Prof. dr hab. inż. Jan Taler
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Energetyki
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
tel. 0048 12 628 3554
e-mail: jtaler@pk.edu.pl

Kraków, 11.06.2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Angielczyka pt. Modelling of CO_2 transonic flashing flow through a convergent-divergent nozzle using the Delayed Equilibrium Model

Recenzowana rozprawa o objętości 145 stron napisana jest w języku angielskim. Składa się z 6 rozdziałów, dodatku z programami obliczeniowymi na platformie MATLAB oraz spisu literatury cytowanej zawierającej 87 pozycji literaturowych. Na początku rozprawy znajduje się spis treści oraz wykaz symboli używanych w pracy. Na końcu rozprawy znajdują się: spisy rysunków i tablic oraz jej streszczenia w języku angielskim i polskim.

Nadrzędnym celem rozprawy jest opracowanie nadkrytycznego układu chłodniczego o wysokim współczynniku efektywności chłodniczej, w którym czynnikiem roboczym jest dwutlenek węgla. Zamiast sprężarki zastosowana została strumienica dwufazowa do podwyższania ciśnienia czynnika. Efektywna praca układu zależy od prawidłowego zaprojektowania dyszy napędowej stanowiącej element strumienicy.

Przedmiotem rozprawy jest matematyczne modelowanie naddźwiękowego przepływu strumieniowego CO_2 przez dyszę zbieżno-rozbieżną z wykorzystaniem modelu równowagi opóźnionej (DEM). W rozprawie przedstawione zostały równania zamknięcia DEM (z ang. Delayed Equilibrium Model) dla transonicznego przepływu dwutlenka węgla z odparowaniem rozprężnym przez dyszę de Lavala. Opracowany został model opisujący ewolucję frakcji nasyconych powstających z rozprężającej się frakcji cieczy metastabilnej (równanie na indeks nasycenia). Kandydat opracował również metodę obliczania spadku ciśnienia w przepływach CO_2 spowodowanego tarciem. Opracowany model DEM do symulacji przepływu CO_2 przez dyszę, wykorzystujący opracowane przez Kandydata równania zamknięcia, został zweryfikowany eksperymentalnie. Porównanie wyników obliczeń za pomocą modelu opracowanego w rozprawie z wynikami obliczeń za pomocą modelu opracowanego dla

przepływu wody oraz z wynikami za pomocą referencyjnego Równowagowego Modelu Homogenicznego potwierdziło wyższą dokładność modelu przedstawionego w rozprawie.

Praca ma duże znaczenie praktyczne. Dwutlenek węgla staje się popularnym czynnikiem roboczym w urządzeniach chłodniczych i pompach ciepła. Z tego względu modelowanie eksperymentalne i matematyczne zjawisk przepływowo-cieplnych ma bardzo duże znaczenie dla poprawy niezawodności i osiągów urządzeń, w których czynnikiem roboczym jest CO_2 o ciśnieniu wyższym od ciśnienia krytycznego.

1. Charakterystyka rozprawy

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi wprowadzenie. Omówione zostały układy chłodnicze, w których zamiast konwencjonalnej sprężarki zastosowana została strumienica (eżektor). Wyjaśnione zostało angielskie pojęcie „flashing flow", które oznacza intensywne wrzenie przepływającej cieczy spowodowane obniżeniem ciśnienia statycznego poniżej ciśnienia nasycenia. Podana została definicja współczynnika efektywności COP (z ang. Coefficient of Performance) obiegu chłodniczego ze sprężarką eżektorową. Porównana została chłodziarka podkrytyczna z chłodziarką transkrytyczną, w których zastosowano sprężarkę eżektorową. Obiegi termodynamiczne obydwu sprężarek przedstawione zostały na wykresie *T-s* (temperatura-entropia). Przegląd literatury dotyczącej przepływu z wrzeniem wywołaniem obniżeniem ciśnienia statycznego poniżej ciśnienia nasycenia przedstawiono w paragrafie 1.2. Uzasadnienie podjęcia tematyki stanowiącej przedmiot recenzowanej rozprawy doktorskiej, jej cele i zakres przedstawione zostały w paragrafie 1.3. Metodologia badań związanych z realizacją pracy doktorskiej przedstawiona jest w paragrafie 1.4.

