

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Dominika Błońskiego

pt.: „NUMERYCZNE MODELOWANIE STRUKTUR WIROWYCH W PRZESTRZENI
MIĘDZYŁOPATKOWEJ MASZYN WIRNIKOWYCH”

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Dominika Błońskiego stanowi pismo nr W9/PW/396/2022 Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej z dnia 12.05.2022r.

Praca zawiera 149 stron i podzielona jest na 8 rozdziałów poprzedzonych streszczeniem pracy w języku polskim i angielskim, spisem treści, wykazem symboli i oznaczeń, a zakończona bibliografią liczącą 160 pozycji literaturowych, dwoma załącznikami, spisem rysunków oraz spisem tablic.

1. Omówienie pracy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra inż. Dominika Błońskiego jest numeryczne modelowanie struktur wirowych w przestrzeni międzyłopatkowej maszyn wirnikowych za pomocą metody cząstek wirowych typu „Wir w komórce”. Zbadany został przepływ płynu przez turbinę wiatrową (maszyna o niskiej gęstości ułopatkowania), stopnie wirnikowe turbiny Kaplana oraz turbiny niskoprężnej T106A. Ze spisu literatury wynika, że Doktorant jest współautorem 1 pracy cytowanej w rozprawie.

W rozdziale 1, który jest wprowadzeniem do pracy, Autor przedstawia możliwości zastosowania metody cząstek wirowych do maszyn przepływowych. Przedstawiony został rozwój metody cząstek wirowych z podziałem na dwa kierunki, z których jeden znany jest pod nazwą „Wir w komórce”. Z porównania tych metod wynika, że najszybszą jest metoda oparta na siatce prostokątnej, czyli ta, która jest przedmiotem zainteresowań Doktoranta. Ważnym zagadnieniem poruszonym w tym rozdziale jest dopasowanie siatki obliczeniowej do kształtu ciała opływanego. Doktorant wskazuje na metodę funkcji kary, która pozwala obszar będący na styku ciała stałe – płyn traktować jako ośrodek porowaty. Metoda ta pozwala rozwiązywać zagadnienia przepływowe dla maszyn wirnikowych o niskiej i wysokiej gęstości ułopatkowania i ma tę zaletę, że można ją łatwo zastosować w obliczeniach równoległych. Złożoność zagadnień, jakie można rozwiązać tą metodą, pokazana jest w dalszej części rozdziału, gdzie podana jest klasyfikacja struktur wirowych powstających w czasie przepływu płynu w maszynie przepływowej, przepływ przez turbinę wiatrową, mechanizm separacji warstwy przyściennej, czy też działanie profilu z wnęką wirową.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny
491569/2022v.

Wpłynęło dnia 14.07.22r.

Rozdział jest interesujący, w sposób jasny i uporządkowany wprowadza do zagadnień, które będą przedstawione w dalszej części pracy.

W rozdziale 2 sformułowane zostały cele, tezy oraz zakres pracy. Głównym celem pracy było opracowanie metody cząstek wirowych „Wir w Komórce”, służącej do rozwiązywania nieściśliwych przepływów płynów lepkich przy opływie ciała o dowolnym kształcie. Ponadto jako dodatkowe cele Doktorant postawił sobie

- poprawę dokładności rozwiązywania równań różniczkowych przez zastosowanie schematów różnicowych czwartego rzędu;
- zastosowanie funkcji kary do efektywnego odtworzenia brzegu opływanego ciała o dowolnych kształcie;
- badanie struktur wirowych wywołanych separacją płynu na powierzchni profilu aerodynamicznego z wnęką.

