dr hab. inż. Sławomir Kubacki, prof. uczelni
Politechnika Warszawska,
Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa,
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej,
ul. Nowowiejska 24, 00-665, Warszawa
tel : +48.22.234.47.77, fax: +48.22.622.09.01
e-mail : slawomir.kubacki@pw.edu.pl

Warszawa, dn. 14 czerwca 2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Emada Hasani Malekshah Fazel
pt. „Numerical and experimental research on the influence of air on the cavitation dynamics"

I. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo Pana Profesora dr hab. inż. Andrzeja Rusina, Przewodniczącego Radny Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwa i Energetyki, Politechniki Śląskiej, z dn. 9 maja 2024 (pismo nr RIE-BD.512.21.2024).

II. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Emada Hasani Malekshah Fazel poświęcona jest badaniom eksperymentalnym i numerycznym procesu kawitacji, z udziałem rozpuszczonego w wodzie powietrza, w opływie wokół hydropłata oraz w przepływie przez dyszę Venturiego. Prace eksperymentalne i numeryczne dotyczyły również oceny zjawisk przepływowych zachodzących w badanym układzie z uwzględnieniem wpływu dodatkowego powietrza doprowadzonego do przepływu przez otwory znajdujące się na powierzchni hydropłata. Promotorem pracy jest Pan Profesor Włodzimierz Wróblewski, znany ekspert w zakresie analiz przepływów w maszynach wirnikowych i przepływów z kawitacją.

Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych mają duże znaczenie poznawcze i aplikacyjne. Kandydat analizuje złożone procesy fizyczne, korzystając z niełatwych z punktu widzenia obróbki danych technik pomiarowych, wymagających przetwarzania obrazów uzyskanych przy pomocy kamery. Analiza wyników badań wymagała zapewnienia wysokich dokładności uzyskiwanych wyników pomiarów wybranych wielkości tj. udziały objętościowe powietrza rozpuszczonego w wodzie. Kandydat wykazał się dużą starannością w przygotowaniu i realizacji całego eksperymentu. Oprócz badań eksperymentalnych, Doktorant rozwinął w toku przewodu doktorskiego narzędzia CFD służące do numerycznej analizy przepływów wielofazowych. Opracowanie wiarygodnych narzędzi obliczeniowych wymagało dużego zaangażowania i wiedzy, celem umożliwienia właściwego opisu złożonej fizyki badanych procesów przepływowych. Nie było to zadanie łatwe, bo modele matematyczne analizowanych zjawisk są przedmiotem intensywnych prac badawczych, podlegają dynamicznemu rozwojowi chociaż nie zawsze odpowiedzi na zadane pytania można było znaleźć w literaturze. Przegląd badań, zamieszczony w przedstawionych

do recenzji publikacjach, został zrealizowany z dużą starannością i zawiera kluczowe pozycje literaturowe.

