Częstochowa, 05.01.2023

Prof. dr hab. inż. Andrzej Bogusławski
Katedra Maszyn Cieplnych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska

**Recenzja pracy doktorskiej**
**mgr. inż. Piotra Wiśniewskiego**
**pt.: Numerical modelling of phase-change process in humid air transonic flows**
***Promotor: Prof. dr hab. inż. Sławomir Dykas***

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 20 października 2022 roku oraz pisma nr RIE-BD.512.59.2022 z dnia 15 listopada 2022 przesłanego przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Profesora dr. hab. inż. Andrzej Rusina.

Rozprawa doktorska została zakwalifikowana do dyscypliny naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka i dotyczy bardzo istotnego zagadnienia numerycznego modelowania przemian fazowych w przepływie wilgotnego powietrza. Rozpatrywane w pracy zagadnienia mają bardzo złożony charakter ze względu na konieczność modelownia przemian fazowych w przepływie turbulentnym z obecnością fali uderzeniowej. Kondensacja i odparowanie rozpatrywane są zatem w interakcji z turbulencją i falą uderzeniową przy uwzględnieniu wieloskalowości obydwu zjawisk. Tak złożone zagadnienia nie są wystarczająco dokładnie zbadana ze względu na ograniczenia zarówno aparatury pomiarowej jak i mocy obliczeniowych dostępnych obecnie komputerów i stanowią ciągle wyzwanie z punktu widzenia badań podstawowych. Przemiany fazowe w przepływie wilgotnego powietrza są również bardzo istotne w zastosowaniach technicznych występując w maszynach przepływowych i instalacjach przemysłowych, gdzie przemiany fazowe pary wodnej wpływają na sprawność i trwałość maszyn i urządzeń.

Praca w zamyśle miała logiczną strukturę i jest napisana poprawnym językiem. Przeniesienie niektórych tabel do aneksów ułatwiałoby lekturę pracy. Jednak wersja pracy przekazana do recenzji, wprawdzie ładnie opracowana, zawiera jednak bardzo istotne błędy wydawnicze. Numery rozdziałów i rysunków zostały zmienione i nie odpowiadają odniesieniom w tekście, co bardzo utrudniało lekturę rozprawy. Te błędy nie mogą wpływać na ocenę pracy, bo Doktorant nie może odpowiadać za błędy wydawnictwa.

W rozdziale 1. zatytułowanym „Introduction" przedstawiono w sposób wyczerpujący cele i zakres pracy, które w zupełności spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Autor omawia procesy przemian fazowych, kondensacji heterogenicznej i homogenicznej oraz interakcji z falą uderzeniową, podkreślając złożoność tych procesów, konieczność modelowania i kalibracji modeli przemian fazowych. W dalszej kolejności przedstawia cele i zakres pracy. Zasadniczym celem pracy jest ocena wiarygodności dostępnych obecnie modeli kondensacji w przepływie wilgotnego powietrza. Autor podkreśla, że większość poprzednich badań modeli kondensacji dotyczyła przepływu czystej pary wodnej, natomiast brakuje testów tych modeli dla przepływu wilgotnego powietrza. Dla realizacji tak sformułowanego celu pracy Autor wykonał zarówno symulacje numeryczne jak i badania eksperymentalne umożliwiające walidację analizowanych modeli kondensacji. Należy podkreślić, że cele pracy są bardzo ambitne a zakres pracy, obejmujący zarówno badania numeryczne jak i eksperyment, bardzo obszerny. Zarówno metody eksperymentalne jak i narzędzia numeryczne wykorzystywane w pracy są zaawansowanymi metodami badawczymi, pozwalającymi osiągnąć założone w pracy cele. Autor planuje wykorzystać w pracy w zakresie modelowania przepływu dwufazowego podejście Eulera oraz kombinację modelu Eulera i Eulera-Lagrange'a. Dla kompletności opisu metod modelowania przepływów dwufazowych dobrze byłoby wymienić modele jednopłynowe, takie jak Volume of Fluid (VoF), Level-set (LS), czy sprzężone modele Vof-LS również dostępne w programie ANSYS-Fluent, z pomocą którego wykonano przedstawione w pracy obliczenia. Nawet jeśli, tego typu podejście nie jest możliwe do wykorzystania

