

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Kosiora  
pt. „Modelowanie ewolucji trójwymiarowych struktur wirowych w cieczy lepkiej  
metodami cząstek wirowych z wykorzystaniem obliczeń równoległych”

### 1. Informacje ogólne

Praca wykonana została na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem promotorów dr hab. inż. Henryka Kudeli, prof. Politechniki Wrocławskiej oraz prof. dr hab. inż. Zbigniew Huzara. Pracę opublikowano jako raport serii PREPRINT nr 3/2015 na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym PWr.

Recenzję opracowano w oparciu o decyzję Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego PWr z dnia 15.04.2015 r.

Praca doktorska została przedstawiona na 129 stronach i zawiera osiem rozdziałów, które poprzedza spis treści i wykaz ważniejszych oznaczeń, kończy natomiast wykaz literatury (108 pozycji) oraz spis rysunków (56 pozycji) i spis tabel (7 pozycji).

### 2. Omówienie treści pracy

Pracę rozpoczyna spis treści i wykaz ważniejszych oznaczeń.

W rozdziale pierwszym (7 stron) pt. *Wprowadzenie*, Doktorant wyjaśnia przedmiot dysertacji, powód podjęcia wybranego tematu, przeprowadza wnikliwą analizę literaturową wykorzystanych metod numerycznych i w skondensowanej formie opisuje zastosowane techniki obliczeniowe.

Rozdział drugi (2 strony) pt. *Cel. Tezy i Zakres Pracy* w syntetyczny i bardzo rzeczowy sposób definiuje cel, tezy oraz zakres pracy. Celem pracy Doktoranta jest „*opracowanie i implementacja metody cząstek wirowych typu Wir w komórce do rozwiązania nieściśliwych, trójwymiarowych przepływów płynów lepkich wykorzystującej obliczenia*

*równoległe, pozwalającej na badanie ewolucji oraz wzajemnych oddziaływań struktur wirowych*". Algorytm był zaimplementowany w środowisku obliczeniowym opartym o ogólnie dostępne karty graficzne, co jest drugim celem pracy.

Autor formułuje dwie tezy pracy, które bezpośrednio związane są z celem pracy:

1. *Metoda cząstek wirowych umożliwia modelowanie ewolucji wirowości, pozwala na symulację rzeczywistych zjawisk hydrodynamicznych i bardzo dobrze nadaje się do zastosowania w obliczeniach równoległych;*
2. *Możliwe jest zbudowanie środowiska do obliczeń równoległych z ogólnodostępnych kart graficznych pozwalających znacząco przyspieszyć obliczenia.*

Następnie Doktorant formułuje zakres pracy:

- zdefiniowanie układów równań dla nielepkiego i lepkiego płynu w trójwymiarowej przestrzeni kartezjańskiej;
- opracowanie i przetestowanie algorytmu obliczeniowego na pojedynczym procesorze;
- walidacja modelu;
- zaimplementowanie metody *Wir w komórce* na wielu kartach graficznych;
- zweryfikowanie poprawności implementacji;
- przeprowadzenie obliczeń numerycznych na superkomputerach zgromadzonych w programie PL-Grid.

Rozdział trzeci (20 stron) pt. *Metoda cząstek wirowych*, Autor poświęcił omówieniu zastosowanej w pracy metody numerycznej. Na początku rozdziału formułuje równanie Naviera-Stokesa w ujęciu wirowości, przytacza wirowe twierdzenie Helmholtza. Następnie pokazuje podstawy teoretyczne służące do dyskretyzacji ciągłego pola wirowego rozkładem cząstek wirowych, którym przypisane są porcje wirowości nazwane intensywnością cząstki. Doktorant przedstawia także technikę wyznaczania pola prędkości, gdy znane jest pole wirowości. Dalej definiuje dla nieściśliwego i nielepkiego płynu wielkości, które mają stałą wartość przez cały czas trwania ruchu. Niezmiennikami ruchu są: całkowita wirowość, całkowita cyrkulacja, entropia, energia kinetyczna oraz impuls liniowy. W późniejszym czasie wspomniane parametry zostaną użyte podczas testowania programów obliczeniowych.

