

Piotr Wiśniewski

Numerical modelling of phase-change processes in humid air transonic flows

Doctoral dissertation

Scientific discipline: Environmental Engineering,
Mining and Energy

Silesian University of
Technology

Faculty of Energy and Environmental
Engineering

Department of Power Engineering
and Turbomachinery

Gliwice, Poland, 2022



Silesian
University
of Technology

Author:

mgr inż. Piotr Wiśniewski
Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Department of Power Engineering and Turbomachinery
Konarskiego 18
44-100 Gliwice
Poland
e-mail: piotr.wisniewski@polsl.pl

Supervisor:

Prof. dr hab. inż. Sławomir Dykas
Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Department of Power Engineering and Turbomachinery
Konarskiego 18
44-100 Gliwice
Poland
e-mail: slawomir.dykas@polsl.pl

Polish title of the PhD dissertation:

Modelowanie matematyczne przemian fazowych w przepływach transonicznych powietrza wilgotnego

Streszczenie

Przepływy wielofazowe z przemianą fazową są wszechobecne zarówno w środowisku, jak i w inżynierii. Najbardziej znanym przypadkiem kondensacji jest przejście fazowe wody z pary do cieczy, które występuje gdy ciśnienie i temperatura spadają poniżej parametrów nasycenia. Kondensacja jest istotna przy projektowaniu wysoko sprawnych maszyn i urządzeń w wielu gałęziach przemysłu. Tradycyjnie badania nad kondensacją koncentrowały się na przepływach czystej pary. W ostatnim czasie obserwuje się jednak znaczny wzrost zainteresowania kondensacją mieszanin powietrzno-parowych. Istniejące metody numeryczne są niezawodne tylko dla przepływów czystej pary i wymagają dalszego rozwoju w celu badania kondensacji w mieszaninach powietrzno-parowych. W naturze parowanie i kondensacja zachodzą powoli. Przy okołodźwiękowych przepływach w aplikacjach technicznych spadek ciśnienia i temperatury jest znacznie szybszy i często dochodzi do powstania nierównowagi termodynamicznej. Gdy przechłodzenie jest wystarczająco silne, następuje proces nukleacji, t.j. zarodki powstają bezpośrednio z pary. Gdy jądra te osiągną wielkość krytyczną, otaczająca je przechłodzona para skrapla się na ich powierzchni co skutkuje ich szybkim wzrostem. Przemianom fazowym towarzyszy uwalnianie bądź absorpcja ciepła utajonego, zjawiska te wywierają znaczący wpływ na charakter przepływu. Wykorzystywane modele kondensacji opierają się na kalibracji z danymi eksperymentalnymi, takimi jak na przykład przepływy okołodźwiękowe w dyszach. Takie przypadki dogłębnej walidacji zostały opublikowane dla kilku przepływów czystej pary, ale do tej pory zbadano tylko kilka dysz powietrznych o dużej szybkości rozprężania.

Pierwszym celem tej pracy było wypełnienie luki w badaniach eksperymentalnych dlatego wykonano pomiary przepływu wilgotnego powietrza w dyszy o małej szybkości rozprężania. Badania zostały przeprowadzone dla różnych warunków otoczenia dla przepływu naddźwiękowego i transsonicznego, czyli przepływu, w którym pojawia się fala uderzeniowa w wyniku przejścia naddźwiękowo-poddźwiękowego. Eksperymenty przeprowadzono z wykorzystaniem istniejącego stanowiska niskociśnieniowego w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej rozbudowanego o nową sekcję testową. Wyniki eksperymentalne stanowiły podstawę do walidacji rozważanego modelu. Ponadto geometria dyszy ze wszystkimi danymi została udostępniona jako test wzorcowy dla przepływów kondensacyjnych.

Drugim celem pracy była analiza dokładności dostępnych modeli kondensacji dla przepływu wilgotnego powietrza. W przeszłości modele kondensacji były opracowywane dla pary czystej i nie były stosowane do badań wilgotnego powietrza. Niemniej jednak, obserwowany jest wzrost zainteresowania kondensacją w mieszaninach powietrzno-parowych. Dlatego przeprowadzono przegląd powszechnie stosowanych modeli i wykazano, iż model kondensacji nie może być wybierany arbitralnie. Dobór modelu przemian fazowych powinien być dobrany do badanego zagadnienia. W tej pracy wyróżniono model mieszany, oparty na modelu kinetycznym i modelu ciągłym, który faworyzuje poprawność fizyczną dla małych kropeł jednocześnie zachowując dokładność dla kropeł dużych.

Kolejnym celem było zbadanie wpływu przemian fazowych na pracę nowoczesnych maszyn wirnikowych. Po uzyskaniu wiarygodnego narzędzia do badania kondensacji w przepływach wewnętrznych i zewnętrznych przeprowadzono kompleksowe badania, skupiające się na wpływie kondensacji oraz parowania na pracę pierwszego stopnia sprężarki turbiny i wentylatora silnika turbowentylatorowego. Przeprowadzono analizę numeryczną zjawisk zachodzących w maszynach wirnikowych, których płynem roboczym jest powietrze atmosferyczne zawierające cząstki stałe i ciekłe. Wykazano, że zjawiska fizyczne towarzyszące przemianie fazowej istotnie wpływają na przepływ w kanale międzyłopatkowym. Uwalnianie ciepła utajonego na skutek kondensacja powoduje wzrost temperatury oraz ciśnienia, co skutkuje spadkiem lokalnej prędkości. Z drugiej strony absorpcja ciepła utajonego, która towarzyszy parowaniu kropeł występującemu na fali uderzeniowej wywołuje zjawiska przeciwne, prowadzące do przesunięcia fali uderzeniowej w dół przepływu. Dodatkowo, wykazano iż spadek gęstości płynu na skutek obecności pary wodnej, często pomijany w badaniach numerycznych, implikuje znaczną zmianę parametrów płynu co wpływa to na proces ekspansji a w rezultacie także na sprawność rozważanych maszyn.

Na koniec porównano podejście Eulera i Lagrange'a i zaproponowano superpozycję obu modeli. Zaprezentowane wyniki świadczą o istotnym wpływie podejścia numerycznego na otrzymywanie wyniki wykorzystując ten sam model fizyczny danego zjawiska. Omówiono zalety i wady obydwu modeli oraz zaproponowano model superpozycji łączący zalety obu podejść. Wskazuje to na lukę naukową, która ma duży potencjał dla rozwoju modeli kondensacyjnych i wskazuje potrzebę dalszych badań.

Podsumowując, wyniki przedstawionych eksperymentalnej i numerycznej analizy przemian fazowych wskazują na istotny wpływ tego zjawiska na charakter przepływów

okołodźwiękowych. Zjawiska przemiany fazowej prowadzą do lokalnej zmiany parametrów płynu oraz charakteru przepływu, co wpływa na cały układ przepływowy. Zarówno jednorodna, jak i niejednorodna kondensacja może prowadzić do obniżenia sprawności maszyn i urządzeń, co jest solidną podstawą do stwierdzenia, że w badaniach i projektowaniu układów przepływowych należy brać pod uwagę zjawiska przemian fazowych.