

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

Gdańsk, 10 października 2025

Recenzja rozprawy doktorskiej

Efektywność wodnych pędników odrzutowych w napędach pojazdów głębinowych
*w języku oryginalu **Effectiveness of waterjet propulsors in underwater vehicle propulsion***

mgr. inż. Maciej Kaczmarczyka

Promotor: dr hab. Lech Rowiński, prof. PG
(Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska)

Ogólne informacje o rozprawie

Praca dotyczy badań autonomicznych pojazdów podwodnych, użytecznych w zastosowaniach cywilnych oraz wojskowych. Ich konstrukcje są rozwijane w zespole Promotora rozprawy, prof. Lecha Rowińskiego. W niniejszej rozprawie przedmiotem zainteresowania jest możliwość napędu takich pojazdów z użyciem pędników strumieniowych, nazywanych też strugowodnymi lub odrzutowymi, zamiast klasycznych pędników śrubowych, bardziej podatnych na uszkodzenia. Istotnym kryterium wyboru jest efektywność (sprawność) napędu. Pędnik strugowodny (ang. *waterjet propulsor*) stanowi rozwinięcie koncepcji śruby w obudowie czy też zespołu śruba-dysza. Jak podaje Doktorant, w pracy analizowane są niestandardowe pędniki do nietypowych zastosowań, w domyśle: stanowi to przykład tak zwanej technologii podwójnego przeznaczenia.

Zagadnienia podejmowane w pracy doktorskiej cechuje aktualność, także w obliczu obecnych zagrożeń bezpieczeństwa oraz intensywnego rozwoju technologii dronowych zarówno obiektów powietrznych jak i operujących w środowisku wodnym. Jednym z narzędzi badawczych stosowanych w pracy doktorskiej są metody obliczeniowej mechaniki płynów (ang. *computational fluid dynamics*, CFD), coraz powszechniej i z sukcesem wykorzystywane do analiz złożonych zagadnień przepływowych. Z obu tych powodów podjęcie badań w tak określonej tematyce uważam za bardzo zasadne. Obszerne analizy CFD poprzedzone są oszacowaniami sprawności napędu z wykorzystaniem tradycyjnych metod opartych na korelacjach półempirycznych, a uzyskane wyniki zostały zweryfikowane na drodze badań eksperymentalnych.

Uważam, że szeroko zakrojony zakres badań oraz stopień trudności przynajmniej niektórych analiz podjętych w rozprawie spełniają zwyczajowe oczekiwania wobec prac doktorskich. Z punktu widzenia klasyfikacji formalnej rozprawa doktorska należy do dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, zasadniczo w zakresie budowy i eksploatacji maszyn.

Przedstawienie i ocena treści rozprawy oraz uwagi szczegółowe

Rozprawa została napisana w języku angielskim, liczy 150 stron, zawiera streszczenia w języku angielskim i polskim. Streszczenia są bardzo krótkie, przedstawiają motywację do

podjęcia badań pędników, a na dużym poziomie ogólności informują o zakresie pracy oraz uzyskanych wynikach. Uważam, że zarówno zastosowane metody badawcze, jak też wyniki powinny zostać opisane znacznie obszerniej, by oddać zawartość pracy i osiągnięcia Doktoranta. Ponadto deklarowany w streszczeniu cel pracy to określenie przydatności i efektywności stosowanych metod („półempirycznych oraz numerycznych”); nie jest on całkiem spójny z tytułem rozprawy, który akcentuje „efektywność pędników”. Z kolei w rozdziale 1 (Cel rozprawy) oraz w rozdziale 2 (Teza pracy), występują oba te aspekty: zarówno efektywność (skuteczność) stosowanych metod jak i efektywność (sprawność) napędu.