Przedmiotem rozdziału drugiego jest modelowanie jednowymiarowego ustalonego przepływu płynu. W paragrafie 2.1.1 wyprowadzone zostało równanie zachowania masy, a w paragrafie 2.1.2 wyprowadzone zostały zależności między pracą sił tarcia a naprężeniem stycznym na ściance kanału. Równanie zachowania pędu omówione zostało w paragrafie 2.1.3, a równanie zachowania energii w paragrafie 2.1.4. Podsumowanie rozdziału 2 przedstawione jest w paragrafie 2.1.5.

W podrozdziale 2.2 opisany jest model przepływu jednofazowego oraz metastabilnego przepływu cieczy. Następnie, w podrozdziale 2.3 omówione są modele przepływu dwufazowego. Najpierw w paragrafie 2.3.1 omówiony jest równowagowy model jednorodny (HEM) przepływu dwufazowego, w którym zastępcza objętość i entalpia właściwa są średnimi ważonymi z odpowiednich właściwości cieczy i pary w stanie nasycenia. Współczynniki

wagowe są odpowiednio równe udziałom masowym cieczy i pary w mieszaninie dwufazowej. Modele przepływu uwzględniające efekty nierównowagowe przedstawione są w paragrafie 2.3.2 . W podpunkcie 2.3.2.1 przedstawiony jest homogeniczny model przepływu (z ang. Homogenous Relaxation Model, HRM), w którym masowy udział pary wyznaczany jest z równania różniczkowego pierwszego rzędu względem drogi przepływu. Model DEM (Delayed Equilibrium Model) jest z kolei rozszerzeniem modelu HRM. W równaniu relaksacji występuje indeks odparowania y, w miejsce udziału masowego pary x.

W krótkim paragrafie 2.4 omówiono wyznaczanie właściwości płynu o ciśnieniu nadkrytycznym, cieczy o temperaturze niższej od temperatury nasycenia oraz cieczy i pary w temperaturze nasycenia. Do obliczania właściwości fizycznych CO_2, w rozprawie zastosowane zostało równanie Span'a i Wagnera.

Wyznaczanie spadku ciśnienia spowodowanego tarciem omówione jest w paragrafie 2.5 zarówno dla przepływów jednofazowych jak i wielofazowych. Do obliczania współczynnika tarcia w przepływie jednofazowym zastosowane zostało nieliniowe równanie algebraiczne Colebrook'a-White'a (2.5.4), które rozwiązywane jest iteracyjnie. Obliczanie spadku ciśnienia w przepływie dwufazowym ciecz-para spowodowanego tarciem zastosowano zależności Lockhart'a-Martinelli'ego oraz Friedel'a.

Topologiczne i numeryczne aspekty modelowania matematycznego przepływów dwufazowych omówione zostały w paragrafie 2.6. W podpunktach do tego paragrafu omówione zostały następujące zagadnienia: ogólna postać układu równań różniczkowych zwyczajnych i jego, transformacja, topologiczna struktura przestrzeni fazowej, punkty regularne, punkty zwrotne oraz punkty osobliwe. W podpunkcie 2.6.3 omówiona została konwencjonalna procedura obliczeniowa. W podpunkcie 2.6.4 omówiony został algorytm PIF (Possible Impossible Flow). Przedmiotem rozdziału trzeciego jest szybka procedura obliczeniowa do wyznaczania trajektorii transonicznej.

W paragrafie 3.1 dr inż. Wojciech Angielczyk zaproponował uogólnioną procedurę wyznaczania osobliwego punktu siodłowego. Wyznaczanie trajektorii transonicznej jest przedmiotem paragrafu 3.2. Inne metody ulepszenia algorytmów obliczeniowych w celu skrócenia czasu obliczeń przedstawione są w paragrafie 3.3. W paragrafie 3.4 został krótko omówiony sposób rozwiązania układu równań w modelu matematycznym zjawiska wrzenia rozprężnego w przepływie. Obliczenia przeprowadzono na platformie MATLAB. W celu przyspieszenia obliczeń procedury obliczeniowe zaprogramowano również w języku C^{++}.

