

dr hab. inż. Sławomir Kubacki, prof. uczelni  
Politechnika Warszawska,  
Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa,  
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej,  
ul. Nowowiejska 24, 00-665, Warszawa  
tel: +48.22.234.13.52, fax: +48.22.622.09.01  
e-mail: slawomir.kubacki@pw.edu.pl

Warszawa dn. 26 września 2022 r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr inż. Tomasza Kwiatkowskiego**

**pt. „Towards the numerical prediction of flow and heat transfer in a tightly spaced rod bundle”**

### **I. Podstawa opracowania**

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie decyzji wydanej przez Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) z siedzibą w Otwocku, 05-400, ul. Andrzeja Sołtana 7.

### **II. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Klasyczne modele turbulencji oparte na uśrednionych w czasie równaniach Naviera-Stokesa (ang. Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS), wykazują duże ograniczenia w modelowaniu konwekcyjnej wymiany ciepła w przepływach turbulentnych dla niskiej liczby Prandtla. Przykładem takiego zagadnienia jest przepływ ciekłego metalu w układach chłodzenia reaktorów jądrowych. Ograniczenia te wynikają z braku wiarygodnych danych eksperymentalnych i numerycznych DNS (ang. Direct Numerical Simulation), umożliwiających opracowanie modeli domknięcia nieznanymi składnikami w uśrednionych równaniach Naviera-Stokesa. Powszechną praktyką, przy niedostępności danych referencyjnych, jest założenie, że turbulentny strumień ciepła może być modelowany z zastosowaniem hipotezy gradientowej, która ma zastosowanie tylko dla liczb Prandtla bliskiej jedności. Jak wykazano w niniejszej pracy, przyjęcie tego typu założeń dla niskiej liczby Prandtla, może prowadzić do znaczącego niedoszacowania obciążeń cieplnych na elementach układów chłodzenia. W konsekwencji, przy braku wiarygodnych modeli obliczeniowych, może to prowadzić do znaczącego zwiększenia różnic w obciążeniach cieplnych uzyskiwanych na wirtualnym modelu wymiennika ciepła i tych obserwowanych w rzeczywistym układzie. Warto podkreślić, że uproszczone metody RANS, wykorzystywane są już na etapie projektowania i testowania wirtualnych modeli układów chłodzenia, tak więc konieczne jest opracowanie nowych, lepszych modeli fizycznych do modelowania procesu wymiany ciepła w przepływach z niską wartością liczby Prandtla.

Podjęte w pracy badania naukowe dotyczące przygotowania bazy danych DNS i opracowania rekomendacji do modelowania procesu wymiany ciepła dla liczb Prandtla w zakresie (0.025-2), mają kluczowe znaczenie w rozwoju metod CFD (ang. Computational Fluid Dynamics). Wyniki tych badań mają również bardzo duże znaczenie poznawcze i aplikacyjne w obszarze szeroko rozumianej energetyki jądrowej.

### III. Struktura pracy i ocena wartości naukowej

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasza Kwiatkowskiego została wykonana w Narodowym Centrum Badań Jądrowych z siedzibą w Otwocku, pod opieką naukową prof. dr hab. Mariusza P. Dąbrowskiego. Promotorem pomocniczym rozprawy był doktor Afaque Shams z Nuclear Research and Consultancy Group, Petten, Niderlandy. Praca została przygotowana w jęz. angielskim i liczy 159 stron. Składa się z 7 rozdziałów, fragmentu podsumowującego dorobek naukowy Doktoranta, abstraktu i streszczenia. Praca zawiera odwołanie do 100 pozycji literaturowych. W pracy znalazły się również odwołania do wcześniejszych prac Autora rozprawy. Doktorant powołuje się na 5 współautorskich artykułów w czasopismach naukowych i 7 artykułów w materiałach konferencji międzynarodowych (w 3 występuje jako pierwszy autor).

