

Prof. dr hab. inż. Andrzej Bogusławski
Instytut Maszyn Ciepłych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska

**Recenzja pracy doktorskiej
mgr. Michała Palacza**

pt.: Mathematical modelling of transcritical flow inside a two-phase ejector for refrigeration systems

Promotor: dr hab. inż. Jacek Smolka, prof. Politechniki Śląskiej

Praca poświęcona jest modelowaniu przepływu dwufazowego dwutlenku węgla w eżektorach wykorzystywanych w systemach chłodniczych. Praca dotyczy bardzo aktualnej tematyki badawczej, której celem jest szersze wykorzystanie dwutlenku węgla, jako czynnika roboczego w systemach chłodniczych i klimatyzacyjnych. Konieczność zastąpienia, powszechnie stosowanych obecnie, syntetycznych czynników chłodniczych, substancjami naturalnymi, wynika z regulacji dotyczących ograniczania emisji gazów cieplarnianych. Spośród różnych, rozważanych obecnie materiałów, najbardziej racjonalnym wyborem wydaje się dwutlenek węgla. Wykorzystanie dwutlenku węgla w klasycznych sprężarkowych układach chłodniczych z zaworem dławiącym wiąże się z istotnym obniżeniem sprawności układu, ze względu na wysokie straty w tym zaworze. Racjonalne wykorzystanie dwutlenku węgla, jako czynnika chłodniczego, wymaga częściowego odzyskania pracy ekspansji czynnika roboczego. Cel ten można osiągnąć wykorzystując eżektor, który jest tematem omawianej pracy. Dane literaturowe wskazują, że prawidłowo zaprojektowane dysze eżektora mogą znacząco poprawić sprawność obiegu chłodniczego.

Omawiana rozprawa doktorska została przedstawiona do oceny w formie cyklu 4. publikacji uzupełnionych 40-stronicowym streszczeniem.

W pierwszym rozdziale pracy przedstawiono motywację przeprowadzonych badań, wskazując na aktualność ich tematyki. Przedstawiono podstawowe obiegi chłodnicze wykorzystujące dwutlenek węgla, podkreślając zalety układu wyposażonego w eżektory, którego sprawność może być wyższa od klasycznych rozwiązań nawet o 20%. Przegląd literatury dotyczącej matematycznego modelowania przepływu dwufazowego w eżektorach jest dość pobieżny i ograniczony jedynie do publikacji związanych bezpośrednio z tematem pracy, czyli przepływu dwutlenku węgla w warunkach transkrytycznych. Wydaje się, że problematyka modelowania przepływów dwufazowych w eżektorach jest znacznie szersza, niż wynika to z przedstawionego przeglądu literatury. Przegląd literatury powinien obejmować jednak szerszą tematykę modelowania przepływów dwufazowych, wskazując na różne modele, ich możliwości, wady i zalety. Z tak wąskiego potraktowania problematyki modelowania przepływów dwufazowych wynika również uboga bibliografia pracy obejmująca jedynie 58 publikacji. Na zakończenie rozdziału pierwszego sformułowano cel i zakres rozprawy doktorskiej. Pierwszym celem pracy jest ocena dokładności modelu równowagowego, homogenicznego. Oznacza to, że Doktorant korzystał z już istniejącego modelu, a jego zadaniem była jedynie ocena jego poprawności. Na podstawie tytułu pracy można sądzić, że to właśnie budowa modelu matematycznego jest głównym zadaniem Doktoranta. Jeszcze bardziej zaskakujące są pozostałe cele pracy, które dotyczą, nie modelu, a optymalizacji sekcji mieszania oraz całego eżektora. Wydaje się, że tytuł rozprawy został niefortunny sformułowany. Z lektury pracy wynika, że najważniejszym celem i osiągnięciem pracy jest optymalizacja eżektora, o której w ogóle nie wspomniano w tytule rozprawy.

