

Dr hab. inż. Dawid Taler, prof. PK
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska
Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
tel. 0048 12 628 30 26
fax. 0048 12 628 20 48
e-mail: dtaler@pk.edu.pl

Kraków, 02.02.2014 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Sylwii Wciślik
„Analiza wymiany ciepła w warunkach niestacjonarnego odparowania kropeł”

1. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska o objętości 136 stron składa się z 10 rozdziałów oraz wykazu oznaczeń i spisu cytowanej literatury zawierającego 154 pozycje literaturowe.

1.1. Ocena wyboru tematyki pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Sylwii Wciślik dotyczy aktualnych zagadnień występujących w odparowaniu kropeł cieczy na powierzchniach płaskich o temperaturze wyższej od temperatury Leidenfrost. Temperaturę Leidenfrost definiuje się jako temperaturę powierzchni, powyżej której występuje wrzenie błonowe charakteryzujące się występowaniem warstewki pary między powierzchnią ciała stałego i kroplą odparowującej cieczy. Różnica temperatury powierzchni i temperatury nasycenia cieczy przy danym ciśnieniu (stopień przegrzania powierzchni), przy której gęstość strumienia ciepła na powierzchni ciała stałego jest najmniejsza określany jest jako II kryzys wrzenia lub kryzys wrzenia drugiego rodzaju. Wystąpienie wrzenia błonowego, tj. kryzysu wrzenia drugiego rodzaju może prowadzić do przegrzania materiału rur parownika kotła. Za temperaturę Leidenfrost przy ciśnieniu atmosferycznym przyjmuje się temperaturę 220°C, tj. temperatura

powierzchni grzejnej jest o 120 K wyższa od temperatury nasycenia. Przy ciśnieniach około krytycznych kryzys wrzenia pojawia się przy stopniu przegrzania powierzchni wewnętrznej rury rzędu kilku Kelvinów. Przy rozruchu kotłów o parametrach nadkrytycznych, temperatura rury w obszarze kryzysu wrzenia może wzrosnąć o ponad 50K, co z kolei może prowadzić do przegrzania materiału rur i przyspieszonej korozji wysokotemperaturowej.

W przypadku hartowania przedmiotów stalowych występowanie wrzenia błonowego może mieć korzystny wpływ na przebieg chłodzenia przedmiotu. Z uwagi na mniejszą gęstość strumienia ciepła przekazywanego od powierzchni hartowanego przedmiotu do cieczy szybkość jego chłodzenia i naprężenia cieplne są mniejsze.

Problemy analizowane w rozprawie są przedmiotem intensywnych badań prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych. Znajduje to odzwierciedlenie w bieżących publikacjach w czasopiśmie krajowych i zagranicznych. Tematyka rozprawy doktorskiej jest aktualna.

1.2 Omówienie treści rozprawy

Rozdział pierwszy poświęcony jest analizie aktualnego stanu zagadnienia. Przegląd literatury jest bardzo szczegółowy. W trzech podrozdziałach omówione zostało odparowanie kropeł wody z gorących powierzchni ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska Leidenfrost. Dużo uwagi poświęcono opisowi matematycznemu procesów przeplywowo-cieplnych zachodzących podczas odparowania kropeł cieczy. Przegląd literatury zakończono podsumowaniem. Należy podkreślić, że rozdział pierwszy liczy 54 strony i jest największy w całej rozprawie.

Tezy i cele pracy sformułowane zostały odpowiednio w rozdziale drugim i trzecim.

Stanowisko badawcze do badania odparowania dużej kropli wody z gorącej powierzchni o temperaturze wyższej od temperatury Leidenfrost omówione zostało w rozdziale czwartym. Metodyka badacza i analiza wybranych wyników pomiaru jest przedmiotem rozdziału piątego. W stanowisku można wyróżnić trzy niezależne układy pomiarowe: kamerę termowizyjną, wagę oraz układ do pomiaru temperatury kropli wody i powierzchni miedzianego walca za pomocą termoelementów.

Metodę eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła na powierzchni miedzianego walca pod kroplą o dużej średnicy przedstawiono w rozdziale szóstym.

Analiza niepewności wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła przedstawiona została w rozdziale siódmym. Oszacowana została niepewność maksymalna oraz średnie odchylenie standardowe.

W rozdziale ósmym przedstawione są wyniki pomiarów i obliczeń dla sześciu różnych temperatur powierzchni grzejnej.

Przedmiotem rozdziału dziewiątego jest analiza radiacyjnej wymiany ciepła między powierzchnią walca i powierzchnią kropli z uwzględnieniem warstwy pary między powierzchnią walca i kropli.

Wnioski końcowe przedstawione zostały w rozdziale 10.

2. Główne osiągnięcia naukowe

Za najważniejsze osiągnięcie mgr inż. Sylwii Wciślik uważam badania eksperymentalne wymiany ciepła podczas odparowania dużej kropli wody na powierzchni o temperaturze wyższej od temperatury Leidenfrost. Na wyróżnienie zasługuje opracowanie oryginalnej prostej metody wyznaczania współczynnika wnikania ciepła, bazującej na pomiarze masy kropli cieczy w funkcji czasu. Dodatkowo mierzona jest temperatura powierzchni ciała stałego oraz kropli odparowującej wody. W opracowanej metodzie unika się pomiaru nieustalonej gęstości strumienia ciepła na powierzchni ciała stałego, który jest bardzo trudny zarówno od strony eksperymentalnej jak i obliczeniowej.