III. Struktura pracy i ocena wartości naukowej

Praca doktorska Pana mgr inż. Emada Hasani Malekshah Fazel stanowi cykl dziewięciu jednotematycznych i powiązanych ze sobą publikacji naukowych. Pierwsza grupa publikacji dotyczy analiz eksperymentalnych i numerycznych przepływu wody z uwzględnieniem procesu kawitacji (bez i z rozcieńczonym gazem) w opływie wokół hydropłatu oraz przez dyszę (zwężkę) Venturiego. W pracy oznaczonej nr 1 przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych przepływu mieszaniny wody, pary wodnej i powietrza wokół hydropłata „Clark Y 11.7%". Badania eksperymentalne i numeryczne zostały wykonane w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechniki Śląskiej. Doktorant przedstawił porównanie wyników badań eksperymentalnych uzyskanych w trakcie przewodu doktorskiego z wynikami badań eksperymentalnych zaczerpniętych z literatury jak i z wynikami własnych symulacji numerycznych. Analizy numeryczne zostały przeprowadzone z zastosowaniem uproszczonego modelu wielofazowego, w którym założono przepływ mieszaniny wody, pary wodnej i powietrza. Ruch mieszaniny opisany jest przy pomocy uśrednionych w czasie równań Naviera-Stokesa. Do modelowania turbulencji zastosowano standardowy model RNG k-ε. Wymiana masy między fazą ciekłą (woda) i parą wodną realizowana była przy pomocy modelu Rayleigha-Plesseta. Zastosowanie tego modelu wymagało rozwiązania równań różniczkowych umożliwiających wyznaczenie lokalnych udziałów objętościowych fazy ciekłej (woda) i gazowej (para wodna). Rozwiązanie ww. równań pozwoliło w kolejnym etapie na obliczenie gęstości mieszaniny. Wielkość ta była wykorzystywana w uśrednionych w czasie równaniach Naviera-Stokesa. Równana ciągłości dla udziałów objętościowych fazy gazowej zaimplementowano w solwerze Fluent przy pomocy funkcji użytkownika UDF. Analizy numeryczne wykonano z zastosowaniem blokowo-strukturalnej siatki obliczeniowej zakładając przepływ quasi-trójwymiarowy. Rozmiar obszaru obliczeniowego w kierunku poprzecznym do kierunku głównego był równy 0.09 mm. Przyjęto 3 komórki w kierunku z. W praktyce był to więc przepływ dwuwymiarowy (2D). W poprawny sposób dobrano schematy numeryczne do dyskretyzacji przestrzennej i czasowej (przepływ był niestacjonarny). W pracy nr 1 przedstawiono parametry siatki obliczeniowej ($y^+<1$). Oceny jakości siatki dokonano w oparciu o dane literaturowe Homa (2018) i Homa i in. (2019). Pozwalało to stwierdzić, że przyjęta do obliczeń geometria układu i gęstość siatki są prawidłowe. Wykazano dobrą zgodność rozkładów ciśnień na powierzchni hydropłata z danymi literaturowymi (eksperyment) w szerokim zakresie analizowanych liczb kawitacyjnych (σ=0.65-3.01, rys. 4). Rozkłady współczynników siły nośnej i siły oporu (rys. 6) dość dobrze zgadzały się z wynikami badań eksperymentalnych uzyskanymi na Uniwersytecie w Tohoku. Pozwalało to stwierdzić, że przygotowane stanowisko badawcze zostało poprawnie zaprojektowane, osiągając żądaną dwuwymiarowość przepływu. Uzyskane w pracy wyniki badań eksperymentalnych są w dobrej zgodności z wynikami badań numerycznych w zakresie analizowanych liczb kawitacyjnych (σ=0.77-1.8, rys. 5). Pozwala to również stwierdzić poprawność przyjętego numerycznego modelu wymiany masy dla analizowanego przepływu trójfazowego. Doktorant prezentuje również szczegółowe charakterystyki częstotliwościowe fluktuacji ciśnienia na wylocie z przestrzeni pomiarowej uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla σ=0.92-2.0 z założeniem różnych udziałów objętościowych powietrza w wodzie. Dokonano porównania pod względem jakościowym (rys. 14) jak i ilościowym wyników badań numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych. Zaobserwowano dosyć duże różnice jakościowe w opisie procesu kawitacji (wizualizacje wykonane kamerą), zwłaszcza za krawędzią spływu hydropłata, czyli w obszarze przepływu który charakteryzuje się występowaniem drobnych struktur wirowych.