w przypadku zagadnień analizowanych w pracy, to wyjaśnienie dlaczego tych modeli nie rozpatrywano w pracy, pokazywałoby wszechstronność wiedzy Doktoranta. Wprowadzenie kończy krótki przegląd literatury dotyczącej badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych procesów kondesacji. Przegląd literatury jest wystarczający z punktu widzenia zasadniczych celów pracy, jednak mógłby być uzupełniony o publikacje poświęcone modelowaniu przepływów z falami kompresji i falami uderzeniowymi z punktu widzenia metodyki modelowania przepływów turbulentnych. W literaturze dostępne są publikacje, które wykorzystują również zaawansowane metody modelowania turbulencji takie Reynolds Stress Model (RSM) i Large Eddy Simulations (LES) w modelowaniu przepływów okołodźwiękowych. Na podstawie tych publikacji można byłoby określić, z jakim poziomem błędów należy się liczyć stosując lepkościowy model turbulencji wykorzystany w pracy. W zakończeniu przeglądu literatury barkuje pewnego podsumowania, jakie kierunki badań procesu kondensacji wynikają z przeglądu literatury, poza stwierdzeniem konieczności dalszych badań.

W rozdziale 2. zatytułowanym „Atmosperic air" przedstawiono podstawy termodynamiki wilgotnego powietrza w warunkach ekspansji w przepływie transonicznym. Rozdział taki jest oczywiście potrzebny, nawet jeśli obliczenia są wykonane przy pomocy programu komercyjnego i wykonawca nie ma wpływu na postać wykorzystywanych równań. Ważne jest jednak, aby konsekwentnie sformułować założenia przyjęte na etapie budowy modelu. W większości przypadków warunek ten jest spełniony w ocenianej pracy, jednak w niektórych przypadkach Autor nie uniknął błędów i niejasności w opisie modelu. W analizowanym rozdziale mieszanina powietrza i pary wodnej jest trakowana jako mieszania gazów doskonałych, jednak w równaniu (2.19) wykorzystano sposób wyznaczania gęstości mieszaniny gazów rzeczywistych, co jest niezgodne z równaniami (2.13) i (2.14). Konieczne jest wyjaśnienie, jaki model został ostatecznie przyjęty w wykonanych obliczeniach. W kolejnym rozdziale Autor wspomina wprawdzie, że wykorzystuje model gazu rzeczywistego w przepływie dwufazowym, jednak nie podano postaci tego modelu, ani jakich przypadkach wykorzystywany jest model gazu rzeczywistego, a w jakich gazu doskonałego.

W rozdziale 3. zatytułownym „Physical and mathematical model" przedstawiono matematyczne modele przepływu dwufazowego, nukleacji oraz wzrostu kropli. Opis przepływu dwufazowego jest bardzo pobieżny. Równanie pędu (3.2) w zapisie wskaźnikowym jest zapisane błędnie. Nie zdefiniowano naprężeń występujących w równaniu (3.2). Jeśli obliczenia zostały wykonane przy pomocy programu komercyjnego, to nazwy modeli i rozwiązywane równania powinny odpowiadać dokumentacji oprogramowania, lub jeśli są to równania lub modele wprowadzone w postaci funkcji użytkownika, to taka informacja powinna byś w pracy wyraźnie sformułowana. Równanie energii dla modelu „Mixture" w programie ANSYS-Fluent ma inną postać. W pracy nie zdefiniowano pojęcia energii w równaniu (3.3). Równanie (3.13), które określa promień kropli jest niezgodne wymiarowo. Błędnie podane równania pędu czy energii oczywiście nie mają wpływu na wyniki obliczeń, bo program rozwiązuje poprawne równania, to jednak modele kondensacji zostały zaprogramowane w postaci funkcji użytkownika (User Defined Functions - UDF). Niepoprawnie zapisane równania nasuwają wątpliwości, czy równania zapisane w funkcjach UDF są poprawne. Wątpliwości tych można byłoby uniknąć, gdyby ważniejsze funkcje UDF zostały przedstawione w pracy w postaci aneksu. Istotnym elementem innowacyjnym ocenianej pracy jest model mieszany autorstwa Doktoranta, który wykorzystuje ciągły i kinetyczny model wzrostu kropli w zależności od liczby Knudsena. Wartość propozycji obniża kolejny błąd w równaniu (3.26), zgodnie z którym współczynnik $b_f$, który z definicji powinien zawierać się w przedziale (0,1), dla liczby Knudsena z przedziału (0.01. 4.5) jest ujemny. Zwrot nierówności w ostatnim wierszu równania (3.26) jest również niepoprawny. Jak wspomniano powyżej, przedstawienie w aneksie funkcji UDF pozwoliłoby rozwiać wątpliwości dotyczące poprawności wykonanych obliczeń.

