

Dr hab. inż. Jan Górski,
emeryt. prof. nadzw. WEiP AGH w Krakowie
ul. Obrońców Poczty Gdańskiej 4/3
35-509 Rzeszów,
[REDACTED]

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 rozproszonej 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 doskonałej 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 dźwiękowej. 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 rozwiązania 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_v 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 Lavaladekwatny 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 (HW) 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.

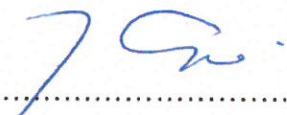
5. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE

- 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 niestrukturalnych.
 - 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 mgra 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.


.....

Dodatkowy wniosek recenzenta

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