Analizy numeryczne wykazały występowanie bardziej skoncentrowanych obszarów występowania pary wodnej w badanej strukturze przepływu wielofazowego wokół hydropłata, co zdaje się wynikać z ograniczeń modelu turbulencji i być może jest również wynikiem przyjętej quasi-trójwymiarowej geometrii obszaru obliczeniowego. W analizach 2D nie ma możliwości symulacji rozpadu struktur wirowych, ze względu na brak trzeciego kierunku przestrzeni, co może częściowo przyczyniać się do wystąpienia różnic w analizowanych wynikach. Podkreślić, należy dużą staranność Doktoranta w opisie złożonych zjawisk przepływowych mających miejsce w badanym układzie. Nie trywialnym zadaniem było uzyskanie zbieżności procesu iteracyjnego z zastosowaniem modelu RNG k-ε z zaimplementowanym modelem wymiany masy. Praca nr 2 dotyczyła analiz numerycznych przepływu wokół hydropłata z zastosowaniem modelu turbulencji RNG k-ε oraz trzech różnych modeli wielofazowych. Pierwszy był to model Sinhala w którym oprócz uśrednionych w czasie równań Naviera-Stokesa rozwiązano równanie ciągłości dla pary wodnej, drugi był to 'model dwufazowy' (równanie ciągłości dla mieszaniny pary wodnej i powietrza), trzeci to był 'model trójfazowy'. W ostatnim modelu rozwiązano dwa dodatkowe równania ciągłości, osobno dla pary wodnej i powietrza. Analizy pokazały ograniczenia modelu Sinhala w opisie procesu kawitacji. Model ten nie pozwalał w prawidłowy sposób modelować wpływu powietrza rozpuszczonego w wodzie na przebieg procesu kawitacji. Ograniczenia tego modelu obserwowano głównie dla dużego udziału objętościowego powietrza (mała zmienność współczynnika siły nośnej). Dużo lepsze wyniki uzyskano z zastosowaniem modeli w których uwzględniono występowanie w przepływie dwóch faz (woda i mieszanina 2 gazów) oraz trzech faz (woda, para wodna i powietrze). Doktorant w prawidłowy sposób dokonał analizy wyników i oceny zastosowanych modeli numerycznych. Kolejne dwie prace dotyczyły badań eksperymentalnych i numerycznych procesu kawitacji dla przepływu wody przez dyszę Venturiego. W pracy nr 3 badania eksperymentalne wykonano dla trzech różnych liczb kawitacyjnych i dla dwóch udziałów objętościowych powietrza. Powietrze było wprowadzane dwuetapowo. W pierwszej kolejności dokonano wprowadzenia powietrza do układu przez otworki umieszczone na powierzchni dyszy, następnie przepływ był kontynuowany przez okres czasu ok. 1-2 min., bez wprowadzenia powietrza do układu, aż do jego pełnego rozpuszczenia w badanym czynniku. Doktorant realizował badania eksperymentalne z dużą starannością, badając zawartość rozpuszczonego w wodzie powietrza przy pomocy czujnika CF-401, powtarzając wyniki badań eksperymentalnych, aż do uzyskania zadowalającej powtarzalności uzyskanych rezultatów. Podobnie jak to miało miejsce w omówionych powyżej pracach, wykonano również symulacje numeryczne procesu kawitacji. Zastosowano model wymiany masy opracowany przez Zwarta-Gerbera-Belamriego. Model RNG k-ε zastosowany został do modelowania przepływu mieszaniny. W pracy pokazano testy niezależności rozwiązania od gęstości siatki (rys. 5). Pokazano porównanie średnich rozkładów ciśnień, uzyskując dosyć dobrą zgodność między wynikami badań numerycznych i eksperymentalnych. Dobra zgodność wyników badań eksperymentalnych z numerycznymi, pozwala stwierdzić poprawność przyjętego modelu kawitacji. Dokonano szczegółowych analiz wyników badań eksperymentalnych (analiza falkowa i funkcje gęstości mocy, PSD). Zwiększenie udziału objętościowego powietrza skutkowało zmniejszeniem częstotliwości fluktuacji ciśnienia. Badania wykazały również, że zwiększenie udziału objętościowego powietrza skutkuje zwiększeniem rozmiaru kawerny utworzonej przez ciecz, natomiast zwiększenie liczby kawitacyjnej skutkowało jej zmniejszeniem. Doktorant w prawidłowy sposób analizuje wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych. Wyniki badań eksperymentalnych mają duże znaczenie praktyczne. W pracy nr 4, podobnie jak w pracy 3, zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych dla dyszy Venuriego. Wyniki są podobne do tych omówionych wcześniej. Zaobserwowano obniżenie częstotliwości fluktuacji ciśnienia rejestrowanych na jednym z czujników ciśnieniowych (P8)

w przypadku przepływu wody w którym znajdowała się większa objętość rozpuszczonego powietrza (rys. 6). Warto zwrócić uwagę, że na rys. 6 oprócz wyżej przedstawionych znajdują się również inne wartości szczytowe dla 8 i 20 Hz (PT170, niski poziom powietrza) które wymagałyby wyjaśnienia. Doktorant podejmuje próbę wyjaśnienia wpływu powietrza rozpuszczonego w wodzie na stabilizację procesu kawitacji i zwiększenie rozmiarów kawerny. Analizowany jest również wpływ liczby kawitacyjnej. Analizy te przeprowadzono na bazie obróbki obrazów uzyskanych z pomocą kamery. Proponowane przez Kandydata wyjaśnienia są logicznie spójne.

