Michał Palacz

Mathematical modelling of transcritical fluid flow inside a two-phase ejector for refrigeration systems

Ph.D. Thesis

Faculty of Energy and Environmental Engineering
Silesian University of Technology
Gliwice, Poland, 2017

Streszczenie

W związku z zaostrzającymi się normami dotyczącymi możliwości stosowania syntetycznych czynników chłodniczych o wysokim wskaźniku GWP (ang. global warming potential) naturalne czynniki chłodnicze przeżywają właśnie swój renesans. Jednym z najbardziej obiecujących naturalnych czynników chłodniczych jest dwutlenek węgla. Dzięki swoim doskonałym właściwościom termodynamicznym oraz niskim GWP, które dla CO_2 z definicji jest równe 1, ten czynnik jest coraz częściej preferowany przez końcowych odbiorców instalacji chłodniczych w Europie. Niestety stosunkowo niska temperatura w punkcie krytycznym CO_2 powoduje, że dla wyższych temperatur otoczenia system na CO_2 pracuje w warunkach nadkrytycznych. W konsekwencji straty dławienia dla takich systemów znacząca obniżają wskaźnik efektywności energetycznej (ang. COP) takich systemów. W celu ograniczenia strat dławienia w najnowszych instalacji chłodniczych na dwutlenek węgla instaluje się strumienice. Dzięki tej modyfikacji część pracy rozprężania jest odzyskana, co wpływa na zmniejszenie zużycia energii związanej z napędem sprężarek. Co za tym idzie, COP dla takich systemów jest na wysokim poziomie nawet dla letnich temperatur otoczenia w, np. południowych Włoszech. Należy tutaj zaznaczyć, że COP systemu może być poprawione jedynie wtedy gdy zainstalowana strumienica jest odpowiednio zaprojektowania. Z tego powodu coraz większa uwaga środowiska związanego z chłodnictwem jest skupiona na opracowaniu efektywnych narzędzi obliczeniowych do projektowania oraz analizy ejectorów na CO_2. W celu zaproponowania takich formułowano cztery cele, które zostały zrealizowane w ramach tej pracy.

Celem pierwszego zadania było wyznaczenie pola zastosowania jednorodnego równowagowego modelu przepływu dwufazowego (ang. HEM). Model ten został zaimplementowany do modelu CFD, który został opracowany do symulowania przepływu dwutlenku węgla wewnątrz strumienicy. W celu zapewnienia spójnej procedury obliczeniowej dla zmiennych parametrów pracy strumienicy jak i dla różnych kształtu urządzenia, opracowano platformę obliczeniową zwaną *ejectorPL*. Ten program łączy ze sobą proces generacji siatki numerycznej z solverem i w końcu post processorem. Następnie *ejectorPL* został użyty do wspomnianej analizy dokładności sformułowania HEM. Jakość modelu była oceniana na podstawie dokładności w odtworzeniu strumienia napędowego w strumienicy. Strumień ten został zmierzony podczas intensywnych badań eksperymentalnych eżektorów realizowanych w laboratorium SINTEF Energy Research, Trondheim, Norwegia. W wyniku porównania zmie-

rzonych oraz obliczonych strumieni oszacowano zakres stosowalności modelu HEM. Dokładny opis metodologii zastosowanej do tego porównania oraz szczegółowy opis wyników tej analizy został opublikowany w anglojęzycznym czasopiśmie pt. International Journal of Refrigeration.

W kolejnym kroku opracowana platforma obliczeniowa została sprzęgnięta z dwoma algorytmami optymalizacyjnymi, tj. algorytmem genetycznym (ang. GA) i algorytmem ewolucyjnym (ang. EA). Na tymi etapie pracy optymalizacji została poddana geometria komory mieszania strumienicy. Zaproponowane funkcje celu miały maksymalizować sprawność urządzenia. Warto w tym miejscu dodać, że funkcja celu została sformułowana w sposób, który pozwala na rozważenie dowolnej liczby punktów pracy strumienicy podczas optymalizacji. Pierwsza z przetestowanych funkcji celu brała pod uwagę dwa punkty pracy. Po przeprowadzeniu optymalizacji dla tego sformułowania, zoptymalizowane strumienice zostały poddane procedurze weryfikacyjnej. Oceniono sprawność tych urządzeni dla 7 punktów pracy, które nie były uwzględnione w funkcji celu użytej do optymalizacji kształtu. Następnie została zaproponowana nowa funkcja celu, dla której użyto 8 punktów pracy było używane podczas optymalizacji. Wypracowana w ten sposób metodologia oraz procedury mogą być efektywnie stosowane do projektowania strumienic. Wyniki oraz dokładny opis sposobu optymalizacji zostały opublikowane w czasopiśmie pt. Applied Thermal Engineering.

W kolejnym etapie pracy podjęto się optymalizacji kształtu mieszalnika strumienicy przy równoczesnej optymalizacji kształtu dyszy napędowej i ssawnej urządzenia. W rezultacie liczba optymalizowanych parametrów uległa podwojeniu w stosunku do optymalizacji kształtu samego mieszalnika. Analogicznie do optymalizacji kształtu komory mieszania funkcją celu była maksymalizacja sprawności strumienicy. W przypadku równoczesnej optymalizacji dysz i mieszalnika zanotowano znaczące przyrosty sprawności urządzenia. Dla każdego z rozważanych przypadków sprawność strumienicy była wyższa niż 30%. Podobne rezultaty zostały osiągnięte na etapie weryfikowania wyników optymalizacji poprzez obliczenie sprawności strumienicy dla punktów pracy nieuwzględnianych w funkcji celu. Uzyskane wyniki zostały szczegółowo opisane w czasopiśmie International Journal of Refrigeration.

W ostatniej części pracy podjęto próby poprawienia dokładności modelu obliczeniowego używanego do symulacji przepływu dwufazowego w strumienicy. W konsekwencji HEM został zastąpiony modelem relaksacyjnym (ang. HRM). Ten model częściowo uwzględnia wpływ metastabilności płynu na wyniki obliczeń. Elementy nierównowagowe w tym modelu są uwzględnione poprzez tzw. czas relaksacji. HRM został zaimplementowany do narzędzia *ejectorPL*, a następnie wykonano podobną analizę dokładności modelu jak dla HEM. Wyniki tej analizy pokazały, że błąd pomiędzy wynikami obliczeniowymi a tymi wyznaczonymi eksperymentalnie jest mniejszy dla HRM, w szczególności dla warunków podkrytycznych. Porównanie między HEM i HRM zostało niedawno opublikowane w czasopiśmie pt. Applied Thermal Engineering.