

Prof. dr hab. inż. Stanisław Witczak
Katedra Inżynierii Procesowej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska

Opole, 28.09.2018 r.

OPINIA

o pracy doktorskiej mgr inż. Bianki Jakubowskiej pt. „Modelowanie procesu wrzenia i kondensacji w przepływie w rozszerzonym zakresie ciśnień zredukowanych”

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej

1. Aktualność wyboru tematu

Przedmiotem pracy są procesy ciepłno-przepływowe zachodzące podczas wrzenia i kondensacji w przepływie w kanałach i minikanalach, ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk towarzyszących przemianom fazowym proekologicznych czynników chłodniczych.

Mając na uwadze stosunkowo małą liczbę opracowań dotyczących problematyki wykorzystania tego typu czynników w zastosowaniu do różnych układów chłodniczych i klimatyzacyjnych, celowym jest rozwijanie tej problematyki.

W tym zakresie na szczególną uwagę zasługują prace dotyczące opisu metod obliczeniowych niezbędnych dla prawidłowego projektowania różnych konstrukcji parowników i skraplaczy rurowych z wykorzystaniem zarówno kanałów konwencjonalnych, jak i minikanalów. Szczególnie te ostatnie rozwiązania, związane z miniaturyzacją obiektów technicznych, stanowią istotne wyzwanie wymagające konieczności poszerzenia wiedzy o hydrodynamice oraz warunkach wymiany ciepła w kanałach o małej średnicy, coraz częściej wykorzystywanych w różnych gałęziach przemysłu.

Jakkolwiek w literaturze światowej istnieje wiele informacji odnośnie opisu metod obliczeniowych współczynnika przejmowania ciepła oraz oporów przepływu podczas przemian fazowych w tego typu kanałach, szeroko cytowanych także przez Doktorantkę, to cechują się one dużą rozbieżnością, zarówno pod kątem postaci opracowanych modeli, jak i zakresem ich ważności i dokładności obliczeń. W tej grupie prac jedynie niewiele z nich dotyczy czynników proekologicznych.

W tym świetle, podjęcie przez mgr inż. Biankę Jakubowską badań i analiz, dotyczących modelowania procesu wrzenia i kondensacji w przepływie w rozszerzonym zakresie ciśnień zredukowanych, należy uznać za działanie w pełni celowe i uzasadnione zarówno z naukowego jak i utylitarnego punktu widzenia.

Praca ta, prowadzona pod kierunkiem promotora prof. dr. hab. inż. Dariusza Mikieliewicza oraz promotora pomocniczego dr. hab. inż. Jana Wajsa, w swym zakresie stanowi oryginalne opracowanie wnoszące nowe elementy naukowe do wiedzy odnośnie opisu procesu wrzenia i kondensacji proekologicznych czynników chłodniczych podczas ich przepływu w kanałach konwencjonalnych i minikanalach.

2. Charakterystyka pracy

Opiniowana praca zawarta na 192 stronach składa się z 12 rozdziałów uwzględniających w swym zakresie odpowiednio: część opisową dotyczącą charakterystyki procesu wrzenia przy przepływie, sformułowanie celu i zakresu pracy, część eksperymentalno-modelową ujmującą zarówno metodykę badań oraz opis uzyskanych wyników, specyfikację bazy literaturowych danych doświadczalnych przyjętych do analizy wraz z przeprowadzoną na ich podstawie własną modyfikacją modelu obliczeniowego dla przepływów dwufazowych w kanałach o różnej średnicy, podsumowanie i wnioski końcowe oraz spis literatury zawierający 215 pozycji, z czego większość to opracowania z ostatnich kilku lat. W tym zakresie Doktorantka

przytacza także 4 własne pozycje współautorskie, które są cytowane w pracy. Całość opracowania została uzupełniona szczegółowym wykazem oznaczeń, streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz zestawieniem przytaczanych w pracy tabel i rysunków.

