

Ocena rozprawy doktorskiej

mgr inż. Sylwii Wciślik

pt.: „Analiza wymiany ciepła w warunkach niestacjonarnego odparowania kropeł”

Promotor pracy: dr hab. inż. Tadeusz Orzechowski, prof. PŚk

1. Zawartość pracy

Przedłożona do opinii praca liczy 136 stron i została podzielona na 9 rozdziałów tematycznych. Zawiera ponadto wykaz oznaczeń, podsumowanie, wykaz literatury i spis prac własnych, które są cytowane w pracy.

W obszernym **rozdz. 1**, na przykładzie licznych procesów technologicznych, takich jak chłodzenie blach w trakcie walcowania, hartowanie, chłodzenie łopatek turbin czy odparowanie kropli paliwa, wskazano na zasadność podjęcia tematyki badań wymiany ciepła podczas odparowania kropli cieczy w zetknięciu z powierzchniami ciał stałych lub cieczy, o temperaturze wyższej niż temperatura Leidenfrosta.

Po przedstawieniu krzywej wrzenia, szczegółowo omówiono wpływ różnych zjawisk i parametrów na przebieg wrzenia błonowego pojedynczej kropli. W szczególności zwrócono uwagę na kąt zwilżania, który jest zasadniczym parametrem decydującym o zwilżalności powierzchni i który wpływa na proces odparowania kropli w przypadkach, gdy dochodzi do wrzenia przejściowego, a więc w zakresie przegrzań bliskich punktowi Leidenfrosta. Dużo uwagi poświęcono wpływowi konwekcji Marangoniego na ruch cieczy wewnątrz kropli, a przez to na zachowanie się kropli na powierzchni grzejnej i w konsekwencji na przebieg procesu odparowania kropli. Wskazano na odmienny przebieg procesu odparowania kropeł cieczy w zależności od sposobu ich doprowadzania na rozgrzaną powierzchnię, tj. powolne osadzania pojedynczych kropeł, mikrostrugi cieczy, spray. Przeanalizowano również wpływ domieszek, np. nanocząstek, soli czy substancji powierzchniowo czynnych, na przebieg procesu odparowania kropli. Przedstawiono też krytyczny przegląd modeli wrzenia błonowego pojedynczej kropli.

Rozdział ten bardzo dobrze świadczy o rozeznaniu Doktorantki w realizowanej tematyce badawczej, chociaż usystematyzowanie przedstawionego materiału – np. przez wprowadzenie nagłówków, ułatwiłoby jego percepcję.

Z badawczego punktu widzenia, zjawisko Leidenfrosta, mimo że jest obiektem intensywnych prac od wielu lat, nie jest jeszcze w pełni rozpoznane i z tego względu rozprawę należy uznać za aktualną naukowo.

W **rozdz. 2 i rozdz. 3** przedstawiono odpowiednio tezy i cele pracy.

Rozdz. 4 zawiera opis stanowiska badawczego. Dobrze opisano jego najistotniejsze elementy, w tym konstrukcję sekcji grzejnej. Bardzo starannie przedstawiono sposób akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych.

W **rozdz. 5** zaprezentowano – w sposób nie budzący wątpliwości, metodykę pomiaru temperatury kropli i powierzchni grzejnej, masy kropli oraz jej powierzchni projekcyjnej.

Rozdz. 6 jest poświęcony analizie teoretycznej zjawiska Leidenfrosta. Zaproponowano własne równanie bilansu energii dla odparowującej kropli, wymieniającej ciepło na drodze konwekcji i radiacji jedynie na swojej dolnej powierzchni. Bez zastrzeżeń podano sposób wyznaczania wielkości występujących w równaniu, które są niezbędne do jego rozwiązania. W wyniku analizy własnych danych eksperymentalnych zaproponowano również skorygowaną postać równania na średnicę odparowującej kropli (prawo D_1^2).

Rozdz. 7 dotyczy analizy błędów wyznaczania całkowitego współczynnika przejmowania ciepła, przy zastosowaniu dwóch metod, tj. różniczki zupełnej i prawa propagacji niepewności. Maksymalny błąd względny wynikający z szacunku metodą różniczki zupełnej to ok. 21%, natomiast maksymalny błąd względny wynikający z prawa propagacji niepewności to ok. 9%. Obie wartości błędów należy uznać za racjonalne. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorantka dokonała dogłębnej analizy udziałów poszczególnych składowych mających wpływ na wartość popełnianego błędów pomiarowego.