W rozdziale 4. zatytułowanym „Experimental study" przedstawiono opis stanowisk eksperymentalnych użytych do walidacji symulacji numerycznych. Opis z stanowisk badawczych wykorzystanych w badaniach eksperymentalnych, które posłużyły do walidacji opracowanego modelu matematycznego jest wyczerpujący. Wydaje się jednak, że jeśli zasadniczym tematem pracy

są przemiany fazowe w przepływie wilgotnego powietrza, to zarówno eksperyment jak i symulacje przepływu czystego powietrza i czystej pary mogłyby być pominięte, ponieważ nie wznoszą nowych informacji z punktu widzenia głównych celów rozprawy, szczególnie że liczba analizowanych w pracy przypadków testowych dla przepływu powietrza jest już bardzo duża. Struktura pracy byłaby przy tym czytelniejsza gdyby tabele opisujące geometrie kanałów przepływowych były przeniesione do aneksu. Badania eksperymentalne dotyczyły przepływu powietrza przez dwa rodzaje dysz zbieżno-rozbieżnych o małej i dużej szybkości ekspansji. Parametr ten podany jest w równaniu (4.1) bez żadnych objaśnień, jakie zostały przyjęte założenia pozwalające uzyskać przybliżoną postać tego parametru. Autor odwołuje się do publikacji, w której również nie podano więcej informacji, przy czym zarówno w pracy jak i w publikacji w równaniu jest ten sam błąd, dlatego wyjaśnienie znaczenia tego parametru byłoby cenne dla czytelnika, który nie zajmuje się przepływem w tego typu dyszach. Obydwie dysze mają niewielką szerokość równą wysokości gardzieli dyszy. Wydaje się dość arbitralne stwierdzenie, że przepływ ma charakter dwuwymiarowy. Konieczne są dodatkowe informacje, na jakiej podstawie przyjęto założenie o dwuwymiarowym charakterze przepływy w obydwu dyszach. Dwa ostanie przypadki badań eksperymentalnych zostały zaczerpnięte z danych literaturowych i dotyczą wirników NASA, sprężarki i wentylatora z silników lotniczych.

