

Gdańsk, 8 sierpnia 2022 r.

prof. dr hab. inż. Jacek Pozorski
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Fiszera 14, 80-231 Gdańsk
tel.: 58 5225145, e-mail: jp@imp.gda.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominika Błońskiego
pt. **Numeryczne modelowanie struktur wirowych
w przestrzeni międzyłopatkowej maszyn wirnikowych**

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Henryka Kudeli, a promotorem pomocniczym był dr inż. Tomasz Kozłowski (tej informacji nie podano jednak w rozprawie). Przedmiotem zainteresowania Doktoranta są metody cząstek wirowych, skutecznie rozwijane od lat w szkole naukowej Promotora i stosowane do badania różnorodnych zjawisk przepływowych. Motywację do podjęcia badań opisywanych w niniejszej rozprawie stanowiły zagadnienia związane z analizą przepływu przez układy łopatkowe turbin wiatrowych, wodnych i parowych. Tym samym cel pracy założono bardzo szeroko.

Rozprawa jest interesująca od strony poznawczej, dostarczając informacji o oddziaływaniu przepływu, a w szczególności występujących w nim struktur wirowych, z pojedynczymi profilami jak również palisadami profilów (układami łopatkowymi). Z uwagi na przyjęty model fizyczny przepływu i wynikające stąd uproszczenia, niektóre z uzyskanych wyników należy jednak postrzegać jako jakościowe. Istotną częścią składową badań, która ma umożliwić osiągnięcie założonego celu jest rozwinięcie i walidacja samej metody cząstek wirowych w zakresie jej elementów składowych, takich jak opis opływu ciał stałych o dowolnej geometrii, implementacja warunków brzegowych, numeryczne rozwiązywanie wyników dużych układów równań liniowych itd. Te aspekty pracy są po części wspólne także dla – innych niż metoda cząstek – podejść stosowanych i rozwijanych we współczesnej obliczeniowej mechanice płynów (ang. CFD); podejmowane badania cechuje aktualność. Ponadto, ważnym elementem przedstawianej pracy doktorskiej jest umiejętne zrównoleglenie wynikowego kodu komputerowego, nieodzowne do skutecznej realizacji dużych zadań obliczeniowych występujących we współczesnej CFD.

Doktorant podjął się rozwinięcia metod wirowych do obliczeń przepływów dwuwymiarowych w geometrii typowej dla układów łopatkowych maszyn wirnikowych. Zakres rozprawy obejmuje zatem zagadnienia mechaniki (obecnie: dyscyplina *Inżynieria Mechaniczna*) oraz energetyki (obecnie: dyscyplina *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka*); istotne w pracy są także komponenty nauk obliczeniowych. Zakres badań podjętych i zrealizowanych przez Doktoranta oraz stopień ich trudności bez wątplenia odpowiadają wymogom stawianym pracom doktorskim.

Struktura i zawartość pracy doktorskiej

Pierwszy rozdział rozprawy stanowi wprowadzenie do podejmowanych badań i zawiera podstawowe informacje o układach przepływowych turbin (w tym wiatrowych), o występujących w nich strukturach wirowych, o kinematyce przepływu, o powstawaniu oderwania warstwy przyściennej (WP). Jest to zasadniczo wiedza podręcznikowa, ale użyteczna dla lepszego rozumienia dalszej części pracy. W rozdziale 1 zawarto również przegląd literatury i krótkie omówienie metod wirowych w zastosowaniu do obliczeń przepływu w układach łopatkowych. Cel i zakres pracy przedstawiono w rozdziale 2 wraz ze specyfikacją tez rozprawy. Kolejne dwa rozdziały pracy zawierają omówienie wyjściowych równań, w tym dynamiki wirowości, sformułowanie metody funkcja prądu - wirowość ($\Psi-\omega$) oraz szereg ważnych elementów składowych proponowanego podejścia, jak również aspekty jego implementacji do obliczeń równoległych. W rozdziale 5 udokumentowano uzyskane wyniki walidacji opracowanej