Następnie Doktorant pokazuje techniki związane z redystrybucją intensywności cząstek na węzłach siatki, używając do tego schematów interpolacyjnych, polegających na

*inicjowaniu nowych cząstek wirowych na regularnych pozycjach oraz wyznaczeniu ich wektora intensywności poprzez interpolację starych wartości na nowe położenia cząstek.* Dalej zanalizowane zostały metody symulacji lepkości dla metod cząstek wirowych. Na zakończenie rozdziału trzeciego opisano algorytm numeryczny metody typu *Wir w komórce*.

W rozdziale czwartym (8 stron) pt. *Badania numeryczne metodą typu Wir w komórce na pojedynczym procesorze*, Doktorant prezentuje techniki oraz wyniki obliczeń numerycznych algorytmu przedstawionego w rozdziale trzecim, zaimplementowanego w języku programowania Fortran 90 dla płynu nielepkiego. W pierwszej kolejności został wykonany test, polegający na analizie prędkości przemieszczania się pierścienia wirowego w czasie dla  $R_0=1.5$  oraz  $r_0=0.3$  i wartości cyrkulacji z przedziału  $\Gamma \in [1.06, 4.23]$ . Obszar obliczeniowy miał wymiar  $2\pi \times 2\pi \times 2\pi$  i rozpięto na nim siatkę o liczbie węzłów  $128 \times 128 \times 128$ . Wartość prędkości translacji obliczonej za pomocą proponowanego algorytmu porównano ze wzorem Kelvina oraz Hicksa, uzyskując dobrą zgodność pomiędzy wynikami teoretycznymi i numerycznymi. Następnie Autor porównał ewolucję pierścieni wirowych z różnymi rozkładami wirowości w rdzeniu. Także dla analizowanych w rozdziale przypadków uzyskano duże zgodności obliczeń numerycznych z wynikami teoretycznymi. Należy podkreślić, że wymienione w rozdziale czwartym techniki oraz metody walidacyjne zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach z listy filadelfijskiej.

Rozdział piąty (6 stron) pt. *Obliczenia równoległe na karcie graficznej* Doktorant poświęcił opisowi architektury zastosowanej karty graficznej firmy NVIDIA, która została wyposażona w technologię CUDA (Compute Unified Device Architecture). Autor wskazał również możliwość przeniesienia obliczeń metodą VIC na architektury równoległe dzieląc wykorzystywany algorytm na dwie części:

- część, dla której możliwe jest bezpośrednio zrównoleglenie kodu (*ruch cząstek, wyznaczenie prędkości w węzłach siatki*)
- część, dla której zrównoleglenie obliczeń wymaga zmiany stosowanego algorytmu i przystosowanie go do obliczeń równoległych (*rozwiązanie równania Poissona i równania dyfuzji*)

Rozdział szósty (38 stron) pt. *Implementacja algorytmu Wir w komórce na kartach graficznych* opisuje algorytmy oraz rozwiązania techniczne zastosowane w czasie obliczeń *Wir w komórce* (równanie Poissona oraz równanie dyfuzji) na kartach graficznych.

Na początku rozdziału Autor skupia się na operacjach związanych z ruchem cząstki i redystrybucją wirowości. W tym celu pokazuje działania związane z przeniesieniem na kartę GPU metody Eulera. Program został napisany w rozszerzeniu języka C zawierającym dodatkowe instrukcje dla kart graficznych o nazwie „C for CUDA”. Następnie przedstawia program do rozwiązania równania Poissona, bazujący na metodzie iteracyjnej. Metody te w pełni wykorzystują możliwości, jakie daje karta graficzna, i w przypadku użytych schematów, jak metoda Jacobięgo lub metoda Gaussa-Seidla (SOR), można je zastosować w schemacie metody wielosiatkowej.

Metodą omówioną i zaimplementowaną na kartach graficznych w pierwszej kolejności jest metoda dwusiatkowa, która pozwala *na wyeliminowanie składowych błędów, które są wolno zbieżne przy wykorzystaniu metod wygładzających na siatce gęstej*. Następnie Doktorant rozszerzył metodę dwusiatkową na wielosiatkową (Multigrid method), wykorzystując do tego schemat cyklu V oraz cyklu FMG (Full Multigrid Method) zwaną pełną metodą wielosiatkową.