Na zasadniczą treść rozprawy składają się dalsze rozdziały 3-11 (różnej długości) oraz 5 dodatków (w rozdziale 12). Praca zawiera także (niezbędny przy dalszej lekturze, chociaż niezupełnie kompletny) spis oznaczeń i zestawienie cytowanej literatury: 150 pozycji, w tym wiele odniesień do stron internetowych. We wprowadzeniu do tematyki pracy (**rozdział 3**) podano informacje o autonomicznych pojazdach podwodnych i rodzajach ich napędu (ang. *propellers, propulsors*), w tym szereg użytecznych informacji o pędnikach strugowodnych oraz ich elementach składowych. Niestety, wobec umieszczonych tam rysunków 3.12-3.14 wyraźnie zauważalny jest brak choćby krótkiego wprowadzenia do metod CFD w zastosowaniu do zagadnienia obliczeń przepływowych pędnika, tak w zakresie doboru i dyskretyzacji obszaru rozwiązania, przedstawienia równań ruchu płynu, jak też sposobu rozwiązania przepływu w obszarze wirnika; podano tylko ultrakrótką zmianę na temat używanych w tym celu technik MRF, *sliding mesh* oraz modelu *body force*, ilustrowaną nieobjaśnioną tabelą 3.13 – jakie wnioski powinien stąd wyciągnąć czytelnik? Którą z technik dalej zastosuje Doktorant? Skądinąd warto zauważyć, że stosowanie siatek ruchomych jest znacznie bardziej kosztowne obliczeniowo niż siatek nieruchomych z dodaniem prędkości unoszenia w obszarze wirnika (technika MRF). Podane wstępne wiadomości ze stron 20-21 wraz z wyczerpującym opisem rysunków 3.12-3.14 i 8.1 (lub też odpowiednich ilustracji z własnych obliczeń CFD) dobrze byłoby rozwinąć/przenieść do odrębnego podrozdziału w rozdziale 3 albo na początek rozdziału 8.

W krótkim **rozdziale 4** zaprezentowano obiekt analizy: zdalnie sterowany pojazd podwodny (ang. *ROV*) o nazwie Głuptak, który w swej oryginalnej wersji wyposażony jest w układ 4 śrub napędowych (SP); rozważany jest także wariant (nazwany SP+G) z ażurową osłoną śrub napędowych, w formie kratki. W rozprawie analizowane jest rozwiązanie alternatywne, z użyciem układu czterech dostępnych na rynku pędników strugowodnych (*waterjet drive* WJ39 i podobnych) bądź też pędników własnego projektu (WJ50). Pytanie: w tabeli 4.2 podano zestawienie siły oporu, naporu i sprawności poszczególnych rodzajów napędu – czy to zestawienie antycypuje wyniki uzyskane przez Doktoranta i przedstawione w dalszej części pracy, czy też zostały one pozyskane uprzednio? W tekście brak odniesienia do Tab. 4.2 oraz objaśnień. Istotnie, raportowana w tabeli sprawność napędów WJ jest znacząco (2-3 krotnie) niższa, natomiast zastosowanie osłony (wariant SP+G) powoduje nadspodziewanie duży wzrost oporu (40% - czy jest tu pole do optymalizacji?).

Równie krótki **rozdział 5** zawiera informacje literaturowe na temat wyznaczania sprawności pędnika typu WJ i podstawową formułę określania siły naporu w pędnikach odrzutowych (równanie 5.4), co pozwala jak rozumiem uniknąć w obliczeniach CFD całkowania tensora naprężenia (w płynie) po powierzchni opływanych ciał. Oto kilka uwag rzeczowych do treści tego rozdziału: prędkość cieczy przed pędnikiem c_1 jest wielkością znaną (zadaną), więc sposób przedstawienia równania 5.2 wymaga chwili zastanowienia (jest to raczej definicja prędkości w_1); przyjęcie założenia upraszczającego $c_1=0$ wymagałoby uzasadnienia (czy formuły przytoczone poniżej nie tracą na ogólności?). W tym miejscu występuje prędkość u

pojazdu głębinowego ROV, a w dalszej części pracy pojawi się prędkość wody v (warta wzmianki byłaby jej relacja do u).