W **rozdz. 8** pokazano - w postaci graficznej, przebiegi wielkości mierzonych, np. masy odparowującej kropli i obliczanych, np. całkowitego współczynnika przejmowania ciepła, w funkcji czasu lub powierzchni projekcyjnej kropli, dla wszystkich 6 badanych temperatur powierzchni grzejnej. Analiza tych rysunków wskazuje, że wyniki układają się w sposób zgodny z fizyką zjawiska, co może świadczyć o poprawności wykonanych pomiarów.

W **rozdz. 9**, z kolei, uwzględniając absorpcyjność pary wodnej w warstwie rozdzielającej kroplę i powierzchnię grzejną, oszacowano udział składowej radiacyjnej w całkowitym współczynnika przejmowania ciepła. Z przedstawionych wyników obliczeń wynika, że udział ten silnie zależy od powierzchni projekcyjnej kropli (czasu odparowania) i nie przekracza 3% niezależnie od temperatury powierzchni grzejnej. Pominięcie absorpcji promieniowania przez parę wodną skutkuje – co jest logiczne, w powiększeniu udziału składowej radiacyjnej do 10%.

Rozdz. 10 to wnioski końcowe i podkreślenie najważniejszych, z punktu widzenia Autorki rozprawy, rezultatów badań eksperymentalnych i teoretycznych.

2. Tezy pracy

Doktorantka podała w sposób jawny, lecz niestety nie w pełni precyzyjny, aż 5 tez swojej pracy. Stwierdza w nich, że:

- „współczynnik przejmowania ciepła, oprócz parametrów materiałowych określających rodzaj i właściwości cieczy, może być podany w funkcji powierzchni jej prostopadłego rzutu na powierzchnię grzejną przy zadanej temperaturze powierzchni”;

- „postuluje się konieczność wprowadzenia dodatkowego członu w prawie D' , który zależy od temperatury powierzchni grzejnej T_w i czasu”;
- „dokładne obliczenie współczynnika przejmowania ciepła wymaga bezpośredniego pomiaru ubytku masy kropli podczas jej odparowania”;
- ruchy konwekcyjne wewnątrz kropli są przyczyną jej niestabilnego zachowania, natomiast ich wpływ na wielkość współczynnika przejmowania ciepła jest nieznaczny i może być pominięty”;
- „dla poprawnego oszacowania popełnianego błędu, wskutek pominięcia oddziaływania radiacyjnego, niezbędnym jest uwzględnienie właściwości absorpcyjnych odparowywanego czynnika”.

Doktorantka starała się ustosunkować mniej lub bardziej jednoznacznie do każdej przyjętej tezy. Odnosnie tezy pierwszej, na str. 90₈ orzeka, iż „stwierdza się słuszność postawionej tezy o lokalnie zmiennych warunkach wymiany ciepła w zaproponowanym układzie z kroplą cieczy odparowującą z powierzchni izotermicznej w warunkach wrzenia błonowego”. Teza pierwsza nic nie mówi o „lokalnie zmiennych warunkach wymiany ciepła”, które – na marginesie, nie zostały w żaden sposób określone. Dopiero drugie zdanie w tym akapicie, tj. „przedstawione wykresy 6.4 i 6.5 potwierdzają, że współczynnik przejmowania ciepła zmienia się z każdą sekundą odparowującej z powierzchni kropli wody, a zatem zależy od jej wielkości” wyraźnie odnosi się do założonej tezy.

Do tezy drugiej Autorka odnosi się na str. 97. Wydaje się, iż wprowadzenie postulowanego członu nieliniowego do prawa D' wymaga sformułowania koniecznych ku temu warunków. np. średnicy kropli, zakresu temperatury (wartości przegrzań) czy rodzaju cieczy – charakteryzowanych np. liczbą Prandtla, których Autorka nie podaje.

O poprawności trzeciej tezy – najbardziej dyskusyjnej, Doktorantka wnioskuje na podstawie analizy błędu pomiaru – str. 124₁₁. Teza budzi wątpliwości, gdyż nie bardzo wiadomo co to znaczy „dokładne obliczenie współczynnika przejmowania ciepła”. Poza tym Doktorantka sama wykazuje, że średni ubytek masy kropli określony na drodze bezpośredniego pomiaru jest taki sam, jak wyznaczony na podstawie powierzchni rzutu kropli – rys. 8.4, co przeczy przyjętej tezie.

