

Wydział Mechaniczny  
Politechniki Białostockiej

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Łęckiego pt. Modelowanie komputerowe zjawisk zachodzących w dwufazowym zamkniętym termosyfonie w aplikacjach niskotemperaturowych.

Podstawa przygotowania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej prof. dr hab. inż. Bogdana Kruszyńskiego, z dnia 29.08.2016 roku.

### **Zawartość pracy**

Promotorem pracy jest: dr hab. inż. Artur Gutkowski natomiast promotorem pomocniczym: dr inż. Grzegorz Górecki. Praca liczy 185 stron. Składa się z: wprowadzenia, 7 rozdziałów, wykazu oznaczeń, w którym podano również miana oraz odwołania do odpowiednich równań, zawiera trzy załączniki. W spisie literatury znajduje się 100 pozycji literatury, doktorant jest współautorem prac zamieszczonych pod pozycją 80 oraz 97.

We wprowadzeniu w rozdziale „Dwufazowy termosyfon a rurka ciepła” przedstawiono klasyfikację termosyfonów. Omówiono różnice i podobieństwa pomiędzy termosyfonem a rurką ciepła. W rozdziale „Cele i teza pracy” sformułowano następującą tezę: „Modele komputerowe uwzględniające procesy ciepłno-przepływowe zachodzące w dwufazowym zamkniętym termosyfonie pozwalają na miarodajne określenie strumienia ciepła przenoszonego przez urządzenie”. Cele pracy doktorant sformułował w postaci jej harmonogramu.

Rozdział pierwszy zawiera zestawienie proponowanych w literaturze zależności określających wymianę ciepła w różnych obszarach zamkniętego termosyfonu. W rozdziale 1.1 przedstawiono zestawienie wyników badań dotyczących wymiany ciepła we wrzeniu pęcherzykowym. Większość rozdziału opracowano na podstawie pracy [5]. Podano zależności na liczbę Nusselta oraz współczynnik przejmowania ciepła występujące przy: konwekcji swobodnej (1.2), wrzeniu pęcherzykowym (1.10) oraz częściowym wrzeniu pęcherzykowym (1.13). Parowanie cienkiej warstwy cieczy i skraplanie błonowe analizowano w rozdziale 1.2. Zależności określające temperaturę ścianki, przy której następuje przejście parowania we wrzenie pęcherzykowe omówione są w rozdziale 1.3. Zależności opisujące

wrzenie pęcherzykowe w spływającym filmie cieczy opisano w rozdziale 1.4. Ograniczenia stosowania zależności opisujących współczynnik przejmowania ciepła przy parowaniu opadającego filmu cieczy omówiono w rozdziale 1.5. Prace dotyczące kondensacji kropłowej omówiono w rozdziale 1.6. W rozdziale 1.7 przedstawiono prace, w których analizowano wpływ gazów nieskrapających się na wymianę ciepła w procesie skraplania błonowego. W rozdziale „Przemiany fazowe roztworów dwu- i wieloskładnikowych wewnątrz DZT” omówiono zagadnienia dotyczące wrzenia i skraplania roztworach oraz parowanie cienkiego, opadającego filmu cieczy. Rozdział „Kondensacja pseudo-kropłowa” poświęcony jest analizie niestabilności filmu cieczy podczas skraplania roztworu. Podano kryterium niestabilności oraz omówiono mechanizm utraty stabilności. Analizowano zmiany współczynnika przejmowania ciepła występujące podczas kondensacji Marangoniego.

W rozdziale drugim „Limity pracy dwufazowego zamkniętego termosyfonu” przedstawiono zakres zmienności punktów pracy termosyfonu oraz omówiono procesy fizyczne towarzyszące granicznym wartościom parametrów (napelnienie objętościowe, strumień ciepła). Podano zależności określające krytyczne strumienie ciepła. Dyskutowano proces wyschnięcia filmu cieczy. Przedstawiono schemat blokowy algorytmu wg, którego obliczana była wysokość zalania sekcji parownika. Algorytm ma charakter iteracyjny. Przedstawiono zależność na krytyczną gęstość strumienia ciepła.