Na podstawie tych celów postawił tezy, które w pracy zamierza udowodnić. Zakres pracy obejmuje:

- sformułowanie równań ruchu płynu w ujęciu wirowości i prędkości dla lepkiego przepływu dwuwymiarowego z wykorzystaniem funkcji kary;
- opracowanie i przetestowanie algorytmu numerycznego metody wirowej typu „Wir w komórce” w oparciu o kompaktowe schematy różnicowe oraz wieloprocessorową technikę obliczeniową;
- badania wydajności rozwiązywania układu równań liniowych za pomocą kodu obliczeniowego dla problemów o różnym stopniu złożoności;
- wykonanie obliczeń charakterystycznych dla maszyn przepływowych, w których występują struktury wirowe.

W rozdziale 3 podano równania ruchu cieczy lepkiej w postaci, w jakiej są rozwiązywane za pomocą metody cząstek wirowych. W sposób opisowy przedstawiony jest algorytm metody „Wir w komórce”. Pierwszym etapem jest wyznaczenie wartości potencjału wektorowego (funkcji prądu dla dwóch wymiarów) z rozkładu wirowości przez rozwiązanie równania Poissona. Z funkcji prądu wyznaczona zostaje prędkość w węzłach siatki. W dalszej kolejności, stosując dekompozycję lepkościową, równanie transportu wirowości rozwiązuje się w dwóch krokach: najpierw równanie konwekcji, a następnie równanie dyfuzji. W części dotyczącej rozwiązania równania konwekcji, rozkład pola wirowości zastąpiony zostaje dyskretnym rozkładem cząstek wirowych. W każdym kroku czasowym cząstki przemieszczają się, transportując pewną wartość wirowości, która jest redystrybuowana na sąsiadujące węzły siatki. Pozwala to na rozwiązanie w kolejnym kroku we współrzędnych Eulera równania dyfuzji, uwzględniającego lepkość płynu.

Rozdział ten podobnie jak rozdział pierwszy w sposób czytelny i uporządkowany opisuje metodę wirową. Podane są niezbędne informacje, które pozwalają zrozumieć działanie algorytmu „Wir w komórce”. Konstrukcja tego rozdziału prowadzi od rozważań ogólnych do szczegółowych. Od syntetycznego opisu algorytmu do szczegółowej realizacji. Przedstawione zostały metody rozwiązywania równań różniczkowych w poszczególnych krokach algorytmu,

rząd dokładności tych metod, a także sposób dyskretyzacji funkcji wirowości, dyskretnym rozkładem cząstek wirowych oraz mechanizm redystrybucji wirowości na węzły siatki.

Rozdział 4. jest rozszerzeniem rozdziału 3. o szczegóły numerycznej implementacji algorytmu numerycznego „Wir w komórce” z zastosowaniem obliczeń równoległych. Autor w swojej pracy kładzie duży nacisk na zastosowanie schematów kompaktowych wysokiego rzędu. Przedstawia schematy różnicowe 4 rzędu względem wymiarów przestrzennych do rozwiązania równania Poissona, wyznaczania składowych prędkości oraz rozwiązania równania dyfuzji. Poprawność działania zastosowanych schematów różnicowych potwierdzają wyniki testów wykonanych przez Doktoranta. W dalszej części rozdziału przedstawiona jest metoda penalizacji, która pozwala na uwzględnienie w obszarze obliczeniowym ciała stałego o dowolnym kształcie. Pojawia się pojęcie funkcji charakterystycznej, która w sposób „rozmyty” dzieli obszar obliczeniowy na ciało stałe i płyn. Pozwala to na traktowanie obszaru obliczeniowego jako materiału porowatego, w którym funkcja ma wartość 0 dla płynu, 1 dla ciała stałego, a pomiędzy 0 i 1 dla obszaru o grubości ε na granicy ośrodków. Wyznaczeniu funkcji charakterystycznej poświęcony jest kolejny podrozdział. Uwzględnienie obecności ciała stałego w czasie obliczeń powoduje dołożenie do algorytmu dodatkowego kroku pomiędzy rozwiązywaniem równania konwekcji i dyfuzji. Podane są równania, które w oparciu o funkcje charakterystyczną, służą do korekty rozkładu prędkości oraz wirowości. Kolejnym krokiem, o który został rozszerzony algorytm, (konieczność jego istnienia została wyjaśniona we wprowadzeniu) jest wyznaczenie siły z jaką płyn oddziałuje na ciało stałe, co jest potrzebne do wyznaczenia współczynników siły nośnej i oporu. Ostatnim krokiem, o który został uwzględniony algorytm „Wir w komórce” jest zapewnienie spełnienia przez rozwiązanie warunku „dalekiego pola”. W tym celu dokonuje się korekty warunku brzegowego dla równania Poissona. Algorytm w ostatecznej postaci pokazany jest w tabeli 4.4. Ostatnią część tego rozdziału stanowi opis obliczeń w środowisku równoległym oraz zastosowane do tego celu biblioteki.

