

# Tytuł rozprawy: Modelowanie ewolucji trójwymiarowych struktur wirowych w cieczy lepkiej metodami cząstek wirowych z wykorzystaniem obliczeń równoległych

Autor: Andrzej Kosior

Promotorzy: dr hab. inż. Henryk Kudela, prof. PWr,  
prof. dr hab. inż. Zbigniew Huzar

Data złożenia pracy: 31.03.2015

## Streszczenie

Wzajemne oddziaływania pola prędkości i wirowości powodują, że wirowość w przepływie ma tendencję do koncentracji i układania się w spójne (koherentne) struktury przypominające rurki. Dwa podstawowe procesy jakim poddawane są te struktury to oddziaływanie ze sztywną ścianą oraz oddziaływanie w innymi strukturami. W wyniku tego drugiego procesu może dojść do zjawiska zmiany topologii linii wirowych inaczej nazywanym także rekonekcją struktur wirowych. Jest ono bardzo powszechne w przyrodzie aczkolwiek nie jest szeroko opisane w literaturze. Uważa się, że ma ono decydujące znaczenie na ewolucję płynu.

W niniejszej pracy do badań numerycznych ewolucji i interakcji struktur wirowych została wybrana trójwymiarowa metoda cząstek wirowych. W metodzie tej używane są cząstki przenoszące informację o polu wirowości. W używanym algorytmie są one inicjalizowane zgodnie z początkowym (zadany) polem wirowości na strukturalnej siatce numerycznej rozpiętej na obszarze obliczeniowym. Na podstawie znajomości pola wirowości można wyznaczyć pole prędkości rozwiązując równania Poissona na tzw. potencjał wektorowy. Do symulacji przepływu lepkiego został wykorzystany algorytm dekompozycji lepkościowej. Polega on na rozbiciu każdego kroku czasowego metody na dwa podkroki. W pierwszym rozwiązywane jest zagadnienie przepływu nielepkiego, w którym na podstawie twierdzenia Helmholtza cząstki niosące informację o wirowości unoszone są przez przepływ tak samo jak cząstki materialne. Następnie informacja o wirowości jest interpolowana z powrotem na węzły siatki numerycznej. W drugim podkroku symulowany jest wpływ lepkości poprzez rozwiązanie równania dyfuzji na siatce numerycznej.

Rozwiązywanie równań ruchu cieczy dla zagadnień trójwymiarowych, niezależnie od użytej metody, wiąże się z długimi czasami obliczeń. Przyrost mocy obliczeniowej komputerów, związany ze zwiększeniem częstotliwości zegara taktującego pracę procesora, w ostatnich latach zdecydowanie się zmniejszył. Dlatego w niniejszej pracy do przyspieszenia obliczeń zostały wykorzystane obliczenia równoległe na kartach graficznych. Metoda cząstek wirowych doskonale nadaje się do wykorzystania w obliczeniach równoległych. Najbardziej czasochłonna część – ruch cząstek i interpolacja wirowości na węzły – ma charakter lokalny i jest niezależna od pozostałych cząstek. Dzięki temu możliwe jest proste mapowanie jednej cząstki na jeden proces równoległy a tym samym efektywne przyspieszenie obliczeń. W celu zwiększenia dostępnej pamięci RAM a tym samym możliwości stosowania gęstszych siatek numerycznych i liczby cząstek wirowych wykorzystane została opracowana implementacja metody cząstek wirowych wykorzystująca do obliczeń wiele kart graficznych. Zastosowano programowanie hybrydowe MPI-OpenMP. Pozwoliło to na przeniesienie obliczeń na klastry obliczeniowe i wykorzystanie dowolnej dostępnej w systemie liczby kart graficznych niezależnie od konfiguracji sprzętowej. Dzięki temu można było połączyć przyspieszenie obliczeń (dla jednej karty graficznej uzyskano ok. 50-krotne skrócenie czasu obliczeniowego względem pojedynczego rdzenia procesora) oraz duży obszar obliczeniowy (dzięki połączeniu pamięci RAM kilku kart).

W pracy zostało zbadane zagadnienie rekonekcji struktur wirowych. Opisany został przebieg tego zjawiska w zależności od różnych geometrii początkowych rurek wirowych. Zbadany został wpływ liczby Reynoldsa na przebieg tego procesu. Przedstawione zostało zjawisko czołowego zderzenia dwóch pierścieni wirowych.

## Abstract

Mutual interactions of the velocity and the vorticity fields cause the vorticity to concentrate in coherent structures resembling tubes (hence called vortex tubes). Those structures undergo two basic processes: interaction with a solid wall and interaction with other structures. During that second process a phenomena called as a reconnection of the vortex lines may occur. It is very common in the nature but is still not well explained in the literature. It is believed that it plays important role in the fluid motion.

In this thesis a three-dimensional vortex particle method was used to study the evolution of vortex structures. In this method particles that carry information about vorticity field are used. In the algorithm used the particles are initiated according to the initial distribution of vorticity field on a numerical grid. The velocity field is calculated from the so called vector potential obtained from the solution of the the Poisson equation. To simulate the viscous flow the so called viscous splitting algorithm was used. It involves splitting each time step into two substeps. In first the incompressible fluid flow equation is solved. In the second substep the viscous effects are modelled by the solution of the diffusion equation. In the algorithm used particles are remeshed onto the nodes of the numerical grid in every time step.

Solving the three-dimensional fluid flow equations is a time-consuming process independently on the method used. In the recent years the computational power of a single core of a processor has stopped rising. This is the reason why multiprocessor architectures have to be used to shorten the computational times. Surprisingly, graphics processing units (GPUs), built mainly for video games, can be used for scientific calculations. Vortex particle method suits very well for parallel computations. Its most time-consuming part - movement of the particles and interpolation of the vorticity to the numerical grid nodes has a local character and is independent on other particles/nodes. Due to this fact a single particle/node computations may be mapped onto a single computational thread and thus calculations may be run in parallel. In order to increase the amount of the available RAM memory and thus the use of denser meshes a multiGPU version of the VIC method was implemented. For the communication between the cards a hybrid MPI-OpenMP programming was used. This allowed for the implementation of the VIC method to be executed on clusters of computers with different configurations of nodes and number of GPUs. The parallel implementation of the VIC method allowed for nearly 50 times faster computations comparing to a single core.

In the thesis a reconnection of the vortex tubes phenomena was investigated. A detailed description of this process was given depending on a different initial configuration of the vortex tubes. An influence of the Reynolds number on the occurrence of the reconnection process was investigated. A head-on collision of two vortex rings was presented.