



Dr hab inż. Waldemar Kuczyński prof. PKosz.
Politechnika Koszalińska Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki
75 – 620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17
Tel. 94 3478-420, 437
email: waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl



Koszalin, 09.01.2020 r

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Sławomira Płaczkowskiego pt.:
„Zastosowanie techniki fotograficznej do jednoczesnej rejestracji struktur przepływu dwu-
fazowego i pomiaru stopnia zapełnienia”

Recenzję wykonano na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku prof. dr hab. inż. Janusza Zielińskiego w oparciu o pismo nr Ldz. PO/43/2019 z dnia 16.12.2019 r.

Rozprawa doktorska powstała pod kierunkiem **prof. dr hab. inż. Mieczysława Poniewskiego** oraz **dr inż. Mirosława Grabowskiego** jako promotora pomocniczego.

1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest analiza możliwości wykorzystania techniki filmowania i fotografowania zjawisk towarzyszących przemianie fazowej wrzenia podczas przepływu dwufazowego w minikanalach rurowych. Wskazane metody posłużyły w szczególności do identyfikacji tworzących się struktur przepływu oraz do określenia lokalnych wartości stopnia zapełnienia. W celu realizacji postawionych w pracy założeń przeprowadzono badania eksperymentalne, które umożliwiły wykonanie wskazanych obserwacji. Opracowano własną procedurę pomiarową oraz obliczeniową opartą o założenia przyjęte z programu MathWorks Matlab oraz LabView.

W badaniach eksperymentalnych zastosowano tzw. szybką kamerę filmową co umożliwiło zgromadzenie odpowiedniego materiału fotograficznego i filmowego. Badania eksperymentalne zrealizowano w minikanalach rurowych o położeniu poziomym i przekrojach kwadratowych oraz prostokątnych. Proces wrzenia inicjowano dostarczając odpowiednią ilość energii cieplnej do badanego medium za pomocą cienkiej folii z materiału oporowego lub masowym grzejnikiem wykonanym z miedzi. Przygotowane autorskie oprogramowanie umożliwiło odpowiednie przetwarzanie danych gromadzone przy użyciu szybkiej kamery filmowej (język M – MathWorks Matlab dla zrealizowanych wcześniej układów zasilania minikanalu) oraz układów pozycjonowania i rejestracji ruchu kamery termowizyjnej i filmowej (wykonane w języku G – LabView).

Badania eksperymentalne realizowano w warunkach równowagi termodynamicznej, w której zidentyfikowano i rejestrowano objętościowe natężenie przepływu, ciśnienie oraz temperaturę badanego czynnika termodynamicznego. Wykonywano również pomiar mocy energii zasilającej grzejnik elektrycznej. Parametry termodynamiczne mierzono na wlocie i wylocie z sekcji pomiarowej natomiast za pomocą kamery rejestrowano obrazy przepływu dwufazowego w wybranych przekrojach badanych minikanalów. Dodatkowo prowadzono identyfikację dwuwymiarowych rozkładów temperatury powierzchni zewnętrznej folii grzewczej oraz w wybranych punktach wewnątrz grzejnika masowego.

W ramach analizy uzyskanych wyników zaobserwowano tworzenie się struktur przepływu w których występowały małe pojedyncze pęcherze pary, duże i wydłużone całkowicie widoczne pęcherze pary oraz wydłużone częściowo widoczne pęcherze pary charakterystyczne dla przepływu filmowego. Doktorant dla każdej z zaobserwowanych struktur przygotował w środowisku MathWorks Matlab skrypty do ich identyfikacji i odczytu. Umożliwiło to przeprowadzenie analizy i określenia stopnia zapełnienia wrzących w minikanale czynników termodynamicznych. Metoda ta polegała na binaryzacji czyli zamianę zidentyfikowanych pęcherzy pary na białe powierzchnie na rozpatrywanych zdjęciach co umożliwiało określenie wymiarów ich wymiarów geometrycznych. Uzyskane geometryczne dwuwymiarowe obrazy pęcherzy przetransformowano do postaci trójwymiarowej co umożliwiło wyznaczyć lokalny stopień zapełnienia. Opracowaną metodę zastosowano dla każdej zidentyfikowanej w eksperymencie struktury przepływu tworzącej się przy różnych wartościach gęstości strumienia ciepła i objętości. Stwierdzono, że uzyskane wyniki charakteryzują się niższym błędem maksymalnym w odniesieniu do tych, które są dostępne w literaturze przedmiotu.

