyjętym w niniejszej rozprawie zakresem badań.

Praca napisana jest w sposób jasny i komunikatywny, język pracy jest poprawny chociaż Doktorant winien zwrócić większą uwagę na precyzję sformułowań (zauważone błędy sformułowań podaję w załączniku). Niezbyt staranna jest edycja tekstu, w którym znalazłem większą od przeciętnie spotykanych liczbę uchybień (patrz załącznik). Jako istotną wartość pracy uznaję wytyczenie nowych kierunków poszukiwań w modelowaniu zjawisk atmosferycznych, co jasno wynika z badań przeprowadzonych przez Doktoranta.

### **3. K o n k l u z j a**

**Reasumując, przedstawiona do recenzji rozprawa jest samodzielnym rozwiązaniem złożonego zadania naukowego. Doktorant wniósł oryginalny wkład w rozwój metod modelowania przepływów atmosferycznych a uzyskane wyniki badań mają dużą wartość poznawczą i pozwalają stwierdzić, że zrealizowane zostały założone cele pracy. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Piotra Korczyka spełnia wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.**

#### **Zestawienie zauważonych usterek redakcyjnych.**

Str. 6 w. 8g – błąd stylistyczny

Str. 6w.10d. i dalsze strony – „szerokość rozkładu” – nieprecyzyjne sformułowanie

Str.8w1g. - "analiza numeryczna w kontekście" – brak precyzji i żargon

Str.17w9d. – brakuje „kropki”

Str. 20w.11g. błąd stylistyczny „oddziaływanie z przepływem... odbywa się w dwóch...”

Str.23 akapit4g. „stosunek zmieszania pary wodnej” – nieprecyzyjne sformułowanie

Str.24w1g. – nie monotoniczność lecz nachylenie

Str.33w. 16g. – błąd stylistyczny

Str. 57w6g. i dalsze strony – „anizotropia kierunku” – nieprecyzyjne sformułowanie

Str. 64w2d. błąd stylistyczny

Str. 65 i dalsze – „pozycja pomiaru” – nieprecyzyjne sformułowanie

Str. 70 i dalsze „kurtoza" to spłaszczenie

Str. 88 i dalsze „transwersalna” to obwodowa