W rozdziale 5. zatytułowanym „Numerical modelling" przedstawiono testy modeli numerycznych analizowanych przypadków, rozpoczynając od testów niezależności rozwiązania od gęstości siatki oraz przeprowadzając walidację wyników obliczeń przy pomocy własnych danych eksperymentalnych oraz danych literaturowych. Testy siatki dla dysz zbieżno-rozbieżnych ograniczono do przypadków dwuwymiarowych natomiast obliczenia przez wirniki maszyn przepływowych przeprowadzono dla siatek trójwymiarowych. Jeśli możliwe było przeprowadzenie obliczeń 3D dla kanałów łopatkowych, to w przypadku dysz takie obliczenia też powinny być przeprowadzone, co mogłoby potwierdzić jednoznacznie poprawność przyjętego założenia o dwuwymiarowym charakterze przepływu. Wskazane byłoby również, aby przynajmniej w wybranych przypadkach przeprowadzić testy wpływu warunków wlotowych dotyczących intensywności turbulencji na wyniki obliczeń. Warunki brzegowe dotyczące poziomu turbulencji nie zostały w pracy zamieszczone. Niejasna jest również metodyka obliczeń dla wirników. Czytelnik nie wie, czy obliczenia zostały przeprowadzone dla ruchomego, czy stacjonarnego kanału przepływowego. Praca dotycząca modelowania numerycznego powinna zawierać więcej informacji na temat zastosowanych w obliczeniach ustawień dotyczących schematów numerycznych: rzędy aproksymacji, związek prędkość-ciśnienie, parametry zbieżności rozwiązania. Lepiej byłoby precyzyjniej opisać wykonane obliczenia, ograniczając liczbę analizowanych przypadków testowych. Informacji tych w opisie modelu brakuje, natomiast w każdym przypadku została podana informacja, że liczba węzłów siatki w kierunku normalnym do ściany zapewnia wartość parametru $y^+$ na poziomie jedności. Tę informację można było podać raz, zaznaczając że dotyczy wszystkich analizowanych przypadków. Testy niezależności rozwiązania od gęstości siatki mają charakter jakościowy, nie pokazano wpływu ilościowego gęstości siatki na parametry przepływu, np. lokalizację fali uderzeniowej. Jest to konsekwencja zbyt dużej liczby przypadków testowych analizowanych w pracy. Najważniejszymi przypadkami testowymi są dysze zbieżno-rozbieżne, dla których dysponowano własnymi danymi eksperymentalnymi. Analiza wpływu gęstości siatki w tych przypadkach powinna być przeprowadzona szczególnie uważnie. Niestety te przypadki zostały opisane bardzo skrótowo i pobieżnie. Dla dyszy o niskiej wartości współczynnika ekspansji przeprowadzono testy siatki dla suchego powietrza dla przepływu naddźwiękowego w całej dyszy oraz przypadku z falą uderzeniową, natomiast w przypadku powietrza wilgotnego przeprowadzono tylko jeden test, nie podając przy tym stopnia wilgotności. Dla dyszy asymetrycznej nie pokazano żadnych testów siatki. W przypadku dyszy o dużej wartości stopnia ekspansji przeprowadzono tylko jeden test, bez żadnej informacji, który to przypadek testowy. Opisując ten przypadek użyto określenia „circular nozzle", co raczej oznacza dyszę osiowosymetryczną o przekroju kołowym, a nie kanał o przekroju prostokątnym ze ścianami zakrzywionymi wzdłuż okręgu. Po wyborze gęstości siatek dla poszczególnych przypadków testowych przeprowadzona została walidacja modeli matematycznych przy pomocy danych eksperymentalnych,

rozpoczynając od przepływu suchego powietrza przez dyfuzor Sajbena. Rzeczywiście model matematyczny precyzyjnie lokalizuje falę uderzeniową, jednak profile prędkości, szczególnie w górnej części dyfuzora, odbiegają znacznie od danych eksperymentalnych. W sąsiedztwie górnej ściany na ostatnim profilu pokazanym na Rys. 5.11 błąd oszacowania prędkości wynosi ok. 30%. Trudno się zgodzić z opinią Autora, że model precyzyjnie określa profil prędkości. Model prawidłowo ujmuje efekty ściśliwości, natomiast efekty lepkościowe nie zostały zamodelowane z wystarczającą dokładnością. Może uważna analiza wpływu wlotowych warunków brzegowych lub modelu turbulencji, których zabrakło w pracy, dałaby odpowiedź na pytanie, z czego wynikają te różnice. W kolejnym podrozdziale Autor przytacza wyniki z poprzedniej publikacji dotyczące modelowania kondensacji w przepływie pary wodnej przez dyszę zbieżno-rozbieżną, w których porównano różne modele kondensacji. Jak już wspomniano wcześniej, z punktu widzenia celów pracy ten przypadek testowy mógłby być pominięty.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono walidację modeli kondensacji dla przepływu wilgotnego powietrza w dyszy o dużym współczynniku ekspansji. To bardzo istotna część rozprawy, zasadnicza z punktu widzenia głównych celów pracy. Potraktowana została jednak dość skrótowo, choć zasługuje na znaczniej więcej uwagi i dyskusji, stąd szereg pytań, które nasuwają się po lekturze tej części pracy. W pierwszej kolejności porównano działanie trzech modeli ciągłych wzrostu rozmiaru kropli z modelem kinetycznym. Okazało się, że model kinetyczny daje wyniki bardzo zbliżone do modelu Fuchsa-Sutugina. Obydwa modele prowadzą do dobrej zgodności z eksperymentem w zakresie rozkładu ciśnienia statycznego wzdłuż dyszy. Przewidują również bardzo zbliżone rozmiary kropli. Obydwa modele zostały sformułowane dla różnych przedziałów liczby Knudsena, więc ta bardzo dobra zgodność może być zaskakująca i zasługuje na komentarz. W początkowym obszarze dyszy model kinetyczny pokazuje duże oscylacje średnicy kropli, czego nie widać w przypadku modeli ciągłych. Ponadto, w przypadku wyższej wilgotności taki efekt nie występuje. Należy zinterpretować ten efekt. Dla wyższego stopnia wilgotności różnice dotyczące rozmiaru kropli są znacznie większe dla wszystkich modeli, co też wymaga jakiejś interpretacji. Następnie Autor zauważa, że model Fuchsa-Sutugina prowadzi do najwyższej temperatury kropli. Ten wynik też zasługuje na komentarz. W modelu kinetycznym występuje współczynnik kondesacji, który był równy jedności. Na Rys. 5.20 pokazano wpływ tego współczynnika, uzyskując najlepszą zgodność z eksperymentem właśnie dla współczynnika kondensacji równego jedności, co potwierdza słuszność wcześniej przyjętego założenia, niezależnie od stopnia wilgotności powietrza. To bardzo cenna informacja, potwierdzona wynikiem eksperymentu. Niezrozumiały jest natomiast wynik dotyczący szybkości nukleacji, której rozkład dla współczynnika kondesacji równego jeden jest inny niż ten przedstawiony na Rys. 5.18.