Kolejna grupa publikacji (prace nr 5 i 6) dotyczy, podobnie jak publikacja nr 1, badań eksperymentalnych i numerycznych przepływu mieszaniny wody, pary wodnej i powietrza wokół hydropłata „Clark Y 11.7%". Analizy numeryczne realizowane są z zastosowaniem modelu RNG k-ε, modelu w którym zastosowano tłumienie lepkości turbulentnej uzyskiwanej z modelu RANS poprzez funkcję zależną od gęstości badanych czynników (DPM – density corrected model) oraz funkcję w której tłumienie lepkości realizowane było, podobnie jak w modelach hybrydowych RANS-LES, poprzez porównanie rozmiaru oczka siatki ze skalą długości turbulentnej (Filter-Based Model, FBM). Definicje obydwu zmodyfikowanych modeli przyjęto korzystając z danych literaturowych. Założono model mieszaniny w którym uwzględniono obecność powietrza w wodzie i w odpowiedni sposób modelowano wymianę masy między ciekłą wodą i parą wodną (odparowanie i kondensacja). Warto zwrócić uwagę, że współczynniki siły oporu uzyskane z zastosowaniem modeli DPM i FBM ulegają nieznacznemu pogorszeniu w pewnym zakresie liczb kawitacyjnych (artykuł 5, rys. 9, σ=0.8-1.4, eksperyment Uniwersytetu Tohoku) w stosunku do wyniku uzyskanego modelem RNG. Wszystkie modele dawały porównywalne wyniki w opisie zjawisk niestacjonarnych tj. częstotliwość rozpadu struktur wirowych (tabela 1). Mój niepokój budzi przyjęcie w obecnych analizach numerycznych quasi-trójwymiarowej geometrii obszaru obliczeniowego (przepływ jest w zasadzie 2D) z zastosowaniem modelu FBM. Modele hybrydowe, do których model FMB zasadniczo należy, wymagają stosowania trójwymiarowych siatek obliczeniowych zachowując odpowiednią rozdzielczość przestrzenną we wszystkich kierunkach przestrzeni.

Artykuł nr 7 dotyczy walidacji modelu numerycznego do symulacji procesu kawitacji z zastosowaniem techniki, która uwzględnia 'połączenie ze sobą' udziałów objętościowych rozpuszczonego w cieczy powietrza i pary wodnej (merging theory). Model ten zaczerpnięto z pracy Chenga i in. (2021). Bazuje on na założeniu (hipotezie), że w przypadku występowania dostatecznie niskiego ciśnienia, możliwe jest występowanie procesu koalescencji cząsteczek rozpuszczonego w wodzie powietrza z cząsteczkami pary wodnej. W pracy założono, że zjawisko koalescencji zachodzi wtedy gdy udziały objętościowe tych gazów są znaczące w odniesieniu do objętości wody. Przyjęto, że proces ma miejsce gdy objętość gazów stanowi 1/100 objętości oczka siatki obliczeniowej. Uzyskano lepsze jakościowo wyniki dla symulacji przepływu wokół hydropłata z zastosowaniem modelu DPM i poprawionego modelu dla przepływu wielofazowego (rys. 14 i 15) od wyników uzyskanych standardowym modelem. Warto w tym miejscu podkreślić duży nakład pracy Kandydata, związany z poszukiwaniem nowego (lepszego) modelu do opisu procesu kawitacji i późniejszego testowania proponowanych rozwiązań.

Publikacja nr 8 dotyczy badań eksperymentalnych opływu hydropłata z wprowadzeniem powietrza do obiegu wody przez otwory znajdujące się na powierzchni płata. Uzyskano ciekawe wyniki badań, które w przyszłości mogą być wykorzystane do walidacji modeli numerycznych. Publikacja nr 9 dotyczy analiz numerycznych i eksperymentalnych procesu kawitacji w opływie wokół hydropłata. Zastosowano model DCM wraz z modelem Chenga do symulacji zjawiska koalescencji molekuł powietrza i pary wodnej. Badania wykonano z wprowadzeniem (i bez) dodatkowego powietrza przez otwory na powierzchni hydropłata.

Doktorant uzyskuje bardzo dobrą zgodność między wynikami analiz numerycznych i eksperymentalnych w rozkładach ciśnienia na powierzchni hydropłata. Wprowadzenie dodatkowego powietrza skutkuje zmniejszeniem częstotliwości rozpadu struktur wirowych. Uzyskano dobre zgodności w wartościach szczytowych fluktuacji udziału fazy gazowej (rys. 9). Różnice między eksperymentem a obliczeniami w wartościach szczytowych częstotliwości rzędu 20-30%, co dla opisu tak złożonych zjawisk fizycznych, są moim zdaniem doskonałym wynikiem.

