

Dr hab. inż. Jan Górski,
emeryt. prof. nadzw. WEiP AGH w Krakowie

Rzeszów, 10-01-2023r.

Recenzja pracy doktorskiej

pt.: *NUMERICAL MODELLING OF PHASE-CHANGE PROCESSES
IN HUMID AIR TRANSONIC FLOWS*

(*„Modelowanie matematyczne przemian fazowych w przepływach
transonicznych powietrza wilgotnego”*)

1. PRZEDMIOT RECENZJI I PODSTAWA OPRACOWANIA

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 20.10.2022r. oraz umowy o dzieło Nr UMC/3628/2022 z dnia 16.11.2022 r., która została zawarta pomiędzy Politechniką Śląską w Gliwicach, reprezentowaną przez prof. dra hab. inż. Mariusza Dudziaka, a niżej podpisanym jej wykonawcą.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Wiśniewskiego pt.: *„Numerical Modelling of Phase-Change Processes in Humid Air Transonic Flows”* (*„Modelowanie matematyczne przemian fazowych przepływach transonicznych powietrza wilgotnego”*). Pracę tę wykonano w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Sławomir Dykas z Katedry Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 20.10.2022r. oraz umowy o dzieło Nr UMC/3628/2022 z dnia 16.11.2022 r., która została zawarta pomiędzy Politechniką Śląską w Gliwicach, reprezentowaną przez prof. dra hab. inż. Mariusza Dudziaka, a niżej podpisanym jej wykonawcą.

2. OGÓLNA OCENA PRACY

Znaczenie i celowość podjętej problematyki

W badaniach naukowych i zastosowaniach inżynierskich, zarówno para wodna jak i wilgotne powietrze są ważnym medium roboczym. Pewna ilość pary wodnej jest zawsze obecna w wilgotnym powietrzu atmosferycznym. W przepływach powietrza, w których para wodna nie kondensuje, jej wpływ na zachowanie się przepływu może być zaniedbany. Jednak w przypadku transonicznego przepływu powietrza lub pary, para wodna ulega gwałtownemu

rozprężeniu, gdy przechodzi przez linię nasycenia, a następnie kondensuje. Duża szybkość rozprężania w przepływie transonicznym powoduje zmianę fazy z pary wodnej na ciecz, co zawsze jest procesem nierównowagowym. Towarzyszy mu uwalnianie ciepła utajonego, które następnie dostarczane jest do otaczającego go przepływu głównego. Przepływ transoniczny, który znajduje się w pobliżu maksymalnej gęstości strumienia masy, jest wrażliwy na różne małe zakłócenia (perturbacje), włączając w to dopływ ciepła. Dlatego też aerodynamiczne właściwości pola przepływu mogą w oczywisty sposób powiązane z nierównowagową kondensacją. Z tego powodu mogą również ulec zmianie rozkłady ciśnienia i temperatury, lokalizacja i kształt struktury obszaru naddźwiękowego, jak również położenie i kształt fal zgęszczeniowo-rozrzedzeniowych.

Wiele przypadków przepływu transonicznego wilgotnego powietrza z nierównowagową kondensacją ma techniczne i praktyczne zastosowania inżynierskie. Przykłady obejmują przepływy w dyszach zbieżno-rozbieżnych, tunelach aerodynamicznych o dużych prędkościach, układach wlotowych turbin gazowych, palisadach łopatkowych sprężarek i turbin, jak również przy opływie elementów konstrukcji samolotu. W przemysłowych turbinach, wilgoć z powietrza wlotowego zwiększa skłonność do osadzania się zanieczyszczeń na powierzchniach kanałów przepływowych ('fouling') co przyspiesza degradację osiągów turbiny gazowych.

Przedstawiona do opinii praca dotyczy badań oraz modelowania przepływów wewnętrznych ośrodków ściśliwych w obszarze prędkości około-dźwiękowych z uwzględnieniem efektów dyspersyjnych wynikających z kondensacji pary wodnej z ośrodka. Poruszana tu problematyka ta ma istotne znaczenie z punktu widzenia poznania złożonych mechanizmów i struktur przepływu oraz opisu zjawisk falowych w przepływie transonicznym powietrza wilgotnego i pary wodnej w warunkach spontanicznej bądź wymuszonej separacji fazy ciekłej oraz jej odparowania.

3. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Cele pracy i jej zakres

Zasadnicze cele pracy obejmowały m.in. opracowanie bardziej efektywnych narzędzi obliczeniowych do analizy przepływów pary wodnej lub powietrza atmosferycznego, w których następują procesy związane ze zmianami stanu skupienia przez kondensację fazy rozproszoną w wyniku oddziaływań energetycznych płynu z otoczeniem i propagacji zaburzeń w zakresie prędkości okołodźwiękowych. Przygotowany i zrealizowany został szeroki program badań zarówno eksperymentalnych na stanowisku badawczym w KMiUE Politechniki Śląskiej jak i obliczeniowych z użyciem technik CFD w pakiecie Ansys-Fluent.

Wyniki tych prac przedstawiono w wielu publikacjach i raportach zrealizowanych w zespole kierowanym przez prof. dr hab. inż. Sławomira Dykasa, przy czym znaczną część tych badań wykonał doktorant, mgr inż. Piotr Wiśniewski. Ich wyniki zostały zebrane w postaci przedłożonej do opiniowania pracy doktorskiej.

Układ i treść rozprawy

Zredagowana w języku angielskim rozprawa doktorska Pana Piotra Wiśniewskiego, wydana przez Politechnikę Śląską obejmuje łącznie 158 stron druku oraz stronę tytułową. Na początku pracy umieszczono wykaz oznaczeń i skrótów. Zasadniczą część rozprawy (str. 15 ÷ 133), podzielono na 6 rozdziałów, które zawierają łącznie ok. 140 rysunków i 20 tablic. Treść rozprawy zamykają podsumowanie i wnioski, wykaz rysunków i tablic oraz jej streszczenie w języku polskim i angielskim. Zamieszczona na końcu rozprawy literatura przedmiotu obejmuje 72 pozycje (głównie anglojęzyczne) w chronologii cytowań źródeł w tekście, w tym 10 publikacji, których współautorem jest doktorant.

Wprowadzenie do tematu stanowi wstępna część pracy tj. Rozdział 1 i 2, gdzie oprócz przeglądu literatury podano podstawowe pojęcia i parametry związane z opisem właściwości powietrza wilgotnego tj. mieszaniny doskonałego powietrza suchego i pary wodnej. Jak wskazał doktorant, w oparciu o aktualny stan wiedzy i wyniki badań wielu ośrodków (w we współpracy z PŚ), podjęte w tej rozprawie kwestie są niezwykle aktualne.

W Rozdziale 3 autor omówił model fizyczny i matematyczny, wprowadzające do technik opisu procesów kondensacji wilgoci z powietrza wilgotnego i ich implementację do równań transportu w przepływie. Zaprezentowano aktualnie stosowane modele i sposoby ich ujęcia. Ta część wyjaśnia potrzebę i sposób realizacji postawionych zadań w dalszej części pracy.

Główną i oryginalną część pracy zawierają rozdziały 4-6. Rozdział 4 obejmuje wykonane przez doktoranta eksperymenty. Zrealizowano je w ramach Projektu IWSMP w tunelu parowym na Wydz. Energetyki i Inżynierii Środowiska PŚI. Prezentuje w nim wyniki pomiarów eksperymentalnych dla przepływu pary wodnej i powietrza przez kanały wewnętrzne tj. dysze zbieżno-rozbieżne i układy palisad łopatkowych stopni sprężarki około dwujęzowej. Te referencyjne przypadki (m.in. dysza Mosesa-Steina, dysza Witoszyńskiego oraz wirniki NASA 37 i 67) stanowiły odniesienie do testowania oraz walidacji modeli i technik numerycznych w analizach CFD.