Istotnym elementem ocenianej pracy jest propozycja modelu mieszanego. Model ten został zdefiniowany w rozdziale 3. pod nazwą „blend model", natomiast w rozdziale 5. występuje pod nazwą „hybrid model". Należałoby konsekwentnie posługiwać się tą samą nazwą, żeby czytelnik nie miał wątpliwości, który model został poddany walidacji. Lektura tego rozdziału nasuwa kolejne wątpliwości i pytania. Na Rys. 5.21 pokazano rozkład współczynnika „mieszania" $b_f$. Autor stwierdza, że zmienność tego współczynnika wynika ze zmian parametrów płynu. Ponieważ współczynnik ten jest wyłączną funkcją liczby Knudsena, to nie jest pewne, czy w równaniach (3.25) i (3.26) liczba Knudsena jest wyznaczana na podstawie rosnącej średnicy kropli, czy brane są pod uwagę wyłącznie zmiany temperatury i ciśnienia potrzebne do wyznaczenia drogi swobodnej molekuły wody. To bardzo istotna informacja dla czytelnika, który ten nowy model chciałby zaimplementować w swoim programie. Model mieszany został porównany z modelem kinetycznym i modelem Fuchsa-Sutugina, należy się domyślać, że te właśnie modele zostały wykorzystane również w modelu mieszanym. Autor zaznacza, że w modelu kinetycznym współczynnik odparowania jest równy jedności. Współczynnik ten poprzednio nazywany był współczynnikiem kondensacji. Konsekwencja w stosowaniu nazw ma w publikacjach naukowych znaczenie, poprawia czytelność publikacji i ułatwia pracę recenzentom. Model mieszany został przetestowany chyba dla kondensacji heterogenicznej, nie podano jednak informacji na temat parametrów fazy ciekłej na wlocie. Wyniki dla niższego stopnia wilgotności prawie nie różnią się od przedstawionych poprzednio wyników dla kondensacji homogenicznej.

Wpływ modelu mieszanego widoczny jest dopiero w przypadku wyższego stopnia wilgotności. Komentarz dotyczący walidacji modelu mieszanego jest bardzo skromny, a właściwie nie ma go wcale.

Rozdział 6. zatytułowany „Phase change analysis" przedstawia najważniejsze wyniki pracy na temat przemian fazowych w kilku typach przepływu. W pierwszej kolejności Autor podejmuje próbę identyfikacji zjawisk obecnych w przepływie wilgotnego powietrza i stymulowanych przemianami fazowymi. Złożoność analizowanych zjawisk nie podlega dyskusji, co Autor pokazał na Rys.6.1. Rysunek ten należy traktować jako poglądowy przedstawiony w celu ilustracji zjawisk analizowanych szczegółowo w dalszej części pracy, jednak dobrze byłoby wskazać, który przypadek testowy jest pokazany. Fale kondesacji oddziałują z falami kompresji, które obecne są również w przepływie adiabatycznym. Bardzo ważna byłaby informacja na temat pochodzenia tych fal oraz możliwości sterowania lokalizacją tego typu fali.

