

PH.D. THESIS

Non-equilibrium two-phase model of transcritical CO₂ flow for ejector design in state-of-the-art refrigeration systems

Author:
Jakub BODYS

Supervisors:
Jacek SMOLKA
Krzysztof BANASIAK
Michał PALACZ



**Silesian
University
of Technology**

Scientific discipline: Environmental Engineering, Mining and Energy

Gliwice, Poland, 2021

Author:

Jakub Bodys, M.Sc.
Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Department of Heat Engineering
Konarskiego 22, 44-100 Gliwice, Poland
e-mail: jakub.bodys@polsl.pl

Supervisor:

Jacek Smółka, Prof.
Full-time Professor at the Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Department of Heat Engineering
Konarskiego 22, 44-100 Gliwice, Poland
e-mail: jacek.smolka@polsl.pl

Co-Supervisor:

Krzysztof Banasiak, Ph.D.
Associate Professor at the Norwegian University of Science and Technology
Department of Energy and Process Engineering
Høgskoleringen 1, 7491 Trondheim, Norway
e-mail: krzysztof.banasiak@ntnu.no

Co-Supervisor:

Michał Palacz, Ph.D.
Researcher at the Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Department of Heat Engineering
Konarskiego 22, 44-100 Gliwice, Poland
e-mail: michal.palacz@polsl.pl

Polish title:

Nierównowagowy dwufazowy model transkrytycznego przepływu CO₂ do projektowania strumieni w najnowszych systemach chłodniczych

©Copyright 2021 by Jakub Bodys

Streszczenie

Dynamiczny wzrost udziału naturalnych czynników roboczych stosowanych w technice chłodniczej i grzewczej początkowo wynikał głównie z aspektów ekologicznych zawartych w regulacjach prawnych - począwszy od Protokołu Montrealskiego z 1987 roku aż do obecnej ratyfikacji europejskiego tzw. rozporządzenia F-Gazowego. Grupa naturalnych czynników roboczych zawiera takie substancje jak woda, powietrze, amoniak, dwutlenek węgla (CO_2) oraz węglowodory. CO_2 można opisać jako najbardziej obiecujące rozwiązanie, biorąc pod uwagę duże systemy, w których implementacja i eksploatacja odbywa się w otoczeniu ludzi, gdyż charakterystyka tego czynnika zapewnia korzyści w zakresie bezpieczeństwa ekologicznego i technicznego. Po pierwsze, poprzez niewielki wpływ na zubożenie warstwy ozonowej i globalne ocieplenie. Po drugie ze względu na nietoksyczność i niepalność. W związku z tym w ostatniej dekadzie rozwoju technologii chłodniczej i grzewczej opartej na CO_2 obserwuje się znaczne wysiłki w działaniach badawczych i handlowych. Problemy techniczne związane są z niską temperaturą punktu krytycznego, a zatem z wysokimi stratami dławienia. Niemniej jednak ta kwestia została rozwiązana zarówno w skali laboratoryjnej, jak i przemysłowej. Kluczową rolę można przypisać dwufazowej strumienicy, która jest głównym tematem niniejszej pracy, służącej do odzyskiwania pracy rozprężania i w konsekwencji redukcji zużycia energii przez sprężarkę jak również funkcjonalności pompy. Ścieżkę rozwoju rynku układów z CO_2 można wskazać od 2000 roku wraz z pierwszym lokalem komercyjnym do 16 000 obiektów w 2018 i 29 000 obiektów w 2020 w Europie. Mniejszą liczbę zainstalowanych jednostek odnotowano w Ameryce Północnej i Japonii, jednak zauważalny jest podobny procentowy przyrost tych układów. Rosnąca liczba instalacji pozwoliła odkryć nowe obszary eksploatacji, takie jak małe dyskonty spożywcze i aplikacje mobilne. Ponadto rozszerzony został zakres zastosowań CO_2 o cieplejsze strefy klimatyczne oraz skorelowane z nimi temperatury otoczenia i obciążenia chłodnicze.