W dalszej części dysertacji opisane zostały badania numeryczne implementacji metod iteracyjnych na karcie graficznej przy wykorzystaniu:

- metody Jacobięgo - Autor testował różne rodzaje pamięci (pamięć współdzielona i pamięć tekstur) z rozszerzoną siatką numeryczną *pozwalającą na wyeliminowanie z kodu jądra instrukcji warunkowych*. Każdy test był wykonywany dla 100 iteracji, a obliczenia prowadzono dla CPU (Intel Core 2 Quad Q9550) i dwóch typów kart GPU (Tesla - NVIDIA TESLA S1070 i FERMI - NVIDIA GFX 480). Doktorant stwierdził, że *przyspieszenie obliczeń zależy zarówno od wykorzystanego typu pamięci, jak i wielkości obszaru obliczeniowego*. W porównaniu do pojedynczego procesora uzyskano przyspieszenie na poziomie 50 – 60 razy;
- metody Gaussa-Seidla z czerwono-czarną numeracją węzłów - podobnie jak w przypadku metody Jacobięgo Doktorant testował dla 100 iteracji metodą Gaussa-Seidla i tej samej konfiguracji sprzętowej. Uzyskał przyspieszenie na poziomie 80-90 razy w porównaniu do pojedynczego procesora;
- metody wielosiatkowej, w której przeprowadził testy dla trójwymiarowego równania Poissona, ze znanym rozwiązaniem oraz dwoma rodzajami warunków brzegowych, z wykorzystaniem następującego sprzętu: CPU (Intel Core i7 960) oraz GPU (NVIDIA GTX 480). Na największej siatce numerycznej dla cyklu V uzyskano około dwukrotne przyspieszenie obliczeń względem metody FES (Fast Elliptic Solver), w przypadku cyklu FMG uzyskano przyspieszenie 10 – 12 razy.



Wspomniane badania numeryczne zostały opublikowane w znaczących czasopismach naukowych.

Kolejny problem opisany i rozwiązany przez Doktoranta w dysertacji, polegał na badaniu numerycznym implementacji metody VIC na GPU dla płynu nielepkiego. W tym celu przeprowadził cztery testy numeryczne dla tych samych parametrów geometrycznych i zmiennej cyrkulacji pierścienia w zakresie  $\Gamma \in [0.25, 1.00]$ , obliczenia wykonał na siatce o liczbie węzłów  $129 \times 129 \times 129$ . Wyniki numeryczne zostały porównane z rozwiązaniami analitycznymi zaproponowanymi przez Kelvina oraz Hicksa. Jak wynika z obliczeń, wyniki CPU i GPU były niemal identyczne, natomiast uzyskano przyspieszenie obliczeń około 40 razy w porównaniu z programem działającym na jednym procesorze.

Ostatnim elementem walidacyjnym algorytmu VIC było rozwiązanie równania dyfuzji symulującego zmianę wirowości cząstki spowodowaną lepkością płynu. Równanie rozwiązywano za pomocą metody *Gradientów Sprzężonych* z implementacją na GPU. Ponieważ badania numeryczne wykazały, że rząd metody wynosił ok. 2.00, Autor stwierdził, że zastosowane schematy oraz implementacja metody są poprawne.

W dalszej części rozdziału szóstego zaprezentowano obliczenia na wielu kartach graficznych. Program do obliczeń metodą VIC Doktorant napisał przy użyciu programowania hybrydowego MPI-OpenMP, zwanego także programowaniem wielopoziomowym. W takich procedurach ważna jest wymiana danych pomiędzy kartami graficznymi, procedury są wykonywane w trzech operacjach:

- *skopiowanie danych z pamięci karty graficznej do pamięci RAM gospodarza (hosta),*
- *przesyłanie danych pomiędzy procesami,*
- *skopiowanie danych na docelową kartę graficzną.*

Do uruchomienia w/w procedur Doktorant wykorzystał bibliotekę MPI. Aby zredukować spadek wydajności obliczeń w konsekwencji zatrzymania obliczeń na czas kopiowania danych, wprowadził kopiowanie asynchroniczne dla danych przesyłanych z i na kartę graficzną. W tym celu zostało wykorzystane tzw. strumienie CUDA.

Doktorant przeprowadził obliczenia na większej liczbie kart graficznych (16 sztuk) przy wykorzystaniu węzłów obliczeniowych superkomputera Zeus znajdującego się w Akademickim Centrum Komputerowym CYFRONET AGH w ramach programu PL-Grid. W celu sprawdzenia przyspieszenia i efektywności wraz ze wzrostem liczby

procesorów użytych do obliczeń, wykorzystał tzw. skalowanie mocne (dla programów, które charakteryzują się długim czasem obliczeń) oraz skalowanie słabe (w przypadku wykorzystania gęstych siatek obliczeń).