Analiza przemian fazowych rozpoczyna się od przypadku dyszy z naddźwiękowymi warunkami na wylocie. Autor zaznacza, że w przepływie nie występuje oderwanie warstwy przyściennej, co prawdopodobnie wiadomo z poprzednich badań, bo w pracy nie przedstawiono żadnych dowodów na potwierdzenie tej tezy. W następnym zdaniu stwierdzono, że warstwy przyścienne nie mają widocznego wpływu na przepływ, co wydaje się stwierdzeniem zupełnie arbitralnym, bo w przepływie czynnika nielepkiego fale kompresji nie pojawiają się wcale. Nie podano na wstępie do tego rozdziału, jaki model kondensacji został wykorzystany w obliczeniach. Można się domyślać, że Autor zastosował zaproponowany przez siebie model mieszany, ale ta informacja powinna być podana.

Na Rys. 6.2 przedstawiono porównanie wizualizacji schlirena uzyskanych w badaniach eksperymentalnych i numerycznych, przy czym badania eksperymentalne przeprowadzono wyłącznie dla powietrza wilgotnego. Jakościowa zgodność wyników eksperymentalnych i numerycznych jest bardzo dobra. Na podstawie rozkładu liczby Macha oraz udziału fazy ciekłej zidentyfikowano fale kondensacji i fale kompresji. Interpretacja spadku liczby Macha za falą kondensacji jest jednak dyskusyjna. Autor twierdzi, że wyzwolone ciepło kondensacji prowadzi do spadku prędkości i w konsekwencji obserwujemy spadek liczby Macha. Zjawisko jest jednak bardziej skomplikowane. Wydaje się, że ciepło dostarczone do czynnika gazowego powoduje spadek gęstości i raczej wzrost prędkości, natomiast jednocześnie wzrasta lokalna prędkość dźwięku i stąd obserwujemy spadek liczby Macha. W analizowanym przypadku nie pokazano jednak pól prędkości. Zjawiska zidentyfikowane w symulacjach numerycznych są niezwykle interesujące z punktu widzenia badań podstawowych jak i technicznych zastosowań. Jaka jest pierwotna przyczyna formowania się fali kondensacji, czy wywołana jest obecnymi w przepływie falami kompresji, czy jest to mechanizm podobny do formowania się fal kompresji, jaki jest wpływ warstw przyściennych. Odpowiedzi na te pytania byłyby bardzo wartościowe i wnosiłyby istotny wkład do zrozumienia fizyki analizowanych zjawisk. Doktorant przygotował i przetestował zaawansowane narzędzia numeryczne gotowe do szczegółowych analiz mechanizmów przemian fazowych w przepływach okołodźwiękowych i to jest bardzo ważne osiągnięcie. Odnieść można jednak wrażenie, że zatrzymał się na początku drogi badawczej, twierdząc że ze względu na „ograniczoną ilość materiału porównawczego" trudno jest znaleźć jednoznaczną odpowiedź ma powyższe pytania. To oczywiście prawda, pytania które pojawiły się w omawianych badaniach są niezwykle trudne, ale badania naukowe właśnie służą rozwiązywaniu trudnych problemów. Przykładowo, przeprowadzenie symulacji niestacjonarnych, poczynając od rozwiniętego przepływu suchego powietrza, wprowadzając w pewnej chwili udział pary wodnej pozwoliłoby na obserwację przejścia od fali kompresji do fal kondensacji dostarczając informacji, jaką rolę pierwotne fale kompresji mają w formowaniu się fal kondesacji i jak fale kondesacji wpływają na fale kompresji. To oczywiście czasochłonne obliczenia, ale można byłoby je wykonać, ograniczając liczbę przypadków testowych.

Jeszcze bardziej złożona jest fizyka kolejnego z analizowanych przypadków, w którym w części rozbieżnej występuje prostopadła fala uderzeniowa wraz z poprzedzającymi ją falami kompresji. Wprowadzenie wilgoci powoduje uformowanie się fal kondensacji, które oddziałują z falami kompresji, lokalizacja których jest w tym przypadku blokowana poprzez falę uderzeniową. W

