

prof. dr hab. inż. Romuald Mosdorf
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45c
15-351 Białystok

Białystok, 29.01.2019

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Kingi Strąk pt. "Badania intensyfikacji wrzenia podczas przepływu przez minikanaly prostokątne"

wykonana na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej, prof. dr hab. inż. Tomasza Lecha Stańczyka, zgodnie z decyzją Rady Wydziału z dnia 20.12.2018 r

Promotorem rozprawy jest: dr hab. inż. Magdalena Piasecka, prof. PŚk, promotorem pomocniczy jest dr hab. Beata Maciejewska, prof. PŚk. Praca powstała w ramach projektu badawczego NCN o numerze umowy UMO-2016/23/N/ST8/01247 sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji o numerze DEC-2016/23/N/ST8/01247

1. Charakterystyka pracy

Opiniowana praca zawarta na 215 stronach składa się z 8 rozdziałów oraz 7 załączników. W rozdziale 2. "Przegląd literatury dotyczącej zagadnień związanych z procesem wrzenia" przedstawiono klasyfikację kanałów, klasyfikację struktur przepływu oraz omówiono wybrane wyniki badań wrzenia w przepływie w kanałach o małej średnicy. Kolejne podrozdziały poświęcono metodom wyznaczania: współczynnika przejmowania ciepła, stopnia suchości i stopnia zapelnienia oraz metodom intensyfikacji wymiany ciepła i pomiaru temperatury powierzchni grzejnej. Przedstawiono równania kryterialne opisujące wymianę ciepła przy wrzeniu w objętości, konwekcji wymuszonej oraz wrzeniu w przepływie.

Tezy pracy przedstawiono w rozdziale 3., natomiast cel i zakres badań w rozdziale 4.

Badania eksperymentalne i procedurę badawczą przedstawiono w rozdziale 5. Omówiono budowę stanowiska pomiarowego, zastosowane moduły pomiarowe oraz stosowane w eksperymencie powierzchnie grzejne (gładkie oraz rozwinięte). Przedstawiono zastosowaną metodykę badań.

Stanowisko eksperymentalne (rys. 5.1) składało się z głównego obiegu czynnika roboczego, system akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych, system zasilania, system oświetlenia oraz kalibracji. Główną częścią składową całego stanowiska badawczego był moduł pomiarowy z jednym/dwoma/trzema równoległymi minikanalami o przekroju prostokątnym, zaprezentowany na rys. 5.2. Metody obliczeniowe stosowane do wyznaczenia lokalnego współczynnika przejmowania ciepła przedstawiono w rozdziale 6. Omówiono metodę jednowymiarową oraz dwuwymiarową.

Wyniki badań oraz analiz przedstawiono w rozdziale 7. Omówiono wyniki badań wizualizacyjnych, uzyskane wartości lokalnych współczynników przejmowania ciepła, krzywe wrzenia oraz obserwowane struktury przepływu dwufazowego.

Na rys. 7.1 i 7.2 przedstawiono termogramy powierzchni grzejnej uzyskane za pomocą kamery termowizyjnej oraz termografii ciekłokrystalicznej, a także przykładowe obrazy struktur przepływu. Zależność temperatury powierzchni płyty grzejnej otrzymaną z zastosowaniem termowizji oraz termografii ciekłokrystalicznej przy różnych rodzajach wrzenia przedstawiono na rys. 7.3, 7.4, 7.5. 7.6. Zmiany wartości współczynnika

przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do minikanalu, otrzymane z zastosowaniem termowizji oraz termografii ciekłokrystalicznej przy różnych rodzajach wrzenia (wyznaczone z zastosowaniem "metody 1D"), przedstawiono na rys. 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12. Stopień zapełnienia kanału w funkcji stopnia suchości, dla kanału zorientowanego pionowo ze zmodyfikowaną powierzchnią płyty grzejnej (teksturowaną laserowo-wibracyjnie) przedstawiono na rys. 7.13. Krzywą wrzenia przedstawiono na rys. 7.14, zaś obrazy struktur przepływu na rys. 7.15-16.

Wpływ wybranych parametrów i czynników na intensyfikację wymiany ciepła omówiono w rozdziale 7.2. Przedstawiono wyniki uzyskane przy różnych powierzchniach grzejnych, zmiennym położeniu minikanalu oraz różnych czynnikach wrzących.

Wyznaczone wartości współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do kanału, otrzymane przy różnych powierzchniach grzejnych oraz różnych strumieniach ciepła przedstawiono na rys. 7.17-23. Obrazy struktur przepływu dwufazowego pokazano na rys. 7.24-26, zaś krzywe wrzenia na rys. 7.27 i 7.28.

