

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Rup

Kraków, 2014-10-08

Politechnika Krakowska

Instytut Inżynierii Ciepłej i Procesowej

Wydział Mechaniczny

Al. Jana Pawła II 37

31-864 Kraków

## RECENZJA

### PRACY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Anny Tyburczyk

pt. „Badania wymiany ciepła elementów z mikropokryciem porowatym o właściwościach anizotropowych”

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Tadeusz Orzechowski, prof. PŚk.

Praca została skierowana do oceny na podstawie uchwały Rady Wydziału Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 21.05.2014 r.

### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa liczy 162 strony, jest ujęta w sześciu rozdziałach, zawiera także wnioski końcowe, spis cytowanej literatury oraz cytowanych prac własnych. Spis literatury zawiera 159 pozycji. Na początku rozprawy zamieszczono spis ważniejszych oznaczeń i wprowadzenie.

W rozdziale 1 opisano urządzenia i aparaty do wzmożonej wymiany ciepła. Skupiono się na wymiennikach, w których realizowany jest proces wymiany ciepła z uwzględnieniem zmiany fazy czynnika. W literaturze omawiane wymienniki ciepła noszą nazwę rur ciepła lub ciepłowodów.

Rozdział 2 zawiera krótki opis procesu wrzenia czynnika grzewczego. Omówiono tu klasyczną krzywą wrzenia i mechanizmy powstawania pęcherzyków pary.

W rozdziale 3 przytoczono opis metod intensyfikacji procesu wymiany ciepła przy wrzeniu. W rozdziale tym wyróżniono trzy grupy metod, są nimi metody pasywne, metody aktywne i techniki łączone. Uwagę skupiono na metodach pasywnych, a szczególnie na rozwijaniu powierzchni wymiany ciepła przez jej ożebrowanie oraz nakładanie dodatkowych mikrostruktur porowatych.

W rozdziale 4 sformułowano tezy, cele i zakres pracy. W ujęciu Autorki rozprawy do głównych celów pracy należą:

- określenie wpływu wybranych parametrów mikropokrycia siatkowego na współczynnik przejmowania ciepła przy wrzeniu na powierzchniach nieizotermicznych,
- opracowanie skutecznego algorytmu do aplikacji otrzymanych wyników na elementy o innej geometrii,
- zbadanie dokładności dostępnych w literaturze zależności korelacyjnych dla nieizotermicznych powierzchni ożebrowanych.

W rozdziale 5 przedstawiono indywidualnie dobraną metodykę prowadzonych badań eksperymentalnych. Ponadto przytoczono opis i schemat specjalnie zbudowanego stanowiska pomiarowego. W rozdziale tym opracowano model matematyczny badanego procesu wymiany ciepła dla żebra płaskiego o powierzchniach gładkich. Do wyznaczenia lokalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła zastosowano metodę bilansów elementarnych. Uzyskane wyniki z obliczeń numerycznych porównano z odpowiednimi rezultatami badań eksperymentalnych.

W rozdziale 6 zaprezentowano uzyskane z pomiarów rezultaty charakterystyczne dla żeber o nieizotermicznej powierzchni z wielowarstwowym pokryciem siatkowym. W szczególności przedmiotem badań było zebro wykonane z miedzi, którego jedną powierzchnię pokryto warstwą siatki wykonaną z drutu miedzianego o średnicy  $d=0,2$  mm, charakterystyczny wymiar bloku oczka wynosił  $w=0,32$ mm lub  $w=0,40$ mm. Czynnikiem grzewczym wykorzystywanym w badaniach była woda lub etanol. Również w tym rozdziale opracowano model matematyczny badanego procesu wymiany ciepła zakładając anizotropowe właściwości wielowarstwowego pokrycia siatkowego. W szczególności uwzględniono dwie różne wartości współczynnika przewodzenia ciepła odpowiednio dla kierunku wzdłużnego i poprzecznego. Wyznaczono też w sposób numeryczny wartości współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni z wielowarstwowym pokryciem siatkowym. W końcowej części tego rozdziału przedstawiono opis specjalnie zbudowanego stanowiska badawczego dla próbek o powierzchniach izotermicznych. W dalszej części rozdziału zaprezentowano porównanie uzyskanych rezultatów dla próbek o powierzchniach nieizotermicznych gładkich i z pokryciem siatkowym oraz dla próbek o powierzchniach izotermicznych.