przeciwieństwie do poprzedniego przypadku wpływ fal kondensacji na fale kompresji jest wyraźnie mniejszy. Inny zatem może być w tym przypadku mechanizm odziaływania formujących się fal kondesacji i obecnych w przepływie fal kompresji. W tym przypadku również nieustalone symulacje mogłyby dostarczyć cennych informacji na temat mechanizmu formowania się fal kondensacji w obecności prostopadłej fali uderzeniowej. Wpływ wilgoci na położenie fali uderzeniowej jest niewielki i powyżej wilgotności względnej 25% fale kondensacji nie zmieniają położenia prostopadłej fali uderzeniowej, co jest istotną obserwacją dla zastosowań technicznych. Kondensat, przechodząc przez prostopadłą falę uderzeniową częściowo odparowuje. Ten proces to kolejny bardzo złożony i interesujący problem, słabo zbadany i wymagający dalszych badań. Autor podkreśla istotność tego zjawiska, prognozując możliwe mechanizmy przejścia kropli przez prostopadłą falę uderzeniową. W tymi miejscu możliwe i wskazane jest zastosowanie metod VoF-LS, które pozwalają symulować powierzchnię kropli oraz siły napięcia powierzchniowego. Jak widać w analizie przemian fazowych w przepływach wilgotnego powietrza jest miejsce dla tego typu metod, które warto było wskazać we wprowadzeniu lub przeglądzie literatury.

W podrozdziale 6.1.4 przedstawiono oszacowanie strat w przepływie przez dyszę spowodowane falami kondensacji. Straty te są znaczące i jest to ważna informacja z punktu widzenia inżynierskich zastosowań.

Kolejny przykład testowy dotyczy przemian fazowych w przepływie przez dyszę asymetryczną, analizując w pierwszej kolejności przepływ naddźwiękowy w całej dyszy. Przykład ten jest bardzo istotny, dostarcza bowiem kolejnych wątpliwości dotyczących identyfikacji fal kondesacji i fal kompresji. Fale kompresji, zarówno w przypadku adiabatycznym jak i w przypadku przepływu powietrza wilgotnego, pozostają falami skośnymi, podczas gdy fala kondensacji formuje się w postaci fali prostopadłej. To kolejny argument, sam Autor to podkreśla, że konieczna jest głębsza analiza fizyki formowania się fali kondensacji w przepływie transonicznym, ważniejsza niż przeprowadzanie symulacji kolejnych przypadków testowych. Przypadek przepływu przez dyszę z falą uderzeniową pokazuje, że zarówno fala uderzeniowa jak i fala kondesacji pozostają prawie prostopadłe. Liczba Macha przed falą uderzeniową jest niższa niż w przypadku dyszy asymetrycznej, stąd i proces odparowania kondensatu jest mniej intensywny.

Kolejne rozdziały zostały poświęcone wszechstronnej analizie przepływu wilgotnego powietrza wokół profili oraz trójwymiarowych przepływów w kanałach łopatkowych wirników sprężarkowych i wentylatorowych. Analizowano kondensację homogeniczną i heterogeniczną, z przepływem cząstek stałych oraz kropli wody. Wyniki te to źródło bardzo istotnych praktycznych informacji oraz inspiracji do dalszych badań numerycznych i eksperymentalnych. W przypadku analizy przepływu przez wirniki, w tabeli 6.5, podano prędkości obrotowe, więc należy przypuszczać, że obliczenia prowadzono dla ruchomych wirników. Czytelnik jednak nic nie wie, w jaki sposób te obliczenia zostały przeprowadzone. Na zakończenie przeprowadzono krótką analizę możliwości wykorzystania modelu jednopłynowego w połączeniu z modelem lagrangeowskim, co mogłoby być tematem na kolejną pracę doktorską.

W ostatnim rozdziale zatytułowanym „Summary and conclusions" w sposób wyczerpujący podsumowano najważniejsze osiągnięcia pracy, sformułowano wnioski bardzo istotne z punktu widzenia badań podstawowych i zastosowań technicznych, wskazując przy tym również kierunki przyszłych badań.