Rozdział 6 jest istotny dla rozprawy. Przytoczone tu zostały informacje literaturowe o współczynnikach strat liniowych i lokalnych dla przepływów w przewodach (ang. *closed pipes*). Wyrażenia zawierające te współczynniki są wykorzystywane do oszacowania strat ciśnienia w układzie przepływowym pędnika strugowodnego, umownie podzielonego na szereg obszarów (strefę wlotową, kanał dolotowy o stałym przekroju, a także dyfuzor, wirnik i wreszcie dysza wylotowa). Straty liniowe są wyrażone poprzez znane formuły empiryczne w funkcji liczby Reynoldsa (nietypowo oznaczanej w rozprawie jako Re) oraz chropowatości względnej ścian, a straty lokalne (spowodowane zakrzywieniem przewodu, ciągłą lub skokową zmianą przekroju) opisywane są poprzez empiryczne współczynniki. Istotny jest także podrozdział 6.6 dotyczący samej pompy, która w wariantach WJ zastępuje pędniki śrubowe występujące w konfiguracji SP. Sam pomysł podziału kanału przepływowego, przedstawiony na rys. 6.1, pozwoli na szybkie przybliżone oszacowanie strat ciśnienia i mocy, przy czym doktorant zdaje sobie sprawę ze znaczących założeń upraszczających: formuły półempiryczne dla strat liniowych zostały opracowane dla przepływów w pełni rozwiniętych, co w rozważanym przypadku nie ma miejsca; przybliżony charakter mają także oszacowania strat lokalnych. Niejasne jest natomiast, wobec różnorodności przytoczonych formuł na liniowe straty ciśnienia, na ile są one sobie bliskie. Użyteczny byłby tu rysunek dla zadanej wartości Re , typowej dla rozważanego układu WJ i np. dwóch wartości chropowatości względnej (w tym zerowej). Ponadto, czy obie formuły 6.16 i 6.17 są przytoczone poprawnie? (ich prawe strony powinny być jednakowe). Podobna uwaga odnosi się do lokalnej straty ciśnienia w dyfuzorze i konfuzorze. Podane zależności 6.27 i 6.29 są jednakowe, chociaż wydaje się, że straty w układzie dyfuzorowym powinny być większe niż w dyszy zbieżnej – proszę o komentarz. Co definiuje rys. 6.6? – czy rzeczywiście prędkość? (ponadto, jeśli nie ma tarcia, to nie będzie też strat). Uwaga do podziału kanału na strefy: oznaczenia podane w tabelach 6.1 i 6.2 oraz na rys. 6.1 nie są całkiem spójne: na rysunku występuje przekrój „2.5” (początek dyfuzora), zatem elementy 6 i 7 (zakrzywienie kanału oraz dyfuzor) powinny raczej zostać zidentyfikowane jako 2-2.5 oraz 2.5-3 w Tab. 6.2 (?). Uwaga redakcyjna: definicja 6.23 liczby Reynoldsa powinna pojawić się wcześniej. Czym jest *contact-broaden phenomenon* (str. 49)? I dalej: nie rozumiem, dlaczego w obszarze wlotowym miałyby występować efekt Coandy (*stream redirected to the duct*, rozdz. 6.4.4)? – przecież pracująca pompa wytwarza podciśnienie w kanale dolotowym; proszę o wyjaśnienie. Podobnie, co oznacza termin *choking phenomenon* (nie: *chocking*, rozdz. 6.5) w kontekście przepływu cieczy? Czy występuje tu przepływ krytyczny? Wzór na profil prędkości w obszarze warstwy przyściennej, równanie 6.50, jest niepoprawny. Rysunki 6.18 i 6.19 mają, jak rozumiem, pełnić funkcję ilustracyjną w kontekście roli warstwy przyściennej w opływie pojazdu podwodnego i kształtowania się przepływu w strefie wlotowej do kanału, w którym pracuje pompa. Są one zapewne autorstwa Doktoranta – nie podano jednak żadnych informacji o rozwiązaniu tu zagadnienia CFD; co te rysunki mają ilustrować? Ponadto, oba są mało czytelne. Uwag krytycznych do rozdziału 6 jest niestety sporo. Na pewno zyskałby on na ponownym przemyśleniu i przeredagowaniu, także wobec jego roli w uzyskaniu wyników raportowanych w rozdziale następnym.

Zanim przejdę do opisu dalszej części pracy doktorskiej, zawierającej oryginalne osiągnięcia Doktoranta i ich dyskusję (rozdziały 7-11), podam kilka ogólnych uwag dotyczących strony redakcyjnej rozprawy. Niestety jest ona niedopracowana, co przekłada się kłopot z przekazem treści.

