PROF. MAREK MORZYŃSKI

Poznan University of Technology
Piotrowo 3
60-965 Poznan, Poland
Tel +48-61-665 2778
Fax +48-61-665 2618
Email: Marek.Morzynski@put.poznan.pl
Url: virtual.edu.pl/morzynski

Prof. Marek Morzynski · PUT · Piotrowo 3 · 60-965 Poznan · Poland

Paryż, 16 marca 2015r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Kamila Kiełczewskiego

„Obliczenia równoległe przepływów przytarczowych ze strumieniami chłodzącymi”

Uwagi wstępne, przedmiot, cel i temat pracy

Głównym celem pracy jest zrównoleglenie istniejącego programu obliczeniowego przeznaczonego dla przepływów osiowo-symetrycznych. Ponadto rozwinięte mają zostać techniki pozwalające na zwiększenie jego funkcjonalności, takie jak ulepszone sposoby wizualizacji czy zastosowanie warunków brzegowych umożliwiających uzyskanie rozwiązania przy wyższych liczbach Reynoldsa.

Współczesne programy przemysłowe numerycznej mechaniki płynów w znakomitej większości upierają się o metody RANS. Programy z wykorzystaniem LES należą do rzadkości, metody DES, stanowiące kompromis między wcześniej wymienionymi – połączenie RANS i LES w zależności od ważności odwzorowania poszczególnych obszarów przepływu bywają już stosowane, w tym w wariancie DDES (Delayed Detached-Eddy Simulation). Metoda DNS, rozwijana w pracy, wejdzie wg optymistycznych przewidywań do zastosowań przemysłowych być może po roku 2050. Znaczeniem rozwijanej metody jest więc skalowanie i walidacja modeli, które mogą służyć do obliczeń o znaczeniu praktycznym. Dodatkowym aspektem może być oszacowanie liczb Nusselta wynikających z uwzględnienia transportu ciepła w równaniach rozpatrywanego przepływu. Temat ma więc znaczenie dla zastosowań praktycznych i poszerza bazę danych w dziedzinie badań jak i w pokrewnych metodach numerycznej mechaniki płynó**w**.

Zawartość pracy

Praca składa się z 9 rozdziałów, podsumowania i spisu literatury.

We wstępie Autor naświetla konieczność obliczeń dla przepływów wirujących motywując to praktycznymi zastosowaniami. Przytoczona zostaje obfita literatura dotycząca skrajnie różnych aspektów problemu, począwszy od turbulencji, poprzez problemy numeryczne, badania laboratoryjne i przemysłowe. Naszkicowane zostają planowane kierunki działania Autora pracy. Obejmują one badania nad przepływami i wymianą ciepła w konfiguracji wirnik/stojan z wyraźną

trójwymiarowością, w obszarze dużych liczb Reynoldsa i z zastosowania strumieni chłodzących. Wyznaczone mają zostać m.in. składowe tensora naprężeń Reynoldsa a całość ma być porównana z wynikami badań eksperymentalnych i numerycznych.

W rozdziale drugim Autor definiuje elementy swego modelu numerycznego. Domena obliczeniowa ograniczona jest do osiowosymetrycznego pierścienia.

W kolejnej części przedstawione są rozwiązywane równania dla przepływu nieściśliwego, zapisane we współrzędnych cylindrycznych, uzupełnione o równia transportu energii i doprowadzone do postaci bezwymiarowej.

W kolejnym podrozdziale opisana jest projekcyjna metoda rozwiązywania równań i schemat czasowy. Są to klasyczne i sprawdzone we wcześniejszych algorytmach metody oparte o sprzężenie równań poprzez ciśnienie i zastosowanie typowej metody predictor -corrector.

Dyskretyzacja przestrzenna, przedstawiona w następny rozdziale jest również standardową siatką strukturalną, o równomiernym podziale komórek w kierunku obwodowym. Schemat Czebyszewa i Fouriera w dyskretyzacji problemu również stanowi znany standard i jest klasycznym podejściem w tego typu dyskretyzacji strukturalnej.