Wydaje się, iż w pracy nie przedstawiono wystarczającego materiału badawczego, aby uzasadnić tezę czwartą. Wnioskowanie dotyczące tej tezy oparte jest na analizie temperatury górnej powierzchni odparowującej kropli, stąd na str. 84₃ można znaleźć takie stwierdzenie: „Jego (tzn. odchylenia standardowego) wartość zmienia się z czasem i wielkością odparowującej kropli cieczy, co dowodzi jednej z tez pracy, że ruchy konwekcyjne powodują asymetryczny rozkład temperatury wewnątrz kropli”. Dodatkowo, na str. 122₁₅, mówi się że „przemieszczająca się z dużą prędkością w obszarze kropli woda wskazuje na intensywne ruchy konwekcyjne o charakterze turbulentnym, co jest przyczyną niesymetrycznego kształtu”. W obu cytowanych zdaniach brak jest odniesienia do niestabilnego zachowania się kropli, a także wpływu prądów konwekcyjnych wewnątrz kropli na wartość współczynnika przejmowania ciepła.

Jak wynika z dobrze udokumentowanych rozważań przedstawionych w rozdz. 9, w pewnych warunkach składowa radiacyjna może być pominięta, stąd teza piąta jest zbyt ogólna.

3. Oryginalność pracy

Oryginalne osiągnięcia pracy to:

- poszerzenie bazy danych eksperymentalnych dotyczących współczynników przejmowania ciepła podczas wrzenia błonowego dużych kropli wody,

- uwzględnienie w analizie teoretycznej zjawiska Leidenfrosta absorpcyjności pary wodnej w warstwie rozdzielającej kroplę i powierzchnię grzejną.

4. Wartości użytkowe pracy

Zaproponowanie zmodyfikowanego równania na średnicę odparowującej kropli.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. Pod rys. 1.5 i rys. 1.8 nie podano źródeł.
2. Jak należy rozumieć stwierdzenie (str. 32₁₅), że *z zamieszczonego w pracy [54] wykresu wynika, że charakter wrzenia wody ma charakter bardziej burzliwy niż emulsji...?*
3. Zdanie *Substancja taka (w domyśle nanociecz) jest cieczą nienewtonowską (str. 33)* jest zbyt ogólnym uogólnieniem. Najczęściej nanociecze są cieczami newtonowskimi.
4. Surfactanty nie mają na celu *obniżyć napięcie powierzchniowo-czynne (str. 34₂)* lecz napięcie powierzchniowe. Surfactanty to substancje powierzchniowo-czynne.
5. Jak należy rozumieć zdanie: *energia generowana przez powierzchnię (str. 39⁴)?*
6. Co to jest punkt saturacji – str. 41₅?
7. Na str. 65¹¹ Doktorantka podkreśla, że *ubytek masy kropli podczas jej odparowania szacuje się...analitycznie, z rzutu lub objętości kropli, co generuje trudne do oszacowania błędy*, a przecież na str. 101 sama stwierdza, że o takim błędzie decyduje *błąd odczytu powierzchni wynikający z rozmiaru pojedynczego piksela na matrycy kamery lub aparatu cyfrowego*.
8. Płaskość powierzchni grzejnej jest jednym z podstawowych parametrów decydujących o zachowaniu się na niej pojedynczej kropli, Dlaczego więc własną *powierzchnię ukształtowaną w postaci czaszy o bardzo dużym promieniu krzywizny – str. 70⁹*? Pytanie jest też czy wgłębieniem ku górze czy ku dołowi?
9. Pomiar przeprowadzono przy założeniu izotermiczności powierzchni grzejnej. Dlaczego więc na str. 73⁹ jest mowa o zachowaniu się kropli na *powierzchni nieizotermicznej*? Nasuwa się też pytanie, dlaczego sekcja grzejna nie była zaizolowana, co z pewnością zwiększyłoby równomierność rozkładu temperatury jej powierzchni?
10. Na rys. 5.2 są rzeczywiście dwie krzywe – str. 78¹⁰, lecz tylko jedna jest opisana.
11. Dlaczego w analizie błędów pomiaru nie uwzględniono niepewności wyznaczania ciepła parowania i ciepła właściwego?
12. Jak wyznaczano k_λ - rys. 9.2a?