W Rozdziale 5 wykonano szereg obliczeń CFD przepływu transonicznego pary wodnej i powietrza w kanałach wewnętrznych (dysze i układy łopatkowe stopni sprężarek). Wybrano tu dobrze udokumentowane wyniki dotyczące badań laboratoryjnych dysz Sajbena, Mosesa-Steina, IWSMP oraz dane z badań palisad łopatkowych wirników transonicznych stopni sprężarek NASA 37 i NASA 67. Gęstość siatki obliczeniowej zoptymalizowano dla każdego przypadku i warunków przepływu pod kątem czasu obliczeń i poprawności rozwiązania dla użytych modeli turbulencji. Obliczenia te posłużyły ponadto predykcji numerycznej dla lokalizacji i struktury fal zgęszczeniowo-rozrzedzeniowych w przepływie transonicznym i ich porównanie z danymi eksperymentalnymi. Ponadto, dokonano walidacji zaproponowanych wcześniej modeli turbulencji i dynamiki procesu kondensacji pary, w tym generowania kropeł wody w przepływie powietrza suchego i wilgotnego lub pary wodnej. Uzyskane wyniki wykazują w tym względzie dobrą zgodność z aktualnie dostępnymi danymi. Rozpatrzono też modele wzrostu kropli wody w przepływie dla modelu ciągłego, kinetycznego i mieszanego. Ograniczone informacje z badań w tym zakresie nie zawsze prowadzą do jednoznacznych wskazań, pozwalających wskazać, który z modeli powinien być stosowany w odniesieniu do rozpatrywanych zagadnień aerodynamiki maszyn przepływowych.

Rozdział 6 zawiera analizę zmiany fazy w przepływie transonicznym. Interesujące są wyniki dotyczą analizy zjawiska oddziaływania fali kondensacyjnej i oscylacji ciśnienia w przepływie przez dyszę Sajbena dla wybranych modeli turbulencji (s.80-83) i przy różnym poziomie wilgotności względnej strugi powietrza. Ta część pracy jest wprowadzeniem do oryginalnych wyników badań autora zawartych w Rozdziale 6. Dotyczą one identyfikacji efektów kondensacji i określeniu strat w przepływie przez kanały wewnętrzne, a także opływie profilu lotniczego. Oszacowano tu wpływ nierównowagowej kondensacji oraz zjawisk falowych na lokalizację i natężenie stref zaburzeń na sprawność maszyn i urządzeń. Zaprezentowane tu wyniki są nowe i w kilku przypadkach w pełni oryginalne.

4. UWAGI SZCZEGÓŁOWE I KRYTYCZNE

Doktorant podjął się trudnych i złożonych zagadnień dotyczących analizy przepływów w maszynach przepływowych. Należy też podkreślić walory praktyczne i poznawcze rozprawy (w tym nowe procedury obliczeniowe oraz weryfikacja przydatności określonych modeli). Na wartość wyników tych badań wskazuje szereg ich cytowań w różnych publikacjach.

W trakcie obliczeń wykorzystano tu powszechnie uznane i efektywne narzędzia numerycznej mechaniki płynów (CFD), w tym najczęściej stosowane techniki obliczeniowe ANSYS CFX, w tym modele turbulencji $k-\varepsilon$ i $k-\omega$ SST.

Jako narzędzie estymacji parametrów w procesie oceny kondensacji pary wodnej wybrano metodę momentów Hilla. Jako model powietrza wilgotnego wybrano tu mieszaninę gazów idealnych, w której każdy lotny składnik jest również gazem termicznie i kalorycznie doskonałym. Dla kropeł wody powstających w wyniku kondensacji nierównowagowej w przepływie transonicznym powietrza wilgotnego mniejszych niż średnia droga swobodna cząsteczek powietrza suchego pominięto międzyfazowy poślizg prędkości. Do wyznaczenia szybkości zarodkowania i wzrostu kropli wykorzystano klasyczną teorię kondensacji Volmera-Hilla opisującą szybkość zmian ilości kondensatu w formie układu równań różniczkowych cząstkowych, które obejmują cztery równania związane z masą skroplin. Całość opisu pola przepływu dopełniają równania zachowania masy, pędu i energii w przepływie powietrza wilgotnego, a do ich rozwiązywania użyto jawnej metody objętości skończonych.

