



Warszawa, 10 lutego 2025

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Rajka pod tytułem:
“Large Eddy Simulations of Turbulent Single-Phase and Dispersed Two-Phase Flows”
(Symulacje wielkowirowe przepływów turbulentnych jednofazowych oraz dwufazowych z
fazą rozproszoną)

Przedstawienie rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska pod tytułem “Large Eddy Simulations of Turbulent Single-Phase and Dispersed Two-Phase Flows” (Symulacje wielkowirowe przepływów turbulentnych jednofazowych oraz dwufazowych z fazą rozproszoną) została przygotowana przez pana mgr. inż. Michała Rajka w Instytucie Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN w Gdańsku w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Jacek Pozorski. Rozprawa jest napisana w języku angielskim, liczy 170 stron, 6 rozdziałów, zawiera odnośniki do 229 naukowych publikacji.

Tematyka rozprawy dotyczy modelowania numerycznego przepływów turbulentnych lepkiego płynu, zawierającego cząstki stałe, krople lub pęcherzyki, modelowane jako cząstki punktowe (tzw. druga faza rozproszona), lub lepkiego płynu bez wtrąceń (płyn jednofazowy).

Rozdział 1 zawiera motywację podjętych badań: stworzenie narzędzi do opisu dynamiki kropeł w turbulencji tworzonej samoistnie w chmurach oraz procesu powstawania ciepłego deszczu. Zamieszczone zostały także argumenty przemawiające za stosowaniem symulacji wielkowirowych (LES), w tym przede wszystkim możliwość stosowania dla dużych liczb Reynoldsa.

Rozdział 2 zaczyna się od opisu teoretycznego przepływów turbulentnych. Dalej przedstawiona została numeryczna metoda DNS ich modelowania, użyteczna dla turbulencji jednorodnej i izotropowej, zarówno statystycznie stacjonarnej jak i zanikającej w czasie. Warto podkreślić, że Autor zatroszczył się o zanikanie korelacji przestrzennych prędkości na około połowie rozmiaru komórki periodycznej. Algorytm pseudo-spektralny zastosowany przez

Autora we własnym programie numerycznym został porównany z rozwiązaniami stosowanymi przez innych autorów. Rozdział 3 poświęcony jest analizie numerycznego algorytmu LES oraz przedstawieniu i uzasadnieniu konstrukcji własnego programu numerycznego opartego na tej metodzie.

Rozdział 4 rozpoczyna się od wprowadzenia równań dynamiki cząstek punktowych w przepływie turbulentnym. Przeprowadzona zostaje interpolacja prędkości płynu w celu wyznaczenia go w położeniu cząstek. Wprowadzony jest opis statystyczny położenia cząstek.

W rozdziale 5 Autor przedstawia swój program numeryczny rozwiązań równań Naviera-Stokesa metodą pseudo-spektralną dużych wirów (LES) sprzężoną z lagrangowskim śledzeniem cząstek punktowych o niezaniechanialnej bezwładności. Następnie przeprowadza walidację tego programu numerycznego, porównując z wynikami dla izotropowej turbulencji uzyskanymi metodą DNS przez różnych autorów, a także analizuje wpływ dwóch różnych modeli lepkości wirowej na ruch cząstek w szerokim zakresie liczb Reynoldsa.

W rozdziale 6 zamieszczone zostały: podsumowanie wyników rozprawy doktorskiej oraz dalsze perspektywy rozwoju metod numerycznego modelowania turbulencji, ze wskazaniem na potencjał LES jako narzędzia do symulacji przepływów turbulentnych zawierających cząstki w zakresie większych niż dotychczas liczb Reynoldsa.