metody – zwane przez Autora testami numerycznymi – dla kilku znanych z literatury przypadków dwuwymiarowego (2D) ruchu nieustalonego cieczy lepkiej. Najważniejsze oryginalne wyniki obliczeń przepływu przez układy łopatkowe omówiono w rozdziałach 6 i 7. Badania numeryczne opływu profilu z wnęką wzbogacone o własne wizualizacje w tunelu hydrodynamicznym (kanale wodnym) przedstawiono w rozdziale 6 w kontekście turbiny wiatrowej. Uzyskane wyniki dla przestrzeni międzyłopatkowej czyli przepływu przez palisadę profilów turbiny wodnej oraz turbiny parowej opisano w rozdziale 7. Podsumowanie rozprawy, wnioski Autora oraz sugerowane przezeń kierunki dalszych badań zamieszczono w krótkim rozdziale 8. Ponadto załącznik A zawiera dodatkowe informacje na temat efektywności algorytmu rozwiązywania równania Poissona na maszynach wieloprocesorowych, a załącznik B – uzupełniające wyniki rozkładów prędkości w opływie pojedynczego profilu z wnęką. Bibliografia pracy jest obszerna (160 pozycji) i zawiera wiele prac opublikowanych w ostatnich latach, tak w zakresie układów przepływowych turbin, tematyki obliczeniowej mechaniki płynów i w szczególności metod wirowych, jak i szeroko rozumianych metod numerycznych. Rzadko spotykaną acz bardzo użyteczną funkcjonalnością jest podanie przy każdej pozycji literatury informacji o miejscu jej cytowania w rozprawie.

2. Szczegółowa ocena rozprawy, pytania i uwagi

Lektura rozprawy jest ciekawa a jej układ zasadniczo przejrzysty i logiczny. Jak już wspomniano w pierwszej części recenzji, Doktorant przedstawił uzasadnienie wyboru tematyki rozprawy oraz podstawy teoretyczne zastosowanej metody obliczeniowej; na tym tle zaprezentowano własne osiągnięcia, które dotyczą zarówno samej metody „wir w komórce” (ang. VIC) jak i jej zastosowań do turbin o niskiej gęstości ułopatkowania (turbiny wiatrowe) oraz do wyznaczenia przepływu w przestrzeni międzyłopatkowej turbin wodnych i parowych. Elementy oryginalnego rozwiązania przez Doktoranta problemu naukowego bardziej szczegółowo ujmuję poniższa lista.

Oryginalne osiągnięcia Doktoranta:

- 1) rozwinięcie metody cząstek wirowych do obliczeń przepływów cieczy lepkiej, w szczególności:
 - (i) opracowanie funkcji kary (metody penalizacji) do opływu ciał stałych w ogólnej geometrii, tzn. gdy brzeg ciała nie pokrywa się z liniami regularnej siatki obliczeniowej. Zastosowano dodatkowy człon równania pędu, który w przybliżeniu przepływu przez ośrodek porowaty ujmuje efekt zmiennej przepuszczalności w obszarze rozwiązania;
 - (ii) opracowanie procedury przenoszenia danych o geometrii profilu z oprogramowania zewnętrznego (typu CAD) do programu obliczeniowego metody cząstek wirowych; informacja o położeniu powierzchni (brzegu) opływającego ciała stałego względem węzłów regularnej siatki obliczeniowej jest konieczna do prawidłowego zastosowania metody penalizacji;
 - (iii) użycie kompaktowych schematów różnicowych czwartego rzędu do dyskretyzacji równania Poissona, co – przy niewielkim wzroście nakładu obliczeniowego – zauważalnie zwiększa dokładność uzyskiwanych wyników;
 - (iv) opracowanie i implementacja warunków brzegowych dla wirowości na wlocie i wylocie obszaru obliczeniowego;
 - (v) walidacja opracowanego wariantu metody obliczeniowej „wir w komórce” na przykładzie wiru Taylora-Greena, przepływu w jamie (w komorze kwadratowej) generowanego ruchem ścianki, opływu walca oraz opływu profilu, dla których to przypadków istnieją dane referencyjne, i uzyskanie dobrej zgodności z tymi danymi;
 - (vi) adaptacja kodu komputerowego do obliczeń równoległych i uzyskanie znaczącego wzrostu efektywności obliczeń;
- 2) przeprowadzenie wielowariantowych obliczeń opływu profilu z wnęką po stronie ssącej (grzbietowej), dla różnych wartości kąta natarcia oraz dwóch wariantów geometrii wnęki; jednym z celów przeprowadzonej analizy było określenie wpływu wnęki na współczynnik doskonałości aerodynamicznej profilu; porównanie jakościowe uzyskiwanych wyników z własną wizualizacją opływu profilu w tunelu hydrodynamicznym przy użyciu metody fluorescencyjnej;