Podsumowując, Doktorant wykonał bardzo złożone i wartościowe badania eksperymentalne i numeryczne, które wnoszą istotny wkład do zrozumienia przepływów wilgotnego powietrza z przemianami fazowymi. Przygotował samodzielnie oprogramowanie dla funkcji użytkownika, rozbudowując program komercyjny. Stworzył bardzo zaawansowane i cenne narzędzie do dalszych badań przepływów z przemianami fazowymi. Przeanalizował różne modele kondensacji i ocenił ich użyteczność w analizie przepływu wilgotnego powietrza z kondensacją i odparowaniem. Zaproponował autorski model mieszany, który może być wykorzystywany w przepływach, w których występuje szeroki zakres liczby Knudsena. Przeprowadził samodzielnie badania eksperymentalne, które posłużyły do walidacji modeli numerycznych. To wszystko wskazuje na bardzo wysoki poziom kompetencji i umiejętności Doktoranta, który samodzielnie rozwiązał złożony problem naukowy.

Praca nie jest jednak wolna od błędów i niedociągnięć, z których wymienić należy:

- dość duża liczba błędnie zapisanych równań, również tych które zostały zaimplementowane w funkcjach UDF, co rodzi wątpliwości, czy równania te zostały poprawnie zapisane w programie,
- wątpliwości takich nie byłoby, mimo błędnie zapisanych równań, gdyby najważniejsze funkcje UDF, pokazujące sposób implementacji modelu zostały włączone do pracy w formie aneksu,
- zbyt skromna informacja dotycząca metod numerycznych wykorzystanych w obliczeniach,
- brak testów, pokazujących słuszność przyjętego założenia o dwuwymiarowym charakterze przepływu w analizowanych przypadkach dysz zbieżno-rozbieżnych,
- brak testów wpływu wlotowych warunków brzegowych na wyniki obliczeń, brak informacji o parametrach turbulencji oraz warstwach przyściennych,
- brak przynajmniej jednego przykładu pokazującego, że przyjęty model turbulencji SST k-ω jest wystarczający w analizowanych przypadkach przez porównanie przynajmniej z modelem drugiego rzędu RSM - Reynolds Stress Model lub LES - Large Eddy Simulation. Przykłady zastosowania metody LES w przepływach przez dysze de Lavala są dostępne w literaturze, pokazując istotną przewagę w stosunku do metody RANS. To szczególnie istotne, ponieważ w pracy są pokazane wyniki, które dość znacznie odbiegają od danych eksperymentalnych. Oczywiście przeprowadzenie wszystkich obliczeń metodą LES wymagałoby wielokrotnie większych nakładów obliczeniowych, to jednak testy dla wybranych przypadków pokazałyby z jakim poziomem błędu należy się liczyć,
- najważniejsza uwaga, to zbyt płytka analiza fizyki symulowanych zjawisk. Doktorant poprzestaje na prezentacji wyników obliczeń, konkludując, że brak innych danych porównawczych uniemożliwia głębszą analizę uzyskanych wyników. Narzędzie, które stworzył i przetestował, modele kondensacji, które zwalidował stwarzają doskonałe środowisko do pogłębionych analiz mechanizmów formowania się i oddziaływania fal kondesacji, kompresji i fali uderzeniowej. Należy mieć nadzieję, że badania takie będą kontynuowane, bo zagadnienia poruszone w pracy mają bardzo istotne znaczenie dla badań podstawowych i zastosowań inżynierskich,
- Pogłębione analizy powinny być przeprowadzone, ograniczając liczbę analizowanych przypadków testowych, co znacząco mogłoby podnieść wartość i możliwości publikacji uzyskanych wyników.

Pomimo licznych uwag krytycznych, oceniam bardzo wysoko kompetencje i umiejętności Doktoranta. Praca przedstawiona w obecnej postaci jest bardzo wartościowa, a niewielkie zmiany zasugerowane powyżej, bez wątpienia klasyfikowały by ją jako wyróżniającą. W obecnej formie, pomimo licznych błędów i niedociągnięć, ale ze względu na stopień złożoności analizowanych zagadnień i zastosowanych narzędzi, jak również połączenie badań numerycznych i eksperymentalnych, pracę należy umieścić na granicy pomiędzy bardzo dobrą i wyróżniającą. Wniosek o wyróżnienie należy jednak w tej sytuacji postawić, uzależniając oczywiście jego skuteczność od przebiegu obrony.

**Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana Piotra Wiśniewskiego spełnia wymogi stawiane przez Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym. Stawiam wniosek o dopuszczenie omawianej rozprawy do publicznej obrony.**

**Ponadto ze względu na złożoność analizowanych zagadnień oraz stopień trudności przeprowadzonych badań wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej.**

Podpisał Andrzej Bogusławski