Rozdziały 3. i 4. stanowią pełny opis algorytmu, a ich podział jest logiczny. W rozdziale 3. nacisk położony jest na etapy rozwiązywania równania różniczkowego transportu wirowości, natomiast rozdział 4. to numeryczny opis tego algorytmu związany z korektą rozkładu prędkości i wirowości, wyznaczania siły w zagadnieniach opływu ciała stałego oraz opis obliczeń równoległych.

Rozdział 5. zawiera wyniki obliczeń dla testów numerycznych, pozwalających ocenić poprawność obliczeń metody „Wir w komórce”. Są to w kolejności: zagadnienie Taylora-Greena, przepływ w komórce z ruchomą ścianą, opływ cylindra oraz opływ profilu NACA0012. Zagadnienie Taylora-Greena posłużyło do określenia dokładności działania algorytmu przez porównanie wyników obliczeń z rozwiązaniem analitycznym. Zagadnienie przepływu w komórce z ruchomą ścianą jest zagadnieniem rozwiązywanym różnymi metodami przez wielu autorów, stąd obliczenia dla tego przykładu pozwoliły porównać wyniki dla tej metody z obliczeniami innych autorów. Wyniki obliczeń pokrywają się z dużą dokładnością w zakresie liczb Reynoldsa od 100 do 10 000. Opływ cylindra i opływ walca pozwalają na sprawdzenie poprawności działania korekty pola prędkości związanej z istnieniem ciała stałego w obszarze obliczeniowym oraz poprawność wyznaczania współczynników siły nośnej i oporu. Testy przeprowadzono dla trzech liczb Reynoldsa 550, 3000 i 9500 dla opływu walca

i dwóch liczb Reynoldsa 500 i 1000 dla opływu profilu. Dla tych liczb Reynoldsa została zbadana zbieżność obliczeń, a rozwiązania zostały porównane z pracami innych autorów, np. porównanie rozkładów wirowości przy opływie walca z pracą Lee, czy zależność współczynnika siły nośnej i oporu od kąta natarcia z wynikami Kurtulus oraz Ilio.

Autor kończy rozdział następującym stwierdzeniem: „uwzględnienie obecności ciała stałego w strumieniu płynu metodą funkcji kary i wykorzystanie metody cząstek wirowych pozwala na skuteczne modelowanie wirowych zjawisk przepływowych.”

Wyniki przeprowadzonych przez Doktoranta obliczeń numerycznych potwierdzają postawioną przez niego powyższą tezę.

Rozdziały 6. i 7. zawierają wyniki obliczeń związanych z modelowaniem struktur wirowych w maszynach przepływowych, za pomocą algorytmu „Wir w komórce”, przedstawionego w rozdziałach 3 i 4, przy czym rozdział 6. dotyczy maszyn przepływowych o niskiej gęstości ułopatkowania (turbiny wiatrowe), natomiast w rozdziale 7. zamieszczone są wyniki dla maszyn wirnikowych wielołopatkowych (turbina Kaplana, turbina niskoprzężna T106A).