W pierwszym rozdziale Autor przedstawia tezę i cele pracy. Teza pracy może być sformułowana jak poniżej:

*„Modelowanie przepływu turbulentnego i procesu wymiany ciepła w kasecie paliwowej reaktora jądrowego z pomocą klasycznych metod URANS (ang. Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) jest dużym wyzwaniem. Dlatego też, klasyczne modele URANS muszą być w odpowiedni sposób walidowane i jeżeli zaistnieje taka potrzeba należy wprowadzić poprawki w tych modelach. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w analizie przepływów ciekłego metalu, a więc przy założeniu małej (różnej od jedności) liczby Prandtla”.*

Zdefiniowano cztery cele pracy. Pierwszy to przygotowanie tzw. „eksperymentu numerycznego”, polegającego na zdefiniowaniu prostego geometrycznie układu, odpowiadającego pod względem fizycznym przepływowi turbulentnemu jaki ma miejsce w kasecie paliwowej reaktora jądrowego oraz poprawnym dobraniu warunków brzegowych (liczba Reynoldsa). Kolejny cel to przygotowanie bazy danych DNS, w oparciu o bezpośrednie rozwiązanie równań Naviera-Stokesa i równań transportu skalara (obliczenia realizowano dla 6 równań transportu). Baza danych ma posłużyć poprawie modeli niskiego rzędu, czyli metod opartych na uśrednionych w czasie równaniach Naviera-Stokesa. Metody niskiego rzędu są stosowane w praktyce inżynierskiej, stąd wynika duże znaczenie wytworzonej bazy danych DNS. Trzeci cel pracy to wykonanie testów wybranych, klasycznych metod modelowania przepływu turbulentnego. Wreszcie, czwarty cel to opracowanie szeroko rozumianej metodyki prowadzenia analiz CFD, na przykładzie wykonanych symulacji przepływu turbulentnego i modelowania procesu wymiany ciepła dla kasety paliwowej i opracowanie rekomendacji do stosowania modeli zredukowanych RANS.

Warto podkreślić, że postawiona teza i cele pracy doskonale wpisują się w tematykę badań realizowanych w Narodowym Centrum Badań Jądrowych i mają istotne znaczenie w rozwoju metod CFD, zwłaszcza w kontekście analiz procesów wymiany ciepła dla niskiej liczby Prandtla. Problem modelowania procesu wymiany ciepła dla niskiej liczby Prandtla jest rozwijany od wielu lat lecz nie doczekał się, jak dotąd, opracowania dostatecznie ogólnego podejścia. Znane są proste modele oparte na koncepcji RANS, wykorzystujące pewne związki oparte np. na

liczbie Reynoldsa (bazującej na średnicy hydraulicznej), które nie są jednak przydatne w analizie bardziej złożonych geometrycznie układów, jakie występują w rzeczywistości. Z drugiej strony, istnieją modele RANS, które wymagają rozwiązania dodatkowych równań różniczkowych opisujących ewolucję w przestrzeni i czasie pewnych wielkości (np. fluktuacji temperatury), które w celu domknięcia wybranych składników równań wymagają informacji np. o składowych tensora naprężeń Reynoldsa. Złożoność tych modeli, jest jednak dosyć duża, co stanowi duże ograniczenie w ich stosowaniu w praktyce inżynierskiej. **Zasadne jest więc, podkreślane przez Autora rozprawy, podjęcie działań mających na celu lepsze zrozumienie procesu wymiany ciepła w przepływie dla niskiej liczby Prandtla i opracowania prostszych i bardziej wiarygodnych modeli RANS.**

