

Gliwice, 15.09.2022

Dr hab. inż. Włodzimierz Wróblewski, Prof. PŚ
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska, Gliwice

OCENA

pracy doktorskiej mgr. inż. Judyty Felicjancik pod tytułem:
„Eksperymentalno-numeryczna metoda modelowania zjawisk hydroakustycznych w przepływach z kawitacją wokół śruby okrętowej”

Opinia została przygotowana na zlecenie Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku (pismo RN-421-20/21 z dnia.13.07.2022).

1. Charakterystyka pracy

Recenzowana praca zawiera 136 stron tekstu podzielonego na 9 rozdziałów, wyodrębniony Wstęp i cel pracy oraz Podsumowanie, bibliografię oraz spis tabel i rysunków. Bibliografia obejmuje 70 pozycji, a w pracy zamieszczono 67 rysunków i 18 tabel.

Praca doktorska mgr inż. Judyty Felicjancik "Eksperymentalno-numeryczna metoda modelowania zjawisk hydroakustycznych w przepływach z kawitacją wokół śruby okrętowej" prezentuje wyniki badań zjawisk akustycznych generowanych w przepływie wokół pędnika z uwzględnieniem zjawiska kawitacji. Badania prowadzone są metodami numerycznymi rozwiązującymi przestrzenny przepływ dwufazowy przy wykorzystaniu wyników badań eksperymentalnych w skali rzeczywistej oraz modelowej.

Wstęp i cel pracy stanowi wydzielony fragment, w którym Autorka przedstawiła motywację do podjęcia tematu. Wynika ona bezpośrednio z wprowadzonych zaleceń przez organy Unii Europejskiej dotyczących konieczności utrzymania dobrego stanu środowiska w wodach europejskich. Jednym z elementów tego dobrostanu jest poziom hałasu podwodnego. Cel pracy został sformułowany jako „ocena praktycznych możliwości prognozowania zjawisk hydroakustycznych w przepływie wokół śruby okrętowej z uwzględnieniem pracy w warunkach kawitacji”.

Rozdział pierwszy ma charakter podręcznikowy i poświęcony jest wyjaśnieniu pojęć i wielkości stosowanych w budowie i projektowaniu śrub okrętowych.

Rozdział drugi przedstawia opis zjawiska kawitacji z podaniem różnych jej typów i skutków jej działania. Podano i omówiono kryterium wystąpienia kawitacji, jakie stosuje się dla śruby okrętowej. W sposób szczegółowy scharakteryzowano wpływ kawitacji na pracę śruby okrętowej. Przedstawiono opis dynamiki pęcherza, przytaczając równanie Rayleigha-Plesseta.

Rozdział trzeci poświęcony jest omówieniu zagadnienia hałasu hydroakustycznego. Oprócz przedstawienia podstawowych pojęć, zaprezentowano sposoby badania hałasu śrub okrętowych na drodze eksperymentalnej i na drodze numerycznej. Opisano różne sposoby podejścia do analizy pola akustycznego oraz podano wielkości charakteryzujące to pole.

Wyodrębniono, jako osobny rozdział czwarty, który zawiera informacje o podstawach i celowości przeprowadzania badań i analiz hydroakustycznych pędników okrętowych. Rozdział ten opisuje inne źródła hałasu, które są uwzględniane w charakterystyce akustycznej statku, czy okrętu, istotne dla środowiska morskiego.

W rozdziale piątym opisano analizowany pędnik okrętowy. Podano zarówno dane geometryczne pędnika, jaki i dane kadłuba statku Navigator XXI.

Rozdział szósty zawiera opis stanowiska laboratoryjnego, które zlokalizowane jest w CTO S.A.. Przedstawiono konstrukcję komory badawczej oraz warunki przeprowadzania eksperymentu. Wskazano również na sposób określenia pola prędkości za kadłubem w oparciu o modelowanie CFD. Przedstawione zostały granice kawitacji pędnika na wykresie liczby kawitacji w funkcji współczynnika momentu.