- 3) wyznaczenie przepływu przez liniową palisadę profilów jako przybliżenia układu łopatkowego turbiny wodnej Kaplana oraz obliczenia opływu palisady profilów o geometrii typowej dla turbiny parowej. W obu przypadkach przeprowadzono szczegółową analizę wpływu wirowości na wlocie do obszaru (pochodzącej z palisady kierowniczej) oraz uzyskano obraz struktur wirowych w pobliżu profilu i ich oddziaływania z warstwą przyścienną.

W rozprawie szczegółowo opisano elementy metody „wir w komórce”, które składają się ostatecznie na oryginalny, autorski algorytm i program obliczeniowy. Jest to zadanie pracochłonne, wymagające wysokich kompetencji i należy z uznaniem odnotować sukces Autora na tym polu. Został on udokumentowany rozwiązaniem przypadków walidacyjnych, gdzie uzyskano poprawne wyniki, korzystnie układające się na tle dostępnych danych referencyjnych tak w zakresie dokładności i rzędu zbieżności otrzymanych rozwiązań, jak i wydajności obliczeniowej i skutecznego zrównoleglenia kodu, który pozostaje efektywny nawet dla bardzo gęstych siatek i dużej liczby cząstek wirowych. Do tej części pracy miałbym kilka pytań (3-7, zob. lista poniżej). Uzyskane przez Doktoranta oryginalne wyniki są interesujące i szczegółowo opisane w zasadniczej części rozprawy (rozdziały 5-7). Pewien niedosyt pozostawiają jedynie wyniki prezentowane w rozdziale 7, dotyczące tytułowego zagadnienia rozprawy, czyli przepływu w przestrzeni międzyłopatkowej – rozumiem, że dokumentują one bardziej obecne możliwości metody VIC, w tym efekt napływu struktur wirowych i ich oddziaływanie z WP, niż ilościowe wyniki rozkładów prędkości (pokazano jedynie mapy koloru) itp. Natomiast najważniejsze spostrzeżenia dotyczą samego zastosowania metody wirowej do wybranych przez Doktoranta zagadnień (pytania 1-3); uważam, że te kwestie powinny zostać omówione bardziej szczegółowo podczas obrony.

Pytanie 1: podjęte w pracy zadanie jest ciekawe i ambitne, natomiast należałoby wyraźniej podkreślić mocne strony i ograniczenia stosowanej metody. Jest ona w istocie odpowiednikiem rozwiązania pełnych równań przepływu (ang. *Direct Numerical Simulation*, DNS) cieczy lepkiej w dwóch wymiarach (2D). Opływ łopat turbin wiatrowej jak również przepływ w kanałach łopatkowych turbin parowych i wodnych zachodzą w reżimie turbulentnym i na poziomie DNS są to *par excellence* przepływy 3D, a – wyłączwszy energetykę wodną – obejmują także efekty ściśliwości czynnika, szczególnie w pobliżu wierzchołków łopat turbin wiatrowych oraz w części niskiego ciśnienia turbin parowych. Zagadnienie wpływu turbulencji wlotowej jest ważne i trudne, natomiast modelowanie struktury napływającej wirowości jako dwuwymiarowej skutkuje między innymi łączeniem się wirów, co jest jednak jakościowo odmienne od zjawisk zachodzących w obszarze międzystopniowym. W kontekście tych uwag, Teza 1 pracy, gdzie mówi się o „rzeczywistych zjawiskach hydrodynamicznych występujących w maszynach przepływowych” wydaje się być sformułowana nieco na wyrost. Jeśli przywołujemy tu tezy pracy (str. 21/22), to Teza 2 i Teza 4 są w moim odczuciu tożsame. Podsumowując ten wątek: istotnie, Tezę 3 o dokładnej i efektywnej metodzie wirowej oraz Tezy 2/4 o skutecznym modelowaniu obecności ciał stałych w przepływie należy uznać za dowiedzione w pracy, Teza 5 o korzystnym wpływie wnęki wirowej pozostaje dyskusyjna i w mojej opinii nieudowodniona.