- 1) Język angielski rozprawy jest zasadniczo zrozumiały (choć niepozbawiony potknięć) i zapewne były powody wyboru tego języka; uważam jednak, że praca napisana po polsku mogłaby bardziej precyzyjnie oddać istotę i szczegóły prowadzonych badań oraz opisy wyników;
- 2) Co ważniejsze, sprawną lekturę utrudnia brak wprowadzenia/opisu występujących w niej oznaczeń i symboli przy pierwszym pojawieniu się w tekście lub w formułach matematycznych – tym bardziej, że nie wszystkie z nich występują w podanym na początku pracy spisie oznaczeń i skrótów, niektóre symbole mają podwójne znaczenie, a niektóre wielkości wydają się mieć podwójne oznaczenia (s , S , k – wysokość chropowatości itd.). Ponadto w rozprawie występuje szereg nieścisłości co do używanych terminów i pojęć – niektóre z nich zostały wyszczególnione w recenzji;
- 3) Wszystkie rysunki i tabele powinny być przywołane i omówione w tekście rozprawy, z właściwym odwołaniem do nich. Takich przykładów jest bardzo wiele, począwszy od Wprowadzenia (str. 15-16; dalej Figs. 3.9-11 itd.). Zamiast „*picture below*” napiszmy „*Fig. X*”; zamiast „*table in the next page*”, niech to będzie jednoznacznie „*Tab. Y*”. Nieprzestrzeganie tej reguły może powodować nieoczekiwane skutki, np. tekst „*presented in figure on the next page*” (str. 97) odsyła do strony bez rysunku. Co gorsza, w pracy przedstawiane są liczne rysunki zawierające wyniki innych autorów (np. Fig. 3.12, 3.14, Fig. 8.1 i inne) zawierające dość istotne informacje, a zupełnie nie omówione w tekście. Podobna uwaga dotyczy niektórych tabel (Fig. 3.13), w których występują nieopisane symbole (Fr – liczba Froude’a?, w_M ?, c_{mM} ?). I co jeszcze mniej zrozumiałe, niektóre rysunki z własnymi wynikami Doktoranta (np. Figs. 6.18-19, 9.9-9.11), także wydają się pozostawać bez omówienia;
- 4) Nie ułatwia sprawnej lektury zwyczaj rozpoczynania tekstu poniżej równań od nowego akapitu, zwłaszcza jeśli jest to dalszy ciąg zdania rozpoczętego powyżej (np. „*Whereas...*” poniżej równania 5.2, tekst poniżej równań 5.17, 5.18, 6.37, a także wiele innych miejsc).
- 5) Na wielu rysunkach przedstawiających wyniki analiz CFD (zwłaszcza w rozdziale 8) występują pola prędkości oraz ciśnienia. Zakładam, że „prędkość” to w istocie moduł prędkości, chociaż niekiedy (np. Fig. 8.7, 8.21) przydałby się obraz np. pola wektorowego albo linii prądu, lub też składowej normalnej (np. w płaszczyźnie wlotu/wylotu). Natomiast co do zasady wyniki w postaci kolorowych map mają bardziej charakter jakościowy i zdecydowanie dobrze mogłyby zostać uzupełnione przez profile składowych prędkości, np. w funkcji odległości od ściany, po kierunku promieniowym, obwodowym, niekiedy także profile uśrednione po kierunku obwodowym. Wiele wskazówek i inspiracji mogą dostarczyć publikacje naukowe z zakresu obliczeń CFD maszyn przepływowych oraz przepływów wewnętrznych (ang. *internal flows*).

Powtórzę: te i inne niedoskonałości redakcyjne znacząco utrudniają odbiór rozprawy.

Wracając do opisu i oceny poszczególnych rozdziałów pracy, w **rozdziale 7** przedstawiono oszacowanie wynikowego naporu, poziomu strat i innych wielkości dla kilku założonych wartości średnicy pompy. Obliczenia wykonano na podstawie korelacji półempirycznych dla strat liniowych i lokalnych w układzie pędnika strugowodnego, natomiast opis tych obliczeń (*calculation algorithm*, rozdz. 7.2) jest zaskakująco krótki; trudno zorientować się, które spośród wielu formuł przywołanych w rozdziale 6 zostały ostatecznie przyjęte do oszacowań

analitycznych, których założenia i rezultaty przedstawiono w tabelach 7.1-7.3. Jest to ważny rozdział pracy i należało poświęcić mu więcej uwagi. Niemniej jednak uważam, że są to wartościowe wyniki, uzyskane z użyciem stosunkowo prostego podejścia analitycznego przy założeniu znacznych uproszczeń, a jednak pozwalające na pewien wgląd w obraz przepływu przez układ pędnika i dające niezłą zgodność z referencyjnymi wynikami badań eksperymentalnych.