W rozdziale drugim, omówione zostały prace eksperymentalne i numeryczne dotyczące analiz cieplno-przepływowych dla różnego rodzaju wymienników ciepła (kaset paliwowych). Podjęto szerszą dyskusję prac w których analizowano pojawienie się w przepływie periodycznych fluktuacji pola prędkości, będących wynikiem rozwijania się w przepływie wzdłużnych struktur wirowych („gap vortex street”). W szczegółowy sposób omówiono badania eksperymentalne Hoopera, na podstawie których przygotowano geometrię układu obliczeniowego i warunki brzegowe do analiz DNS (ang. Direct Numerical Simulation). W rozdziale trzecim, przedstawiono cechy przepływów turbulentnych, koncepcję Richardsona, równania Naviera-Stokesa uśrednione w czasie i koncepcję modelu lepkości turbulentnej i modelu transportu naprężeń Reynoldsa.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki analiz numerycznych przepływu chłodziwa przez kasetę paliwową z wykorzystaniem techniki URANS. Celem tych prac było ustalenie minimalnej liczby Reynoldsa dla której obserwuje się występowanie w przepływie charakterystycznych fluktuacji pola prędkości i temperatury, będących skutkiem rozwijania się w przepływie wzdłużnych struktur wirowych, jak również istnienie drobnoskalowego ruchu turbulentnego. Wykonanie obliczeń DNS dla wyjściowej konfiguracji Hoopera wymagałoby przyjęcia do analiz bardzo gęstej siatki obliczeniowej (Autor oszacował ją na 14 miliardów komórek), ze względu na dużą liczbę Reynoldsa ( $Re=49\ 000$ ). Te obliczenia były poza zasięgiem możliwości komputera równoległego, dlatego też należało znaleźć inną bardziej wydajną konfigurację. Wyboru liczby Reynoldsa (konfiguracji układu) dokonano na podstawie analiz średnich i fluktuacyjnych pól prędkości w wybranych przekrojach, tempa zmian lepkości turbulentnej w przepływie i analizy widmowej przeprowadzonej dla składowej osiowej prędkości (rys. 13, 15, 24). Analizy te były niezbędne, ze względu na konieczność, z jednej strony, zapewnienia dostatecznej rozdzielczości siatki obliczeniowej, oraz z drugiej strony, uzyskania dostatecznie zbieżnych statystyk wybranych wielkości na końcu kampanii obliczeniowej. Kroki podjęte przez Doktoranta, celem znalezienia minimalnej liczby Reynoldsa dla której badany przepływ cechowałby się występowaniem ruchu turbulentnego były w pełni uzasadnione. Doktorant w prawidłowy sposób dokonał wyboru finalnej konfiguracji geometrycznej układu i liczby Reynoldsa ( $Re=9800$  i  $L=2.2$  m). Należy podkreślić dojrzałość naukową Kandydata, który w świadomy sposób realizował badania naukowe w taki sposób, aby przygotowana przez niego baza wyników DNS, była wartościowa z punktu widzenia opisu ruchu turbulentnego i wymiany ciepła, jakie mają miejsce w rzeczywistym układzie w reaktorze jądrowym. W dalszej części pracy, Autor podejmuje również próby oszacowania rozdzielczości siatki obliczeniowej dla analiz DNS, dla konfiguracji z mniejszą liczbą Reynoldsa (9800), w oparciu o szacowania rozmiarów struktur Kołmogorowa i Batchelor’a, uzyskane na podstawie wyników URANS (analizy „a priori”). Należy podkreślić, że Doktorant w bardzo rzetelny sposób dokonał oszacowań rozdzielczości siatki do analiz DNS.