## 2. Tezy pracy

W rozdziale 4 pracy Autorka przedstawia następujące tezy:

- *istnieją optymalne parametry pracy żebra ze względu na jego efektywność,*
- *można z wystarczającą dokładnością wykorzystać rezultaty badań otrzymanych dla elementów o powierzchniach wykonanych za pomocą tych samych technologii lecz o innej geometrii,*

*- analiza wymiany ciepła na pokryciach mikrostrukturalnych wymaga uwzględnienia właściwości anizotropowych struktur pokrycia.*

### **3. Dobór tematu, zakres, cele i tezy rozprawy**

Dobór tematu rozprawy doktorskiej uważam za trafny, aktualny i ważny zwłaszcza w tak często spotykanych w praktyce zagadnieniach jak intensyfikacja procesu wymiany ciepła w zakresie wrzenia. Warto zaznaczyć, że analizowany proces wymiany ciepła w zakresie wrzenia cechuje się bardzo dużymi wartościami współczynnika przejmowania ciepła. Wspomniane, bardzo duże wartości współczynnika przejmowania ciepła umożliwiają budowę zwartych (o małych gabarytach) aparatów do wymiany ciepła o wysokiej wydajności.

Sformułowany, szeroki zakres rozprawy obejmuje zarówno badania eksperymentalne jak też prace teoretyczne, posiadające duże znaczenie praktyczne i poznawcze.

Sposób sformułowania celów rozprawy, zakresu pracy jak również jej tezy, świadczy o dojrzałości naukowej Autorki.

### **4. Stopień wiedzy Autorki, umiejętność przedstawiania uzyskanych wyników naukowych w zakresie dyscypliny dotyczącej rozprawy**

Lektura rozprawy upewnia czytelnika, że Autorka rozprawy jest wnikliwym znawcą teorii i badań eksperymentalnych podjętego zagadnienia. Ponadto z biegłością potrafi się posługiwać aparatem matematycznym i informatycznym, o czym świadczy między innymi opracowany autorski program do rozwiązywania nieliniowych układów równań algebraicznych napisany w środowisku pakietu MATLAB.

Należy podkreślić duże umiejętności Autorki w zakresie planowania i przeprowadzania prac eksperymentalnych o szerokim zakresie. Na uwagę zasługuje również umiejętność oszacowania błędów pomiarów wynikających z zastosowanych metod i przyrządów pomiarowych.

Przeprowadzenie szerokich badań doświadczalnych i dokonanie wnikliwej analizy porównawczej uzyskanych rezultatów pozytywnie świadczy o umiejętnościach Autorki rozprawy.

### **5. Uwagi krytyczne (dyskusyjne)**

Lektura rozprawy nasuwa pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym, których wyjaśnienie byłoby pomocne w ewentualnych, przyszłych publikacjach Autorki.

- 1) Niejednoznacznie sformułowane zdanie na str. 69 w liniach 18-20 liczonych od dołu (ld).

- 2) Wyjaśnić treść zdania na str. 73 pod rys. 5.7 w kontekście wzoru (5.11).
  - 3) Wyjaśnić wartości współczynnika determinacji  $R^2$  przytoczone na rys. 5.9 w odniesieniu do dużego rozrzutu punktów pomiarowych.
  - 4) Brak legendy opisującej znaczenie przedstawionych punktów pomiarowych na rys. 5.11.
  - 5) Błędnie przytoczony zapis równania bilansu (5.20) na str. 82.
  - 6) Wyjaśnić jakie są temperatury przegrzania w przypadku wyników pomiarów dotyczących żebra aluminiowego, zaprezentowanych na rys. 5.16 i 5.17.
  - 7) Wydaje się, że przedstawiona na rys. 5.22 różnica temperatur przegrzania jest znacznie większa od odpowiedniej przedstawionej na rys. 5.21, str. 86.
  - 8) Wyjaśnić odmienne usytuowanie osi wykresu na rys. 5.8 i 5.23 na str. 87.
  - 9) Na str. 89, w zdaniu l.d 5-6 powinno być :”liczby  $Bi$  mniejszej od 0.1.”
  - 10) Należy użyć inne oznaczenie dla wielkości z lewej strony rów. (5.24) na str. 93.
  - 11) Na rys. 6.7, str. 98 przytoczono krzywe wrzenia charakterystyczne bardzo dużymi wartościami współczynnika przejmowania ciepła, jak definiowano ten współczynnik w przypadku powierzchni z pokryciem siatkowym?
  - 12) Mało precyzyjny zapis równania bilansu (6.54) na str. 124, w odniesieniu do wymiarów objętości kontrolnych przedstawionych na rys. 6.26.
  - 13) Mało precyzyjny zapis równania bilansu (6.60) na str. 125, wymiary objętości kontrolnych są nie zgodne z przedstawionymi na rys. 6.27, brak temperatury płynu otaczającego żebro osiatkowane. Wydaje się, że wymiary objętości kontrolnych dotyczących warstwy – struktury siatkowej- będą różne w zależności od ilości warstw.
  - 14) Brak opisu warunków brzegowych na powierzchniach nieosiatkowanych żebra.
  - 15) Brak oznaczeń wielkości w zapisie wzoru (6.62) na stronie 133.
- Inne, drobne usterki zauważone w pracy przekazałem Autorce.