Opisany zostaje sposób wprowadzania warunków brzegowych. Dodatkowo zastosowana zostaje stabilizacja metody DNS przy użyciu znanego z LES spectral vanishing viscosity. Jego zastosowanie wydaja się kluczowe dla rozwiązania w pracy ponieważ poświęcono mu szczególnie dużo uwagi, włączając w to osobne testy numeryczne. Niezbędne człony równania tworzone są w języku manipulacji symbolicznej i przenoszone do kodu numerycznego bezpośrednio.

Zdefiniowane zostają warunki brzegowe, w tym uwzględniające dodatkowy przepływ zewnętrzny. Na wypływie konieczne stało się zastosowanie konwektywnych warunków brzegowych, które jednak, jak opisano to w następnym rozdziale, ze swej strony powodują problemy ze stabilnością rozwiązania. Po pokonaniu tych trudności Autor przedstawia sposoby wizualizacji, w tym standardowe Q-criterion, Lambda2 i pochodne w stosunku do nich. Wszystkie one zostają zastosowane w programie wizualizacyjnym ParaView, przy czym nie wskazane jest czy makra ParaView są tworzone czy adaptowane na podstawie istniejących. Przedstawienie szczegółowych sposobów obliczania powierzchni dla poszczególnych kryteriów ma pozytywny wymiar dydaktyczny.

W dalszej części pracy Autor przedstawia ważne zmiany jakie wprowadzone zostały do dotychczasowej wersji programu. Istotnym jest zrównoleglenie wcześniejszej wersji kodu. Pozostałe zmiany mają charakter techniczny i pomocniczy. W kolejności opisano środowisko obliczeniowe, użyte oprogramowanie i przygotowane skrypty. Opis obejmuje szczegóły zarówno istotne dla obliczeń (jak zastosowane biblioteki rozwiązujące układy równań liniowych) jak i stricte utylitarne (np. narzędzia do przenoszenia plików z wykorzystaniem ftp czy informacje o putty).

Ważnym rozdziałem jest właściwy „eksperyment numeryczny” z wykorzystaniem opracowanych narzędzi. W pracy rozdział ten nazwano „Analizą wyników”. We wstepie rozdziału przedstawiono ambitne zadania obejmujące: zbadania przepływów w konfiguracji wirnik/stojan z wymianą ciepła w obszarze wysokich prędkości obrotowych wirnika, precyzyjne wyznaczenie rozkładów parametrów, fundamentalne zrozumienie mechanizmów rządzących prostymi przepływami trójwymiarowymi, znalezienie odpowiedzi na podstawowe pytania dotyczące struktur występujących w obszarze przejścia laminarno-turbulentnego, znalezienie źródeł tych struktur, roli jaką spełniają w tworzeniu naprężeń i transporcie energii a w przyszłości sterowanie (kontrolę?)

przebiegających tam procesów. Pokazano rozkłady prędkości w przekrojach domeny, wizualizacje wybranego przypadku i wykresy składowych naprężenia Reynoldsa. Oszacowano rolę składowych w procesie dyfuzji i konwekcji i zweryfikowano pozytywnie porównując z klasycznymi danymi literaturowymi.
Wyznaczono wielkości charakteryzujące przepływ ciepła, turbulentną liczbę Prandtla i wartości liczby Nusselta na ściankach, ponownie pozytywnie weryfikując je z danymi innych badaczy.

W kolejnym podrozdziale zmieniono warunki brzegowe przepływu, symulując strumień styczny do ścianki. W rozdziale tym przedstawiono obszerne wizualizacje dla zmieniających się warunków przepływu. Wyniki zgodne są z danymi, jakich należałoby oczekiwać analizując obrazy przepływu. Również tu przedstawiono szczegóły profili prędkości i wartości poszczególnych składowych tensora Reynoldsa.

Osobnym i odbiegającym od poprzednio przedstawionych przypadków (w sensie zakresu liczb Reynoldsa i domeny) jest przepływ Taylora-Couetta. W pracy jest zbyt mało danych dla tej symulacji by w pełni ją ocenić (docenić).

