

Recenzja

Pracy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Patryka Brenka nt.

„Wpływ zamarzania cieczy grzewczej na regazyfikację cieczy kriogenicznych”

Recenzja została wykonana na zlecenie Rektora Politechniki Wrocławskiej zgodnie z uchwałą RDN Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka nr 887/37/RDND08/2021-2024 z dnia 13.12.2023 r.

Opiniowana praca dotyczy zagadnień związanych z gazyfikacją gazu kriogenicznego ogrzewanego wodą w płytowych i płaszczowo-rurowych wymiennikach ciepła. Podjęty w pracy temat z zakresu wykorzystania metod numerycznych w modelowaniu złożonych procesów wymiany ciepła, zastosowany w odniesieniu do metanu i wody, może mieć szersze znaczenie użytkowe np. w procesach akumulacji chłodu w blokach lodowych, czy produkcji lodu w tzw. kombajnach lodowych.

Praca dotyczyła badań numerycznych zmierzających do przygotowania numerycznego modelu procesu odparowania cieczy kriogenicznej i vs. proces krzepnięcia cieczy grzewczej. Autor wykorzystał metodę sprzężonej wymiany ciepła pomiędzy obszarem płynu i ciała stałego, w pakiecie numerycznym OpenFoam, do zamodelowania procesu wrzenia metanu i krzepnięcia wody, będącej źródłem ciepła w procesie regazyfikacji. Istotne założenia dotyczące przyjętego modelu numerycznego obejmują:

- wykorzystanie metody entalpia-porowatość do modelowania procesu krzepnięcia wody,
- hipotetyczne zastąpienie procesu wrzenia cieczy procesem przewodzenia ciepła w ciele stałym.
- założenie przypadku wrzenia błonowego po stronie wrzącego czynnika.

Znaczenie użytkowe podjętego tematu odnosi się do intensyfikacji oraz poprawy efektywności energetycznej i bezpieczeństwa przebiegu procesów wymiany ciepła w parowaczach ciekłych, w których ciepło konieczne do odparowania czynnika pobierane jest w procesie ochładzania i krzepnięcia cieczy grzewczej.

Należy podkreślić, że podjęty temat pracy odnosi się nie tylko do regazyfikacji cieczy kriogenicznych, jest aktualny i złożony, ma istotne znaczenie praktyczne oraz może stanowić temat rozprawy doktorskiej.

Przedłożona praca doktorska ma przede wszystkim charakter numeryczny, chociaż zawiera również pewne zagadnienia pomiarowe.

Pomijając aspekty ogólne, praca skonstruowana jest z trzech zasadniczych części obejmujących:

- modelowanie procesu krzepnięcia wody w płytowych parowaczach metanu,
- badania numeryczne procesu wymiany ciepła pomiędzy krzepnącą wodą i parującym metanem w płaszczowo-rurowych wymiennikach ciepła,
- przygotowanie metodologii badań numerycznych, wraz z jej weryfikacją doświadczalną, pozwalającej analizować rzeczywisty przebieg procesu parowania cieczy kriogenicznej i jego wpływ na zjawisko krzepnięcia wody w wymienniku płaszczowo-rurowym, wraz z analizą stanów krytycznych.

Przyjęty układ pracy odpowiada ewolucji badanego zagadnienia.

Pierwszy etap prac pozwolił Doktorantowi na przygotowanie i sprawdzenie przydatności, jak również możliwości obliczeniowych, skojarzonych metod: entalpia-porowatość oraz sprzężonej metody wymiany ciepła pomiędzy obszarem płynu i ciała stałego do modelowania procesu krzepnięcia wody w płytowych parowaczach metanu. Na tym etapie prac wytypowano efektywną gęstość siatki modelu, przeprowadzono jego walidację na podstawie uproszczonego modelu analitycznego oraz przeanalizowano wpływ warunków cieplno-przepływowych na intensywność krzepnięcia wody.

Następny etap prac koncentrował się na modelowaniu rozważanego procesu wymiany ciepła metan-woda dla uproszczonego modelu płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła. Ta część badań numerycznych pozwoliła określić wpływ parametrów geometrycznych wymiennika (podziałki rozstawienia rur, owalność rur) oraz strumienia przepływu wody na przewężenie przepływu wody w wyniku oblodzenia rur i uzyskiwane wydajności cieplne. Ten etap prac umożliwił wyznaczenie zalecanych wybranych parametrów geometrycznych wymiennika w kontekście minimalizacji oporów przepływu i maksymalizacji strumienia przekazywanego ciepła.