W rozdziale „Walidacja zależności” przedstawiono wyniki analiz danych zebranych w ramach projektu LIDER III "Intensyfikacja procesów wymiany ciepła w bezpośrednim otoczeniu rurek ciepła i ich zastosowanie w innowacyjnym wymienniku ciepła – badania przy zastosowaniu metody PIV". W projekcie badano rurki ciepła (bez knota) wypełnione czynnikami chłodniczymi z rodziny HFC (hydrofluorowegli). Przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego. W eksperymencie do pomiaru temperatury zastosowano termopary (trzy w sekcji parownika, dwie w sekcji adiabatycznej i trzy w sekcja skraplacza). Cztery dodatkowe termopary zainstalowano na wylotach i wlotach wody w sekcjach parownika i skraplacza. Mierzono również ciśnienie wewnątrz układu oraz w rurce ciepła. Na podstawie pomiaru temperatur na powierzchni ścianki oraz całkowitego strumienia ciepła pobranego w parowniku w rozdziale 3.1 obliczono średni współczynnik przejmowania ciepła. Obliczanie niepewności pomiaru: temperatur, ciśnienia oraz strumienia ciepła oszacowano w rozdziale 3.2 „Niepewności uzyskanych wartości pomiarowych”. W rozdziale 3.3 „Wymiana ciepła w sekcji parownika” wyznaczono średnie współczynniki przejmowania ciepła w funkcji średnich gęstości strumieni ciepła dla termosyfonów napelnionych czynnikami: R134a, R404A, R410A.

W rozdziale „Wymiana ciepła w sekcji skraplacza” współczynnik przejmowania ciepła w procesie skraplania obliczany był za pomocą równania (3.7). Obliczone na podstawie danych eksperymentalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła otrzymane dla sekcji skraplacza porównano z wartościami obliczonymi z zależności literaturowych. Porównanie pokazano na rys.3.27. W rozdziale zamieszczono kod funkcji wyznaczającej temperaturę powierzchni swobodnej. Analizowano również zależność ciśnienia wewnątrz dwufazowego zamkniętego termosyfonu od strumienia ciepła dla czynnika roboczego R404A. W rozdziale przedstawiono również szereg wykresów charakteryzujących wymianę ciepła w dwufazowym zamkniętym termosyfonie.

W rozdziale czwartym „Aplikacja i budowa modelu jednowymiarowego” zaproponowano model wymiany ciepła oparty na sieci oporów cieplnych (jednowymiarowy przepływ ciepła bez rozwiązywania przepływu pary). Wyniki obliczeń na podstawie własnego modelu porównano z wynikami obliczeń na podstawie modelu zaproponowanego w pracy [73] (Engineering Sciences Data Unit - ESDU).

W rozdziale piątym „Eksperyment wizualizacyjny” opisano wyniki badań eksperymentalnych, w których badano zachodzące w termosyfonie zjawiska.