W rozdziale piątym przedstawiono wyniki symulacji numerycznych przepływu i wymiany ciepła dla kasety paliwowej dla trzech liczb Prandtla ( $Pr=2, 1$  i  $0.025$ ) przyjmując dwa typy warunków brzegowych (warunek typu Dirichleta i warunek Neumanna) dla pola temperatury na ściankach prętów paliwowych. Symulacje zostały wykonane z zastosowaniem kodu NEK5000 autorstwa prof. Paula Fischera, wykorzystującego do dyskretyzacji przestrzennej metodę wysokiego rzędu, opartą na metodzie elementów spektralnych. Analizy wyników DNS, poprzedzone były testami wpływu gęstości siatki i rozmiaru kroku czasowego na strukturę przepływu turbulentnego. Doktorant w prawidłowy sposób definiuje kryteria oceny jakości siatki i rozmiaru kroku czasowego w oparciu o skale długości Kołmogorowa i skale czasowe Kołmogorowa i Batchelor'a, uzyskane teraz na podstawie wyników DNS (test „a posteriori”). Wyniki potwierdzają, prawidłowość wyboru rozmiaru makro-oczka siatki (rozmiaru elementów Gaussa-Lobatto), rzędu wielomianów aproksymujących rozwiązanie wewnątrz elementów (finalnie był to wielomian 7. rzędu), oraz kroku czasowego. Realizacja symulacji numerycznych, realizowanych na 10 000 procesorów komputera równoległego znajdującego się w Centrum Obliczeniowym w Świerku, trwających łącznie 4 lata, nie była łatwym zadaniem. Symulacje DNS, w celu zapewnienia stabilności procesu obliczeniowego, były uruchamiane na różnych siatkach obliczeniowych, na których stopniowo zwiększano stopień wielomianów aproksymujących rozwiązanie (3, 5 i docelowo 7). Doktorant realizował symulacje, monitorując statystyki wybranych wielkości (prędkość tarcia lub strumień ciepła) w wybranych punktach przepływu. Symulacje były bardzo kosztowne obliczeniowo. Warto podkreślić, że rozwiązania statystycznie zbieżne uzyskano dla symulacji PS1-4. Symulacje PS5 i PS6 nie były w pełni statystycznie zbieżne, na etapie przygotowywania pracy doktorskiej i wyniki tych prac (słusznie) nie zostały w pracy omówione (poza pokazaniem globalnych rezultatów). Doktorant porównuje wyniki symulacji DNS z wynikami badań eksperymentalnych Hoopera oraz z wynikami analitycznymi dla przepływu w turbulentnej warstwie przyściennej. Uzyskana dobra zgodność z danymi referencyjnymi wskazuje na bardzo dobrą jakość uzyskanych wyników symulacji DNS. Bardzo ciekawa jest analiza widm gęstości mocy uzyskana dla składowych osiowych prędkości, pokazana na rys. 63 i 64. Widma te potwierdzają turbulentny charakter przepływu oraz istnienie bezwładnościowego obszaru na widmie energii w zakresie częstotliwości od  $f=10$  do  $100\text{Hz}$ . Interesujące, że na widmach mocy widoczna jest wartość szczytowa fluktuacji pola prędkości dla  $f=3.7\text{Hz}$ . Wskazana wartość szczytowa potwierdza rozwijanie się w przepływie wielokształtowych struktur wirowych nazywanych w pracy „gap vortex street”. W dalszej części pracy (rozdział 5.4.8), Doktorant analizuje również widma mocy dla fluktuacji temperatury (przypadki PS1-4), formułując bardzo interesujące wnioski o transferze energii od większych do mniejszych skal przestrzennych, wraz ze wzrostem liczby Prandtla. Rozdział piąty kończy się podsumowaniem statystyk wybranych wielkości. Liczba statystyk jest bardzo duża i obejmuje ona nie tylko statystyki pierwszego i drugiego rzędu (naprężenia Reynoldsa), współczynnik skośności czy spłaszczenia (kurtoza), ale również znajdują się tutaj bilanse poszczególnych składników w równaniu energii kinetycznej turbulencji (produkcja, dysypacja, etc) czy równania energii. Statystyki te są bardzo ważnym źródłem informacji dla twórców modeli RANS i w przyszłości wytworzona baza danych DNS może posłużyć do walidacji, poprawy lub opracowania nowych modeli wymiany ciepła (w szczególności dla przepływu z niską liczbą Prandtla). Szkoda, że w pracy nie udało się chociaż częściowo omówić wyników pokazujących bilanse składników w równaniu transportu energii kinetycznej turbulencji.

W rozdziale szóstym znajduje się porównanie uzyskanych wyników DNS z wynikami obliczeń numerycznych uzyskanych z zastosowaniem wybranych tzw. klasycznych modeli

RANS. Analizy porównawcze pokazano dla 6 różnych modeli RANS (URANS), w tym dla modeli opartych na koncepcji lepkości turbulentnej i modeli drugiego rzędu (Reynolds Stress Model). Wyniki te są bardzo interesujące, bo pokazują że modele RANS (URANS) całkiem dobrze radzą sobie z symulacją przepływu turbulentnego dla liczby Prandtla wynoszącej jeden. Wszystkie wyniki RANS pokazują oscylacyjny charakter pola prędkości dla przepływu chłodziwa przez kasetę paliwową. Uzyskiwana przy pomocy metod URANS wartość szczytowa fluktuacji jest nieco mniejsza ( $f=3.1-3.2\text{Hz}$ ) od tej która obserwowana jest dla DNS ( $f=3.7\text{Hz}$ ). Jednak bardziej szczegółowe porównanie statystyk prędkości średniej i energii kinetycznej turbulencji wskazuje na pewne różnice między wynikami RANS i DNS. Analizy profili średniej temperatury wskazują również na występowanie różnic między wynikami RANS i DNS dla liczby Prandtla wynoszącej 2. Pokazano również istnienie bardzo dużych różnic między wynikami RANS i DNS dla niskiej liczby Prandtla (0.025), głównie ze względu na brak stosowalności hipotezy gradientowej w opisie turbulentnego strumienia ciepła w tego typu przepływach. Wyniki te pokazują konieczność opracowania nowych, bardziej ogólnych modeli wymiany ciepła dla przepływów z niską liczbą Prandtla. Należy podkreślić duże znaczenie naukowe uzyskanych wyników DNS, zwłaszcza dla przepływu z niską liczbą Prandtla. Wyniki te pokazują zasadność podjętych przed Doktoranta badań naukowych. Jestem przekonany, że uzyskane wyniki badań przyczynią się w przyszłości do rozwoju bardziej wiarygodnych i użytecznych modeli domknięcia dla technik RANS.