Współczynnik przejmowania ciepła w funkcji: gęstości strumienia ciepła, długości minikanalu, orientacji minikanalu dla (FC-72) pokazano na rys. 7.29. Obrazy struktur przepływu dwufazowego, temperaturę powierzchni grzejnej, współczynnik przejmowania ciepła otrzymane przy różnych nachyleniach kanału przedstawiono na rys. 7.30-38. Obrazy struktur przepływu dwufazowego otrzymane przy różnych nachyleniach kanału pokazano na rys. 7.39 - 7.43, zaś krzywe wrzenia na rys. 7.44.

Zmiany wartości współczynnika przejmowania ciepła w funkcji długości od wlotu do minikanalu, uzyskane dla trzech gęstości strumienia masy i strumienia ciepła, pokazano na rys. 7.45. Krzywe wrzenia dwóch odległości od wlotu do minikanalu i trzech gęstości strumienia masy pokazano na rys. 7.46. Obrazy struktur przepływu dwufazowego uzyskane dla trzech gęstości strumienia masy pokazano na rys. 7.47. Wartości współczynnika przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do minikanalu, otrzymane dla różnych ciśnień na wlocie do kanału, pokazano na rys. 7.48. Współczynnik przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do wylotu minikanalu, dla dwóch głębokości kanału, pokazano na rys. 7.49 i 7.51, struktury przepływu pokazano na rys. 7.50.

Wyniki badań uzyskane dla różnych czynników wrzących pokazano na rys. 7.52-57.

W rozdziale 7.3 przedstawiono porównanie wyników uzyskanych za pomocą różnych metod (1D i 2D). Współczynnik przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do minikanalu, wyznaczony przy wykorzystaniu różnych metod pokazano na rys. 7.58.

Propozycję własnego równania kryterialnego przedstawiono w rozdziale 7.4. Równanie opisuje wymianę ciepła w obszarze wrzenia przechłodzonego przy różnych rozwinięciach powierzchni grzejnej, zmiennej orientacji modułu testowego i różnych czynnikach roboczych. W rozdziale 7.5 przedstawiono porównanie uzyskanych wyników z danymi literaturowymi. Testy własnego równania kryterialnego (7.8) pokazano na rys. 7.59 - 66.

Podsumowanie pracy przedstawiono w rozdziale 8.

Praca zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń, wykaz tabel i ilustracji. Wykaz bibliografii zawiera 202 cytowane prace, wykaz patentów (2) oraz wykaz cytowanych stron internetowych (6).

W załączniku 1 przedstawiono charakterystykę głównych elementów stanowiska badawczego i systemów pomiarowych. W załączniku 2 przedstawiono charakterystykę właściwości stosowanych w eksperymencie powierzchni grzejnych. Właściwości płynów chłodniczych zastosowanych w badaniach przedstawiono w załączniku 3. Charakterystyka bezstykowych metod pomiaru temperatury powierzchni grzejnej przedstawiona jest w załączniku 4. Załącznik 5 zawiera porównanie pomiaru temperatury powierzchni grzejnej uzyskane przy wykorzystaniu różnych technik pomiarowych. Ocenę dokładności

wyznaczania strumienia ciepła i współczynnika przejmowania ciepła omówiono w załączniku 6. Załącznik 7 zawiera zestawienie parametrów, przy których prowadzono pomiary.

2. Teza pracy

Zaproponowana w pracy hipoteza badawcza ma postać:

"Na współczynnik przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie przez prostokątny minikanal wywierają wpływ: parametry cieplno-przepływowe, geometria i orientacja przestrzenna minikanalu, rodzaj czynnika wrzącego i rozwinięcie powierzchni grzejnej."

Cel i zakres badań został sformułowany następująco: "analiza procesu wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie kilku płynów roboczych przez minikanaly o przekroju prostokątnym, uwzględniająca wpływ: wybranych parametrów cieplno-przepływowych, zmiennej geometrii i orientacji przestrzennej kanału."

Cele szczegółowe odnoszące się do badań eksperymentalnych oraz rozważań teoretycznych sformułowano następująco:

- *"wyznaczenie lokalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła, zweryfikowanie wpływu powierzchni płyt grzejnych o różnym stopniu rozwinięcia i orientacji przestrzennej kanału oraz wybranych parametrów eksperymentalnych na intensyfikację procesu wrzenia."*
- *"sformułowanie jednowymiarowej (1D) i dwuwymiarowej (2D) metody obliczeniowej, opisującej przepływ ciepła przez poszczególne elementy modułu pomiarowego, celem wyznaczenia lokalnych wartości współczynników przejmowania ciepła na styku płyta grzejna – płyn oraz propozycja własnego równania kryterialnego, opisującego wymianę ciepła przy wrzeniu podczas przepływu w minikanalach."*

3. Oryginalność pracy

Oryginalnymi osiągnięciami pracy są:

- opracowanie metodyki prowadzenia badań eksperymentalnych intensyfikacji wrzenia podczas przepływu przez minikanaly prostokątne,
- przeprowadzenie systematycznych i precyzyjnych pomiarów wrzenia w minikanale prostokątnym,
- opracowanie wyników badań eksperymentalnych,
- propozycja własnego równania kryterialnego, opisującego wymianę ciepła przy wrzeniu w minikanalach.