W części opisowej pracy (rozdziały 2-6) Doktorantka dokonała obszernego przeglądu literatury odnośnie opisu parametrów charakterystycznych dla wrzenia przy przepływie w kanałach o różnej geometrii z jednoczesnym wskazaniem kryteriów przejścia pomiędzy kanałami konwencjonalnymi i kanałami o małej średnicy. W tym zakresie zostały szczegółowo opisane metody obliczania oporów przepływu dwufazowego (w warunkach przepływu adiabatycznego i z wymianą ciepła) oraz metody obliczeniowe współczynników przejmowania ciepła. W przeglądzie uwzględniono także charakterystykę wybranych modeli obliczeniowych współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia w objętości, które stanowią lub mogą stanowić części składowe modeli wykorzystywanych dla warunków wrzenia pęcherzykowego przy przepływie.

W opisie modeli zaprezentowanych w pracy szczególną uwagę skupiono na tych metodach obliczeniowych, które obowiązują dla pełnego stopnia suchości oraz są wykorzystywane do obliczeń w szerokim zakresie zmian parametrów przepływowych, cieplnych oraz geometrycznych. Z przedstawionego w tym zakresie przeglądu wynika, że praktycznie wszystkie metody obliczeniowe to modele empiryczne, które zostały opracowane bez uwzględnienia podstaw teoretycznych procesów mających miejsce podczas przemian fazowych w przepływie.

Na tle zaprezentowanych korelacji, Doktorantka wykazała, że jedynie metoda Profesora Jarosława Mikielewicza posiada jednoznaczne podstawy teoretyczne oraz taką postać matematyczną, która może być wykorzystana jako podstawa do poszukiwania szczegółowego rozwiązania dla warunków wrzenia i kondensacji także w dużym zakresie zmiany wartości ciśnienia zredukowanego.

Przeprowadzona w tym zakresie analiza dała Doktorantce podstawę do sformułowania celu i zakresu pracy, co zostało przedstawione w rozdziale 7. Zasadniczym celem pracy było pogłębienie wiedzy dotyczącej zjawisk zachodzących podczas wrzenia i kondensacji w przepływie. Z kolei przyjęty w pracy zakres działań został ukierunkowany na potwierdzenia tezy, iż *„Uwzględnienie ciśnienia zredukowanego w mnożniku dwufazowym, współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia w objętości oraz poprawce modyfikującej gradient temperatury w stosunku do wrzenia w objętości P w analizowanym modelu wrzenia i kondensacji w przepływie dla kanałów konwencjonalnych i minikanalów przyczyni się do poprawy jego zbieżności z posiadaną bazą danych doświadczalnych”*.

W rozdziale 8 została przeprowadzona szczegółowa analiza przyjętego modelu opisującego wymianę ciepła podczas wrzenia i kondensacji w przepływie, który od lat jest rozwijany w Katedrze Energetyki i Aparatury Przemysłowej Politechniki Gdańskiej przez promotora niniejszej pracy Profesora Dariusza Mikielewicza. W tym zakresie Doktorantka wskazuje na istotne zalety przyjętego do rozważań modelu oraz dokonuje wyboru jego końcowej postaci, pozwalającej na jego dalsze doskonalenie.

W kolejnym 9 rozdziale pracy Doktorantka przedstawia sposób pozyskania i usystematyzowania bazy danych eksperymentalnych stanowiących podstawę do rozszerzenia funkcjonalności przedmiotowego modelu dla jak najszerszego zakresu zmian wartości ciśnienia zredukowanego. Dokonuje przy tym również szczegółowego opisu stanowiska doświadczalnego, na którym przeprowadziła własne badania doświadczalne odnośnie wyznaczenia wartości współczynników przejmowania ciepła.

W ramach przeprowadzonego eksperymentu przeprowadzono pięćdziesiąt siedem serii pomiarowych procesu wrzenia w przepływie czynnika HFE7000, dla których parametry przepływu były zmienne w zakresie: temperatur nasycenia $(30-54)^{\circ}\text{C}$, prędkości masowej $(214-1006) \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ oraz gęstości strumienia ciepła $(60-227) \text{ kW}/\text{m}^2$, co zostało dokładnie

przystawione w tabeli 9.1. W każdej serii badania przeprowadzono dla pełnego zakresu zmienności stopnia suchości. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że przyjęty w pracy zakres oraz metodyka przeprowadzonych badań, wraz z oceną dokładności przeprowadzonych pomiarów, są w pełni poprawne i świadczą o dużej dojrzałości badawczej Doktorantki.