Rozdział ten kończy się omówieniem implementacji metody Jacobiego przy pomocy programowania hybrydowego MPI-OpenMP z wykorzystaniem technologii GPUDirect. Także i w tym przypadku, aby zbadać przyspieszenie programu na wielu kartach graficznych, wykonano skalowania. Dzięki zastosowaniu programowania hybrydowego MPI-OpenMP w metodzie VIC do obliczeń na wielu kartach graficznych, Autor uzyskał możliwość obliczeń na większej siatce a tym samym większej liczbie cząstek oraz skrócenie czasu trwania obliczeń.

W rozdziale siódmym (27 stron) pt. *Badania numeryczne ewolucji struktur wirowych*, Doktorant opisał szereg dobrze udokumentowanych w literaturze przypadków rekonekcji struktur wirowych dla różnych konfiguracji warunków początkowych.

W pracy przedstawiono m.in. zjawisko gry wirów, polegające na badaniu oddziaływania między sobą dwóch pierścieni wirowych o tej samej cyrkulacji. Autor przeprowadził obliczenia dla płynu nielepkiego i stwierdził, że wyniki obliczeń pozostają w zgodzie z twierdzeniem Helmholtza, co wskazuje na poprawność kodu numerycznego. Kolejnym krokiem walidacyjnym było wykonanie obliczeń dla przepływu lepkiego, dla którego  $Re_T=1000$ . Uzyskano grę wirów porównywalną z danymi eksperymentalnymi, co pozwoliło stwierdzić, że dla tego przypadku zaproponowany kod VIC jest poprawny.

Następnie Doktorant dokonał analizy zmiany topologii linii wirowych, izopowierzchni wirowości i pasywnych markerów. W tym celu przedstawił rekonekcję dwóch pierścieni wirowych ( $Re_T=730$ ) ustawionych początkowo obok siebie. Pierścienie te charakteryzowały się taką samą cyrkulacją. Za pomocą grupy pasywnych markerów stwierdził, że tylko markery znajdujące się na drodze pierścieni wirowych zostały poruszone. Następnie przeprowadził i przeanalizował rekonekcję identycznych, prostopadłych rurek wirowych przesuniętych względem siebie ( $Re_T=1403$ ). Wyniki badań numerycznych zostały zwalidowane z danymi literaturowymi uzyskanymi metodą spektralną. Także dla tego przypadku wprowadzono grupy markerów w celu analizy oddziaływania struktur wirowych na przepływ. Zderzenie rurki wirowej i pierścienia to kolejna symulacja przeprowadzona i analizowana przez Doktoranta. Wykonał dwie symulacje dla różnych liczb Reynoldsa ( $Re_T=1000$  oraz  $Re_T=2000$ ).

Obszar obliczeniowy miał wymiar  $4\pi \times 4\pi \times 4\pi$  i  $256 \times 256 \times 256$  węzłów. Na wszystkich brzegach zadane były okresowe warunki brzegowe.

Inny przykładem jest rekonekcja dwóch antyrównoległych rurek wirowych ( $Re_T=730$ ). Autor porównał powstałe struktury z przypadkami zaczerpniętymi z literatury uzyskując podobne rozwiązania.

Doktorant przeanalizował także wpływ liczby Reynoldsa na proces rekonekcji dla dwóch antyrównoległych rurek wirowych. Badania prowadzone były dla 5 różnych liczb Reynoldsa w zakresie od  $Re_T=1003$  do  $Re_T=353$ . Zmiana liczby Reynoldsa realizowana była poprzez zmianę wartości współczynnika lepkości ( $\nu=0.0176$  oraz  $\nu=0.05$ ). Autor stwierdził, że *dla przypadków, w których zaszedł pełny proces rekonekcji pojawiło się maksimum na wykresie największej wartości wirowości w obszarze obliczeniowym. (...) Pokazuje to, że lokalnie proces rekonekcji ma charakter bardzo dynamiczny.*

W dalszej części rozdziału Autor analizuje zderzenie czołowe dwóch pierścieni wirowych. Najpierw wykonuje obliczenia dla liczby Reynoldsa  $Re_T=1000$ , a następnie dla  $Re_T=2000$ . Dzięki zastosowaniu markerów możliwe było potwierdzenie zgodności obliczeń numerycznych z eksperymentem. Dodatkowo, celem zbadania wpływu liczby węzłów na wyniki obliczeń, Autor przeprowadził symulacje dla przypadku ( $Re_T=2000$ ) z powiększoną ilością węzłów  $512 \times 512 \times 512$ . Zauważył, że wyniki symulacji nadal wykazują dużą zgodność z doświadczeniem.