IV. Mocne i słabe strony pracy

Do mocnych stron pracy należy zaliczyć realizacje złożonych badań eksperymentalnych procesu kawitacji oraz analiza wyników badań eksperymentalnych obejmująca techniki wizualizacyjne (detekcja obrazu), pomiary ciśnień i dalej przetwarzanie i analizy danych obejmujące analizy widmowe, analizy falkowe. Realizacja prac eksperymentalnych wymagała zapewnienia wysokich dokładności mierzonych wielkości (liczba kawitacyjna, udział objętościowy powietrza). Doktorant, oprócz analiz wyników badań eksperymentalnych realizuje równolegle symulacje numeryczne procesu kawitacji. Uzyskane wyniki badań numerycznych zostały w rzetelny sposób porównane z wynikami badań literaturowych i z wynikami własnych badań eksperymentalnych. Ten rodzaj realizacji badań wymagał od Doktoranta dużego zaangażowania i zasługuje on na wyróżnienie.

Warto również podkreślić duży wysiłek Kandydata, którego celem było opracowanie wiarygodnego modelu matematycznego procesu kawitacji, biorąc pod uwagę ograniczenia tego modelu (uśrednione równania Naviera-Stokesa stosowane do modelowania ruchu mieszaniny). Zauważyć można konsekwentny rozwój metodyki symulacji numerycznych, w trakcie realizacji prac badawczych, poprzez rozbudowywanie elementów modelu o kolejne istotne składniki pozwalające (czasami częściowo) poprawić jakość uzyskiwanych wyników obliczeń numerycznych. Rozwój ten realizowany jest na dwóch polach, obejmujących zarówno opracowanie bardziej wiarygodnych modeli dla samego przepływu mieszaniny (DPM i FBM) jak i modelu wielofazowego (modele dla dwóch i trzech faz).

Istotnym elementem pracy zasługujący na wyróżnienie jest publikacja uzyskanych wyników badań w 9 prestiżowych czasopismach naukowych.

Słabą stroną pracy jest moim zdaniem przyjęcie w analizach numerycznych z zastosowaniem technik DPM i FBM, uproszczonej dwuwymiarowej geometrii obszaru obliczeniowego. Może to prowadzić do obniżenia jakości uzyskanych wyników numerycznych. Wydaje się, że w przyszłości symulacje te będzie można uzupełnić (zakładając, że Doktorant będzie miał dostęp do dostatecznie dużych mocy obliczeniowych) realizując je na siatkach w pełni trójwymiarowych tj. zostało to zrobione w cytowanej literaturze.

V. Szczegółowe pytania do Autora rozprawy

W niniejszym rozdziale znajdują się szczegółowe pytania do Autora rozprawy:

1. W opublikowanych pracach przyjęto model mieszaniny. Założono więc, że prędkość czynnika złożonego z molekuł wody, pary wodnej oraz powietrza jest otrzymywana z tych samych uśrednionych w czasie równań Naviera-Stokesa (zmianie ulega gęstość mieszaniny). Jest to pewien model płynu wielofazowego w którym zakłada się, że nie istnieje różnica prędkości pomiędzy fazami. Istnieją również inne bardziej złożone modele w których np. dyspersję drobnych cząsteczek śledzi się poprzez rozwiązanie równań ruchu np. metodą Lagrangea lub stosuje się podejście w którym realizuje się połączenie metod Eulera i Lagrangea w jednej symulacji (dotyczy to np. symulacji procesu atomizacji kropel). Czy w trakcie studium literatury ustalił Pan warunki dla

których stosowanie przyjętego przez Pana modelu jest słuszne? Zastanawiam się jak w tym kontekście należy rozumieć ruch powietrza wprowadzanego do układu poprzez otwory umieszczone na powierzchni hydropłata (publikacja nr 9). W pobliżu wlotu do obszaru obliczeniowego prędkość powietrza może się znacząco różnić od prędkości wody. Jakie są ograniczenia stosowanego przez Pana podejścia (o ile są)?