W rozdziale 6. przedstawione są wyniki obliczeń dla 3 geometrii, z których dwie są z wnękami, dla kątów natarcia 3, 6 i 9 stopni, przy liczbie Reynoldsa 20 000. Przedstawione w rozdziale wyniki obliczeń i ich analiza potwierdzają tezę, że możliwe jest modelowanie opływu ciał stałych o skomplikowanej geometrii, uwzględniające jego oddziaływanie z płynem, przez modyfikację równań ruchu płynu do równania Naviera-Stokesa-Brinkmana. Ponadto wnęka po stronie grzbietowej profilu łopatek turbiny pozwala na zmniejszenie oddziaływania strefy recyrkulacji, co prowadzi do ograniczenia intensywności wirów i poprawy doskonałości profilu.

Obok obliczeń numerycznych, w dalszej części rozdziału przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych w tunelu wodnym dla profili, dla których wcześniej wykonano obliczenia numeryczne. Uzyskano jakościową zgodność przepływu dla badanych geometrii z wynikami obliczeń numerycznych.

Rozdział 7. rozpoczyna się od dyskusji dotyczącej warunków brzegowych dla przepływów periodycznych. Wskazano na komplikacje związane z doborem warunków brzegowych, ich niejednoznaczność oraz podano rozwiązanie tego problemu. Wyniki obliczeń zestawionych w dalszej części rozdziału dotyczących przepływu przez palisadę łopatek dla turbiny Kaplana oraz turbiny niskoprzężnej T106A, wskazują na skuteczność tej metody numerycznej w rozwiązywaniu zagadnień przepływowych. Rozdział kończy się informacjami na temat wydajności podzielenia rozwiązywanego problemu na wiele procesów obliczeniowych.

Kończący pracę, rozdział 8. stanowi podsumowanie wyników pracy oraz wnioski końcowe. Na szczególną uwagę zasługują oryginalne osiągnięcia Doktoranta, do których można zaliczyć :

- zastosowanie w algorytmie „Wir w komórce” przestrzennych schematów kompaktowych 4-rzędu i pokazanie, że te schematy różnicowe poprawiają dokładność rozwiązywania równań różniczkowych w tym algorytmie

- wykazanie, że funkcja kary pozwala na uwzględnienie w obszarze obliczeniowym opływu ciała stałego i dzięki prostej implementacji w algorytmie umożliwia prowadzenie obliczeń w postaci wielu jednoczesnych procesów,
- uzyskanie zgodności obliczeń numerycznych z eksperymentem w zakresie przepływów o małej gęstości ułopatkowania,
- rozszerzenie zastosowań metody „Wir w komórce” do modelowania struktur wirowych w maszynach przepływowych o dużej gęstości ułopatkowania (przepływy przez stopnie wirnikowe).

2. Uwagi

Algorytm „Wir w komórce” należy do metod rozwiązań bezpośrednich (DNS) zagadnień przepływowych, dlatego mylący jest tytuł pracy „Numeryczne modelowanie struktur wirowych ...”, który sugeruje, że do rozwiązania zagadnień przepływowych stosowany jest model struktur wirowych, podobnie jak model turbulencji. Powstaje zatem pytanie, czy traktować tę metodę jako DNS, czy też jako odmianę metody LES?

Praca doktorska została wydana przez Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, jednak mogłaby być poddana edycji redaktorskiej, co pozwoliłoby uniknąć wielu „literówek” znajdujących się w tekście. Praca jest napisana poprawnym stylistycznie językiem, lecz Autor ma tendencję do używania słowa „ilość” w miejsce „liczba”, np. ilość cząstek, ilość ciał, ilość kroków, ilość elementów, ilość węzłów, itd. Warto na przyszłość zwrócić uwagę, że policzalne wielkości określamy mianem „liczba”, a niepoliczalne „ilość”, chociaż obecnie coraz mniej zwraca się uwagę na takie rozróżnienie. Niektóre ze wzorów są napisane błędnie, co zostało uznane za błąd edycyjny. Dotyczy to