W dalszej części rozdziału Doktorantka przedstawiła krótką charakterystykę właściwości analizowanych czynników oraz specyfikację bazy danych doświadczalnych pochodzących z danych literaturowych oraz przytoczonych powyżej badań własnych. Zebrana i uporządkowana baza danych doświadczalnych, pochodząca z 43 różnych źródeł, liczy łącznie 7650 punktów eksperymentalnych takich czynników jak: dwutlenek węgla oraz R600a, R290, R134a, R1234yf, amoniak, R152a, R236fa, R245fa oraz HFE7000, z czego 52% całej zgromadzonej bazy to dane opisujące proces wrzenia w kanałach o małej średnicy – minikanalach. Obejmuje ona szeroki zakres zmian parametrów, a mianowicie: średnic kanałów (0,51-9,25) mm, prędkości masowej (50-1500) kg/(m²s), gęstości strumienia ciepła (1-205) kW/m², stopnia suchości 0-1 oraz temperatur nasycenia (-40-+54)°C, które dla danych czynników były równoważne zmianie wartości ciśnień zredukowanych w zakresie 0,0328-0,777. Szczegółową specyfikację wymienionych parametrów Doktorantka zawarła w tabeli 9.2.

W rozdziale 10 pracy Doktorantka dokonała własnej modyfikacji analizowanego modelu w zakresie uwzględnienia w mnożniku dwufazowym efektu związanego z różnymi ciśnieniami, który ujęła zależnością (10.2). Celem wyboru zależności opisującej współczynnik oporu w przepływie dwufazowym Φ_{LO}^2 dokonała ona przeglądu i weryfikacji doświadczalnych najczęściej cytowanych w literaturze metod obliczania oporów przepływu dwufazowego, słusznych dla szerokiego zakresu danych doświadczalnych z jednoczesnym uwzględnieniem przepływu dwufazowego w warunkach adiabatycznych i z wymianą ciepła. Przeprowadzona w tym zakresie weryfikacja metod, w oparciu o dane doświadczalne scharakteryzowane w tabeli 10.1 (zawierające te same czynniki chłodnicze co zgromadzone w bazie danych dla wymiany ciepła), wykazała, że najkorzystniej jest w tym przypadku przyjąć zależność opisującą współczynnik oporów w przepływie wyznaczany w oparciu o zmodyfikowaną metodę Müllera-Steinhagena i Hecka (Φ_{LO}^2)_{MS}, którą to wielkość uwzględniono w nowo zaproponowanej postaci empirycznej poprawki P , ujętej zależnością (10.26).

Z kolei w obszernym rozdziale 11 została przeprowadzona weryfikacja wyników obliczeń z posiadaną bazą danych eksperymentalnych dotyczących warunków wymiany ciepła dla kanałów konwencjonalnych i kanałów o małej średnicy, które podzielono zgodnie z kryterium zaproponowanym przez Kew i Cornwella poprzez ocenę wartości liczby ograniczającej Con wyrażonej równaniem (2.3).

Poszukiwanie końcowej postaci zależności do wyznaczania wartości współczynników przejmowania ciepła podczas przepływu dwufazowego prowadzone było etapowo.

W pierwszej kolejności Doktorantka przeprowadziła analizy związane z obliczeniami za pomocą korelacji (8.29), w której mnożnik dwufazowy wyznaczany był za pomocą różnych definicji mnożnika dwufazowego zabranymi w pracy zależnościami (10.2) – (10.23). Uzyskane wyniki obliczeń dla przyjętych do analizy modeli zostały przedstawione na rysunkach 11.1 – 11.16. Przeprowadzone w tym etapie wyniki obliczeń statystycznych, zestawionych w tabeli 11.1, pozwoliły Doktorantce dowiedzieć, że w przypadku rozpatrywania całej bazy danych eksperymentalnych, wartość błędu względnego dla analizowanego modelu opartego na zmodyfikowanej zależności Müllera-Steinhagena i Hecka (10.23), jest wysoka i wynosi MAE=36,73%. Jakkolwiek wartość ta jest zadawalająca dla warunków wymiany ciepła w przepływie dwufazowym, to Doktorantka podjęła dalszą próbę jego doskonalenia.