Ósmym rozdziałem pracy (2 strony) jest *Podsumowanie*.

Końcowy fragment rozprawy stanowi wykaz literatury, głównie w języku angielskim. Większość z nich to publikacje wydane zaledwie kilka lat temu. Do pracy dołączono też spis rysunków i tabel.

### 3. Ocena pracy

#### 3.1. Wybór tematu rozprawy

Badania numeryczne ewolucji i wzajemnych interakcji podstawowych struktur wirowych, jak rurki i pierścienie, pozwalają na głębsze poznanie zjawisk takich jak rekonekcja oraz gra wirów, które mogą być podstawą powstawania turbulencji.

Opisywanie i analizowanie tych zjawisk wymaga jednocześnie badań numerycznych i doświadczalnych. Obszar badań, jakim zajmuje się Doktorant, wymagał

wprowadzenia nowych technik numerycznych, które byłyby dostępne nie tylko dla ośrodków badawczych posiadających duże moce obliczeniowe, ale także dla grup naukowych dysponujących „standardowym” sprzętem obliczeniowym. Implementacja np. techniki *Wir w komórce* na wielu kartach graficznych jest moim zdaniem najbardziej optymalnym rozwiązaniem ze względu na niski koszt oraz skrócenie czasu obliczeń.

Oceniana praca należy do tych, które w sposób kompleksowy podchodzą do modelowania ewolucji trójwymiarowych struktur wirowych w cieczy lepkiej metodami cząstek wirowych z wykorzystaniem obliczeń równoległych.

Można więc uznać, że jest ona ważna technicznie, nośna naukowo i zawiera duży potencjał innowacyjny. Tematyka badań odpowiada wymogom stawianym w tym względzie rozprawom doktorskim.

### 3.2. Ocena wyników badań

- Doktorant wykorzystał metody cząstek wirowych do badania zagadnienia rekonekcji trójwymiarowych struktur wirowych. Wyniki badań numerycznych otrzymane metodą zaimplementowaną przez Autora zostały porównane z serią badań doświadczalnych i numerycznych przedstawionych w literaturze i pozostają w dobrej zgodności z wynikami innych autorów. Pokazuje to, że rozwijana w pracy metoda cząstek wirowych typu *Wir w komórce* wraz z opisanymi modyfikacjami może stanowić poważną alternatywę dla innych metod numerycznych w przypadku badania zjawisk wirowych. Przeprowadzone w pracy badania numeryczne pozwoliły na głębsze poznanie procesu ewolucji i rekonekcji struktur wirowych. W pracy została zaprezentowana zmiana topologii linii wirowych oraz wpływ liczby Reynoldsa na proces rekonekcji. Ważnym wnioskiem uzyskanym w wyniku badań było powiązanie procesu rekonekcji ze wzrostem maksymalnej wartości modułu wirowości w obszarze obliczeniowym.
- Autor badał numeryczne zjawiska czołowego zderzenia pierścieni wirowych, których wyniki eksperymentalne zostały zaprezentowane i omówione w prestiżowym czasopiśmie *Nature*. Eksperyment przedstawia dwa pierścienie wirowe, które w wyniku zderzenia czołowego rozpadają się na serię mniejszych pierścieni wirowych rozłożonych na obwodzie pierwotnych pierścieni. Według Autora tego zjawiska nie udało się odtworzyć dotąd w badaniach numerycznych. W pracy wykorzystano



stworzoną w tym celu przez Autora dysertacji implementację metody cząstek wirowych typu *Wir w komórce*. Wyniki symulacji zostały przedstawione zarówno w postaci ewolucji izopowierzchni wirowości, jak i ewolucji pasywnych markerów. Pozwoliło to na lepsze porównanie otrzymanych wyników z rzeczywistym eksperymentem. Mimo że obydwa rezultaty nie pokrywają się w pełni, Autorowi udało się odtworzyć proces rekonekcji podobnie jak w eksperymencie. Niedokładności mogą być związane z różnicą w sposobie wyznaczania liczby Reynoldsa w obydwu wypadkach.