Rozdział siódmy prezentuje wyniki analiz numerycznych. Przedstawiono w nim założenia, kształt domeny obliczeniowej oraz sposób dyskretyzacji. Opisano w nim model matematyczny zastosowany w prowadzonych symulacjach numerycznych przepływu dwufazowego z kawitacją. Przedstawiono sposób formułowania warunków brzegowych oraz dobór parametrów do symulacji. Rozdział kończy się prezentacją wyników.

W rozdziale ósmym opisane zostały wyniki uzyskane w czasie badania na obiekcie rzeczywistym. Podano dane przeprowadzonych badań oraz wyniki uzyskane z pomiarów ciśnienia oraz wyniki uzyskane z trzech hydrofonów.

Ostatni rozdział poświęcono na przedstawienie charakterystyk hydroakustycznych uzyskanych ze wszystkich badań. Ma on charakter podsumowania, w którym zestawiono wyniki w skali modelowej i rzeczywistej uzyskane w badaniach eksperymentalnych i w symulacjach numerycznych.

Część opisową pracy kończy podsumowanie.

2. Uwagi ogólne

Zagadnienia, które analizuje w swojej pracy Mgr inż. Judyta Felicjancik, są bardzo istotne dla współczesnego środowiska wodnego oraz dla rozwoju techniki okrętowej. Ocena ilościowa hałasu generowanego przez różne eksploatowane i projektowane obiekty ma coraz większe znaczenie ze względu na konieczność wypełnienia regulacji, przyjmowanych w celu ochrony środowiska. Ograniczenie hałasu jest zadaniem, które dla poruszających się obiektów różnego typu, traktowane jest na równi z innymi wymaganiami jak np. redukcja zużycia paliwa, czy ograniczenie emisji gazów. Bardzo rozwinięte analizy tego typu prowadzi się m.in. w przemyśle lotniczym.

Problem, który rozwiązywała Doktorantka jest z pewnością bardzo złożone. Wymaga zarówno wiedzy z zakresu metod modelowania jak i technik eksperymentalnych. Modelowane zjawiska występują w przepływie dwufazowym, w którym dochodzi do zmian fazowych. Dynamika tego procesu w znacznym stopniu utrudnia prowadzenie obliczeń i powoduje że symulacje są bardzo czasochłonne. Na podkreślenie zasługuje szeroki zakres wykorzystanych eksperymentów. Wyniki eksperymentów na stanowisku laboratoryjnym uzupełniane były wynikami eksperymentów w skali rzeczywistej na statku w warunkach morskich. Wykorzystanie kompleksowych danych stanowi dużą wartość merytoryczną i poznawczą pracy.

W części pierwszej „Wstęp i cel pracy” sformułowano bardzo ogólny cel, po którym pojawia się informacja, że ten cel został osiągnięty. Miejscem na ocenę przeprowadzonych badań jest podsumowanie. Wydaje się, że bardziej odpowiednim tytułem tej części byłby „Cel i zakres pracy”. W rozprawie należałoby oczekiwać, że na początku umieszczony będzie przegląd literatury tematu. Brakuje opisu aktualnego stanu wiedzy i odniesienia zakresu badań w pracy do badań prowadzonych w innych ośrodkach. Tym bardziej, że bez trudu można znaleźć w bazach czasopism naukowych wiele prac w tym temacie. Przytoczone w spisie literatury pozycje są najpóźniej z 2017 roku. Do pewnych pozycji literaturowych Doktorantka odnosi się dopiero przy omawianiu modelu numerycznego oraz przy prezentacji zakresu i sposobu przeprowadzania eksperymentu.

Rozdziały 1,2,3 zawierają odpowiednio opis charakterystyki pędników okrętowych, opis kawitacji w przepływie przez pędnik oraz opis zagadnienia hałasu aerodynamicznego.

Przedstawione informacje o podstawowych wielkościach do opisu konstrukcji i parametrów pracy śrub okrętowych oraz o parametrach zjawisk zachodzących w przepływie pozwalają na łatwiejsze śledzenie analiz omawianych w pracy. Pewne fragmenty opisów są jednak zbyt szczegółowe, bez związku z pracą. Mają charakter podręcznikowy. Nie wydaje się, aby w pracy doktorskiej należało umieszczać definicję gęstości płynu.