W rozdziale szóstym „Symulacja CFD procesów zachodzących w dwufazowym zamkniętym termosyfonie” przedstawiono wyniki symulacji numerycznych. Symulacje procesów zachodzących w termosyfonie wykonano przy użyciu oprogramowania ANSYS FLUENT wersja 14.5 - 16.1. W rozdziale 6.1 „Równania zachowania masy, pędu i energii” przedstawiono równania wykorzystywane w modelowaniu. W rozdziale 6.2 „Aspekty numeryczne symulacji” omówiono wybrane algorytmy stosowane podczas obliczeń. Do budowy modelu przepływu dwufazowego zastosowano model Volume of Fluid (VOF). Omówiono wybrane algorytmy śledzenia położenia powierzchni rozdziału faz. W rozdziale 6.3 „Ogólne ustawienia symulacji numerycznych w ANSYS FLUENT” podano podstawowe ustawienia programu. Zastosowany model zmiany fazy przedstawiono w rozdziale 6.4 „Odwzorowanie przemian fazowych w uproszczonym modelu jednofazowym”. Wyniki testowej symulacji przedstawiano w rozdziale 6.5 „Wyniki symulacji z użyciem modelu jednofazowego”, analizowano przypadek, w którym czynnikiem roboczym była woda. Sposoby uwzględnienia w obliczeniach przemian fazowych omówiono w rozdziale 6.6 „Przemiany fazowe w modelu dwufazowym”. Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono w rozdziale 6.7 „Wyniki symulacji z użyciem modelu VOF”. W rozdziale 6.8 przedstawiono niefizyczne wyniki symulacji. W rozdziale siódmym przedstawiono podsumowanie i wnioski. W załącznikach przedstawiono: parametry termofizyczne czynnika HFE-7100, omówiono

metodę prowadzenia obliczeń zdalnych w trybie BATCH ANSYS FLUENT oraz treść funkcji UDF użytej do modelowania dwufazowego zamkniętego termosyfonu.

### **Merytoryczna ocena pracy**

Doktorant przeprowadził analizę zależności literaturowych opisujących procesy dwufazowe zachodzące wewnątrz dwufazowego zamkniętego termosyfonu. Analizował: skraplanie, wrzenie w zbiorniku oraz parowanie/wrzenie opadającego, cienkiego filmu cieczy. W pracy zamieścił zależności pozwalające na wyznaczenie liczby Nusselta oraz współczynników przejmowania ciepła opisujących: konwekcję swobodną, wrzenie pęcherzykowe oraz częściowe wrzenie pęcherzykowe. Przyjął, że mechanizm wymiany ciepła w parowaniu cienkiej warstwy cieczy i skraplaniu błonowym jest taki sam oraz omówił zależności opisujące wymianę ciepła i masy w tym zależności wyznaczające współczynniki przejmowania ciepła. Przedstawił zależności określające temperaturę ścianki, przy której następuje przejście parowania we wrzenie pęcherzykowe oraz zależności opisujące wrzenie pęcherzykowe w spływającym filmie cieczy. Omówił ograniczenia stosowania zależności opisujących współczynnik przejmowania ciepła przy parowaniu opadającego filmu cieczy.

Doktorant analizował zagadnienia dotyczące kondensacji kropłowej oraz wpływ gazów nieskrapających się na wymianę ciepła w procesie skraplania błonowego. Przedstawił zależność pozwalającą na wyznaczenie całkowitego współczynnika przejmowania ciepła oraz średnią wartość liczby Reynoldsa występującą w kondensacji błonowej. Omówił zagadnienia dotyczące wrzenia i skraplania roztworów w tym zagadnienia parowania cienkiego, opadającego filmu cieczy. Praca zawiera również analizę niestabilności filmu cieczy podczas skraplania roztworu. Doktorant podał kryterium niestabilności oraz omówił mechanizm utraty stabilności. Analizował zmiany współczynnika przejmowania ciepła występujące podczas kondensacji Marangoniego.

Doktorant analizował wyniki eksperymentalne pochodzące z pomiarów wykonanych w ramach projektu LIDER III. Dane zebrane były dla różnych czynników roboczych: R134a, R404A i R410A. Rejestrowano je przy różnych stopniach napełnienia dwufazowego zamkniętego termosyfonu: 10%, 20%, 30%, 40%.

Przeprowadziła analizę niepewności pomiaru: temperatury, ciśnienia oraz strumienia ciepła oraz oszacował tolerancję pozostałych wielkości wykorzystywanych w obliczeniach.

