

Dr hab. Zbigniew Walenta
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Krzysztofa Dekajło „Analiza stabilności przepływów termicznych w pochylej geometrii”.

Praca doktorska mgr. Krzysztofa Dekajło, o objętości 159 stron, składa się z czterech rozdziałów oraz dwóch załączników. Poświęcona jest eksperymentalnym i numerycznym badaniom przepływów konwekcyjnych, wywołanych różnicą temperatur między ściankami nachylonego kanału. Zrozumienie mechanizmów takiej konwekcji może być istotne dla usprawnienia pracy paneli słonecznych, pochylonych wymienników ciepła, układów chłodzących procesory komputerów itp. Niezależnie od tego można się spodziewać, że uzyskane informacje pozwolą wyjaśnić niektóre zagadnienia związane z konwekcją atmosferyczną na pochylonych zboczach, mimo że bezpośrednie przeniesienie wyników, z uwagi na różnicę skal, nie jest możliwe.

Autor pracy przeprowadził serię eksperymentów w zamkniętym, prostopadłościennym kanale o wymiarach 38 x 38 x 114 milimetrów. Kanał ten mógł być ustawiany pod dowolnym kątem do poziomu. Wypełniony był wodą, jego górnej i dolnej ściance można było nadawać zadane, jednorodne temperatury, zaś pozostałe ścianki można było z dobrym przybliżeniem uważać za adiabatyczne (izolowane cieplnie).

Eksperymenty obejmowały, w pierwszym rzędzie, pomiary chwilowych pól prędkości metodą DPIV (Digital Particle Image Velocimetry), oraz pomiary chwilowych pól temperatury metodą DPIT (Digital Particle Image Thermometry) w pionowej płaszczyźnie symetrii kanału. Obie te metody zaliczyć można do kategorii najbardziej nowoczesnych metod pomiarowych. Autor wykazał się dużą biegłością w ich stosowaniu.

Dodatkowo, jako pomiar kontrolny, wykonany został punktowy pomiar temperatury przy pomocy dziewięciu termopar umieszczonych w ściankach kanału.

Oprócz eksperymentów przeprowadzona została obszerna analiza numeryczna badanego zjawiska z użyciem trzech różnych programów: komercyjnego programu Fluent 2D i 3D, oraz dwóch programów akademickich, Cav2D_av i Frecon3V. Przeprowadzono również analizę POD (Proper Orthogonal Decomposition) uzyskanych wyników numerycznych, celem wyodrębnienia najbardziej istotnych struktur badanych przepływów.

Do najbardziej istotnych wyników recenzowanej pracy należy stwierdzenie istnienia trzech odrębnych reżimów przepływu konwekcyjnego w zamkniętym, nachylonym kanale:

- dla kątów nachylenia kanału w zakresie $0^\circ \div 20^\circ$ – reżim struktur typu Rayleigh’a – Benarda,
- dla kątów nachylenia kanału w zakresie $30^\circ \div 60^\circ$ – reżim struktur oscylacyjnych,
- dla kątów nachylenia kanału w zakresie $70^\circ \div 90^\circ$ – reżim struktur stacjonarnych.

Kryterium stanowiło tu występowanie i charakter niestabilności termicznych w przepływie.

Podkreślić należy dobrą zgodność wyników numerycznych i doświadczalnych, co wskazywałoby, jak zauważa Autor, na możliwość stosowania użytych programów również w zakresie parametrów, którego nie obejmują wykonane eksperymenty.

Oprócz powyższego, na uwagę zasługuje wytworzenie w warunkach laboratoryjnych t.zw. „wieczornego frontu” – zjawiska obserwowanego na nachylonych obszarach pustynnych, gdy wieczorem nasłonecznienie gwałtownie słabnie, powierzchnia ziemi szybko się ochładza, podczas gdy powietrze nad nią jest jeszcze wciąż nagrzane. Sugeruje to możliwość wykorzystania wyników eksperymentu laboratoryjnego do opisu i ewentualnego prognozowania zjawisk atmosferycznych, mimo ogromnej różnicy skal i wynikającej stąd niemożności spełnienia wszystkich warunków podobieństwa.

Rozdział pierwszy recenzowanej pracy „Wstęp i przegląd literatury” w podrozdziale „Motywacja” podaje powody, dla których pracę podjęto. W dalszym ciągu znajdują się w nim podstawowe dane dotyczące atmosfery ziemskiej, oraz omówienie bezwymiarowych liczb podobieństwa, mających zastosowanie przy modelowaniu procesów atmosferycznych. Rozdział kończy się przeglądem literatury, potraktowanym dość skrótowo (10 stron, wobec 89 podanych pozycji bibliograficznych).

Pewien niedosyt budzi też zamieszczony (zaczepnięty z literatury) opis tworzenia się „wieczornego frontu” – moim zdaniem nieprecyzyjny.

