

Prof. dr hab. Szymon Malinowski,
Instytut Geofizyki UW
ul. Pasteura 7
02-093 Warszawa
tel. 5546860
e-mail malina@fuw.edu.pl

Marina, Kalifornia, 20 lipca 2008

**Ocena rozprawy doktorskiej
Pana mgr. inż. Krzysztofa Dekajło
“Analiza stabilności przepływów termicznych w pochyłej
geometrii”**

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Krzysztofa Dekajło zatytułowana “Analiza stabilności przepływów termicznych w pochyłej geometrii”, napisana pod opieką prof. dr hab. Tomasza A. Kowalewskiego, liczy 160 stron druku. Zaczyna się podziękowaniami, streszczeniem i omówieniem celu i zakresu pracy. Dalej autor zamieścił spis treści i tabele pomocnicze, a zasadnicza część rozprawy podzielona jest na 4 rozdziały. Pracę zamykają załączniki i obszerny, obejmujący 89 pozycji spis literatury.

Tematem pracy jest laboratoryjne i numeryczne badanie przepływów konwekcyjnych nad nachylnym pod kątem do poziomemu podłożem. W szczególności chodzi o badanie reżimów cyrkulacji konwekcyjnych i warunków przejść między tymi reżimami. Inspiracją do badań są spotykane w naturalnych warunkach przepływy atmosferyczne nad zboczami wzniesień, badane w trakcie kampanii pomiarowej VTMX 2000 w dolinie Salt Lake City.

Tematyka ta ma duże znaczenie praktyczne – w wielu zaludnionych regionach o urozmaiconej topografii procesy konwekcyjne wpływają na warunki życia, odpowiadając za np. transport zanieczyszczeń. Także z naukowego punktu widzenia dobór tematu pracy jest odpowiedni: procesy konwekcji w pochyłej geometrii są słabo zbadane, zarówno od strony pomiarowej, jak i teorii. Zastosowana technika badawcza – modelowanie laboratoryjne procesu występującego w naturze i weryfikacja wyników z zastosowaniem modelowania numerycznego jest często stosowana w sytuacjach gdy pomiary atmosferyczne są drogie i niezwykle trudne technicznie jest w pełni uzasadniona. Cele i zakres pracy są jasno wytyczone przez autora w części wstępnej rozprawy. Mogę stwierdzić, że zarówno tematyka, jak i metodyka pracy badawczej p. mgr. Krzysztofa Dekajło są przemyślane, a doktorat oparty jest na solidnych podstawach.

Opis rozprawy.

Merytoryczna część rozprawy rozpoczyna się krótkim wprowadzeniem w tematykę pracy. Następnie autor przypomina podręcznikowe wiadomości o budowie atmosfery i o atmosferycznej warstwie granicznej – obszarze w którym zachodzą procesy konwekcji suchej badanej w rozprawie. Dalej przedstawiony jest zakres skal przepływów atmosferycznych oraz porównane są charakterystyczne skale przepływów konwekcyjnych w pochyłej geometrii w atmosferze i eksperymencie laboratoryjnym prowadzonym przez autora.

W kolejnej części pierwszego rozdziału doktorant omawia liczby bezwymiarowe używane do skalowania przepływów atmosferycznych. Dalej następuje przegląd literatury przedmiotu – eksperymentów laboratoryjnych i prac pomiarowych w warunkach naturalnych.

Rozdział 2 zawiera szczegółowy opis metodyki badań eksperymentalnych: opis kanału pomiarowego, techniki wizualizacji przepływów, pomiaru temperatury z użyciem termopar i z wykorzystaniem termografii ciekłokrystalicznej, której autor poświęca wiele uwagi w związku z późniejszymi zastosowaniami. Dalej następuje opis technik wykorzystanych w anemometrii obrazowej, które pozwoliły doktorantowi na zbadanie prędkości przepływu w komorze pomiarowej i szczegółowe przedstawienie układu pomiarowego.

Kolejna część rozdziału 2 to w mojej ocenie najbardziej wartościowa część rozprawy. Doktorant przedstawia w niej szczegółowo wyniki licznych eksperymentów w kanale pomiarowym. Zbiorcza Tabela 8 zawiera zestawienie wykonanych serii eksperymentów.