W analizie danych pomiarowych zaproponował koncepcję wyznaczania średniej temperatury ścianki parownika, która posłużyła do obliczenia średniego współczynnika

przejmowania ciepła w sekcji parownika. Wyznaczył średnie współczynniki przejmowania ciepła w funkcji średnich gęstości strumieni ciepła dla termosyfonów napełnionych czynnikami: R134a, R404A, R410A. Przyjął, że współczynnik przejmowania ciepła jest średnią ważoną (średniego współczynnika przejmowania ciepła w strefie opadającego filmu i średniego współczynnika przejmowania ciepła w strefie objętości cieczy). Natomiast wagami, są odpowiednie części powierzchni grzejnej sekcji parownika, w których zachodzą analizowane procesy. Wysokość całkowitego zalania zamkniętego dwufazowego termosyfonu obliczył na podstawie modelu El-Genka.

Przeprowadził identyfikację mechanizmów wymiany ciepła. Słusznie zauważył, iż uzyskany rezultat może nieprecyzyjnie identyfikować mechanizmy wymiany ciepła. Dlatego średnie współczynniki przejmowania ciepła opisał równaniem w postaci zaproponowanej przez El-Genka. Podał procedurę wyznaczania współczynników w zależności El-Genka. Uzyskane wyniki porównał z danymi eksperymentalnymi. W przypadku czynnika R134a porównanie wyników eksperymentalnych z zależnościami zaproponowanymi w modelu El-Genka pokazało, iż wyniki uzyskane z modelu znacznie odbiegają od wyników uzyskanych na podstawie danych pomiarowych.

Przeprowadzona analiza wymiany ciepła w sekcji skraplacza pokazała, iż każdy z badanych czynników odznacza się innym zachowaniem, dlatego każdy czynnik analizował oddzielnie. Wyznaczył średnie temperatury powierzchni swobodnej spływającej warstwy cieczy w funkcji ciśnienia oraz współczynniki przejmowania ciepła. Analizował zależność ciśnienia wewnątrz termosyfonu od strumienia ciepła. W wyniku przeprowadzonej analizy doktorant wnioskuje, iż: "W modelu jednowymiarowym dwufazowego zamkniętego termosyfonu teoria Nusselta (skraplanie błonowe) będzie więc używana do obliczania średnich współczynników przejmowania ciepła w sekcji skraplacza". Przedstawił: średnie eksperymentalne współczynniki przejmowania ciepła w sekcji skraplacza w funkcji liczby Reynoldsa dla opadającego filmu, rozkłady temperatur ścianki wzdłuż dwufazowego zamkniętego termosyfonu wypełnionego czynnikami R134a i R404A dla różnic temperatur wody ogrzewającej i chłodzącej 35 i 40 °C, średnie współczynniki przejmowania ciepła w sekcji skraplacza dla czynnika R134a w funkcji liczby Reynoldsa dla filmu cieczy, średnie współczynniki przejmowania ciepła w sekcji skraplacza dla czynnika R410A w funkcji liczby Reynoldsa dla filmu cieczy.

Doktorant zaproponował model wymiany ciepła oparty na sieci oporów cieplnych (jednowymiarowy przepływ ciepła bez rozwiązywania przepływu pary). Wykorzystał zależności średnich współczynników przejmowania ciepła w sekcji skraplacza i parownika

przedstawione w podrozdziałach 3.3 i 3.4. W modelu uwzględnił następujące opory cieplne: opór cieplnego przewodzenia przez ściankę termosyfonu, opór cieplny skraplania, opór cieplny sekcji parownika (oporu cieplnego w strefie spływającego filmu, oporu zalanej części parownika). Doktorant przyjął, że opory cieplne w sekcji parownika są połączone równolegle, natomiast pozostałe opory połączone są szeregowo. Na rys. 4.2 (strumienie ciepła) oraz 4.3 (temperatury) wyniki otrzymane z wykorzystaniem zaproponowanego w pracy modelu porównał z wynikami eksperymentalnymi oraz wynikami otrzymanymi z modelu ESDU. Uzyskał dobrą zgodność uzyskanych rezultatów obliczeń na podstawie własnego modelu z danymi eksperymentalnymi oraz wynikami uzyskanymi z modelu ESDU.