W świetle między innymi dyskusji na str. 19, pojawia się **pytanie 2** o „status” wnęki wirowej we współczesnej aerodynamice. Czy – pomijając nawet aspekty wytrzymałościowe (osłabienie konstrukcji łopaty/płata poprzez „wybranie” materiału) – jest to rozwiązanie perspektywiczne, czy raczej należy je traktować w kategoriach ciekawostki? Skądinąd jest to (zgodzam się z Autorem) wdzięczny obiekt do analiz z racji dynamiki wirowości. Natomiast od strony ilościowej uzyskano wzrost współczynnika doskonałości aerodynamicznej jedynie dla jednej z założonych wartości kąta natarcia, przy czym typowe warunki pracy turbiny wiatrowej to zmienna w czasie siła i kierunek wiatru.

Pytanie 3 dotyczy procedury wyznaczania odległości (ze znakiem) D od punktów siatki do brzegu ciała, opisanej na rys.4.8. O ile dobrze zrozumiałem opisany sposób postępowania, jego celem jest wyznaczenie wartości D dla *każdego* punktu siatki obliczeniowej. Czy rzeczywiście tak jest? Rys. 4.8 przewiduje sytuację „jeśli punkt nie jest w trójkącie”. Innymi słowy: czy (zwłaszcza w przypadku, gdy opływane ciało ma ostrza, np. opływ kwadratu ustawionego pod kątem 45 stopni do napływającego strumienia), procedura zawsze zwróci odległość D (np. dla punktów leżących w osi ostrza)?

Pytanie 4: na str. 24 mówi się o generowaniu cząstek w węzłach siatki: czy we wszystkich? Jedną z zalet bezpośrednich metod wirowych jest to, że jeśli niezerowa wirowość nie występuje w całym obszarze przepływu, np. w warunkach napływu strumienia potencjalnego na ciało, to cząstki wirowe występują tylko w WP i w dół przepływu (w obszarze śladu). Czy w metodach VIC jest inaczej?

Pytanie 5: rysunek 4.9e przywodzi na myśl metody rozmytego interfejsu (ang. *diffuse interface*) stosowane niekiedy w modelowaniu przepływów dwufazowych. Jakie są przesłanki przyjętego wyboru (str.52) grubości interfejsu jako $2\sqrt{2}h$? Ponadto, Autor wspomina o metodach zanurzonego brzegu (ang. IBM), cytując także pracę [45], gdzie połączono metodę wirową z IBM. Ciekawe byłoby porównanie mocnych i słabych stron metody funkcji kary w odniesieniu do IBM. I ogólniejsza jeszcze kwestia: jak sytuuje się metoda VIC w stosunku do metod siatkowych stosowanych powszechnie w „przemysłowej” CFD w zakresie kosztu obliczeniowego?

Pytanie 6: proszę o komentarz Autora do stwierdzenia na str. 5 „brak siatki jest zaletą”, jako, że w kolejnym zdaniu mówi się o niskiej efektywności obliczeniowej bezpośrednich metod wirowych. Pomijając aspekt efektywności: jak mogłyby uwidocznić się zalety metody bezpośredniej? Z drugiej strony, zastosowanie regularnej siatki jest nieefektywne w warunkach przepływów o dużej liczbie Reynoldsa (występujących w typowych maszynach wirnikowych). Czy możliwe byłoby adaptacyjne dostosowanie siatki i/lub liczby cząstek wirowych?

Pytanie 7: ważnym elementem metody VIC jest realizacja warunków brzegowych dla wirowości. Jeśli Doktorant uzna to za celowe, to może warto więcej o tym powiedzieć. W szczególności, nie zrozumiałem dobrze postępowania odnośnie w.b. na wlocie: czy rzeczywiście ten warunek uwzględnia obecność (wpływ) opływającego ciała, co sugerują stwierdzenia Autora w tekście: „naturalne dopasowanie profilu prędkości wlotowej” (str. 82), „obecność ciała stałego jest silnie uwzględniona na wlocie” (str. 93).