W bardzo obszernym **rozdziale 8** Doktorant opisał wyniki czasochłonnej analizy pędników strugowodnych z użyciem narzędzi obliczeniowej mechaniki płynów i co więcej, podjął się także ambitnego zadania wypracowania/zaprojektowania nowego wariantu takiego pędnika. W pierwszej kolejności wyznaczono siłę oporu w opływie ciała o kształcie pojazdu głębinowego ROV (bez napędu). Rozważano następnie obszar wlotu do kanału dolotowego: wpływ kształtu samego wlotu oraz jego umiejscowienia względem pojazdu (otwór w pobocznicy lub osobny wlot/chwyt naporowy „typu F16”, ang. *ram intake*). Przedstawiono dalej obliczenia CFD dla wielu wariantów doboru kształtu kanału dolotowego do pompy oraz średnicy i kształtu dyszy wylotowej. Wykonano także obliczenia CFD samej, nowo zaprojektowanej pompy; szkoda tylko, że nie podano w tym miejscu więcej szczegółów o procesie projektowym i udziale Doktoranta – rozumiem, że w tym fragmencie pracy istotna była rola eksperta (nazwanego w rozprawie *pump pundit*). Wreszcie, w rozdziałach 8.3-8.5 przedstawiono wielowariantowe obliczenia całości: układu pędnika (kanał, pompa, dysza wylotowa) oraz opływu pojazdu. Pozwoliło to na wyznaczenie siły naporu, składowych występujących sił oraz sprawności. Mimo występujących różnic w stosunku do eksperymentalnych pomiarów naporu, rozdział ten dostarcza wiele interesującego materiału. Pewien niedosyt pozostawia jednak skrótowe przedstawienie metodyki obliczeń i oszacowania ich wiarygodności (por. punkt C poniżej). Oto uwagi i pytania dotyczące tego rozdziału (proszę o odpowiedź pisemną i wyjaśnienie podczas obrony rozprawy).

A) prezentacja użytego do obliczeń modelu matematycznego przepływu turbulentnego wymaga uzupełnień. Przytoczono dwa warianty warunku brzegowego (*scaled* oraz *automatic*) do obliczeń z użyciem funkcji ściany (str. 71) – proszę o ich lepsze wyjaśnienie, także o dyskusję stosowalności do przepływów z oderwaniem. Ponadto, jak rozumieć określenia *flow damping* oraz *flow breakdown*?

B) proszę o dokładniejsze wyjaśnienie związku modelu SST z modelem $k-\omega$. I dalej: tensor naprężenia występujący w równaniach $k-\omega$ błędnie przypisano efektom molekularnym – czym jest ten tensor? Ponadto, do czego służą oba te równania?

C) wskazane jest, aby prezentacja obliczeń CFD zawierała informacje o typie zastosowanej siatki obliczeniowej do dyskretyzacji obszaru rozwiązania oraz jej rozdzielczości, a przede wszystkim (jeśli to wykonalne) informację/analizę zbieżności rozwiązania przy zagęszczaniu siatki. Jako minimum, potrzebne byłoby odwołanie do literatury, gdzie badano zbliżone układy przepływowe.

D) w zadaniu wyznaczenia siły oporu, czy i jak można wyjaśnić znaczący poziom błędu względnego wykazanego w tabeli 8.1? I jak obliczano wartość tej siły? Celowe byłoby także pokazanie oszacowania błędu (zarówno CFD, jak i eksperymentu), np. na rys. 8.5. Podobna

uwaga odnosi się do analiz obliczeniowych całego układu pędnika i porównania wyników z pomiarami – tym bardziej, że na str. 115 pojawia się zagadkowy komentarz Doktoranta co do źródeł rozbieżności: *propulsion's poor workmanship not modelling errors*.