Generalnie układ pracy jest dość nietypowy i nie ułatwia analizy tekstu. Informacje ogólne, stanowiące podstawową wiedzę przenikają się z informacjami merytorycznymi pracy. Było to zapewne powodem pojawienia się powtórzeń opisów, definicji i wzorów.

Znacznym utrudnieniem w śledzeniu tekstu i w pisaniu recenzji było pominięcie numeracji wzorów. O tyle jest to zaskakujące, bo świadczy o tym, że Doktorantka w opisie nie musiała się na żaden wzór powoływać.

W opisie modelu Rayleigha-Plesseta podano, że w pracy stosuje się pełny model. Jakie jest uzasadnienie użycia pełnego modelu, skoro w większości modeli wystarczająca jest jego uproszczona wersja?

W ogólnym opisie w p.3.4 wspomina się o różnych metodach analizy zjawisk akustycznych, jednak bez wskazanie jaka metoda jest preferowana. Mimo, że Autorka o metodach modelowania hałasu wspomina w p.3.4, to już wcześniej, w punkcie 3.2, opisuje podejście numeryczne w badaniu hałasu śrub wspominając o postprocesorze stosującym analogię akustyczną Ffowcs-Williams and Hawkings oraz wspomina jednym zdaniem o możliwości stosowania transformacji Fouriera. Jest to trochę chaotyczne i utrudnia śledzenie tekstu pracy. Czytelnik nie ma pewności, jakie metody w dalszej części będą wykorzystywane. Należałoby się spodziewać, że metodom wykorzystanym przez Autorkę w analizie poświęcona będzie większa uwaga i podane uzasadnienie dlaczego stosujemy dwie metody lub wybieramy jedną z nich. Na str.81 wspomniano o zastosowaniu transformacji Fouriera do oscylacji ciśnień. Czy analizowano zmianę wartości ciśnień bezwzględnych, czy wyznaczano fluktuacje? Z opisu na str.115 wynika, że do analizy pola akustycznego zastosowano model Ffowcs-Williams and Hawkings oraz model standardowy. Można się domyślać, że standardowy oznacza wykorzystanie transformacji Fouriera.

W dwóch miejscach w pracy (str.83 i Podsumowanie) pojawia się informacja o wykonaniu badania niezależności rozwiązania od siatki. W pracy nie ma jednak z tych badań żadnego śladu. Jest to spory mankament, bo takie badanie jest standardowym elementem mającym na celu uwiarygodnienie uzyskiwanych wyników.

Wyjaśnienia wymagałoby dlaczego w symulacjach numerycznych zastosowano dwa różne sposoby dyskretyzacji dla skali rzeczywistej i modelowej. Ta uwaga wynika m.in. z faktu, że czytelnik nie ma pewności, jak wygląda obszar obliczeniowy w skali rzeczywistej. Wydaje się jednak, że sama domena śruby mogłaby mieć taką samą siatkę. Czy różne siatki wynikają z innych prędkości obrotowych i innych wartości prędkości względnych (domena pędnika jest wirująca), a w konsekwencji innych wartości y^+ ?

W pracy zastosowano siatkę dla której wartość y^+ na ścianach pędnika jest wg Rys.29 w zakresie 5-40 (nie wiadomo o jaką skalę chodzi). W związku z tym warstwa przyścienna nie jest rozwiązywana za pomocą samego modelu SST, lecz powinna być zastosowana funkcja ściany. W opisie modelu jest to pominięte, a wymagałoby wyjaśnienia.

W opisie modelu matematycznego (punkt 7.3) pojawia się szereg niejasności. Nie wiadomo, dlaczego punkt 7.3.1 ma nazwę: równania ciągłości? W opisie podano, że kod rozwiązuje równania ciągłości w postaci całkowitej a poniżej podane są równania zachowania dla płynu jednorodnego. Podane równania nie są wystarczające do rozwiązania przepływu dwufazowego. Brak równania transportu dla jednej fazy w którym pojawia się człon źródłowy modelu kawitacji.

W parametrach przyjętych do obliczeń wskazano, że dobierany krok czasowy jest adekwatny do częstotliwości próbkowania podczas badań. Jest to dość specyficzne podejście i

wymagałoby wyjaśnienia dlaczego tak postępowano i co należy rozumieć pod słowem „adekwatny”. W Tab.10 podano wartości kroków czasowych, które dla skali modelowej są większe od skali rzeczywistej. Konieczne byłoby wyjaśnienie, dlaczego tak jest?