Działania badawcze zrealizowane w ramach pracy doktorskiej można podzielić na dwie części: symulacje numeryczne oraz badania eksperymentalne prototypu strumienicy następnej generacji. Wspomniane rozszerzenie możliwych zastosowań układów dwutlenkowych było częścią motywacji do opracowania modelu numerycznego eżektora pracującego w klimacie umiarkowanym i chłodnym. Pierwsze próby symulacji strumienicy pracującej w podkrytycznych warunkach termodynamicznych (poniżej 73 bar i $31,1^\circ\text{C}$) charakteryzowały się niezadowalającym niedoszacowaniem strumienia masowego przepływającego przez dyszę napędową i w efekcie dużą rozbieżnością symulowanego strumienia ssawnego. Model numeryczny opracowany w tej pracy

zawiera dodatkowe równanie opisujące nierównowagową przemianę fazową w dyszy napędowej. Dodatkowo intensywność zmiany fazy (wrzenia) została wykalibrowana na podstawie danych doświadczalnych masowego natężenia przepływu. Otrzymany błąd względny obliczonego strumienia dyszy napędowej został oceniony jako zadowalający, jednak dalszy rozwój modelu był niezbędny w celu dokładnego określenia strumienia ssawnego. Ten etap rozwoju modelu został opisany w artykule opublikowanym w czasopiśmie *International Journal of Refrigeration*. Dalsze prace obejmowały analizę wpływu kawitacji i modelu turbulencji. Dodatkowo, dedykowane dane walidacyjne uzyskano z stanowiska testowego zlokalizowanego w laboratorium Politechniki Śląskiej. Instalacja wykorzystująca dwutlenek jako czynnik roboczy została zaprojektowana na moc chłodniczą na poziomie 50 kW oraz dedykowana jest testom strumienic dzięki dodatkowym punktom pomiarowym. W modelu założono występowanie zjawiska kawitacji w sekcji mieszania, gdzie przewidziano potencjalny jej wpływ na wartości strumienia ssawnego. Niestety efekt działania tego mechanizmu został oceniony jako znikomy z punktu widzenia wartości strumienia ssawnego. Z drugiej strony wyniki analizy wpływu modeli turbulencji dały zadowalającą dokładność przy zachowaniu niskiego kosztu obliczeniowego symulacji strumienicy. Wspomniany wcześniej odpowiedni poziom zasobów wymaganych do symulacji strumienicy, a zatem procesu projektowania, był jednym z celów projektu. Ostateczna wersja modelu strumienicy została opublikowana w czasopiśmie *Applied Thermal Engineering*.

W drugiej części pracy skoncentrowano się na nowym typie strumienicy i opracowaniu jej prototypu na podstawie wstępnych symulacji, a następnie badań eksperymentalnych. Charakterystyczną cechą prototypowej strumienicy był kanał obejściowy króćca ssawnego. To rozwiązanie zostało już analizowane i przedstawione w literaturze dla strumienic z innymi czynnikami roboczymi niż CO₂. Te teoretyczne analizy wykazały duży potencjał tego rozwiązania, jednak nie przeprowadzono testów eksperymentalnych. Stąd zrealizowano ocenę zastosowania kanału obejściowego dyszy ssawnej dla strumienicy CO₂, co zostało zrealizowane na drodze symulacji numerycznych, wykazując wysoki przyrost zasysanego strumienia masowego o nawet 37% w stosunku do konstrukcji standardowej. W ramach symulacji 2-W analizowany był wpływ geometrii kanału obejściowego, położenia i warunków pracy, w szczególności wzrostu ciśnienia pomiędzy portem ssawnym a wylotem. Opisane badania wstępne zostały opublikowane w czasopiśmie *International Journal of Refrigeration*. Wnioski ze wstępnej analizy zostały wykorzystane w projektowaniu prototypu do badań eksperymentalnych. Wyprodukowane urządzenie przeznaczone było do instalacji o mocy chłodniczej ok. 50 kW. W wyniku badań eksperymentalnych uzyskano mapy wydajności oraz określono wpływ warunków pracy i stopnia otwarcia przewodu obejściowego na sprawność prototypu strumienicy. Poprawa wydajności strumienicy na poziomie 35% zapewniła bardziej równomierną pracę strumienicy w szerokim zakresie przyrostów ciśnień pomiędzy portem ssawnym a wylotem. Ponadto symulacje testowanego urządzenia dostarczyły informacji dotyczących charakterystyki przepływu w komorach

ssawnych i ich możliwych modyfikacji w celu dalszej poprawy wydajności. Warto też dodać, że zaproponowana strategia sterowania otwarciem kanału obejściowego może być łatwo zaimplementowana w układach automatyki i kontroli już pracujących instalacji CO₂. Ponadto prototyp wykorzystuje tę samą liczbę portów jak standardowe urządzenie - istnieje więc możliwość szybkiej wymiany bez konieczności modyfikacji instalacji. Analiza strumienicy z kanałem obejściowym została opublikowana w czasopiśmie *Applied Thermal Engineering* z rekomendacją dalszego rozwoju tego obiecującego rozwiązania.