Uwagi rzeczowe

Rozprawa zawiera niestety pewne błędy rzeczowe oraz niejasności; proszę Doktoranta o odniesienie się do nich w formie pisemnej, podobnie jak do wyżej sformułowanych pytań.

- A. str.14: Autor pisze, że „energia potencjalna (...) ma znikomy wpływ na globalną energetykę”. Stwierdzenie to wymaga wyjaśnienia, także w kontekście faktu, że około 1/6 światowej produkcji energii elektrycznej generują elektrownie wodne – więcej niż inne źródła odnawialne i więcej niż energetyka jądrowa (dane za rok 2020; źródło: Wikipedia);
- B. wydaje się, że wektor prędkości unoszenia (kierunek ruchu wirnika) na rys. 1.8 ma niepoprawny zwrot, inaczej niż na rys. 7.7, gdzie $\mathbf{w}+\mathbf{u}=\mathbf{c}$;
- C. str.16 (środek) i str.17 (u dołu): Doktorant stwierdza, że wzrost liczby Reynoldsa i spadek grubości WP powoduje spadek oporu – proszę o uzasadnienie tego kontrowersyjnego stwierdzenia. Ponadto pisze Autor: „gdy $Re \rightarrow \infty$, mamy do czynienia z przepływem nielepkiem, bez strat tarcia”; czy rzeczywiście? NB: o granicy zerowej lepkości warto też poczytać w „Feynmana wykładach z fizyki”, Tom 2, rozdz. 41.5.
- D. równ. (3.6) odnosi się do wielkości unoszonej przez cząstki; wydaje się, że poprawny zapis to pochodna materialna (tu: zwyczajna) $d\omega/dt$;
- E. z kolei w równaniu (3.9) po lewej stronie występuje $d\omega/dt$; czy – zważywszy, że to równanie rozwiązywane jest na siatce i reprezentuje tylko krok cząstkowy metody VIC – nie powinna tu raczej wystąpić pochodna cząstkowa $\partial\omega/\partial t$? Podobnie w równ. (4.26).
- F. str.24, tekst poniżej (3.7): sformułowanie „cząstki przenoszone są z powrotem na węzły” jest nieprecyzyjne, a nawet niepoprawne jako, że „cząstkom” (w lagranżowskich metodach cząstek) przypisywane są pewne wielkości fizyczne, które w kroku „przenoszenia” (adwekcji) nie ulegają zmianie, lecz podlegają własnym równaniom ewolucji (np. pęd, wirowość, temperatura itd.). Rozumiem, że tu chodzi raczej o „*remeshing*” czyli generowanie nowego układu cząstek w węzłach siatki i przypisanie do nich wartości wirowości określonej w tychże węzłach (?);
- G. rozdz.3.3, pierwsza linia: wirowość nie jest „tendencją płynu do lokalnej zmiany kierunku przepływu”. Jest to dobrze określona wielkość fizyczna, która występuje także w przepływach o liniach prądu będących prostymi (np. przepływ Couette’a), a może być zerowa w przepływach, których linie prądu są okręgami (wir potencjalny, $u_\theta(r)=\Gamma/2\pi r$);
- H. w ogólności, wirowość ω jest wektorem – jest to wielkość skalarna ω w zagadnieniach 2D; w niektórych równaniach Doktorant poprawnie rozróżnia te warianty zapisu lecz, niestety, w wielu

wzorach zapis wirowości jako wielkości skalarnej jest błędny, np. (3.10)-(3.16), (3.20)-(3.21), Def. 3.1, Tw. 3.2, (3.30)-(3.35), (3.90), (4.45)-(4.46), (6.1);