Przeprowadził badania wizualizacyjne w szklanym termosyfonie o długości 710 mm oraz wewnętrznej średnicy 19 mm. Przepływy dwufazowe wewnątrz rurki rejestrował aparatem cyfrowym NIKON D7100. Struktury przepływu analizował przy następujących mocach grzejnych: 12.5 W, 20 W, 25 W, 37.5 W, 50 W, 62.5 W, 75 W, 87.5 W, 62.5 W, 37.5 W, 20 W. Wyniki wizualizacji przedstawił w postaci serii zdjęć.

Symulacje procesów zachodzących w termosyfonie wykonał przy użyciu oprogramowania ANSYS FLUENT wersja 14.5 - 16.1. Rozwiązywał układ równań zachowania energii, pędu i masy w układzie dwuwymiarowym osiowo-symetrycznym. Do budowy modelu przepływu dwufazowego zastosował model Volume of Fluid (VOF). Przepływ obliczał w dwóch prostokątnych obszarach o wymiarach  $0.1 \text{ mm} \times 1 \text{ cm}$  oraz  $0.2 \text{ mm} \times 2 \text{ cm}$ . Wymiary siatki były następujące: wysokość  $3.33 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  oraz szerokości  $1.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ . Wyniki symulacji przedstawił w formie:

- rozkładu grubości filmu cieczy (udział objętościowy cieczy) na długości 0.5 mm od szczytu dwufazowego zamkniętego termosyfonu zgodnie z modelem Lee oraz Faghri'ego,
- fal na powierzchni filmu z wykorzystaniem modelu Lee oraz Faghri'ego,
- procentowych różnic pomiędzy lokalnymi współczynnikami przejmowania ciepła otrzymanymi z symulacji a obliczonymi na podstawie teorii Nusselta,
- rozkładu udziału objętościowego fazy ciekłej dla 1 mm odcinka ogrzewanego parującego filmu według modelu Lee oraz Faghri'ego,
- pola prędkości i rozkład źródeł masowych dla symulacji parującego filmu (model Faghri'ego),
- porównania lokalnych współczynników przejmowania ciepła pochodzących z symulacji ze współczynnikiem przejmowania ciepła wynikającym z przewodzenia ciepła przez warstwę cieczy,

- procesu wzrost pęcherzyka w cieczy w czasie,
- temperatury płynu w dwufazowym zamkniętym termosyfonie,
- rozkładu cieczy wewnątrz dwufazowego zamkniętego termosyfonu.

### **Uwagi krytyczne**

Przedstawiona do oceny praca ma charakter raportu z wykonanych badań eksperymentalnych, analiz danych pomiarowych oraz modelowania. Doktorant przeprowadził obszerną dyskusję prowadzonych analiz przedstawiając zarówno wyniki analiz poprawnie opisujące badane zjawiska jak również wyniki obliczeń, których rezultaty nie pasowały do wyników badań eksperymentalnych. Ten sposób prezentacji badań utrudnia zrozumienie celu naukowego pracy.

Cel naukowy pracy nie został w niej jednoznacznie zdefiniowany. Doktorant stwierdza, iż cel pracy przedstawiony jest w jej harmonogramie. Natomiast harmonogram pracy zawiera zarówno punkty, które nie mają charakteru naukowego takie jak: "Zapoznanie się z kodem ANSYS FLUENT..." jak również punkty, które mają naukowy charakter. Wśród tak zdefiniowanych celów znajduje się zapis: "Przeprowadzenie pomiarów na stanowisku "HFE-7100 - woda". Natomiast w pracy przedstawione są jedynie wyniki badań wizualizacji procesów zachodzących w dwufazowym zamkniętym termosyfonie.