- Ważnym elementem pracy było przeniesienie obliczeń związanych z metodą cząstek wirowych na środowisko równoległe kart graficznych. Pozwoliło to na znaczące przyspieszenie obliczeń (Autor podaje, że ok. 50-krotne), co zaowocowało możliwością przeprowadzenia wielu testów numerycznych, które w rezultacie pozwoliły na dogłębne zbadanie zjawiska rekonekcji struktur wirowych. Programowanie kart graficznych staje się coraz bardziej popularne w środowisku związanym z obliczeniami numerycznymi, jednak wciąż przeniesienie programu obliczeniowego wymaga włożenia dużego wysiłku. Dodatkowym ograniczeniem staje się stosunkowo niewielka pamięć RAM pojedynczej karty graficznej (choć w najnowszych rozwiązaniach dochodzi do 12GB), co w omawianej pracy zostało rozwiązane przez zastosowanie programowania hybrydowego MPI-OpenMP.

### 3.3. Uwagi krytyczne

- Zbadanie poprawności implementacji metody *Wir w komórce* z zastosowanym modelem lepkości ograniczono do podania rzędu metody rozwiązywania równania dyfuzji oraz do przeprowadzenia testu przedstawiającego zjawisko gry wirów. Ciekawym byłoby wykazanie poprawności tej implementacji w sposób bardziej dokładny. W przepływie nielepkim badane były niezmienniki ruchu, które nie są spełnione w przepływie lepkim, ale możliwe jest przykładowo określenie tempa spadku energii kinetycznej poprzez zależność:

$$\frac{dT}{dt} = -\nu \int_D \omega^2 dv = -2 \nu E$$

gdzie T - energia kinetyczna, E - entropia pola wirowości.

- Bardzo trudno znaleźć w literaturze wiarygodne doświadczenia (lub jest ich bardzo mało), które pozwoliłyby zweryfikować poprawność uzyskanych symulacji.

- We wprowadzeniu do obliczeń na wielu kartach graficznych przeprowadzony został test skalowania dla trzech kart graficznych przy czym karty te różniły się od siebie. Nie jest podane, która z tych kart była wykorzystana przy wyznaczaniu czasu obliczeń na jednym GPU oraz jak się ma czas wykonywania programu na różnych kartach. Wiadomo, że w obliczeniach równoległych czas wykonywania programu będzie zależał od najsłabszego urządzenia. Niemniej jednak jako wstępne testy implementacji metody wyniki te są do przyjęcia.

### 3.4. Uwagi redakcyjne

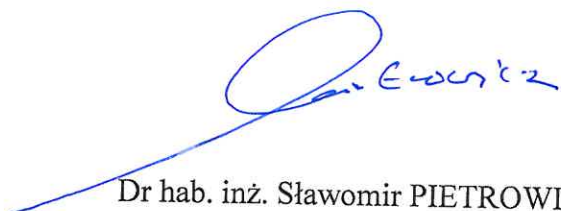
Praca prezentuje bardzo wysoki poziom redakcyjny. Język użyty w dysertacji jest precyzyjny i jednocześnie naukowy.

## 4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę przedstawioną rozprawę doktorską, jej temat i sposób prowadzenia badań, tj. dekompozycję problemu na zadania cząstkowe, sposób doboru narzędzi badawczych i syntezę osiągniętych wyników, można wysunąć wniosek, że mgr inż. Andrzej Kosior wykazał się znaczącą wiedzą i umiejętnościami badawczymi niezbędnymi do prowadzenia badań w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn i spełnia warunki do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych.

Wnoszę więc, zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14. 03. 2003r., o dopuszczenie Go do obrony pracy i nadanie Mu stopnia doktora nauk technicznych.

Jednocześnie po wnikliwej analizie pracy oraz przestudiowaniu zakresu zrealizowanych badań jak i publikacji, jakie ukazały się m.in. w prestiżowych czasopismach z listy filadelfijskiej (4 publikacje), na recenzowanych konferencjach notowanych na Web of Science (3 artykuły) oraz w czasopismach z listy MNiSW (6 publikacji), uważam, że dysertacja mgr inż. Andrzeja Kosiora zasługuje na wyróżnienie.



Dr hab. inż. Sławomir PIETROWICZ