W drugim rozdziale pracy przedstawiono wyniki zastosowania modelu równowagowego, odwołując się do publikacji pt. „Application range of the HEM approach for CO₂ expansion inside two-phase ejectors for supermarket refrigeration systems” w piśmie International Journal of Refrigeration. W publikacji, ze względu na tematykę czasopisma, model matematyczny został opisany bardzo skrótowo. W rozprawie doktorskiej model matematyczny powinien być przedstawiony w bardziej

wyczerpujący sposób, który umożliwiłby recenzentowi ocenę kompetencji Doktoranta w zakresie numerycznego modelowania przepływów. Jest to tym bardziej istotne, że wspomniana publikacja ma aż 7. autorów i trudno ocenić, jaki był wkład merytoryczny Doktoranta. Analizowany przepływ jest bardzo złożony. Jest to przepływ turbulentny z falą uderzeniową, w którym wymienić można bardzo długą listę źródeł błędów i niepewności, wpływających na jakość rozwiązania, poza metodyką wyznaczania własności termodynamicznych czynnika roboczego. W publikacji zaznaczono, że wlotowe i wylotowe warunki brzegowe sformułowano na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Czy wyniki tych badań obejmowały również parametry przepływu turbulentnego, poziom kinetycznej energii turbulencji oraz szybkości dysypacji. Jeśli nie, to czy przeprowadzono testy wrażliwości wyników obliczeń na poziom wlotowej turbulencji. W przepływie formuje się fala uderzeniowa, która oddziałuje z warstwą przyścienną. Można oczekiwać, że dokładność opisu przepływu przyściennego ma kluczowe znaczenie dla lokalizacji fali uderzeniowej. Niestety w pracy nie pokazano, jaki model warstwy przyściennej został wykorzystany. Czy był to model standardowej funkcji ściany, czy model dla niskiej wartości liczby Reynoldsa. W każdym przypadku należy zapewnić odpowiednią rozdzielczość siatki w sąsiedztwie ściany. Czy warunki te były spełnione w przeprowadzonych obliczeniach? W jaki sposób sformułowano warunki termiczne na ścianach dyszy, jaki warunek zastosowano na wylocie z dyszy? Czy warunek ten mógł wpływać na lokalizację fali uderzeniowej. Pytania dotyczące modelu matematycznego można mnożyć, ponieważ w pracy zabrakło wyczerpującej informacji na ten temat. Przedstawienie do oceny rozprawy doktorskiej w postaci cyklu publikacji w prestiżowych pismach jest jak najbardziej zasadne. Nie ma sensu opisywać w pracy wyników obliczeń, które zostały opublikowane i ocenione przez recenzentów publikacji. Jednak w pracy, której tematem jest model matematyczny, model ten powinien być precyzyjnie sformułowany, aby można było jednoznacznie ocenić kompetencje i „warsztat” Doktoranta. Najważniejszym wnioskiem sformułowanim w rozdziale pierwszym jest, że zaproponowany model prowadzi do zadowalających rezultatów jedynie dla parametrów zbliżonych do punktu krytycznego. Publikacja, do której Autor odwołuje się w rozdziale pierwszym ma kluczowe znaczenie dla rozprawy, ponieważ został tam zdefiniowany model matematyczny przepływu, stanowiący zasadniczy temat rozprawy. W celu oceny dokładności modelu równowagowego w pracy zestawiono wyniki obliczeń dla 24. przypadków testowych, dla szerokiego zakresu parametrów wlotowych. W wyniku obliczeń wyznaczono strumienie masy dla dyszy głównej i ssącej, błąd względny dla tych strumieni odniesiony do wyników eksperymentu oraz błąd względny dla stosunku strumieni masy w dyszy ssącej i głównej oraz błąd względny całkowitej sprawności eżektora. Należy przyznać, że uzyskane wyniki nie są łatwe do interpretacji. Okazało się, że w tych przypadkach, w których błąd oszacowania całkowitej sprawności eżektora, parametru najbardziej miarodajnego dla oceny jakości modelu, był najmniejszy, błędy dotyczące strumieni masy są bardzo duże. Przykładowo, w przypadku testowym nr 12, błąd dla sprawności eżektora wynosi 4%, natomiast strumień masy w dyszy głównej został wyznaczony z błędem ok. 60%, a ponadto w dyszy ssącej strumień masy był równy zero. Ponadto, jeśli błąd względny był określony zgodnie z zależnością (9) w publikacji, to błąd dla strumienia w dyszy ssącej nie powinien być równy 100%, a raczej zmierzać do $-\infty$. Dyskusja wyników przedstawionych w tabeli 2 jest dość pobieżna i nie do końca jasna. Przykładowo, omawiając przypadek nr 18 stwierdzono, że „w wybranych przypadkach niedoszacowany strumień masy w dyszy głównej nie wpływa na dokładność oszacowania stosunku strumienia masy wtórnego do pierwotnego χ ” (tłumaczenie recenzenta). Zdanie to nie jest jasne, ponieważ błąd oszacowania strumienia masy w dyszy głównej wynosi -28%, a błąd oszacowania χ wynosi ok. 22%, więc obydwa błędy są raczej duże. W następnym zdaniu stwierdzono natomiast, że „w tym przypadku błąd χ jest silnie związany z błędem oszacowania strumienia masy w dyszy głównej”. Te dwa stwierdzenia, występujące po sobie, wydają się sprzeczne. Kolejne zdanie, w którym stwierdza się, że „niepoprawnie oszacowany stosunek χ może silnie wpływać na oszacowanie ogólnej sprawności eżektora”, jest również dyskusyjne. Trudno zgodzić się z tą opinią w świetle wyników przedstawionych w Tabeli 2. W niektórych przypadkach zgodność oszacowania strumieni mas jest bardzo dobra, a błąd oszacowania ogólnej sprawności eżektora jest ponad 30%, i na odwrót, przy