## 6. Ogólna ocena pracy

W ramach realizacji pracy przeprowadzono obszerne badania doświadczalne dotyczące intensyfikacji procesu wymiany ciepła w zakresie wrzenia. Badania te wykonano na specjalnie zbudowanych stanowiskach badawczych wyposażonych w nowoczesną aparaturę pomiarową. Uzyskane w pracy rezultaty posiadają wartości poznawcze i aplikacyjne.

Z przeprowadzonych w pracy badań doświadczalnych wynika wyraźna zależność pomiędzy strukturą pokrycia powierzchni wymiany ciepła a ilością odprowadzanego od niej ciepła. Elementy grzejne z pokryciem siatkowym intensywniej odprowadzają ciepło do otaczającego płynu. Współczynnik przejmowania ciepła jest w omawianym przypadku silnie zależny od właściwości pokrycia siatkowego i przyjmuje wyraźnie większe wartości w porównaniu z odpowiednimi

wartościami dla przypadku powierzchni gładkich (bez pokrycia siatkowego) zwłaszcza dla małych wartości temperatury przegrzania. Z przeprowadzonych w pracy badań wynika również, że duże gęstości strumienia ciepła przekazywane od nagrzewanego elementu (żebra) z pokryciem siatkowym w warunkach małych wartości temperatury przegrzania są wywołane odparowaniem cienkiej warstwy cieczy w zakresie wrzenia pęcherzykowego.

Oryginalnym wkładem Doktorantki jest wyznaczenie przebiegów zmian lokalnego współczynnika przyjmowania ciepła na nieizotermicznych powierzchniach elementów grzejnych z pokryciem siatkowym oraz bez pokrycia.

Ważne znaczenie mają również uzyskane wyniki badawcze dotyczące powierzchni izotermicznych oraz ich porównanie z odpowiednimi rezultatami otrzymanymi dla powierzchni nieizotermicznych jak też przeprowadzona analiza porównawcza z uwzględnieniem dostępnych w literaturze odpowiednich wyników badań.

Merytoryczną wartość pracy oceniam wysoko. Wyżej wymienione uwagi krytyczne mają głównie charakter dyskusyjny.

### **Wniosek końcowy**

Stwierdzam, że Doktorantka osiągnęła zamierzone cele, udowodniła postawione tezy i wyczerpująco zrealizowała założony zakres pracy, wnosząc swój wkład zarówno w poznanie, usystematyzowanie jak i praktyczne stosowanie procesu wzmoczonej wymiany ciepła w zakresie wrzenia.

Stwierdzam, że Autorka rozprawy wykazała się dużym zasobem wiedzy w problematyce, której ona dotyczy. Wykazała się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod. Uzyskane rezultaty badawcze są bardzo atrakcyjne z punktu widzenia zastosowań w praktyce.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa mgr inż. Anny Tyburezyk spełnia z naddatkiem wymagania określone w *Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki* dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych, w związku z czym może być dopuszczona do publicznej obrony.

Uwzględniając, że w rozprawie podjęto bardzo ważny z poznawczego punktu widzenia problem i rozwiązano go w sposób zasługujący na uznanie oraz to, że rozprawa wzorowo spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, a ponadto doceniając, że Autorka opublikowała kilkanaście prac naukowych, uczestniczyła w wielu pracach badawczo – naukowych oraz doceniając aplikacyjny aspekt uzyskanych wyników – proponuję wyróżnienie rozprawy.