Rozdział 4 poświęcony jest modelowaniu przepływu dwufazowego, dla którego równania zachowania masy, pędu i energii przedstawione są w podpunkcie 2.1.5. W modelu HEM

z rozwiązania układu równań zachowania masy, pędu i energii wyznacza się ciśnienie p, masowy udział pary x w mieszaninie ciecz-para oraz prędkość przepływu mieszaniny w. W modelu HRM wyznaczanymi wielkościami są: ciśnienie p, entalpia właściwa frakcji metastabilnej h_{ml}, udział masowy pary x oraz prędkość przepływu w. W modelu DEM wyznaczanymi wielkościami są: ciśnienie p, indeks odparowania y (udział masowy cieczy i pary w temperaturze nasycenia), udział masowy pary x oraz prędkość przepływu w. Wyznaczanie właściwości fizycznych frakcji metastabilnej omówione jest w paragrafie 4.2. Wyznaczanie gradientu spadku ciśnienia spowodowanego tarciem jest opisane w paragrafie 4.3. Jest to ważne zagadnienie, gdyż metody obliczania spadku ciśnienia dostępne w literaturze dają niezadowalające wyniki w przypadku modelowania przepływu CO_2.

W podpunkcie 4.3.1 Kandydat zaproponował własną procedurę do obliczania gradientu spadku ciśnienia spowodowanego tarciem. Jest to procedura Friedel'a dostosowana do przepływów pod- i naddźwiękowych CO_2 w dyszach zbieżnych i rozbieżnych.

Podobnie w podpunkcie 4.3.2 dr inż. Wojciech Angielczyk przedstawił własną procedurę do obliczania indeksu odparowania y. Zmodyfikował równanie różniczkowe zwyczajne do obliczania zmian wartości y na długości kanału uwzględniając po prawej stronie równania szybkości zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego dyszy w części rozbieżnej i rozbieżnej.

Kandydat poświęcił dużo uwagi eksperymentalnej weryfikacji opracowanej metody modelowania przepływów dwufazowych wykorzystując wyniki badań przeprowadzonych przez Nakagawę et al. [54]. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla CO_2 przepływającego przez dyszę zbieżno-rozbieżną o prostokątnym przekroju poprzecznym kanału. Długość części zbieżnej wynosiła 27.35 mm a części rozbieżnej 56.15 mm.

W paragrafie 5.2 testowane są modele DEM i HEM. Wyniki obliczeń otrzymanych przy zastosowaniu różnych modeli matematycznych porównano z wynikami badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Nakagawę et al.. W tym paragrafie przetestowanych zostało pięć modeli: model DEM, w którym spadek ciśnienia spowodowany tarciem obliczany był za pomocą zależności Lockhart'a-Martinelli'ego ważnych dla wody; model DEM, w którym spadek ciśnienia spowodowany tarciem obliczany był za pomocą zależności Lockhart'a-Martinelli'ego ważnych dla CO_2; model HEM, w którym spadek ciśnienia spowodowany tarciem obliczany był za pomocą zależności Lockhart'a-Martinelli'ego; model HEM, w którym spadek ciśnienia spowodowany tarciem obliczany był za pomocą zależności Friedel'a oraz model HEM-isentropic, w którym przyjęto, że naprężenie styczne na ściance kanału jest równe zeru, tj.$\tau = 0$. Lepszą zgodność między

obliczeniami i eksperymentem uzyskano dla większego ciśnienia na wlocie do dyszy, niezależnie od zastosowanego modelu. Modele homogeniczne HEM również dają dobre rezultaty. Można to wytłumaczyć mniejszą różnicą gęstości między cieczą i parą w stanie nasycenia przy wyższych ciśnieniach. Należy przy tym dodać, że modele homogeniczne są stosowane z powodzeniem do obliczania spadku ciśnienia w rurach parownika w kotłach parowych, z uwagi na wysokie ciśnienia robocze. W paragrafie porównano wyniki obliczeń rozkładu ciśnienia na długości dyszy wyznaczone za pomocą trzech różnych modeli HEM. W podsumowaniu wyników przedstawionych w paragrafie 5.2 Autor stwierdza, że model przepływu dwufazowego HEM-isentropic daje rozkłady ciśnienia w dyszy, które są bliskie zmierzonym rozkładom ciśnienia.