E) na ile miarodajna jest analiza wpływu kształtu otworu wlotowego przy zastosowaniu opisanego stacjonarnego warunku wylotowego (str. 74) zamiast kompletnego układu z pompą? I skąd wiemy, czy na wlocie (rys. 8.7) występuje oderwanie przepływu (*inlet separation edge*, str. 77). Ponadto, czy rys. 8.12 jest poprawny? (lewy i prawy panel są identyczne – gdzie tu wariant „F16”?).

F) Co dokładnie oznacza warunek wylotowy typu *bidirectional unrestricted flow* (str. 87)?

G) Dość nietypowa jest ilustracja map prędkości poza przekrojem osiowym, jak na rysunku 8.40 (panele 2 i 3). Jaki był tego cel?

W **rozdziałach 9 i 10** przedstawiono uzyskane wyniki eksperymentalne oraz ich dyskusję. Wartościowym uzupełnieniem są podane w załączniku II informacje o warunkach pomiaru i użytym sprzęcie, a także dalsze wyniki z badań w tunelu hydrodynamicznym i w warunkach otwartego akwenu (załączniki III-V). Nie wiem natomiast, czy załącznik I (informacje literaturowe na temat zjawiska kawitacji) jest potrzebny.

Uzyskane wyniki budzą zaufanie i pozwalają na ocenę oraz porównanie poszczególnych rodzajów napędu w warunkach pracy zbliżonych do rzeczywistych, dostarczają jednocześnie danych referencyjnych dla oszacowania jakości obliczeń przepływowych z rozdziału 8. Uwaga szczegółowa: czy rysunki 9.9 i 9.10 przedstawiają wyniki z tej samej serii pomiarów?

Z dyskusji przedstawionej w rozdziale 10 można wnosić, że początkowe oczekiwania co do napędu strugowodnego były większe; natomiast należy pamiętać, że konkurencją dla opracowanego układu WJ50 stanowiły rozwiązania komercyjne pędników serii WJxxG zapewne dopracowane przy użyciu standardów R & D. Zaprojektowanie odpowiedniej pompy o wyższej sprawności i optymalizacja kanału przepływowego, częściowo podane jako kierunki dalszej pracy przedstawione w rozdziale 11, mogą rzeczywiście doprowadzić do ulepszeń, przy czym rozwiązanie pełnego problemu optymalizacyjnego stanowiłoby odrębne i ambitne zadanie badawcze. Inną kwestią jest osiągnięcie wspomnianego celu uzyskania pożądanych właściwości manewrowych pojazdu podwodnego.

Przedstawione powyżej uwagi przy ocenie poszczególnych rozdziałów pracy nie obniżają zasadniczo wartości merytorycznej całej rozprawy, ale przynajmniej niektóre z nich wymagają odpowiedzi pisemnej i dyskusji podczas publicznej obrony.

Oryginalne wyniki rozprawy doktorskiej

Oceniając rozprawę, mimo pewnych usterek natury rzeczowej i licznych niedoskonałości redakcyjnych, należy docenić duży wkład pracy Doktoranta oraz uzyskane przez niego oryginalne wyniki.

Zasadnicze osiągnięcia przedstawione z rozprawie to:

- (i) zastosowanie szybkiego obliczeniowo podejścia analitycznego z użyciem formuł półempirycznych na straty liniowe i lokalne. Mimo znaczących uproszczeń, takie podejście pozwoliło pozyskać informacje o wpływie poszczególnych elementów pędnika

strugowodnego na efektywność tego napędu. Uzyskane wielkości dość dobrze odpowiadają wynikom badań eksperymentalnych;

(ii) przeprowadzenie obszernych wielowariantowych analiz z użyciem metod obliczeniowej mechaniki płynów zarówno kanału przepływowego, pompy, jak i całego pędnika oraz układu pędnik-pojazd podwodny. Pozwoliło to na wybór najlepszych rozwiązań spośród badanych konfiguracji geometrycznych i w rezultacie opracowanie nowego pędnika strugowodnego. Należy podkreślić, że rozwiązanie zadania CFD dla całego układu przepływowego z oddziaływaniem pojazdu podwodnego i pędnika jest złożone, wymaga znaczącego nakładu pracy oraz niezbędnego doświadczenia. Mimo pewnych niedostatków, uzyskane wyniki należy ocenić jako wartościowe, co po części potwierdza niezła zgodność z referencyjnymi wynikami pomiarów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych;

W konsekwencji, należy uznać, że cel rozprawy został osiągnięty: wykazano, że zestawienie obu powyższych metod jest przydatnym i skutecznym narzędziem wspierającym proces projektowania i oceny efektywności pędników strumieniowych.