2. Przegląd literatury zawarty w publikacji nr 1 (Wróblewski i in., 2021) wskazuje na zasadność zastosowania modelu przejścia laminarno-turbulentnego do modelowania przepływu i tym samym symulacji zjawiska kawitacji (Zhang i in., 2020). Czy rozważał Pan w trakcie swojej pracy symulacje przepływu z wykorzystaniem modelu przejścia L-T? Liczba Reynoldsa jest typowa dla przejścia laminarno-turbulentnego w warstwie na powierzchni profilu (10^5-10^6), także zasadne byłoby uwzględnienie warstwy laminarnej w przepływie. Mogłoby to przyczynić się do obniżenia poziomu lepkości turbulentnej w kluczowych obszarach przepływu i skutkować intensyfikacją procesu kawitacji.
3. W pracach używany był model RNG k-ε i później stosowane były inne bardziej rozbudowane modele. W publikacjach nie znalazłem informacji o warunkach brzegowych dla turbulencji na wlocie do obszaru obliczeniowego. Turbulencja działa stabilizująco na przepływ i być może zbyt niski poziom fluktuacji turbulentnych mógł wpływać negatywnie na stabilność procesu iteracyjnego. Jakie to były warunki i czy miały one wpływ na wynik obliczeń?
4. Proszę o uzasadnienie przyjęcia w analizach numerycznych z wykorzystaniem modeli DPM i FBM domeny w postaci fragmentu obszaru o bardzo małej rozpiętości w kierunku poprzecznym (z). W kierunku poprzecznym przyjęto rozmiar obszaru o grubości 0.09mm zakładając 3 komórki. Metoda FBM, będąca w zasadzie metodą hybrydową RANS-LES, wymaga przyjęcia w pełni trójwymiarowej geometrii obszaru obliczeniowego. Czy przyjęcie małego rozmiaru obszaru w kierunku poprzecznym do kierunku głównego przepływu mogło wpłynąć na wynik symulacji z zastosowaniem metod DPM i FBM?
5. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób i w których obszarach przepływu następuje redukcja lepkości turbulentnej z zastosowaniem metod DPM i FBM. Czy jest ona realizowana w całym obszarze, lokalnie w obszarze oderwanej warstwy przyściennej czy może w dole przepływu. Jak duża jest to redukcja? Można to sprawdzić analizując stosunek lepkości turbulentnej do lepkości laminarnej czynnika. Jest to istotne celem ustalenia wpływu tych modyfikacji na wyniki obliczeń, które nie zawsze prowadzą do lepszych rezultatów w odniesieniu do wyników uzyskanych modelem RANS.
6. Na rys. 6 w pracy nr 4, widoczne są oprócz tych omówionych w publikacji wartości szczytowych również inne wartości np. dla f=8 i 20 Hz (PT170, pressure, niski poziom powietrza) lub f=50Hz dla PT150 (vibration). Proszę o wyjaśnienie znaczenia tych wartości szczytowych. Z czego one wynikają?

VI. Podsumowanie

Pracę uważam za bardzo istotną z punktu widzenia badań podstawowych i aplikacyjnych w obszarze zagadnień związanych z kawitacją. Przyczyni się ona do lepszego zrozumienia fizyki badanego procesu. Istotny element pracy stanowiły analizy wpływu rozpuszczonego w wodzie powietrza na przebieg badanego zjawiska kawitacji. Równolegle do prowadzonych badań eksperymentalnych prowadzono prace związane z rozwojem wydajnych narzędzi obliczeniowych, służących do symulacji przepływów wielofazowych. Praca ta wnosi istotny wkład w rozwój modeli matematycznych służących do opisu procesu kawitacji. W istotny sposób przyczynia się do rozwoju dyscyplin Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka oraz Inżynieria Mechaniczna.

Podsumowując, uważam, że praca doktorska Pana mgra inż. Emada Hasani Malekshah Fazel pt.: „Numerical and experimental research on the influence of air on the cavitation dynamics" odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i **wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony**.

Biorąc pod uwagę wysokie wartości naukowe uzyskanych wyników badań ich duże znaczenie aplikacyjne, unikatowość realizowanych prac badawczych i publikację wyników w dziewięciu prestiżowych czasopismach naukowych **składam wniosek o wyróżnienie pracy doktorskiej** Pana mgr inż. Emada Hasani Malekshah Fazel.

Krzysztof Kubacki