Moją wątpliwość budzi również sformułowana w pracy hipoteza dotycząca wyników uzyskanych dla czynnika R410A, w której doktorant tłumaczy uzyskany wynik niedokładnym wyczyszczeniem stanowiska przed zalaniem do czynnikiem R410A. Moim zdaniem brak jest naukowych dowodów potwierdzających tą hipotezę.

Również mam wątpliwości dotyczące uzasadnienia pokazanej na rys.3.21 hipotezy dotyczącej struktury przepływu cieczy. Chciałbym, aby Doktorant w czasie obrony przedstawił uzasadnienie tej hipotezy np. poprzez oszacowanie liczby Rayleigha w postulowanym przepływie konwekcyjnym.

Chciałbym również, aby Doktorant w czasie obrony uzasadnił przyjęte w pracy (rys.3.4) założenie o liniowym rozkładzie temperatury pomiędzy punktami pomiarowymi. Interesuje mnie odpowiedź na pytanie: jaki wpływ na wyniki miałyby przyjęcie założenia o nieliniowym rozkładzie temperatury?

Następną interesującą kwestią jest dynamika zmian temperatury i ciśnienia. W pracy przedstawione są wyniki badań wizualizacyjnych. Interesuje mnie odpowiedź na pytanie: czy

w czasie eksperymentu obserwowano powtarzalność występowania zjawisk wewnątrz dwufazowego zamkniętego termosyfonu lub czy te zmiany miały jedynie charakter losowy?

Uwagi powyższe mają charakter dyskusyjny i nie mają istotnego wpływu na moją ogólną ocenę pracy.

### **Uwagi redakcyjne**

Praca zawiera szereg uchybień redakcyjnych. Poniżej wykaz przykładowych uchybień:

- W podpisie pod rys.3 brak odwołania do literatury.
- Przy licznych wzorach również brak odwołania do literatury.
- Brak odstępu pomiędzy opisem symboli użytych we wzorach a dalszym tekstem.
- Źle sformatowane tytuły podrozdziałów.
- Na rys.4.5 brak informacji, które wyniki uzyskano z modelu a które z pomiarów.
- Na rys.6.4 brak oznaczenia rysunków a i b. Na "dolnym" wykresie brak opisu osi.
- Na rysunkach przedstawiających wyniki symulacji numerycznych np. rys.6.8 zbyt małe czcionki.
- Podpis pod rys.6.11 nie pasuje do wykresu (wykres zawiera jedynie wyniki symulacji numerycznej).
- Na rys.6.19 brak informacji o wielkości czasu pomiędzy prezentowanymi wynikami symulacji.

Zawarte w pracy uchybienia redakcyjne są typowe i nie obniżają naukowej wartości pracy.

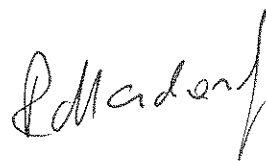
### **Podsumowanie**

Przedstawiona do oceny praca doktorska jest zarówno pracą teoretyczną jak i doświadczalną. Autor podjął się ambitnego zadania, uważam, iż wykonał je dobrze i sumiennie. Wybór tematyki badań i dobór metod badawczych oceniam pozytywnie. Duża liczba rezultatów pozwala na wykonano w przyszłości dodatkowych analiz, których wyniki dadzą pełniejszy obraz wymiany ciepła w dwufazowym zamkniętym termosyfonie. Wyniki końcowe, uzyskane po analizie danych eksperymentalnych oraz wyników symulacji, wnoszą elementy nowości oraz wskazują kierunki dalszych prac.

Praca spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki z dnia 14



marca 2003 r. Wnioskuje o przyjęcie pracy w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn i dopuszczenie mgr inż. Marcina Łęckiego do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "J. Mardziej". The signature is written in a cursive style with a long, sweeping tail on the final letter.