Uzyskane wyniki posłużyły do zredagowania zbiorczego zestawienia wartości stopnia zapełnienia w funkcji odległości od wlotu do minikanalu. Opracowano również mapy przepływu dwu-fazowego realizowanego wrzenia w przepływie w minikanalach o rozpatrywanych przekrojach poprzecznych.

Rozprawę zredagowano na 96 stronach w 6 rozdziałach z wykazem oznaczeń i literatury oraz załącznikami. Zauważa się wyraźny podział opracowania na część teoretyczną, czyli przegląd literatury z rozpatrywanego tematu, eksperymentalną oraz analizę uzyskanych wyników. W szczególności w opracowaniu ujęto następujące informacje:

we **wstępnym rozdziale** Autor przedstawia genezę swojej rozprawy doktorskiej. W tej części opracowania przedstawiono podstawowe informacje dotyczące realizacji opracowania. Skupiono się na zagadnieniach związanych z metodami wyznaczania stopnia zapełnienia. Zwięźle opisano metodę pułapkową; prześwietlania mieszaniny dwufazowej promieniami X , β , γ ; metodę przetwarzania obrazów; metodę sond oporowych; metodę pojemnościową; metodę akustyczną; metody PIV, Micro-PIV i PT; metody termografii z zastosowaniem ciekłych kryształów, służące do pomiaru rozkładów temperatury na powierzchniach grzejnych lub w cieczy; metody OCT służące do analizy i wizualizacji procesów dynamicznego wrzenia na ogrzewanych powierzchniach; metody przetwarzania obrazów służące do badania procesu nukleacji i wizualizacji struktur dwufazowych. W rozdziale tym Autor przedstawił również aktualnie stosowane korelacje obliczeniowe do wyznaczania stopnia zapełnienia. Informacje te odniesiono do takich czynników jak woda, etanol oraz tzw. czynnika suchego FC72, wszystkich występujących w stanie ciekłym.

W kolejnym podrozdziale opisano metody definiowania struktur przepływu podczas wrzenia w minikanalach rurowych. Uwzględniono w tych informacjach wpływ orientacji kanału tj. poziomą i pionową. W tej części przypomniano również informacje związane z krzywą wrzenia oraz opisano zwięźle zerowy, pierwszy i drugi kryzys wrzenia.

Rozdział 2 przedstawia cel badań i postawioną hipotezę. Zgodnie z podanymi informacjami przedmiotem pracy jest określenie stopnia zapełnienia i struktur przepływu podczas wrzenia w przepływie w minikanalach rurowych. W zasadzie w tym miejscu opracowania skrótowo powtórzono informacje ze słowa wstępnego do rozprawy. Na podstawie tych wiadomości zdefiniowano hipotezę, zgodnie z którą, stwierdzono, że zastosowanie proponowanych technik wizualizacji i rejestracji danych z tzw. kamery szybkiej i opracowanym skryptów identyfikujących pęcherze powstającej podczas wrzenia pary można znacznie dokładniej wyznaczyć stopnie zapełnienia niż jest to obecnie proponowane.

Rozdział 3 przedstawia metodykę wykonanych badań eksperymentalnych; opis stanowiska eksperymentalnego; systemy akwizycji danych pomiarowych; procedury obliczania udziału objętościowego fazy parowej w minikanale o przekroju kwadratowym i prostokątnym. W tej części rozdziału przedstawiono przykładowe uzyskane wyniki rejestracji trzech rodzajów pęcherzy parowych: małych pojedynczych dobrze widocznych o średnicy równej lub mniejszej od średnicy minikanalu; dużych; wydłużonych pęcherzy pary, całkowicie widocznych o średnicy równej średnicy minikanalu; dużych, wydłużonych pęcherzy pary, częściowo widocznych o średnicy równej średnicy minikanalu. Podano autorskie propozycje obliczenia objętości tych pęcherzy oraz na tej podstawie wyznaczenia stopnia zapełnienia.