Ostatni, siódmy rozdział stanowi podsumowanie uzyskanych wyników badań.

#### IV. Uwagi rzeczowe i pytania do Autora rozprawy

Poza uwagami znajdującymi się w pierwszej części recenzji, nasuwają się poniższe uwagi szczegółowe:

1. W równ. 3.7-3.9 brakuje definicji liczby Reynoldsa. Jak rozumiem jest to tzw. „turbulentna liczba Reynoldsa”, bazująca na energii kinetycznej turbulencji. Proszę o wyjaśnienie znaczenia tej liczby.
2. W równ. 4.1 zdefiniowano liczbę Couranta, jednak nie podano w jaki sposób jest definiowana prędkość i charakterystyczna długość  $\Delta x$ ?
3. Na str. 71 pokazana jest wielkość  $\overline{\varepsilon_{Mr}}/\nu$ , na podstawie której ustala się wartość liczby Reynoldsa dla której obserwuje się przejściowy charakter przepływu. Nie jest dla mnie jasne znaczenie fizyczne tej wielkości przedstawione w pracy („eddy diffusivity of momentum in radial direction”) w kontekście modelu opartego na koncepcji lepkości turbulentnej (model izotropowy).
4. Na rysunku 47 pokazano rozmiar „oczka siatki” dla obliczeń DNS. W jaki sposób określono rozmiar komórki obliczeniowej? Czy był to rozmiar makro-komórki Gaussa-Lobatto czy oszacowano rozmiar najmniejszego „elementu” w oparciu o przyjęty rząd aproksymacji w obrębie makro-komórek?

#### V. Podsumowanie

Podsumowując, uważam, że mgr inż. Tomasz Kwiatkowski osiągnął założone cele pracy i udowodnił tezę pracy. Doktorant zrealizował bardzo wymagające symulacje numeryczne DNS, przepływu chłodziwa i wymiany ciepła wewnątrz kasety paliwowej, na potrzeby walidacji i poprawy własności modeli RANS i opracowania nowych modeli domknięcia dla turbulentnego strumienia ciepła dla szerokiego zakresu liczb Prandtla (0.025-2). Uzyskane wyniki badań są

bardzo interesujące, unikatowe i mają duże znaczenie w analizie procesu wymiany ciepła dla niskiej liczby Prandtla (przepływ ciekłego metalu). Warto podkreślić, zasadność wyboru tematyki pracy doktorskiej i jej duże znaczenie poznawcze i utylitarne dla szeroko rozumianej energetyki jądrowej. Pan mgr inż. Tomasz Kwiatkowski ma bardzo dobre przygotowanie warsztatowe i teoretyczne do prowadzenia badań naukowych. Uwagi krytyczne zawarte w recenzji nie obniżają wartości naukowej pracy doktorskiej i nie wpływają na moją pozytywną opinię pracy.

Pragnę podkreślić, że mgr inż. Tomasz Kwiatkowski realizował badania naukowe w ramach grantu NCN Preludium 17, co stanowi bardzo duże wyróżnienie, bo tylko niewielka liczba wniosków o realizację grantów badawczych NCN jest akceptowanych do finansowania.

Uważam, że praca doktorska Pana mgra inż. Tomasza Kwiatkowskiego pt.: „Towards the numerical prediction of flow and heat transfer in a tightly spaced rod bundle” w pełni odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i **wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Biorąc pod uwagę zakres rozprawy, sposób podejścia do problemu naukowego, unikatowość i znaczenie uzyskanych wyników obliczeń w rozwoju metod CFD oraz wysokie walory poznawcze i aplikacyjne uzyskanych wyników badań w zakresie przepływów turbulentnych i wymiany ciepła dla niskiej liczby Prandtla, wnoszę o możliwość **wyróżnienia pracy doktorskiej Pana mgr inż. Tomasza Kwiatkowskiego.**