Analizując wyniki Autor zauważa, że można wyróżnić trzy różne reżimy przepływu w kanale pomiarowym: reżim Rayleigha-Benarda (przypadek kanału poziomego lub nachylonego pod kątem nieprzekraczającym 20°), reżim oscylacyjny (dla kątów nachylenia w zakresie 30° - 60°) oraz reżim struktur stacjonarnych dla większych kątów nachylenia. Tabela 10, pokazująca szacunki liczby Rayleigha, w tym najbardziej reprezentatywnej wg Autora zmodyfikowanej liczby Rayleigha, podaje jednak we wszystkich przypadkach wielkości znacznie przekraczające znacznie krytyczne wartości liczby Ra dla których występuje klasyczna konwekcja Rayleigha-Benarda (por. strona 26 rozprawy). Tak więc wybór nazwy pierwszego z zaobserwowanych reżimów nie wydaje się najszcześniejszy, choć rzeczywiście występują w nim wyraźne komórki konwekcyjne. Przydałaby się w tym miejscu pogłębiona (w stosunku do tego co zawarto w pracy) analiza, choćby dyskusja na temat wpływu geometrii kanału pomiarowego (stosunek głębokości do szerokości) na otrzymane rezultaty i odniesienie warunków eksperymentu do klasycznych, opisanych w literaturze prac badających konwekcję Rayleigha-Benarda.

Interesujący jest opis, przedstawiony w sekcji 2.5.5 pracy, eksperymentu symulującego cykl dobowy konwekcji atmosferycznej nad nachylonym zboczem (kanał pomiarowy nachylony pod kątem 10°), w którym symulowano powstawanie frontu wieczornego, podobnego do tego jaki

był obserwowany w trakcie eksperymentu VTMX. Analiza zmian liczby Rayleigha podczas eksperymentu jest zgodna z obserwowanym obrazem przepływu. Występuje tu jednak pewna niezgodność z opisem reżimów konwekcyjnych obserwowanych w kanale w warunkach stacjonarnych: wartość krytyczna liczby Rayleigha przy której następuje przejście od stanu konwekcji komórkowej do przepływu uporządkowanego jest taka jak w teorii Rayleigha-Benarda, tzn., wynosi ok. 1000, podczas gdy eksperymenty w warunkach stacjonarnych sugerowały wartość $\sim 1.69 \cdot 10^6$. Przydałaby się głębsza dyskusja tej różnicy.

W kolejnym, trzecim rozdziale rozprawy autor przedstawia wyniki obliczeń numerycznych przepływu, który obserwował wcześniej w kanale pomiarowym. Obliczenia te prowadzone były przy użyciu aż trzech programów CFD: komercyjnego kodu FLUENT oraz dwóch mniej znanych programów akademickich.

Kilka wyników prezentowanych w tej części pracy zasługuje na omówienie w recenzji. Sposób analizy symulacji prowadzonych kodem FLUENT, mimo znacznego wysiłku włożonego w jej wykonanie przez autora, nie jest przekonujący. Chodzi o badanie rezultatów metodą POD – Proper Orthogonal Decomposition. Trudno ocenić, jak wyniki symulacji dla katów nachylenia 10° i 20° różnią się od wyników doświadczalnych. Rezultaty analizy POD sugerują jednokomórkową strukturę przepływu (Rys. 3.12 i 3.13, oraz porównanie wartości energii pierwszego i drugiego modu). Z kolei wizualizacje symulacji pokazane na Rysunku 3.4 oraz Załączniku B sugerują istnienie dwóch komórek, co było także obserwowane w laboratorium. Nie rozumiem ujemnych wartości energii wyższych modów przepływu pokazywanych na Rysunkach 3.11-3.17. Czy nie jest to wynikiem błędów analizy? Na jakie pytanie stara się autor odpowiedzieć przeprowadzając dekompozycję na mody ortogonalne i badając ich energię? Nieprzekonujące są także wyniki symulacji pokazujące tworzenie się frontu (zupełnie niejasna skala kolorów!!), choć rzeczywiście rysunek 3.21 dokumentuje zmianę kierunku i profilu składowej przepływu wzdłuż zbrocza.

Dalsze analizy wyników obliczeń FLUENT-em nie budzą już takich wątpliwości. Analiza związana z liczbą Nusselta i transportem ciepła w warunkach stacjonarnych w zależności od nachylenia ogrzewanej powierzchni jest ważna, a wynik ze maksimum transportu uzyskuje się dla nachylenia powierzchni 70° może mieć znaczenie w technice grzewczej. Warta podkreślenia jest zgodność profili temperatury i prędkości nad silnie nachyloną powierzchnią w geometrii dwu i trójwymiarowej, co sugeruje że wynik symulacji jest ogólny i warto dalej to zagadnienie badać doświadczalnie w dalszych eksperymentach laboratoryjnych.

Interesująca jest także analiza stabilności przepływu wykonana na podstawie symulacji wykonanych programem FRECON3V (Tabela 23 i Rysunek 3.22), wyniki jej zbliżone są do prezentowanych w Tabeli 10 wyników eksperymentalnych dla sytuacji stacjonarnych. Także zasygnalizowane w ostatniej części tego rozdziału dwuwymiarowe symulacje atmosferyczne kodem FLUENT wyglądają ciekawie, szkoda że niewielkie możliwości obliczeniowe jakimi dysponował

autor nie pozwoliły mu na bardziej zaawansowane eksperymenty.