Trzecia część pracy doktorskiej jest rozwinięciem dwóch pierwszych jej etapów. Obejmuje rozszerzenie sprzężonej metody wymiany ciepła pomiędzy obszarem płynu i ciała stałego o możliwości symulacji zarówno procesu wrzenia czynnika chłodniczego, jak również jego przegrzewania. Na tym etapie prac Doktorant przygotował model obliczeniowy umożliwiający analizowanie zarówno stopnia odparowania kriogenu jak również propagacji krzepnięcia wody wzdłuż długości wymiennika płaszczowo-rurowego. W tej części pracy przedstawiono wyselekcjonowane badania eksperymentalne weryfikujące model numeryczny

i odnoszące się do różnych warunków realizacji eksperymentu po stronie wody oraz czynnika jakim był azot.

Zakres prowadzonych badań numerycznych, ich weryfikacja analityczna lub doświadczalna jak również ocena jakościowa uzyskiwanych wyników obliczeń pozwala stwierdzić, że postawione w pracy tezy zostały potwierdzone.

Osiągnięcia Doktoranta

Za osiągnięcia doktoranta należy uznać:

- Zaproponowanie uproszczonego modelu złożonego procesu wymiany ciepła pomiędzy cieczą wrzącą i zamarzającą, opartego między innymi o redukcję opisu procesu wrzenia cieczy do procesu przewodzenia w ciele stałym.
- Określenie granicznych wartości liczb Reynoldsa cieczy chłodzonej, poniżej której proces krzepnięcia cieczy obniża wydajność cieplną wymiennika płytowego.
- Przygotowanie metodologii rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych doboru parametrów geometrycznych płaszczowo-rurowych parowaczy cieczy kriogenicznych wykorzystujących ciepło zamarzania czynnika grzewczego.
- Przygotowanie metodologii modelowania procesów wymiany ciepła w rzeczywistym płaszczu-rurowym parowaczu cieczy kriogenicznych.

Inne uwagi dotyczące pracy doktorskiej

Lektura pracy doktorskiej Pana Arkadiusza Brenka nasuwa następujące spostrzeżenia o charakterze dyskusyjnym:

- W moim odczuciu Autor przyjął niestandardowy układ pracy doktorskiej, który spowodował brak właściwego dla tego typu prac przeglądu literatury np. dotyczących numerycznych metod rozwiązywania podobnych zagadnień cieplnych. Utrudnia to ocenę aspektu nowości poruszanych zagadnień na tle innych publikacji
- Podstawą przyjętej przez Autora procedury modelowania procesu wymiany ciepła po stronie wrzącego czynnika jest redukcja procesu konwekcji w warunkach wrzenia do procesu przewodzenia ciepła w ciele stałym. W przypadku wyznaczania zastępczej wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla umownej warstwy „stałego” kriogenu konieczne jest przyjęcie jej grubości. Jak ta grubość była wyznaczana- na przykład równanie (3.16), tabela 4.1? Dlaczego w

płytowym i płaszczowo-rurowym wymienniku ciepła grubość zastępczej warstwy ciała stałego dla metanu jest różna (tabela 4.1 i tabela 5.1)

- W badaniach dotyczących płytowych wymienników ciepła obliczenia realizowano w zakresie liczb $Re_{H_2O} < 2000$, co dla rozważanego kanału płytowego wymiennika ciepła odpowiadało prędkościom przepływu niższym niż 0.16m/s. Czy istotnie w warunkach rzeczywistych proces odparowania metanu prowadzi się dla tak niskich strumieni przepływu wody, dla których dochodzi do jej krzepnięcia na powierzchni wymiany ciepła?
- Dlaczego nie zastosowano warunku symetrii w przypadku modelu wymiennika płytowego (rys. 4.4)?
- Dlaczego właściwości fizyczne wody (rozdział 3.3.2), niezależnie od zakresu temperatur, określane były jedną postacią funkcji, co nie zapewniało dobrej zgodności rzeczywistymi wartościami właściwości fizycznych, szczególnie na granicy przejścia fazowego?
- W walidacji modelu przedstawionej w rozdziale 4, Autor wskazuje zależności kryterialne obliczania współczynnika przejmowania ciepła po stronie wody w szerokim zakresie liczb Reynoldsa, znacznie wykraczającym poza rozważany eksperyment (np. obszar przepływu burzliwego). Dlaczego? Ponadto Autor pisze, że w zakresie przejściowym wartości współczynników przejmowania ciepła dla wody wyznaczone były przez interpolację. Tą niedogodność można wyeliminować stosując np. zależność Gnielińskiego, prawdziwą dla liczb $Re > 2300$.
- Cytując zależności kryterialne wskazane jest podanie autorów cytowanych zależności (np. strona 61, wzory 4.19, 4.20).
- Jaki wpływ na wyniki obliczeń modelu analitycznego miałyby wyznaczenie lokalnych wartości współczynników przejmowania ciepła dla wody z uwzględnieniem zmiany wymiaru charakterystycznego D_h , wynikającego z przewężenia przekroju przepływu tworzącą się warstwą lodu.
- Strona 77, można doprecyzować o jaką prędkość (0.003;0.02m/s) wlotową chodzi w przypadku wymiennika płaszczowo-rurowego.
- W rozdziale 7 brakuje dokładności przyrządów pomiarowych oraz wyników rachunku błędów systematycznych wielkości mierzonych.