Podsumowanie jest streszczeniem zakresu prac przedstawionych w rozprawie.

Uwagi krytyczne i szczegółowe

Przegląd literatury nie dotyczy zagadnień rozwijanych w pracy a stanowi zbiór prac mających wykazać erudycję Autora.

W pracy wprowadzono konwektywny warunek brzegowy, jego zastosowanie powoduje jednak problemy ze stabilnością rozwiązania. Nie jest jasne w jakim zakresie i w jakim stopniu należy tłumić to oddziaływanie i na ile wpływa to na rozwiązanie. Podobna sytuacja jest przy zastosowaniu schematu SVV. Schemat ten jest przedstawiony w szczegółach, w tym dla przypadku jednowymiarowego.

Wydaje się, że w wielu przypadkach w pracy schemat postępowania jest podobny. Przyjmuje się pewna metodę numeryczną. Metoda, mimo np. wysokiego rzędu powoduje występowanie pewnych mankamentów natury numerycznej. W związku z tym wprowadza się inna metodę numeryczną która przeciwdziała występującym problemom. Taka metoda, jak np. sztuczna dyfuzja skutecznie przeciwdziała problemom występującym w przypadku pierwszym, a ponadto posiada parametry pozwalające (pośrednio) wpływać na rozwiązanie. Postępowanie takie stosowane jest powszechnie w numerycznej mechanice płynów, zwłaszcza w jej aplikacjach nastawionych na rozwiązania utylitarne i przemysłowe. Jednakowoż wyciąganie wniosków na temat fizyki zjawisk symulowanych w ten sposób budzi wątpliwość, zwłaszcza gdy dotyczy to subtelnych wartości np. niestabilności i należy zachować w tym przypadku daleko idąca ostrożność .

Podkreślić należy biegłość Autora w posługiwaniu się narzędziami programistycznymi. Uzyskane dwudziestokrotne przyspieszenie w stosunku do programu wykorzystującego pojedynczy procesor uznać należy za satysfakcjonujące, jakkolwiek brak informacji o skalowalności programu. Nie wiadomo czy liczba 20 odnosi się do obliczeń dla 50 mln punktów. Obliczenia dla takiej liczby punktów dla wersji sekwencyjnej programu nie wydają się możliwe.

Nie jest jasnym, co Autor ma na myśli pisząc: “Możliwości programu,... zostały poszerzone, w stosunku do programu wyjściowego, o następujące elementy (wykorzystanie niektórych z nich przekraczało ramy tej pracy)” ?

Wydaje się, że naturalnym sposobem zrównoleglenia programu dla prostej domeny jaką jest pierścień walcowy jest zastosowanie siatki blokowej strukturalnej i podział całego obszaru na poddomeny stanowiące wycinki tego pierścienia. W przeciwieństwie do siatek niestrukturalnych nie występuje tu problem samego podziału, load balancing, wymiana informacji jest prosta i jednoznacznie zdefiniowana a rozmiar zadania można dowolnie skalować.

Zrównoleglenie programu uzyskano posługując się techniką OpenMP. Z opisu wynika, że nie zastosowano żadnego partycjonowania domeny obliczeniowej. Należy pokreślić, że równoległa wersja działa de facto nie na klastrze składającym się z pojedynczych jednostek o pamięci rozproszonej i połączonych szybka siecią, a na jednym komputerze wieloprocesorowym z dużą pamięcią współdzieloną. W przypadku obliczeń przebiegających w kierunku DNS parametry takiego komputera (wielkość pamięci i liczba procesorów mogących do niej jednocześnie mieć dostęp) jest istotną barierą i programy symulujące procesy turbulentne opierają się o rozwiązania rozproszone, mogące obejmować dziesiątki tysięcy procesorów (typu Blue Gene Mira) i wydajność rzędu Petaflops. O ile w obszarze zdefiniowanych jako High Performance Computing (HPC) istnieją precyzyjne narzędzia do mierzenia wydajności i skalowalności programów równoległych nie zostały one zastosowane w ocenie opracowanego programu.