- wzoru (3.34) i (3.35) na str. 28 – zamiast $\omega(x')$ powinno być $\omega(x', t)$,
- wzoru (3.79) i (3.81) na str. 35 – w pierwszym po prawej stronie powinno być tylko 1, a w drugim brak nawiasów,
- str. 26 – lepiej nie stosować takiego zapisu $\omega_x = \omega_y = \frac{\partial}{\partial z} = 0$, o ile $\omega_x = \omega_y = 0$, to operator $\frac{\partial}{\partial z}$ już nie,
- str. 29 – wyrażenie $\nu \Delta U$ nie jest operatorem – powinno być $\nu \Delta$,
- we wzorze (4.42) na str. 52 powinno być $\cos\left(\pi\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{2\sqrt{2}h}\right)\right)$(brakuje w mianowniku litery h)

Na str. 80 tekst zaczynający się od słów „Na rys. 5.13 przedstawiony został obraz wirowości...”, stwierdzenie to dotyczy rys. 5.14.

We wzorze (3.9) na str. 25, zamiast operatora pochodnej materialnej, powinien być operator pochodnej lokalnej (cząstkowej) względem czasu. Prawidłowo jest to równanie napisane w tab. 4.4 (str. 61) pkt 9 oraz wzór (3.56). Ten błąd nie jest błędem edytorskim, nie wpływa jednak na wyniki obliczeń, ponieważ w algorytmie jest poprawnie zapisany.

Autor pisze na str. 24: „Z równania (3.5) wynika, że wirowość jest niezmienna w czasie” To sformułowanie jest nieprecyzyjne, lepiej brzmiałoby następująco: wirowość jest zachowa-

na wzdłuż trajektorii elementów płynu. Stwierdzenie to jest prawdziwe tylko dla dwuwymiarowego przepływu płynu barotropowego, nielepkiego. Równanie (3.5) lepiej wygląda, jeśli jest napisane następująco:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\partial\omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\omega = 0$$

Poza tym nie rozumiem zapisu wzoru (3.6), który w tym zapisie oznacza stacjonarność przepływu, a rozważany jest przepływ niestacjonarny. Chyba również powinna być pochodna materialna zamiast lokalnej?

Na str. 33 zbyt mało jest informacji dotyczącej przyjęcia aproksymacji funkcji wirowości za pomocą wzoru (3.64), co powoduje niejasny związek między tym wzorem, a wzorem (3.65). Doktorant cytuje ten wzór za publikacjami [70, 27], ale tam również nie jest to wyjaśnione. Po pierwsze brakuje zmiennej t , co mogłoby oznaczać, że funkcja aproksymująca jest niezmienna w czasie, a tak nie jest. Po drugie, we wzorze (3.64) występuje delta Diraca, co mogłoby oznaczać, że w punktach, gdzie $\mathbf{x} = \mathbf{x}_p$ wartość funkcji aproksymującej wirowość jest równa ∞ , a w pozostałych równa 0, i to również nie jest prawdą. Działanie delty Diraca w tym wzorze powinno być wyjaśnione, tak, aby w sposób naturalny prawdziwy był wzór (3.65).

Na str. 42 Doktorant pisze: „W obecnej pracy została zaimplementowana kompaktowa metoda czwartego rzędu wykorzystująca 9-punktowy schemat różnicowy. Wyprowadzenie tego schematu zostało szczegółowo przedstawione w [150, 42]”. Wystarczyło w pracy doktorskiej podać postać tego schematu, gdyż jest to wiedza akademicka, powszechnie dostępna, np. w podręczniku A. Bjork, G. Dahlquist – *Metody numeryczne*.