bardzo dużych błędach oszacowania strumieni mas, gdy w dyszy ssącej nie ma przepływu, błąd dla ogólnej sprawności eżektora jest poniżej 10%. Dyskusyjne jest również stwierdzenie, że niedoszacowany spadek ciśnienia jest przyczyną zbyt małej wartości strumienia wtórnego. Czy można mówić o źle oszacowanym spadku ciśnienia, gdy różnica ciśnień na wlocie i wylocie eżektora została ustalona poprzez warunki brzegowe? Rozbieżność uzyskanych wyników dla różnych kryteriów oceny dokładności obliczeń powinna być przedmiotem dyskusji w trakcie publicznej obrony pracy doktorskiej.

Rozdział drugi poświęcono zagadnieniu optymalizacji geometrii komory mieszania eżektora, odwołując się do artykułu pt. „CFD-based optimisation of a CO₂ two-phase ejector mixing section”, opublikowanego w piśmie Applied Thermal Engineering, przez 8. osobowy zespół. W publikacji pokazano, że optymalizacja geometrii komory mieszania, polegająca głównie na wydłużeniu sekcji mieszania o stałej średnicy, prowadzi do poprawy sprawności w szerokim zakresie parametrów wlotowych eżektora. Wynik optymalizacji geometrii sekcji mieszania ma niewątpliwie wartość praktyczną. Bardzo interesująca byłaby jednak dyskusja, dlaczego wydłużenie sekcji mieszania wpływa na poprawę sprawności eżektora. W jaki sposób zmienia się struktura przepływu w przypadku zoptymalizowanym w stosunku do geometrii wyjściowej? W publikacji tej po raz pierwszy pokazano, poza parametrami globalnymi, rozkłady parametrów przepływu wewnątrz eżektora, porównując model dwu- i trójwymiarowy, uznając, że różnice są pomijalne, stąd dla celów optymalizacji zastosowano model dwuwymiarowy. Bardziej interesujące byłoby jednak porównanie przepływów przed i po optymalizacji, szczególnie w przypadku obliczeń trójwymiarowych. Istotnym elementem tej części pracy są zastosowane algorytmy optymalizacyjne. Niestety, trudno ocenić, jaka była rola Doktoranta, czy był twórcą oprogramowania, czy jedynie jego użytkownikiem.