Uwagi edytorskie: Pod względem edytorskim praca napisana jest starannie, jej układ jest przejrzysty oraz logiczny, a terminologia używana w pracy jest poprawna i zrozumiała. W trakcie czytania pracy zauważono pewne drobne niedoskonałości, z których najważniejsze to:

- Brak kompletnego wykazu oznaczeń oraz jednostek przypisanych do parametrów fizycznych.
- Używanie niestandardowych oznaczeń lub określeń np. dotyczących właściwego ciepła parowania (C_{vap}) czy współczynnika przenikania ciepła (OHTC), który też określany jest niestandardowo jako całkowity współczynnik wymiany ciepła. Podobnie, tak jak to jest w języku angielskim, Autor używa pojęcia współczynnika wymiany ciepła vs. współczynnika przejmowania czy wnikania ciepła, czy szorstkość vs chropowatość.
- Stosowanie nieprecyzyjnych sformułowań, np. dotyczącego „dobrego przewodzenia cieplnego stali nierdzewnej” (strona 30).
- W równaniu 3.22 pod znakiem całki brakuje nawiasu. W kontekście równania 3.24, równanie 3.23 jest zbędne.
- Strona 54, brak precyzji w sformułowaniu nt. wpływu liczby Re wody na czas obliczeń, który jest raczej niejednoznaczny.
- Podpis pod rysunkiem 5.6 zawiera błąd ($s=10\text{mm}$). Podpis pod rysunkiem 5.7 jest błędny.
- Niefortunne sformułowanie powyżej wzoru 5.3 : „w ostatnim rzędzie rurek, przez które przepływa woda”. Woda omywa (opływa rurki).
- W zależności 7.7 jest błąd w ilorazie gęstości.

Podsumowanie

Reasumując opinię nt. rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Arkadiusza Patryka Brenka uważam, że posiada ona istotną wartość dla praktyki inżynierskiej oraz wnosi wkład merytoryczny w metodologię analizowania równoległych procesów wrzenia i krzepnięcia zachodzących w ciekzowych parowaczach płynów kriogenicznych. Przedstawione przeze mnie powyżej uwagi mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają osiągnięć Doktoranta.

Mgr inż. Arkadiusz Brenk wykazał się umiejętnością zdefiniowania pewnej hipotezy badawczej oraz wykorzystania jej w szerokim spektrum problemów projektowych występujących w wymiennikach ciepła. Doktorant swobodnie korzysta z dostępnych narzędzi numerycznych oraz umiejętnie wykorzystuje wiedzę z zakresu wymiany ciepła konieczną do uproszczenia modelu obliczeniowego, jego walidacji, czy rozszerzenia możliwości badawczych. Uważam, że przedłożona rozprawa doktorska dokumentuje samodzielność Pana

mgr inż. Arkadiusza Patryka Brenka w rozwiązaniu problemów badawczych oraz stanowi wkład w rozwój wiedzy z dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka i spełnia wymagania formalne określone przez stosowne Ustawy i Rozporządzenia (Ustawa z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017r., poz. 1789 oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim Dz. U. z 30 stycznia 2018 r., poz. 261).

Uważam, że przedłożona rozprawa doktorska może stanowić podstawę nadania mgr inż. Arkadiuszowi Patrykowi Brenkowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych po jej publicznej obronie. Biorąc powyższe pod uwagę stawiam wniosek o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Beata Niezgoda-Żelasko