4. Wartości użytkowe pracy

Zjawisko wrzenia występuje w wielu przemysłowych systemach takich jak: wymienniki ciepła, generatory pary, skraplacze, termosyfony itp. Ciągła tendencja do miniaturyzacji urządzeń stawia wyzwania dla systemów odprowadzających ciepło. Układy wyposażone w minikanaly potrafią odprowadzać wysokie strumienie ciepła. Przedstawione w pracy systematyczne badania eksperymentalne wymiany ciepła w minikanale prostokątnym oraz opracowanie korelacji pozwalającej na wyznaczenie liczby Nusselta z uwzględnieniem rodzaju powierzchni grzejnej, zmiennym położeniu kanału oraz różnych czynników

roboczych ma duże znaczenie dla procesu projektowania nowych konstrukcji układów wykorzystywanych w procesie wymiany ciepła.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić w czasie obrony pracy są następujące:

- W pracy stwierdzono, że "Po uzyskaniu ustabilizowanych wartości ciśnienia i natężenia przepływu, podczas eksperymentów dla każdej serii pomiarowej stopniowo zwiększano strumień ciepła dostarczany do płyty grzejnej, a następnie zmniejszano przez płynną regulację mocy prądu." W Tab. 10.9 nie podano czasu trwania pomiarów w czasie "serii pomiarowej", dlatego wyjaśnienia wymaga zastosowana szybkość zmiany parametrów układu oraz kwestia wpływu tego procesu na zjawiska zachodzące we wrzeniu.
- Czy w trakcie pomiarów obserwowano niegasnące fluktuacje ciśnienia i czy charakter tych zmian zależała od wielkości strumienia ciepła dostarczanego do układu?
- Czy zamieszczone na rys. 7.3 - 7.5 zmiany temperatury powierzchni grzejnej są wartościami średnimi, czy chwilowymi? (w rzeczywistości wielkości te fluktuują w czasie).
- Jakie procesy zachodzące podczas wrzenia powodują, że najwyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła uzyskano dla powierzchni grzejnej ustawionej pod kątem 120° ?

Praca zawiera szereg drobnych błędów redakcyjnych (poniżej podałem przykładowe uchybienia):

- Tytuły rysunków nie zawierają pełnej informacji o zawartości rysunku - co utrudnia czytanie pracy (np. rys. 7.1 prezentuje również struktury przepływu, rys.7.30).
- Prezentacja wyników pomiarów na wykresach z wykorzystaniem mniejszych znaczników byłaby lepszym rozwiązaniem.
- s.54 głębokość i szerokość minikanalów podano w przedziałach - powinny być podane wartości wykorzystywane w eksperymentach.
- Umieszczone na rysunkach opisy są odwołaniami do innych rysunków - co utrudnia czytanie pracy (np. rys.7.4, 7.5, 7.3).
- s.82. w podpisie pod rys.7.15 nie podano, co oznaczają numery klatek.
- s.83. na rys 7.16 nie pokazano skali (wymiaru), co utrudnia określenie rozmiaru pęcherzy - w opisie rysunku również brak jest takiej informacji.
- s.91 rys.7.23 w podpisie pod rysunkiem nie podano, dlaczego w środkowej części wykresu brak danych dla powierzchni "laser nr 2".
- s.136 - "Liczby te zastosowano jako określające, a jako określoną - liczbę Nusselta (Nu)".

6. Wnioski końcowe

Rozpatrując całość przedłożonej pracy doktorskiej mgr inż. Kingi Strąk, stwierdzam, że wykazała się dobrą znajomością wiedzy o procesie wrzenia oraz praktycznymi umiejętnościami w zakresie prowadzenia badań eksperymentalnych. Wykazała się również umiejętnością modelowania złożonych procesów wrzenia w minikanalach.

Uważam, że główną wartością pracy jest zarówno zebranie i analiza obszernego materiału doświadczalnego, jak również opracowanie własnej korelacji pozwalającej na wyznaczenie liczby Nusselta z uwzględnieniem rodzaju powierzchni grzejnej, zmiennego położenia kanału oraz różnych czynników roboczych.

Wykonana przez mgr inż. Kingę Strąk praca pt. „Badania intensyfikacji wrzenia podczas przepływu przez minikanaly prostokątne” jest opracowaniem, które wnosi oryginalny wkład w poznanie i opis zjawisk zachodzących podczas złożonych procesów występujących we wrzeniu w minikanalach.

Moim zdaniem, praca spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki z dn.14 marca 2003 r, dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie Pani mgr inż. Kingi Strąk do publicznej obrony pracy.