W tym celu, w kolejnym etapie analizy zgodności predykcyjnych analizowanego modelu (8.29) z posiadaną bazą danych, przeprowadziła kolejne obliczenia, w których bazę danych rozdzieliła na trzy odrębne grupy płynów, a mianowicie jako czynniki syntetyczne (R134a, R1234yf, R152a, R236fa, R245fa oraz HFE7000), czynniki naturalne (amoniak-R717, propan

– R290 oraz izobutan – R600a) oraz dwutlenku węgla – R744. Wyniki tej analizy zostały w pracy przedstawione na rysunkach 11.17 – 11.64 oraz w tabelach 11.2 – 11.4. Także w tym przypadku Doktorantka nie uzyskiwała korzystniejszych wyników, gdyż wartość średniego błędu względnego w odniesieniu do poszczególnych grup czynników wynosiła $MAE=(33,77-54,24)\%$ w zależności od zastosowanej postaci równania Müllera-Steinhagena i Hecka.

Kolejnym etapem doskonalenia metody było uwzględnienie wpływu ciśnienia zredukowanego w poprawce P – zdefiniowanej zależnością (11.1), przy wykorzystaniu w modelu ogólnym (11.2) różnych metod obliczania oporów uwzględniających także wpływ ciśnienia zredukowanego w postaci relacji (10.,26).

W celu poprawy zbieżności modelu z danymi eksperymentalnymi, wykładnik potęgowy a_2 uwzględniony w równaniu (11.2) został wyznaczony w oparciu o teorię liniowej regresji wielu zmiennych, wykorzystując do tego celu ewolucyjną metodę obliczeń należącą do grupy algorytmów poszukiwania dopuszczalnego, akceptowanego rozwiązania zadania w zbiorze wszystkich możliwych rozwiązań. W ten sposób wartość poszukiwanego wykładnika a_2 , została przez Doktorantkę wyznaczona zarówno w odniesieniu do całej bazy danych jak i poszczególnych grup czynników. Uzyskane wyniki obliczeń wykazały, że uwzględnienie wpływu ciśnienia zredukowanego w poprawce P znacznie poprawia dokładność obliczeń w stosunku do posiadanej bazy, gdyż średnia wartość błędu względnego dla całego zbioru danych wyniosła $MAE=28,2\%$ przy wartości wykładnika $a_2=-0,985$. Także bardzo korzystne wyniki obliczeń zostały uzyskane dla poszczególnych grup czynników, dla których zostały uzyskane wartości $MAE=(28,4 - 34,5)\%$.

Przeprowadzona przez Doktorantkę analiza w pełni potwierdziła przyjętą w pracy tezę, iż uwzględnienie w obliczeniach ciśnienia zredukowanego zarówno w definicji mnożnika dwufazowego, współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia w objętości, jak i w empirycznej poprawce P , przyczynia się do poprawy zbieżności modelu z danymi eksperymentalnymi.

Przeprowadzone przez Doktorantkę wielowariantowe obliczenia porównawcze pozwoliły na jednoznaczne ustalenie postaci modelu obliczeniowego, który dla celów praktycznych został zaproponowany w postaci równania (11.4). Dokonane w oparciu o tę zależność obliczenia porównawcze (zawarte na rysunkach 11.109-11.118 oraz rysunkach 1-8 w Załączniku 4, a także w tabeli 11.10) w pełni potwierdzają wysoką dokładność opracowanej metody.

Końcowa część rozprawy (rozdział 12) to krótkie podsumowanie oraz wnioski i zalecenia dla przyszłych prac.