W dalszej części przedstawiono sposób pomiaru stopnia zapełnienia metodą rejestracji filmów i fotografii. Opisano główne techniki przetwarzania obrazów do wykrywania ruchu i obiektów czyli metodę odejmowania tła, statystyczną, przetwarzania materiału filmowego i fotograficznego. Następnie przedstawiono własne opracowanie uzyskanych wyników badań w obszarze metody odejmowania tła dla wszystkich trzech przypadków zidentyfikowanych pęcherzy pary. Istotnym elementem tej części pracy jest określenie parametrów termodynamicznych, w których zidentyfikowano dany rodzaj pęcherzy parowych. Przedstawiono w tej części pracy funkcjonalność opracowanych w programie MathWorks Matlab skryptów obliczeniowych wraz ze schematem funkcyjnym. Umieszczono tutaj również cały opis funkcyjny tych skryptów oraz uzyskane wyniki w tzw. operacjach morfologicznych.

Rozdział 4 ujmuje analizę błędów i ocenę dokładności wykonanych pomiarów. Odniesiono te informacje do wyznaczenia tzw. błędów bezwzględnych wartości mierzonych i obliczanych. Określono te wartości dla wielkości mierzonych takich jak: ciśnienie, temperatura, napięcie i natężenie prądu elektrycznego, objętościowego natężenia przepływu, czasu, gęstości strumienia masy i ciepła. Działania te przeprowadzono również dla wielkości obliczeniowych tj. stopnia zapełnienia i zidentyfikowanych struktur przepływu. Autor opracowania wykazuje, że zaproponowana w rozprawie metoda skryptów jest znacznie dokładniejsza niż te, które stosowano do tej pory. Zestawienie takie przedstawiono w tablicy 14 dla struktur przepływu i w tablicach 16 i 17 dla stopnia zapełnienia. W rozdziale 4 opisano również występujące problemy z detekcją obiektów i obróbki obrazów.

Rozdział 5 nosi tytuł Wyniki badań eksperymentalnych. Przedstawiono w nim jedno zdjęcie przykładowych uzyskanych struktur przepływu dwufazowego z wrzeniem. Znajduje się tutaj również opis tego przykładowego zdjęcia. Umieszczono w tym rozdziale również zbiorcze zestawienie parametrów termicznych realizacji badań eksperymentalnych. Istotnym elementem umieszczonym w tym rozdziale są przykładowe zbiorcze zależności lokalnego stopnia zapełnienia od odległości od początku kanału dla zmiennego strumienia objętości: ciecz-etanol, ciecz-woda. Następnie wyniki te porównano z korelacjami stopnia zapełnienia dostępnymi w literaturze przedmiotu. W kolejnej części tego rozdziału przedstawiono również stworzone na podstawie badań eksperymentalnych mapy struktur przepływu dla etanolu (rys. 75) i wody (rys. 76).

Rozdział 6 stanowi podsumowanie całego opracowania wraz z propozycją dalszych badań.

Rozdział 7 to wykaz literatury, w którym zawarto 52 pozycje.

Ostatnim **Rozdziałem 8** przedstawionego do recenzji opracowania są załączniki, w których umieszczono autorskie skrypty obliczeniowe, które wykorzystano w realizacji rozprawy doktorskiej.

2. Uwagi krytyczne redakcyjne i dyskusyjne do pracy.

Oceniając pod względem redakcyjnym przedstawioną do recenzji rozprawę należy zwrócić uwagę na zbyt enigmatyczną analizę literatury z rozpatrywanego zakresu. Szczególnie zauważalne jest to w **rozdziale 1** zatytułowanym Wstęp. Podano w nim dostępne w literaturze metody określania stopnia zapełniania jednak są to informacje podane w bardzo oszczędny sposób. Uważam, że należało tę część pracy znacznie bardziej rozbudować podając dokładniejsze dane. Brakuje tutaj też wyjaśnienia niektórych skrótów takich jak np. Metody PIV, Micro-PIV i PTV na str. 19. Na tej samej stronie przedstawiono Metody OCT służące do analizy i wizualizacji procesów dynamicznego wrzenia na ogrzewanych powierzchniach, gdzie podano polskie wyjaśnienie skrótu OCT. Uważam, że w dobrą praktyką jest podanie nazwy takich skrótów w języku oryginalnym a następnie ich polskie znaczenie. Uwaga ta wynika z faktu, że opracowania tego typu muszą być czytelne nie tylko dla osób poruszających się w tym zakresie tematycznym, ponieważ rozprawa ta zostanie przedstawiona podczas publicznej obrony. W związku z tym przekaz musi być ogólnie zrozumiały i czytelny.