Uwagi redakcyjne

Część usterek typu redakcyjnego i językowego przedstawiłem łącznie z omawianiem uwag rzeczowych podczas oceny poszczególnych rozdziałów pracy; szereg dalszych przykładów:

- a) w streszczeniu rozprawy pojawia się bardzo ogólne pojęcie „algorytmy numeryczne” - lepiej mówić tu o metodach albo narzędziach obliczeniowej mechaniki płynów;
- b) spis oznaczeń (str. 10): lepiej „*Roman symbols*” albo „... *letters*” niż „*Latin ...*” (nie „*Latina*”);
- c) str. 21: „*to be bared in mind*” → „*to bear in mind*”;
- d) str. 23 (i wiele innych wystąpień): „*see the Figure X*” → „*see Fig. X*”;
- e) po poprawnym wprowadzeniu η_{wj}^0 w równaniach 5.11-5.12, niefortunne jest określenie tej wielkości występujące w linii tekstu między nimi;
- f) w legendzie rys. 5.1 brak oznaczenia *explicite* parametryzacji rodziny krzywych (sumaryczny współczynnik strat energii); ponadto: czy $\Sigma \zeta$ w tekście oraz ζ na rys. 5.2 to ta sama wielkość?
- g) zapis generycznego wyrażenia na poszczególne składowe strat, równanie 6.2 z użyciem „(.)”, jest mało jasny; por. poprawne równanie 13 w pracy Rowiński & Kaczmarczyk [PMR 2021];
- h) str. 40: co znaczy uwaga „*turbulent (flow) is the dominant force*”?
- i) niefortunne jest przytaczanie *in extenso* wniosków z innej, jedynie wzmiankowanej publikacji ([82], na stronie 54);
- j) czy podpisy pod rysunkami 9.8 i 9.9 nie są błędne (*CFD prediction*)?
- k) w wierszu 5 tabeli 8.4 powinno być: *mass flow rate* oraz [kg/s];
- l) rysunki 8.35 i 8.36 są za małe (mało czytelne);
- m) Niewłaściwa (a przynajmniej niestandardowa) jest praktyka cytowania literatury na samym początku zdania (początek rozdziałów 5.2, 6.4.2, 6.5 i liczne inne miejsca).
- n) str.115: wykonane analizy zakwalifikowano do kategorii *Fluid Structure Interaction method*. Termin FSI stosuje się raczej, gdy występują drgania lub deformacje ścianek ciał stałych ograniczających przepływ, a nie sam ruch ścianek (np. wirnika pompy);
- o) spis literatury został bardzo źle przygotowany: zamiast nazwisk autorów w wielu miejscach występują jedynie inicjały, niekiedy brak informacji, czy dany tytuł odnosi się do publikacji w czasopiśmie, książce lub w innym opracowaniu (jakim?), niekiedy niekompletne są także inne dane bibliograficzne: rok, wolumin, zakres stron, wydawnictwo (dla książek), uczelnia i miejsce (dla rozpraw doktorskich, opracowań), dane konferencji itd.

Podsumowanie recenzji

Przedstawiona do oceny rozprawa dokumentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy badawczej i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W pracy przedstawiono obszerne własne badania Doktoranta przeprowadzone z użyciem metod modelowania matematycznego przepływów, a także badania eksperymentalne. Opisano i zinterpretowano uzyskane nowe wyniki, a założony cel rozprawy został osiągnięty.

Pomimo pewnych uwag natury rzeczowej i znaczących niedostatków redakcyjnych utrudniających przekaz rozprawy stwierdzam, że opiniowana praca spełnia w stopniu zadowalającym wymagania stawiane zwyczajowo rozprawom doktorskim co do treści, natomiast w stopniu minimalnym co do formy (w zasadzie należałoby ją istotnie poprawić od strony redakcyjnej).

W podsumowaniu niniejszej recenzji uważam, że opiniowana praca doktorska odpowiada warunkom określonym w odpowiednich przepisach obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym – **wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Macieja Kaczmarczyka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