- I. zapis równania (3.22) jest niepoprawny;
- J. operator konwekcji A w równ. (3.45) nie został zdefiniowany; wydaje się, że powinien on być określony jako $A = \mathbf{u} \cdot \nabla$ bez znaku minus (?);
- K. jak rozumieć stwierdzenie „wirowość ... transportowana jak ciało stałe zgodnie z (3.7)”?
- L. str.31: nie jest jasne, dlaczego metoda RK4 posiada „własności uśredniające pole prędkości”; o jakich własnościach tu mówimy i dlaczego są użyteczne w rozwijanej metodzie?
- M. str.33: niejasne są oznaczenia α_p i $\alpha_{p,i}$ (do czego służy $\alpha_{p,i}$ w równ.3.65?). Czym jest \tilde{x}_p ?
- N. str.38: ciekawe byłoby porównanie przyjętych warunków brzegowych na ścianie z wzorami przytoczonymi na str. 418 książki: W.J. Prosnak „Mechanika Płynów” Tom 1, PWN 1970;
- O. czy równ. (4.10) jest poprawne? Podobnie równ. (4.37);
- P. str.50: co z realizacją warunku nieprzenikalności na ścianie?
- Q. str.51 u dołu: czy zależności na parametr penalizacji różnią się w przypadkach 2D i 3D? (występuje tu wysokość ciała H); ponadto, jest to parametr bezwymiarowy – jak więc rozumieć wyznaczanie go w zależności od $(\Delta t)^{-1}$?
- R. zapis równania (4.47) opisującego siłę oddziaływania płynu na ciało stałe jest niepoprawny;
- S. str.58: jak rozumieć stwierdzenie, że „efekty niestacjonarne są poddane dyfuzji i rozmyciu”?
- T. równ. (5.1) w obecnej formie jest dyskusyjne; proponuję zapisać je w postaci bezwymiarowej;
- U. str.113: czy istotnie w części niskiego ciśnienia turbin liczby Re są niskie?

Uwagi redakcyjne

Od strony redakcyjnej, praca przygotowana jest poprawnie w zakresie struktury tekstu, składu formuł matematycznych, jak również starannie opracowanych a niekiedy nawet spektakularnych rysunków. Cennym uzupełnieniem rozprawy (niestety nie podano w niej odnośnika) są umieszczone w internecie (youtube.com, kanał: Dominik Błoński) animacje przepływów przygotowane w wysokiej rozdzielczości. Rozprawa jest obszerna, i choćby z tego względu Doktorant nie ustrzegł się niestety dość licznych potknięć językowych w tekście. Wynikają one częściowo z faktu, że literatura specjalistyczna w języku polskim jest uboga. Zatem już tylko z tego powodu warto wymienić niektóre z nich – wyrażam nadzieję, że może to pomóc w uzgodnieniu spolszczonych terminów. Ponadto, szereg uwag dotyczy używania określeń z języka potocznego, podczas gdy w literaturze naukowej, gdzie oczekuje się precyzji przekazu, znane i stosowane są poprawne (wydaje się) terminy. Inne jeszcze uwagi dotyczą użycia niektórych symboli matematycznych. Poniższa lista zawiera ważniejsze spostrzeżenia w tych kategoriach, w kolejności ich pojawiania się w tekście. Ponadto, skład tekstu jest niestety niestaranny: w pracy występują (zbyt) liczne błędy literowe oraz sporo drobnych niedoskonałości interpunkcyjnych, stylistycznych, a niekiedy i gramatycznych. Chociaż pojawiają one często (średnio zapewne 2-3 na stronę), to nie mają jednak wpływu na ogólną czytelność tekstu. Na życzenie mogę udostępnić Doktorantowi egzemplarz rozprawy z zaznaczeniami tychże.

- a) „złoże porowate” i „ośrodek porowaty” (ang. *porous bed/medium*, odpowiednio) nie są pojęciami tożsamymi – w kontekście pracy właściwszy jest ten drugi termin;
- b) streszczenie: „wspólnie oddziałują ze sobą” – pleonazm, zapewne niezamierzony;
- c) „domena obliczeniowa” – proponowałbym zamiast anglicyzmu (*domain*) pozostać przy terminie „obszar obliczeniowy”, ewentualnie obszar lub dziedzina rozwiązania;
- d) str. xi/xii: „moment” – co to?; dalej „współczynnik”;
- e) „ilość” – w przypadku rzeczowników policzalnych rekomendowana jest „liczba” (str.16ff);
- f) „punkt/obszar stagnacji” – lepiej „spiętrzenia”;
- g) str.7: „wirry współprądowe” (ang. *streamwise*) – raczej „wzdłużne”; dalej „przepływ denny” (hydraulika/hydrologia?) – poprawniejsze „przepływ przy zewnętrznym ograniczeniu kanału”;
- h) „rozwinienia wielobiegunowe” – proponowałbym pozostać przy „multipolowe”, spotykane w języku polskim, a dodatkowo wsparte przez słowa „monopol”, „dipol”, „kwadrupol” itd.;