Na str. 88, ryss. 6.3 i 6.4, przedstawiają przebieg współczynnika siły nośnej oraz siły oporu w czasie. Zastosowane w tym przypadku uśrednienie tych przebiegów nie jest przekonujące. Brakuje wyjaśnienia, skąd oscylacje wartości tych wielkości. Przede wszystkim powinien być wykluczony wpływ siatki na taki przebieg. Bardziej czytelne byłyby te wykresy w dziedzinie częstotliwości. Poza tym te wielkości można porównać, wykonując obliczenia we Fluencie. Zgadzam się z tym, że pełne porównanie nie jest możliwe, ze względu na to, że metoda „Wir w komórce” należy do metod bezpośrednich (Direct Numerical Simulation), natomiast Fluent korzysta z modeli turbulencji. Jednak te siły w obu przypadkach można wyliczyć i porównać ze sobą. Uzyskanie takich oscylacji za pomocą Fluentu byłoby potwierdzeniem, że efekt jest fizyczny, a nie numeryczny.

Algorytm przedstawiony w tabeli 4.4 jest niezależny od metody numerycznej, co oznacza, że może być użyta inna metoda niż metoda różnic skończonych. Tutaj największą wątpliwość budzi kształt siatki numerycznej w otoczeniu opływającego profilu, pomimo, że Autor zbadał zbieżność i niezależność rozwiązania od zastosowanej siatki obliczeniowej. Przydałaby się informacja dotycząca jakości siatki obliczeniowej, np. podanie wartości parametru y^+ . A poza tym, skoro jest to metoda DNS, można pokazać tworzenie się struktur wirowych dla różnych skali Kolmogorowa.

Aby należycie ocenić wpływ zastosowania schematu kompaktowego 4 rzędu do rozwiązania równań różniczkowych za pomocą tego algorytmu, przydałoby się przynajmniej w za-

gadnieniach testowych wykonanie obliczeń za pomocą schematów różnicowych 2- rzędu i porównanie tych wyników. Doktorant co prawda porównuje swoje obliczenia z wynikami innych autorów, którzy stosowali schematy 2-rzędu, niemniej warto sprawdzić, czy metoda VIC z wyższym schematem różnicowym, dla zagadnień dla niej dedykowanych jest istotnie lepsza, pod względem dokładności i czasu obliczeń.

Na str. 106 – nie jest jasne zrozumienie zdań: „Niestety nie jest możliwe jednoczesne spełnienie obu warunków. Aby to zrobić, należałoby ten warunek przedstawić w postaci liczby zespolonej, co komplikuje implementację algorytmu”. W pierwszym zdaniu Autor pisze, że jest niemożliwe, a w drugim podaje jak to zrobić, dlatego przydałoby się wyjaśnienie bardziej szczegółowe tego co Doktorant miał na myśli.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie zmniejszają merytorycznej wartości pracy.

3. Podsumowanie

Praca mgra inż. Dominika Błońskiego potwierdziła słuszność postawionych przez niego tez. Cele jakie sobie postawił dla ich potwierdzenia, zostały przez niego w pełni zrealizowane i stanowią Jego oryginalne osiągnięcie. Podjęty przez Doktoranta temat badawczy jest aktualny a zaprezentowane wyniki przyczyniają się do rozwoju nauki. Doktorant wykazał się umiejętnościami wymaganymi w trakcie samodzielnej pracy badawczej, dysponując przy tym niezbędną wiedzą teoretyczną.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgra inż. Dominika Błońskiego spełnia wymogi określone w art. 13 Ustawy z dnia 14.03.2003r o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i mieści się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz świadczy o dobrej ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w tej dyscyplinie.

Wnoszę zatem do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Z uwagi na Jego istotny wkład w rozwój metody „Wir w komórce” do rozwiązywania zagadnień związanych z maszynami przepływowymi, w szczególności o wysokim ułopatkowaniu oraz staranność w przeprowadzeniu badań numerycznych i ich weryfikacji eksperymentalnej, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Andrzej Terluwal