Rozdział drugi, „Część eksperymentalna”, zawiera szczegółowe opisy użytych technik pomiarowych, opis stanowiska pomiarowego, opis i wyniki wykonanych eksperymentów. Rozdział ten napisany jest naogół jasno i precyzyjnie.

Pewne zastrzeżenia budzi opis przejścia z formatu RGB do HSI (w formacie RGB wysyła dane kolorowa kamera, obserwująca przepływ z zawiesiną ciekłych kryształów, reagujących zmianą barwy na zmianę temperatury; dane w formacie HSI pozwalają bezpośrednio odczytać temperaturę). Podany jest wyłącznie użyty algorytm, bez choćby próby wytłumaczenia skąd się wziął.

Poza tym nie mogę się zgodzić ze zdaniem „Największa czułość metody (DPIT – dopisek mój) ma miejsce przy zmianie barwy materiału ciekłokrystalicznego z czerwieni do zieleni”, umieszczonym pod rysunkiem 2.4 (str. 46), z którego wynika coś zupełnie innego.

Moja następna uwaga dotyczy rysunków: Rysunek 2.8 (str. 56) i 2.9 (str. 57 ÷ 59) – brak jednostek na osiach; Rysunek 2.14 a. (str. 66) – kolory na rysunku nie zgadzają się z opisem znajdującym się powyżej.

Rozdział trzeci, „Część obliczeniowa”, zaczyna się od sprecyzowania modelu matematycznego badanych zjawisk (równania Naviera – Stokesa dla płynu nieściśliwego, przybliżenie Boussinesq’a, rodzaje warunków brzegowych), określone zostają konkretne warunki modelowania, odpowiadające warunkom wykonanych eksperymentów, po czym omawiane są pokrótce użyte programy numeryczne (komercyjny pakiet Fluent 2D, 3D, oraz programy akademickie Cav2D_av i Frecon3V). Dość dużo miejsca poświęcono doborowi odpowiednich siatek numerycznych.

Większość obliczeń numerycznych wykonano przy użyciu programu Fluent, ze wszystkich trzech najbardziej uniwersalnego. Obliczenia pozostałymi programami miały charakter kontrolny. Wyniki uzyskane przy użyciu programu Fluent poddano analizie POD (Proper Orthogonal Decomposition) celem wyodrębnienia najbardziej istotnych struktur przepływu.

Moje zastrzeżenia budzi nieprecyzyjny opis warunków brzegowych (str. 83), oraz nieprecyzyjny Rysunek 3.1 (str. 84), mający ilustrować domenę obliczeniową. Na stronie 96

(wiersz 7 i 8 od góry) niezrozumiałe jest dla mnie zdanie: „Dla kątów większych ($\varphi > 0^\circ$) fluktuacje są ukierunkowane wzdłuż pochylenia kanału”.

Na rysunkach 3.11 ÷ 3.20 (str. 110 ÷ 119) niezrozumiałe są dla mnie oznaczenia skal na osiach; dodatkowo – rysunek 3.18 (str. 118) jest w ogóle błędny.

Rozdział czwarty, ostatni, „Podsumowanie” zawiera między innymi porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami numerycznymi, oraz wnioski końcowe.

Jakościowa zgodność wyników eksperymentalnych i numerycznych jest widoczna gdy porównuje się obrazy pól temperatur i prędkości zamieszczone w rozdziałach drugim i trzecim. W rozdziale czwartym zamieszczono dodatkowo Tabelę 25, zawierającą wynik ilościowy – porównanie uśrednionych parametrów przepływu (prędkości i różnic temperatur w odpowiadających sobie punktach). Wynika z niej, że maksymalne rozbieżności naogół nie przekraczają 5%, czyli pozostają na poziomie szacowanej dokładności pomiarów. Większe rozbieżności występują jedynie dla najmniejszych kątów nachylenia kanału (reżim struktur Rayleigh’a – Benarda), co wydaje się rzeczą naturalną ze względu na silną niestabilność przepływu w tym zakresie.

Tak dobra zgodność eksperymentu i wyników numerycznych jest niewątpliwym osiągnięciem Autora.

Wymieniłem w niniejszej recenzji usterki, które uważam za merytorycznie istotne, bądź też uniemożliwiające lub utrudniające zrozumienie myśli Autora. Oprócz nich zauważyłem szereg niezręcznych sformułowań, błędów stylistycznych i t.p. usterek mniejszej wagi, których usunięcie może jednak być istotne przy ewentualnej publikacji pracy. Informację na ten temat przekazałem Autorowi bezpośrednio.

Odnoszę wrażenie, że większość usterek wynikła z pośpiechu przy przygotowywaniu pracy; nie świadczą one o niezrozumieniu przez Autora omawianych przez niego zagadnień.

Za najbardziej wartościową cechę recenzowanej pracy uważam to, że wyniki uzyskano równoległe, nowoczesnymi metodami eksperymentalnymi i numerycznymi, przy czym na szczególne podkreślenie zasługuje ich dobra zgodność. Sformułowane przeze mnie uwagi 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