- i) str.12: „wstrzykiwana wirowość”;
- j) str.14: „energia termalna” – nie znam takiego pojęcia w języku polskim (występuje „energia termiczna”, ale jest to termin mało precyzyjny), więc zdecydowanie „energia wewnętrzna”;
- k) str.16: „separacja” (przepływu, WP) – raczej: „oderwanie”; dalej „omywany” → „opływany”;
- l) str.19: anenometria;
- m) „warstwa graniczna” – w języku polskim jest to termin przyjęty głównie w fizyce atmosfery; w mechanice płynów mówi się raczej o „warstwie przyściennej”;
- n) str.22: „badanie osiągnięć kodu” – niefortunne;
- o) w równ. (3.7): \mathbf{x} , \mathbf{x}_p oraz α są wielkościami wektorowymi (brak pogrubienia);
- p) str.24: „spowrotem”;
- q) w równaniach (3.23), (3.29), (3.54), (3.61), (3.64)-(3.81) występują pogrubione indeksy dolne;
- r) „Helmholza” (str.27) oraz „Helmoltza” (str.33);
- s) str.32: czy równanie (3.63)a jest poprawne?
- t) „krok cząstowy” zamiast „cząstkowy” – występuje kilkakrotnie;
- u) str.61: „linie opływowe” – co to? „prekondycjonowanie” – lepiej „uwarunkowanie wstępne”;
- v) gdy cytowane są w tekście prace dwu- lub wieloautorskie, nie należy wymieniać tylko nazwiska pierwszego Autora (np. na str. 4 przy odwołaniu do pozycji [27] i [99]) ani – tym bardziej – tylko drugiego, zwłaszcza gdy pierwszym jest Promotor (str.118, [67] i [68]);
- w) w pozycji [32] występuje tajemniczy autor B. Dominik;
- x) w bibliografii w tytułach artykułów, książek często brak dużych liter w nazwach własnych lub akronimach – w składzie tekstu LaTeX pomocne będzie użycie nawiasów: {R}e, {CFD} itd.;
- y) str.47: do dyskretyzacji równań parabolicznych stosuje się schemat Cranka-Nicolson – nie „Nicholsona”, gdyż Phyllis Nicolson była doktorantką prof. Johna Cranka;
- z) w równ. (4.42) są błędy;
- aa) str. 77: „rozwiązanie ma skłonność do zbieżności”;
- bb) str.110: „filtr „ekspotencjalny”;
- cc) str.113: „nadpływający”;
- dd) str.115: „równanie zwane super-Gaussian”;
- ee) str.118: „dochodzi do utraty przylegania płynu do ściany” – jest to mylące, a nawet niepoprawne

3. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa dokumentuje wiedzę Doktoranta o konwersji energii w maszynach przepływowych i o fizyce przepływów w ogólności oraz jego wysokie kompetencje w zakresie metod obliczeniowej mechaniki płynów, a w szczególności: samodzielnego opracowania złożonego algorytmu symulacji przepływu z zastosowaniem metody „wir w komórce”, przygotowania, uruchomienia i walidacji równoległego kodu komputerowego. W pracy rzetelnie opisano przeprowadzone przez niego badania wraz z pogłębioną analizą uzyskanych wyników. W tym sensie **rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**. Obliczenia dotyczyły pewnego modelu matematycznego zagadnień występujących w energetyce, takich jak: (i) analiza obliczeniowa oraz wizualizacja opływu profilu łopatki turbiny wiatrowej, (ii) badania przepływu przez stopień turbiny wodnej oraz (iii) obliczenia przepływu przez palisadę profilów w geometrii stopnia turbiny parowej. **Rozprawa świadczy dostatecznie o ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydata, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.**

Uważam, że opiniowana praca spełnia wymagania stawiane zwyczajowo rozprawom doktorskim oraz odpowiada warunkom określonym w przepisach obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym. Tym samym **wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Dominika Błońskiego do jej publicznej obrony.**