W pracy brakuje walidacji metod obliczeniowych na zweryfikowanym przykładzie raportowanym w literaturze. Mimo, że badania mają charakter numeryczno-eksperymentalny i można oprzeć się na wynikach własnego eksperymentu, to jednak niezależny test wniosłby do pracy dodatkową wartość.

Zestawienie eksperymentów i obliczeń w p.9.3 jest bardzo ważnym fragmentem pracy. Do oceny ilościowej przydałyby się porównania liczbowe z podaniem poziomu różnic. Zestawienie samych wykresów jest trudne do prześledzenia.

Nie wiem z jakich powodów Doktorantka nie zawarła w pracy, choćby dla porównania, wyników analiz przeprowadzonych dla innych danych, na przykład tych, które jako współautorka opublikowała w renomowanym czasopiśmie Ocean Engineering w 2016r. Takie porównanie pozwoliłoby na wyciągnięcie szerszych wniosków.

Podsumowując uwagi ogólne można stwierdzić, że zastosowany przez Doktorantkę układ pracy jest w kilku miejscach dość niefortunny. Sądzę, że utrudnił on samo pisanie pracy. Jednak recenzent może, choć z większym wysiłkiem, znaleźć większość informacji. Praca zawiera szereg nieścisłości i pomyłek redakcyjnych, które mogą świadczyć o pośpiechu w jej redagowaniu. Listę ważniejszych uwag szczegółowych wymieniono w p.3 recenzji.

Moim zdaniem praca ma wiele walorów poznawczych w zakresie numerycznej mechaniki płynów oraz w obszarze badań hydroakustycznych pędników statków. Metodologię zastosowaną do badań oraz plan badań prawidłowo dopasowano do wyznaczonego celu. Potwierdzono zgodność zjawisk zachodzących w tunelu kawitacyjnym oraz w warunkach rzeczywistych i wskazano na przydatność przyjętego modelu numerycznego do oceny zjawisk hydroakustycznych.

Problem naukowy jaki analizowała Doktorantka jest ważny z praktycznego punktu widzenia, gdyż wskazuje metodę postępowania w celu oceny hałasu pędników statków opartą o badania numeryczne i modelowe. Poziom merytoryczny pracy i uzyskane wyniki oceniam pozytywnie.

3. Uwagi szczegółowe

W czasie czytania pracy pojawiło się kilka wątpliwości, które wymagałyby wyjaśnienia oraz zauważyłem kilka pomyłek i nieścisłości:

- Wykaz oznaczeń jest niepełny. Nie zawiera opisu oznaczeń stosowanych w modelach matematycznych. Trudno przyjąć, że nie są to ważniejsze oznaczenia.
- Rysunki zaczerpnięte z innych źródeł np. Rys.1 i Rys.2 powinny mieć odnośnik.
- Str.21 – w definicji współczynnika momentu co rozumie się przez określenie „wartość siły momentu”? Generalnie współczynniki siły czy momentu charakteryzują te wielkości, ale nie podają wartości siły ani momentu, jak napisano.
- Str.23 – Zdanie: „Rozerwanie wody rozpoczyna się punktowo od zarodników kawitacji tj. od mikroskopijnych pęcherzy powietrza...” nie jest szczęśliwie sformułowane. Niewłaściwe jest tu słowo „rozerwanie” oraz przypisanie początkowi procesu kawitacji pęcherzom powietrza. Kawitacja powstanie również wtedy, gdy powietrza rozpuszczonego w wodzie nie będzie, a będą tworzyły się pęcherzyki pary (proces nierównowagowy). Poprawne stwierdzenie pojawia się na tej samej stronie w ostatnim akapicie.
- Oznaczenia na Rys.4 nie odpowiadają tym w opisie.
- W jakim celu umieszczono obok siebie Rys.5 i Rys.6 i gdzie pokazano na nich siły, jak zaznaczono w podpisach.