Do głównych osiągnięć w pracy doktorskiej mgr inż. Bianki Jakubowskiej należy zaliczyć:

1. Pozyskanie i usystematyzowanie bazy danych eksperymentalnych wymiany ciepła podczas wrzenia przy przepływie w kanałach konwencjonalnych i o małej średnicy.
2. Przeprowadzenie badań własnych współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia czynnika HFE7000 w minikanale o średnicy 2,3 mm, jako uzupełnienie bazy danych.
3. Opracowanie algorytmu obliczeniowego oraz przeprowadzenie w programie Excel obszernych wielowariantowych obliczeń porównawczych i statystycznych.
4. Uwzględnienie w algorytmie obliczeniowym wpływu efektów związanych z ciśnieniem zredukowanym w przepływie dwufazowym na wyznaczanie oporów przepływu oraz wymiany ciepła.
5. Zaproponowanie nowej postaci korelacji pozwalającej na wyznaczenie współczynników przejmowania ciepła w przepływie dwufazowym, która uwzględnia wpływ ciśnienia zredukowanego.

Przedstawione osiągnięcia w pełni potwierdzają realizację deklarowanych celów szczegółowych pracy a zastosowana przez Doktorantkę metodyka działań pozwoliła na uzyskanie bardzo wartościowych wyników oraz potwierdzenie tezy o jednoznacznym wpływie

wartości ciśnienia zredukowanego na warunki wrzenia i kondensacji podczas przepływu w kanałach o różnej średnicy.

3. Uwagi szczegółowe

Praca jest napisana starannie z dużą dbałością o szatę graficzną opracowania. Zawarte w niej rysunki, wykresy i tabele, w pełni oddają istotę analizowanych problemów. Nie dopatrzyłem się także w pracy żadnych istotnych uchybień formalnych ani merytorycznych.

Podczas lektury opracowania nasunęło mi się jednak kilka uwag, głównie o charakterze dyskusyjnym, a mianowicie:

1. Dane eksperymentalne zebrane w banku danych pochodzą z wielu źródeł i były wyznaczone z różną dokładnością. Czy uwzględnienie w obliczeniach porównawczych i statystycznych wagi związanej z dokładnością pomiarów, pozwoliłoby na wskazanie zróżnicowanej dokładności obliczeń, dla określonych zakresów zmian parametrów cieplno-przepływowych?
2. W pracy brak wystarczających informacji o sposobie opracowania algorytmu obliczeniowego. W jakim stopniu wykorzystywano w tym przypadku gotowe procedury zawarte w programie Excel?

Przytoczone uwagi nie umniejszają wysokiej wartości pracy i mają charakter czysto dyskusyjny.

4. Wnioski końcowe

Rozpatrując całość przedłożonej mi do oceny pracy doktorskiej mgr inż. Bianki Jakubowskiej, stwierdzam, że wykazała Ona się dobrą znajomością wiedzy oraz praktycznymi umiejętnościami w zakresie prowadzenia badań oraz modelowania procesu wrzenia podczas przepływu dwufazowego.

Główną wartość pracy upatruję zarówno w zebraniu i analizie obszernego materiału doświadczalnego, jak i opracowaniu oryginalnego, mającego podstawy matematyczne, modelu korelacyjnego do obliczania współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia i kondensacji w przepływie dla szerokiego zakresu zmian wartości ciśnienia zredukowanego.

Wykonana przez mgr inż. Biankę Jakubowską praca pt. „Modelowanie procesu wrzenia i kondensacji w przepływie w rozszerzonym zakresie ciśnień zredukowanych” jest opracowaniem, które wnosi oryginalny wkład w poznanie i opis zjawisk zachodzących podczas wrzenia perspektywicznych czynników chłodniczych przy ich przepływie w kanałach konwencjonalnych i kanałach o małej średnicy.

Zawarta w pracy tematyka mieści się w pełni w dyscyplinie *budowa i eksploatacja maszyn* i w tym obszarze wnosi elementy nowości naukowej.

W moim przekonaniu praca w pełni odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim, tak więc stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Bianki Jakubowskiej do publicznej obrony swojej pracy.