Do osiągnięć Autorki zaliczyłbym również wyznaczenie temperatury kropli za pomocą kamery termowizyjnej i porównanie jej z wynikami pomiaru temperatury za pomocą termoelementu.

Oszacowane zostały także niepewności współczynnika wnikania ciepła wyznaczanego pośrednio.

3. Uwagi krytyczne

Pomimo pozytywnej oceny rozprawy w pracy zauważyłem następujące niedociągnięcia:

- W spisie oznaczeń na stronie 9 oraz we wzorze (1.8) na stronie 31 symbolem J oznaczono funkcję Bessela pierwszego rodzaju; brak jest indeksu dolnego określającego rząd funkcji Bessela.
- W warunku brzegowym (1.6) na stronie 30 powinno być „ $z=h$ ”, a nie „ $z=e$ ”.
- We wzorze (1.45) na stronie 56 powinno być $\lambda \nabla T \cdot \mathbf{n}$ gdzie \mathbf{n} jest jednostkowym wektorem normalnym skierowanym na zewnątrz obszaru; uwzględniając, że gradient temperatury jest wektorem wyraz $\lambda \cdot \nabla T$ w warunku brzegowym (1.45) jest niepoprawny.
- Na rysunku 8.4 porównano ubytek masy kropli w funkcji czasu wyznaczony doświadczalnie i numerycznie. Porównanie to nie jest potrzebne, gdyż najpierw

z równania (6.1) wyznaczono sumaryczny współczynnik wnikania ciepła obliczając szybkość ubytku masy kropli w czasie, tj. pochodną dm/dt na podstawie danych doświadczalnych (rysunek 6.2). W związku z tym wystarczy scałkować równanie $dm/dt = f(t)$, w którym $f(t)$ jest wielomianem trzeciego stopnia lub pochodną uśrednioną za pomocą 23 punktowego filtra Savitzky'ego-Golay'a (rysunek 6.2). Wyników przedstawionych na rysunku 8.4 nie można zatem wykorzystywać do demonstrowania dokładności proponowanej procedury obliczeniowej do wyznaczania zmiany masy kropli w czasie.

- Do oceny niepewności wyznaczania współczynnika wnikania ciepła α_{in} spowodowanej niepewnościami systematycznymi zastosowano wzór (7.2). W tym wzorze powinno się sumować wartości bezwzględne wyrazów po prawej stronie (7.2), tj. obliczyć niepewność maksymalną (H. Szydłowski, Pracownia fizyczna, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994, str. 57, wzór (1.4)). Następnie z prawa propagacji wariancji opracowanego przez Gaussa (wzór 7.12) obliczono średnie odchylenie standardowe wyznaczanego pośrednio współczynnika wnikania ciepła $\bar{\alpha}_{in}$ dzięki czemu można wyznaczyć 68,3 procentowy przedział ufności $[\alpha_{in} - u(\Delta\alpha_{in}), \alpha_{in} + u(\Delta\alpha_{in})]$. Zwykle w literaturze [H. W. Coleman, W. G. Steele, Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers, Third Edition, Wiley, Hoboken 2009] niepewność wielkości wyznaczanej pośrednio ocenia się za pomocą 95-cio procentowego przedziału ufności $[\alpha_{in} - 2u(\Delta\alpha_{in}), \alpha_{in} + 2u(\Delta\alpha_{in})]$ - gdzie $u(\Delta\alpha_{in})$ obliczane jest ze wzoru (7.12) na stronie 104 rozprawy. Przy takim sposobie obliczania zarówno niepewność maksymalna jak i 95-cio procentowy przedział ufności będą większe odpowiednio od $\Delta\alpha_{in}$ (wzór 7.2) i od $u(\Delta\alpha_{in})$ obliczanej według wzoru (7.12). W tym ostatnim przypadku niepewność będzie dwukrotnie większa.
- W rozdziale 9 rozprawy wyprowadzony został wzór na radiacyjną wymianę ciepła między dwoma powierzchniami płaskimi między którymi znajduje się ośrodek optycznie czynny, w danym przypadku para wodna. Brak jest powołań na literaturę z zakresu radiacyjnej wymiany ciepła, w której tego typu zagadnienia były analizowane, np.
 - J. R. Mahan, Radiation Heat Transfer, Wiley, Hoboken 2002, rozdział 7 (Solution of the Equation of Radiative Transfer)
 - The Heat Transfer Problem Solver, Research and Education Association, Piscataway 1999, Problem 8-33, str. 515
 - J. R. Howell, R. Siegel, M. P. Menguc, Thermal Radiation Heat Transfer, 5th Edition, CRC Press, Boca Raton 2010
 - M. F. Modest, Radiative Heat Transfer, 3rd Edition, Academic Press, New York 2013

Wymienione wyżej uwagi krytyczne nie zmniejszają merytorycznej wartości rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia z nadmiarem wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim. Rozprawa jest wartościowa z uwagi na obszerne badania eksperymentalne. Wyniki tych badań mogą być wykorzystane w praktyce, w szczególności w procesie hartowania stali.

Z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczeniu mgr inż. Sylwii Weislik do publicznej obrony swojej rozprawy. Z uwagi na oryginalne badania eksperymentalne rozprawa zasługuje na wyróżnienie.

David Taylor