6. Formalna ocena pracy

1. Rozprawa jest napisana dobrą polszczyzną. Układ pracy nie budzi zastrzeżeń, a jej struktura jest zbudowana w sposób logiczny.
2. Cytowana literatura jest kompletna i zawiera pełny opis bibliograficzny.
3. W pracy jasno zdefiniowano problem naukowy.

7. Terminologia i ważniejsze uwagi redakcyjne

Terminologia stosowana w rozprawie jest poprawna. Doktorantka nie ustrzegła się jednak niewłaściwych terminów czy niezręcznych sformułowań.

Do istotniejszych uchybień terminologicznych należy zaliczyć:

- W rozdz. I używane są zamiennie terminy *przegrzanie* i *przegrzanie powierzchni*. Tylko ten pierwszy jest poprawny.
- To samo dotyczy terminu *kąt zwilżania* i *kąt zwilżenia*, z których pierwszy jest poprawny, a także *temperatura nasycenia* (poprawnie) i *temperatura saturacji*.
- Jak należy rozumieć *równowazny kąt zwilżania* (str. 15₆)? Rozróżnia się statyczne i dynamiczne kąty zwilżania.
- Podobnie na str. 16 użyty jest termin *teoretyczny kąt zwilżenia*.
- Termin: *konwekcyjne ruchy Marangoniego* (str. 20₆) jest niepoprawny.
- Stwierdzenie *próba numerycznej optymalizacji chłodniczej* (str. 28₁₁) jest niepoprawne.
- Co to jest *funkcja gęstości strumienia objętości cieczy* (str. 28₆)?
- Termin *napięcie dynamiczne powierzchni* (str. 35³) jest niepoprawny. Wynika z niewłaściwego tłumaczenia z języka angielskiego.
- Termin *ciało czarne* jest niepoprawny (str. 37¹).
- Zamiast *fazy płynnej* powinno być *fazy ciekłej* (str. 42₇).
- Opis kształtu kropli podany na str. 43 nie zgadza się z tym co pokazuje rys. 1.10. Przykładowo, kropla na rys. 1.10a nie ma kształtu płaskiego dysku lecz półkuli.
- Kropla, o której mowa na str. 50₈ nie jest *obiektem półkolistym* lecz półkulą.
- We wzorze (1.45) - str. 56⁵ - Wykaz oznaczeń, D_m nie jest *dyfuzją masy powietrze-woda* lecz kinematycznym współczynnikiem dyfuzji molekularnej zwanym też dyfuzyjnością substancjalną. Następnie h_{fg} to nie *utajone ciepło parowania* lecz ciepło parowania, a x_1 to nie *stopień nasycenia przy wilgotności 100%* lecz zawartość wilgoci (zawilgocenie, zawilżenie) dla wilgotności względnej $\varphi=100\%$.

Drobniejsze uchybienia redakcyjne i stylistyczne zaznaczyłem w dostarczonym egzemplarzu pracy.

Przedstawione powyżej uwagi mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i redakcyjny i w niczym nie umniejszają wartości merytorycznej pracy, którą oceniam bardzo wysoko.

8. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona praca zawiera oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autorkę naukowych metod eksperymentalnych i numerycznych stosowanych w technice cieplnej. Praca doktorska mgr inż. Sylwii Weislik w pełni wyczerpuje warunki określone przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dn. 14.03.2003 roku i uzasadnia dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie stawiam **wniosek o wyróżnienie** przedłożonej rozprawy ze względu na następujące przesłanki:

1. wykorzystanie do opracowania wyników pomiarów analizy statystycznej i solidnej analizy błędu pomiaru, co znacznie podnosi wartość uzyskanych rezultatów, jako poziomu odniesienia dla innych badaczy, ale także jako podstawa do modelowania zjawiska Leidenfrosta,
2. opanowanie i zastosowanie współczesnych technik pomiarowych opartych na cyfrowej rejestracji i analizie obrazu,
3. podjęcie próby modelowania złożonego procesu przenoszenia ciepła w warstwie pary rozdzielającej kroplę i powierzchnię grzejną.