Przedmiotem paragrafu 5.3 jest walidacja różnych modeli do symulacji przepływu dwufazowego. Przeprowadzono obliczenia za pomocą modelu homogenicznego, najpierw za pomocą izentropowego modelu homogenicznego, w którym przyjmuje się zerowe naprężenie styczne na ściance kanału, a później za pomocą modelu HEM, w którym do obliczania gradientu spadku ciśnienia spowodowanego tarciem zastosowano wzory Friedel'a. Zastosowano również model HEM z różnymi zależnościami do obliczania gradientu spadku ciśnienia spowodowanego tarciem. Oprócz wzoru Friedel'a, Kandydat zastosował do obliczania (dp/dz) dwie własne zależności. Do obliczania (dy/dz) w modelu DEM zastosowana została zależność (4.3.18).

Wnioski i sformułowanie zadań, które planowane są do rozwiązania w przyszłości zawiera rozdział szósty.

2. Charakterystyka najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych przedstawionych w rozprawie

Mgr inż. Wojciech Angielczyk przeprowadził szczegółowe modelowanie numeryczne transonicznego przepływu dwutlenku węgla z odparowaniem rozprężnym przez dyszę de Lavala (dyszę zbieżno-rozbieżną). Wyniki symulacji numerycznej porównane zostały z wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi przez M. Nakagawę, M. S. Berana i A. Kishine.

Przedstawione zostały szczegółowo wszystkie testowane modele matematyczne łącznie ze sposobem rozwiązywania układu równań różniczkowych opisujących analizowane zjawisko oraz zależnościami do obliczania właściwości fizycznych CO_2.

Mgr inż. Wojciech Angielczyk przedstawił nowe zależności do obliczania strat tarcia dla przepływu dwutlenku węgla z odparowaniem rozprężnym.

Drugim istotnym osiągnięciem naukowym Kandydata jest opracowanie oryginalnego równania różniczkowego zwyczajnego pierwszego rzędu (równanie na indeks nasycenia y) opisującego ewolucję frakcji nasyconych powstających z frakcji rozprężającej się cieczy metastabilnej.

Praca napisana została jasno i przejrzyście w języku angielskim. Użyta techniczna terminologia angielska jest poprawna.

Praca doktorska mgr inż. Wojciecha Angielczyka ma bardzo duże znaczenie praktyczne.

3. Uwagi krytyczne

Pomimo bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Angielczyka mam również pewne uwagi krytyczne, które wynikają głównie z obszernego zakresu prac teoretycznych i eksperymentalnych związanych z realizacją rozprawy. Są to następujące uwagi krytyczne:

1. W równaniu zachowania pędu nie uwzględniono składowej pochodzącej od siły ciężkości. Ogranicza to zastosowanie równania (2.1.38) tylko do przepływów poziomych.
2. W równaniu zachowania energii (2.1.39) pominięto ogrzewanie lub chłodzenie ścianki kanału. Równanie może być zatem stosowane do modelowania przepływów adiabatycznych.
3. Do obliczania współczynnika tarcia w przepływie jednofazowym zastosowane zostało nieliniowe równanie algebraiczne Colebrook'a-White'a, które rozwiązywane jest iteracyjnie. W literaturze dostępnych jest jednak kilkanaście jawnych zależności do beziteracyjnego obliczania współczynnika tarcia w rurach chropowatych, które nie wymagają długiego czasu obliczeń tego współczynnika.

Zauważone usterki nie zmniejszają merytorycznej wartości rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Angielczyka spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim.

Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój numerycznego modelowania przepływów dwufazowych z rozprężnym odparowaniem.

Wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Wojciecha Angielczyka do publicznej obrony swojej rozprawy i o nadanie Mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Proponuję również wyróżnić rozprawę doktorską mgr inż. Wojciecha Angielczyka za opracowanie modelu matematycznego transonicznego przepływu CO_2 z odparowaniem rozprężnym przez dyszę de Lavala.

Mgr inż. Wojciech Angielczyk przedstawił nowe zależności do obliczania strat ciśnienia spowodowanych tarciem dla przepływu dwutlenku węgla z odparowaniem rozprężnym oraz opracował oryginalne równanie różniczkowe pierwszego rzędu (równanie na indeks nasycenia y) opisujące ewolucję frakcji nasyconych powstających z frakcji rozprężającej się cieczy metastabilnej.

J. Taler