W rozdziale “Analiza wyników” we wstępie Autor stawia niezwykle ambitne zadania obejmujące fundamentalne problemy nurtujące mechanikę płynów. Z przedstawionych tam wykresów wynika że udało się odtworzyć rozkłady prędkości w warstwie przyściennej spełniające prawo ścianki. Problem przejścia laminarno turbulentnego zilustrowany jest na rys. 9.2 wizualizacją Lambda2 dla wartości -1. (wartość -1 jest używana dla Lambda2 w całej pracy – w numerycznej mechanice płynów przyjęło się wizualizować struktury dla Lambda2 minimalnie mniejszego od zera). Autor pisze: na Rys. 9.2 zaobserwować można obszar przejścia laminarno-turbulentnego” W jaki sposób czytelnik na podstawie tej wizualizacji, która zmieni się diametralnie przy zmianie progu Lambda2 ma wnioskować o turbulencji lub laminarności przepływu nie jest jasne.

Przy analizie i wizualizacji wyników Autor posługuje się wartościami średnimi i zastosowanymi w pracy wizualizacjami kryteriów Lambda2 czy Q-criterion. Zwłaszcza w obliczu ambitnych celów jakie stawia sobie Autor obejmujących, jak już wspomniano wyżej, fundamentalne problemy nurtujące mechanikę płynów, wymagany jest komentarz o bardziej ogólnym charakterze. Dla odkrywania fizyki zjawisk niezbędne są metody (również numeryczne) o doskonałej wiarygodności i dokładności. Następnie niezbędna jest nowoczesna obróbka wyników badań. Zwłaszcza w przypadku turbulencji potrzebne są analizy statystyczne, korelacyjne, modalne, filtracja i to w odniesieniu do całej, trójwymiarowej domeny obliczeniowej. W ostatnim czasie rozwinięto tu szereg metod pozwalających na zupełnie nowe spojrzenie na uzyskiwane wyniki. Wydaje się że w tej pracy jak i w przyszłych opracowaniach Autor mógłby poświecić uwagi takiemu opracowaniu wyników.

Drobne uwagi szczegółowe;

W pracy brak elementarnego „spellingu” i korekty:

„Równania opisjące przepływ”, „za pomocą macierz różniczkujących”, „nazwę Tylora-Couetta.”

Używane są dyskusyjne sformułowania typu:

„schemat po czasie”,

“pik Nusselta w pobliżu zewnętrznego cylindra maleje. Ponadto widać że dla czasu t=25 ów pik Nusselta w pobliżu zewnętrznego cylindra jest nieznacznie wyższy niż dla przypadku bez chłodzenia”

“program RotNS ma lepsze właściwości wzrostu tempa obliczeń przy wzroście siatki”

Ocena pracy

Przedmiotem pracy było opracowanie i oprogramowanie technologii równoległej wraz z elementami wizualizacji dla programu obliczeń w domenie cylindrycznej dla różnych warunków brzegowych. Postawione sobie zadania Autor z powodzeniem wykonał, dowodząc przekonywająco na wybranych przykładach, że opracowany system funkcjonuje właściwie. Dokonanie tego było dużym i ambitnym i przedsięwzięciem z zakresu informatyki i numeryki. W trakcie realizacji tej pracy Autor wykazał się dobrą znajomością elementów numerycznej mechaniki płynów i samodzielnością w osiąganiu poszczególnych celów. Wyniki testów są przekonywującym dowodem na sukces całej koncepcji i realizacji pracy.

Krytyczne uwagi zawarte w niniejszej recenzji mają charakter ogólny i nie podważają merytorycznego sukcesu Autora rozprawy. Wszystkie pozytywne aspekty recenzowanej pracy świadczą o właściwym warsztacie badawczym i dojrzałości naukowej doktoranta. W związku z tym stwierdzam, że rozprawa **mgr inż. Kamila Kiełczewskiego** spełnia wymagania sformułowane w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 i może być podstawą do ubiegania się mgra o nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