- Str.39 – wzór na $p(R)$ powinien mieć indeksy przy ciśnieniach
- Str.39 – nie wiadomo po co wprowadzono wielkość R_{prim} . To chyba jest to samo co $\dot{R}$.
- Str.40 - Ta sama uwaga jak poprzednia.
- Str.40 – ostatnie zdanie przed p.2.4.2 – brak odnośnika do źródła.
- Str.42 – pierwszy akapit - Czy metoda Runge-Kutty dotyczy symulacji wzrostu pęcherzy?
- Str.42 – czwarty akapit jest sformułowany w niezrozumiały sposób.
- Str.43 – ostatni akapit – Co oznacza Pierwsze zdanie tego akapitu. O jakie zużycie chodzi i w którym równaniu zachowania masy jest to wykorzystane.
- Str.44 – Dlaczego tu wprowadza się jeszcze inne oznaczenie na prędkość wzrostu pęcherza?
- Str.44 - ostatnie zdanie – Gdzie występują wielkości V_g i V_l ?
- Str.53 – nieczytelne rysunki
- W wielu wzorach indeksy dla modelu są raz małe a raz duże, podobnie dla skali rzeczywistej.
- Str.58 i 59 – dlaczego przyjmuje się różne oznaczenia na poziom ciśnienia akustycznego? Czym różnią się wzory na poziom ciśnienia akustycznego?
- Str.63 – ostatnie zdanie- Co to jest „obszar powierzchni kawitacji”?
- Str.71 – Rys.20 nie ma wyszczególnionych elementów podanych w opisie.
- Rys.24 – brak legendy
- Rys.25 – Niestety obszar kawitacji jest słabo widoczny. Jaką technikę wykorzystano przy wykonywaniu tego zdjęcia?
- Punkt 6.4 – Ten punkt właściwie nie ma opisu i trudno się zorientować jaki był zamiar, aby go zamieścić.
- Str.79 – teraz symbol skali modelowej zmienia się z M na MS, a rzeczywistej z S na FS.
- Str.80 – ostatnie zdanie- Lokalizacja punktów w oparciu o skrzydła, które się obracają nie jest precyzyjna.
- Str.87 – w równaniu energii naprężenia są oznaczone przez t a powinny być przez τ .
- Punkt 7.6 – przedstawione wyniki właściwie nie mają opisu. Nie wiadomo, dlaczego takie kontury wybrano i co jest powodem widocznych różnic. Zgodność wizualna z eksperymentem na rysunkach jest dość umowna, bo jakość zdjęć jest słaba.
- Rys.44 – dlaczego na rysunkach są różne rozkłady prędkości na napływie?
- Rys.48 – komentarza wymagałaby różnica w transporcie wirowości między MS i FS. Dla skali FS wyraźnie widać transport fali a dla skali MS jest ona rozmyta. Czy to wynik różnic w siatkach?
- Punkt 8.3 – nie wiadomo o jakie punkty zamieszczone w tabelach chodzi
- Rys.51 – nie wiadomo co oznaczają poszczególne kolory
- Rys.57 jest nieczytelny
- Rys. 58 jest nieczytelny
- Rys. 59 – W obu przypadkach pojawienie się kawitacji zwiększa amplitudę zmian ciśnienia, jednak amplitudy różnią się o 50%. Przebieg zmian ciśnienia jest zgodny jakościowo, ale nie ilościowo. Jak można to skomentować?

4. Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że temat podjęty przez mgr inż. Judytę Felicjancik jest tematem ważnym z punktu widzenia środowiskowego oraz technicznego, ważnego przy konstruowaniu i eksploatacji śrub okrętowych.

Doktorantka osiągnęła postawiony w pracy podstawowy cel stosując zaawansowane narzędzia badawcze, zarówno w analizach numerycznych, jak i w analizie badań eksperymentalnych. W swojej pracy wykazała znajomość badanych zagadnień. Uzyskane wyniki można uznać za wartościowe pod względem naukowym oraz pod względem aplikacyjnym. Przedstawione w recenzji uwagi dotyczą głównie formy redakcyjnej pracy i nie zmniejszają jej końcowego wyniku naukowego.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do opinii praca doktorska mgr inż. Judyty Felicjancik spełnia wymagania ustawowe o stopniach naukowych i tytule naukowym i może stanowić podstawę do przeprowadzenia postępowania o nadanie stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.