W kolejnym rozdziale pokazano wyniki optymalizacji całego eżektora, uwzględniając parametry dyszy głównej i ssącej, odwołując się do artykułu pt.: „Shape optimisation of a two-phase ejector for CO₂ refrigeration systems”, opublikowanego w piśmie International Journal of Refrigeration. Optymalizacja geometrii eżektora doprowadziła do poprawy sprawności kilku procent w zależności od parametrów wlotowych. W publikacji pokazano interesujące wyniki obliczeń w obszarze komory mieszania. Widoczne jest, że przed komorą mieszania powstaje strefa recyrkulacji i oderwanie warstwy przyściennej. Wynik ten wskazuje na istotność poprawności modelowania przepływu przyściennego, która determinuje poprawność określenia miejsca oderwania, a co za tym idzie wielkości oraz kształtu strefy recyrkulacji, co podkreślono przy dyskusji modelu matematycznego sformułowanego w rozdziale pierwszym rozprawy. W przepływach z oderwaniem warstwy przyściennej, przy dużej wartości liczby Reynoldsa, można oczekiwać, że strefa recyrkulacji ma charakter niestacjonarny. Nasuwa się pytanie, czy obliczenia prowadzono wyłącznie, zakładając stacjonarny charakter przepływu, czy może również przeprowadzono testy dla warunków niestacjonarnych. W dalszej części pokazano rozkład intensywności turbulencji w tym obszarze, przed i po optymalizacji. Szkoda, że nie pokazano również strefy recyrkulacji w obydwu przypadkach. Poziom turbulencji znormalizowano przez wartości występujące na wlocie do obszaru obliczeniowego, pokazanego na rysunku. Interesująca byłaby informacja, jaki jest poziom turbulencji w odniesieniu do skali prędkości w przepływie.

Ostatni rozdział poświęcono porównaniu wyników uzyskanych przy pomocy modelu równowagowego oraz modelu nierównowagowego, wprowadzając czas relaksacji równowagi termodynamicznej. Model ten jednak nie przyniósł istotnej poprawy wyników, dla parametrów odległych od punktu krytycznego. Można w tym miejscu powrócić do pytania, czy metodyka określania parametrów krytycznych jest najważniejszym źródłem błędów w omawianym modelu matematycznym przepływu dwufazowego.

Zakres przedstawionych w rozprawie badań jest bardzo szeroki, a wyniki bardzo wartościowe i ważne dla zastosowań dwutlenku węgla w systemach chłodniczych, niezwykle istotnych dla ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Potwierdzeniem wysokiego poziomu zaprezentowanych badań są publikacje w prestiżowych czasopismach. Przy tak poważnym dorobku publikacyjnym prezentacja rozprawy doktorskiej w postaci cyklu publikacji jest całkowicie zasadna. Jednak cykl publikacji powinien być uzupełniony wyczerpującym opisem modelu matematycznego, który

pozwolilby recenzentowi na jednoznaczna ocenę kompetencji oraz wkładu merytorycznego Doktoranta, szczególnie, gdy publikacje mają wielu autorów. Pytania i wątpliwości przedstawione powyżej, nie kwestionują poziomu naukowego rozprawy, a wynikają ze sposobu jej prezentacji. Pytania, te powinny być przedmiotem dyskusji w trakcie publicznej obrony, ze szczególnym naciskiem na precyzyjne określenie merytorycznego wkładu Doktoranta.

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