Czwarty, ostatni rozdział pracy to podsumowanie zawierające porównanie wyników symulacji numerycznych i oraz eksperymentów laboratoryjnych. Warte podkreślenia są przede wszystkim Rysunki 4.2 i 4.3, na których porównano niektóre charakterystyki przepływów obserwowanych w laboratorium i symulowanych numerycznie w geometrii płaskiej. Dokumentują one zadowalającą zgodność między quasi-dwuwymiarowym przepływem w kanale pomiarowym i jego odwzorowaniem w dwuwymiarowej symulacji DNS, choć widać (co autor zauważa) pewne różnice między wynikami laboratoryjnymi a symulacjami dla niewielkich kątów nachylenia kanału. Podana sugestia, że przyczyną tych różnic są niedoskonałości techniki eksperymentalnej, nie jest jednak głębiej uzasadniona. Przyczyn rozbieżności może być znacznie więcej, np. dwuwymiarowość symulacji numerycznych, niedoskonałość symulacji numerycznych (tzw. „lepkość numeryczna”) itp. Dla wyjaśnienia tego zagadnienia przydałyby się dokładniejsze analizy symulacji wykonanych różnymi kodami.

Ocena rozprawy.

Rozprawa doktorska p. mgr inż. Krzysztofa Dekajły ma wiele dobrych i kilka słabszych elementów. Jej mocną stroną są unikalne i wartościowe rezultaty doświadczalne. Opis różnych reżimów konwekcji wewnątrz kanału pomiarowego, udokumentowany zarówno rozkładem temperatur, jak i prędkości przepływu oraz opis przejść między reżimami potwierdzony wynikami symulacji numerycznych jest wart podkreślenia i stanowi najmocniejszy punkt rozprawy. Innym ważnym wynikiem jest odtworzenie w laboratorium w warunkach zmiennego strumienia ciepła powstawania frontu wieczornego, analogicznego do frontu obserwowanego podczas pomiarów atmosferycznych w ramach kampanii VTMX i opisanego dokładniej przez Hunta.

Doktorant uzyskał też kilka wartościowych wyników symulacji numerycznych. Wartościowa jest analiza transportu ciepła, pokazująca maksimum liczby Nusselta dla nachylenia powierzchni pod kątem 70° . Ważna jest też niezła (choć najslabsza dla małych kątów nachylenia) zgodność przepływów obserwowanych w laboratorium z wynikami dwuwymiarowych symulacji.

Wymienione wyżej wyniki pracy są oryginalne i stanowią wartościowy przyczynek do naszej wiedzy o konwekcji w przepływach laboratoryjnych i w atmosferze ziemskiej. Inne pozytywy rozprawy to dobry opis techniki eksperymentalnej, dokumentujący techniczne umiejętności doktoranta i potwierdzający jego sprawność i samodzielność w zakresie laboratoryjnej mechaniki płynów,

Słabsza strona tej pracy to nie zawsze dobrze opisane i do końca przemyślane podsumowania oraz niestaranność edytorska, utrudniająca niekiedy czytelnikowi samodzielny osąd części rezultatów. Mam tu na myśli braki w opisach jednostek przy skalach kolorów, zbyt małe i nie

zawsze czytelne ilustracje niosące mało informacji podpisy pod nimi. Pracę czyta się trudno, nie zawsze jasna jest logika wyводу, brakuje powiązań pomiędzy kolejnymi sekcjami. Wątpliwości budzi wspomniana już analiza wyników symulacji kodem FLUENT za pomocą rozkładu przepływu na elementy ortogonalne. Na szczęście jest to poboczny wątek rozprawy nie wpływający na zasadnicze tezy pracy.

Podsumowanie.

Mankamenty pracy, którym poświęciłem w recenzji dużo miejsca, do pewnego stopnia obniżają wysoką ocenę rozprawy. Jednak pozytywy zdecydowanie przeważają. Doktorant wskazał ważne zagadnienie naukowe, podjął się pracy nad jego rozwiązaniem i w efekcie tej pracy uzyskał oryginalne, wartościowe i nowe wyniki naukowe. Wykazał się znajomością technik doświadczalnych, sprawnością doświadczalną, a także znajomością metod obliczeniowych nowoczesnej mechaniki płynów i umiejętnością praktycznego ich zastosowania. Przebieg i efekty swojej działalności naukowej opisał w sposób niedoskonały, ale satysfakcjonujący. Stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca Pana Krzysztofa Dekajło w spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i w związku z tym wnoszę o dopuszczenie doktoranta do dalszej części przewodu.