W odniesieniu do całości tekstu rękopisu pracy zauważono drobne nieścisłości i niedopatrzenia, a w szczególności:

- W wykazie stosowanych symboli i skrótów (str.8-14) niepoprawnie podano opis pojęć dotyczących wielkości odniesionych do jednostki masy (E – *specific energy*, oraz h – *specific enthalpy*, s – *specific entropy*, f – *frequency* zamiast poprawnie *angular frequency*).
- Kolejne rozdziały (1÷6) w drukowanej wersji dysertacji, nie mają jednolicie prowadzonej numeracji części tekstu, wzorów, tablic oraz rysunków. Nie są też one zgodne z zamieszczonym na końcu wykazem rysunków i tablic (str. 147÷152/153), jak i odwołaniami do nich w tekście pracy co utrudnia jej lekturę. Wersja książkowa różni się z tego powodu od pliku źródłowego 'pdf'.
- Spis literatury (str.139÷146), nie zawiera w wielu przypadkach pełnych informacji źródłowych ([2,17,25,26,28,30,37,38,40,42÷46,49,59,64,65,67,70÷72]).
- Wykaz literatury nie zawsze jest prezentowany w kolejności odwołań w treści pracy, być może lepiej byłoby zastosować spis uszeregowany w pełni alfabetycznie.
- W Rozdziale 1.3 (s.24) nie wskazano, że parametrem odniesienia dla powietrza wilgotnego jest masa powietrza suchego m_a (także w spisie oznaczeń). Nie podano, że wzory (2.15) i (2.16) służą do obliczeń entalpii i entropii właściwej mieszaniny. W tej części (s.25) we wzorze (2.5), stała gazowa R , dotyczy pary wodnej, a nie wody.
- W punkcie 1.5 (s.29), przy definicji prędkości dźwięku, wzór (2.17), warto podać komentarz, że jej wartość w powietrzu wilgotnym ($\varphi = 50\div 100\%$), różni się o mniej niż 0,5% niż w powietrzu suchym.
- Opis właściwości termodynamicznych powietrza wilgotnego (s.23÷33) powinien być szerzej przedyskutowany pod względem zakresu jego stosowalności.
- Na Rys.2.3 (wykres $h-s$, s.32) warto byłoby uzupełnić szkic ekspansji adiabatycznej i diabatyycznej o schemat dyszy de Laval'a adekwatny dla obu przypadków.
- W Rozdziale 5 wyniki symulacji numerycznych związane z testowaniem wyboru siatki obliczeniowej, dotyczące analizy przepływu przez dysze Sajbena, Mosesa-Steina i projektu IWSEP, pokazane na Rys.5.3÷5.7 są słabo rozróżnialne w przyjętej skali wymiarowej. Uwaga ta dotyczy też kilku innych rysunków w tekście rozprawy.
- Na Rys. 6.4 (s. 89) z lewej strony brak jest naniesionych wyników eksperymentu dla przypadków W1.2SS ($\varphi = 37.5\%$), W1.3SS ($\varphi = 51.5\%$).

- Pokazane na Rys.6.43 zmiany wartości sprawności i entropii właściwej w wieńcach międzyłopatkowych stopnia NASA37 i 67 związane z dużą wilgotnością strumienia wlotowego powietrza (50-90%) są w zasadzie niezauważalne dla NASA37 i wydają się być niedoszacowane (patrz *NATO AGARD AR-332*). Wpływ wtrysku wody (IIW) do strumienia powietrza (Rys. 6.44) istotnie zmienia ten obraz. Dotyczy to głównie warunków pracy stopni transonicznych w stacjonarnych turbinach gazowych.

Zamieszczone powyżej uwagi krytyczne mają zasadniczo charakter czysto redakcyjny i nie stanowią istotnego elementu końcowej oceny pracy doktorskiej.

5. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE

- Doktorant podjął się badań obejmujących aktualne i kluczowe problemy w obszarze aero-termodynamiki przepływów okołodźwiękowych par i gazów, którym towarzyszą zmienne strefy nieciągłości związane zarówno z dynamiką ruchu jak i przemianami fazowymi składników ośrodka. Należy podkreślić obszerność i walory poznawcze dysertacji, które wynikają z prowadzonych przez doktoranta analiz i badań (szereg cytowań wybranych publikacji, w tym kilku których jest autorem lub współautorem).
- Jako oryginalne osiągnięcia doktoranta należy w szczególności wskazać:
 - Doktorant efektywnie implementował w pakietach obliczeniowych CFD ANSYS-Fluent nowe procedury służące do modelowania zjawisk kondensacji w przepływie powietrza wilgotnego, w tym dodatkowe równania transportu.
 - Wprowadzone modyfikacje kodów Fluent usprawniają obliczenia CFD w zakresie dużych prędkości przepływu z użyciem siatek niestukturalnych.
 - W oparciu o połączenie podejścia Eulera dla fazy ciągłej oraz Lagrange'a dla śledzenia ruchu cząstek w przepływie wprowadził do obliczeń efektywny opis DPM (*Discrete Phase Model*), który został zweryfikowany w przypadkach przepływu gazów z jednoczesną kondensacją homogeniczną i heterogeniczną.
 - W celu weryfikacji zastosowanych modeli numerycznych, przeprowadził na stanowisku badawczym w KMiUE Politechniki Śląskiej liczne i wiarygodne testy eksperymentalne. Badania te dotyczyły zarówno przypadków przepływu powietrza o różnej wilgotności jak i pary wodnej.
 - Określił eksperymentalnie i numerycznie zmiany parametrów oraz przebieg ekspansji w przepływie przez referencyjne geometrie dysz z oceną wpływu zawartości wilgoci na rozkłady parametrów i propagację fal zgęszczeniowo-rozrzedzeniowych.
 - Wyznaczył rozkłady ciśnień i liczb Macha w przepływie transonicznym w palisadach wirnika NASA 37 i NASA 67 oraz przez dysze o różnej geometrii poprawnie interpretując obraz zmian i deformacji pola przepływu, w tym efektów falowych związanych z obecnością wilgoci.
 - Opracował analizę dynamiki generowania i rozwoju kropli w warunkach kondensacji mieszanej wraz ze wstępną oceną dodatkowych strat w przepływie przez dyszę i w kanale wirnika stopni osiowych sprężarek NASA37 i 67.
- Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Wiśniewskiego, niezależnie od drobnych niedoskonałości, została przygotowana starannie i w sposób przemyślany, z odpowiednim uwypukleniem istotnych kwestii ujętych i rozwiniętych w trakcie wykonanych licznych pomiarów, badań i testów numerycznych.

- Postawione zadania, które sformułowano, ich zakres obejmujący weryfikację założeń i modeli oraz cele badawcze pracy, zostały osiągnięte. Doktorant wykazał się dobrym przygotowaniem ogólnym i specjalistyczną wiedzą potwierdzającą umiejętności prowadzenia badań efektywnie łączących eksperyment laboratoryjny z modelowaniem numerycznym.
- Praca mieści się w nurcie współczesnych zaawansowanych narzędzi badawczych mających na celu lepsze poznanie złożonych mechanizmów transportu masy i ciepła w zagadnieniach przepływu ośrodków niejednorodnych związanych z przemianami fazowymi i efektami falowymi w obszarze dużych prędkości. Ich rozwój wymaga zarówno dobrej znajomości technik pomiarowych jak i narzędzi obliczeniowych. Doktorant wykazał się w tym zakresie bardzo dobrą wiedzą i umiejętnościami.
- Należy podkreślić, że konieczna jest dalsze rozwijanie badań w obszarze problematyki podejmowanej w niniejszej pracy obejmujących pomiary i modelowanie przejść fazowych w przepływie ośrodków lotnych. W tym celu warto wykorzystać narzędzia oparte o narzędzia matematyki statystycznej i techniki sztucznej inteligencji, w tym *'machine learning'*, co sprawi, że algorytmy będą ewoluować i lepiej kalibrować w czasie rzeczywistym parametry pola przepływu.

Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej argumenty stwierdzam, że opiniowana praca Pana mgr inż. Piotra Wiśniewskiego spełnia wymagania zawarte w przepisach ustawy o stopniach i tytułach naukowych („Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, Dz. U. z 30.08.2018r. poz. 1668) oraz wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Rzeszów, 10-01-2023r.

Podpisał Jan Górski

Dodatkowy wniosek recenzenta

Uwzględniając oryginalność zaproponowanych metod modelowania oraz uzyskanych wyników badań eksperymentalnych, a także duży wkład pracy włożony przez doktoranta w realizację przyjętych koncepcji, które potwierdzają liczne cytowania jej wyników w renomowanych periodykach naukowych, wnioskuję o możliwość wyróżnienia tej dysertacji przygotowanej przez mgr inż. Piotra Wiśniewskiego.

Podpisał Jan Górski