Pytania, komentarze i obserwacje

- 1) Jaka jest fizyczna interpretacja założonej przez Autora gęstości sił w równaniu Naviera-Stokesa? Na s. 19 użyte jest określenie "artificial forcing". Jednakże gęstość sił na jednostkę masy płynu w równaniach (2.6) i (2.10) ma jakieś swoje fizyczne źródło dla przepływu turbulentnego – jakie ono jest? Na ile dobrze jest ono opisywane przez założoną przez autora postać "artificial forcing"?
- 2) Cząstki zawieszone w płynie wpływają wzajemnie na swój ruch (tzw. oddziaływania hydrodynamiczne). Wpływ poruszającej się cząstki na prędkość innej cząstki skaluje się odwrotnie proporcjonalnie do wzajemnej ich odległości. Efekt ten nie jest uwzględniany we wzorach opisujących dynamikę cząstek. Kiedy cząstki grupują się w przepływie turbulentnym, odległości między nimi są małe, co pozwala przypuszczać, że wzajemne oddziaływania hydrodynamiczne są istotne. Powstaje zatem pytanie, czy (i w jaki sposób) można uzasadnić zaniechanie tych oddziaływań wzajemnych? Skąd wiadomo, że ich uwzględnienie nie doprowadziłoby do jakościowo i ilościowo różnych wyników?

- 3) Rozprawa doktorska jest napisana w stylu obszernego artykułu przeglądowego. W każdym rozdziale i podrozdziale następuje opisywanie rezultatów prac innych autorów oraz analiza porównawcza, co utrudnia zrozumienie, jakie są istotne wyniki Autora.
- 4) Czy kody numeryczne opracowane przez Autora zostały (lub zostaną w przyszłości) udostępnione w publicznym dostępie (open access)? Jeśli nie, to jakie są dalsze perspektywy stosowania tych programów numerycznych?

Szczegółowe uwagi

- A) W równaniu Naviera-Stokesa (2.3) F_α jest siłą na jednostkę masy płynu (określenie „an external body force acting on the fluid”
- B) Średnia po zespole statystycznym wprowadzona na s. 8 oraz p i f_α wprowadzone na s. 9 powinny być zdefiniowane.
- C) Pan mgr inż. Michał Rajek jest pierwszym z dwóch współautorów 3 publikacji związanych z tematyką doktoratu wymienionych w bazie Scopus:
 - 1) Michał Rajek and Jacek Pozorski, Kinematic simulations as a subgrid-scale model for particle motion: *a priori* LES of homogeneous isotropic turbulence, *J. Phys.: Conf. Ser.* **2367**, 012029 (2022).
 - 2) Michał Rajek and Jacek Pozorski, Structural Models for Particles in LES: Assessment Through the Subfilter Enstrophy Field, *Ercoftac Series*, **31**, 221-226 (2014).
 - 3) Michał Rajek and Jacek Pozorski, Adaptively reconstructed spectral eddy-viscosity in large eddy simulations of particle-laden isotropic turbulence, Part I: Particle statistics at low Reynolds number, *International Journal of Multiphase Flow*, **197**, 105584 (2026).
 Dlaczego w spisie literatury rozprawy doktorskiej nie zamieszczone zostały publikacje 1-2 oraz praca 3 jako „w przygotowaniu”?

Podsumowanie

Niewątpliwie, rozprawa doktorska pana mgr. inż. Michała Rajka prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, w zakresie przepływów turbulentnych lepkiego płynu zawierającego małe cząstki, lub nie zawierającego cząstek, oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, dotyczącej numerycznego modelowania turbulencji, a zatem spełnia warunek sprecyzowany w ust. 1 art. 187 Ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, zwanej dalej Ustawą. Autor wykazał się znajomością wyników licznych istotnych prac naukowych dotyczących numerycznego modelowania

turbulencji. Skonstruował, przetestował i zastosował własne programy numeryczne, krytycznie porównując wyniki z rezultatami zawartymi w literaturze.

Ponadto przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. A mianowicie, mgr inż. Michał Rajek stworzył zestaw algorytmów i kodów numerycznych DNS oraz LES modelujących jednorodną izotropową turbulencję lepkiego płynu, wykorzystując własny model lepkości wirowej. Stworzył także własny algorytm i program numeryczny do wyznaczania dynamiki cząstek punktowych o niezaniechanialnej bezwładności, stosowalny dla stosunkowo dużych liczb Reynoldsa. Spełniony jest zatem warunek określony w ust. 2 art. 187 Ustawy.

Biorąc pod uwagę powyższe podsumowanie mojej recenzji, wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej pana mgr. inż. Michała Rajka i dopuszczenie Go do publicznej jej obrony.

A handwritten signature in blue ink, reading "Marek R. Jędraszek". The signature is fluid and cursive, with the first name "Marek" and the last name "Jędraszek" clearly distinguishable.