Kolejna uwaga dotyczy **rozdziału 1.5. pt.: Wrzenie w minikanalach i struktury przepływu**. W tej części opracowania na stronach 28 i 29 Autor przytacza informacje dotyczące zjawiska kryzysu wrzenia. Ewidentnie brakuje tutaj odniesienia do znaczących publikacji z tego zakresu autorstwa prof. dr hab. inż. Tadeusza Bohdała. Oprócz wielu innych pozycji tego autora w szczególności polecam:

1. Zjawiska wrzenia pęcherzykowego czynników chłodniczych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2001, stron 272, opiniodawcy: prof. dr hab. inż. Roman Domański, prof. dr hab. inż. Jarosław Mikielwicz.
2. Przyczyny niestabilności przemian fazowych czynników energetycznych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2006, stron 282, opiniodawcy: prof. dr hab. inż. Janusz Cieśliński, prof. dr hab. inż. Jarosław Mikielwicz.

Dotyczą one nie tylko typowych czynników chłodniczych, ale także m.in. wody. Zabrakło w tym miejscu również informacji dotyczących zjawiska *flashingu* czyli nagłej nieprzewidzianej kondensacji występującej podczas wrzenia w przepływie. Opisują to m.in. tacy autorzy jak:

1. Dutkowski K.: Influence of the flashing phenomenon on the boiling curve of refrigerant R134a in minichannels, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, nr 53, str. 1036 - 1043, 2010.
2. Dutkowski K.: Wymiana ciepła i opory przepływu czynników jedno- i dwufazowych
3. w minikanalach, Wyd. Ucz. Politechniki Koszalińskiej, stron 212, 2011.
4. C. Seladji, S,R Taleb, Y. Khadraoui: Flashing Phenomena in the Case of Two-Phase Flow (Liquid-Gas) in a Vertical Porous Channel. Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
5. A.Attou, J.M.Seynhaeve: Steady-state critical two-phase flashing flow with possible multiple choking phenomenon: Part 1: Physical modelling and numerical procedure. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Volume 12, Issue 5, September 1999, Pages 335-345.

Wskazane powyżej publikacje mogą być wskazówkami do odnalezienia tych informacji w literaturze przedmiotu.

Następna uwaga o charakterze redakcyjnym dotyczy **Rozdziału 3 Badania eksperymentalne**. Odczuwa się tutaj pewien niedosyt związany z ilością prezentowanych wyników badań eksperymentalnych. Ewentualnie należało umieścić je w załącznikach. Rozdział ten jest nieco zaburzony, ponieważ najpierw przedstawione są przykładowe wyniki badań eksperymentalnych (**podrozdział 3.5. Pomiar stopnia zapelnienia metodą rejestracji filmów i fotografii**), a dopiero potem pojawia się w podrozdziale **3.8 Metodyka badań eksperymentalnych**. Metodykę prowadzenia eksperymentu należało umieścić na początku tego rozdziału.

Jeśli chodzi o rozdział 5 Wyniki badań eksperymentalnych, to też uważam, że Autor jest zbyt skromny i z tego powodu nie przedstawił wszystkich uzyskanych wyników oraz porównań.

Powyższe uwagi to w zasadzie wskazówki dla Autora na przyszłość, w jego dalszej działalności naukowej.

3. Ocena pracy i wniosek końcowy

Biorąc pod rozwagę uwagi przedstawione powyżej stwierdzam, że mimo zastrzeżeń o charakterze redakcyjnym przedstawiona mi do recenzji praca stanowi rozprawę doktorską. Wynika to z rozpatrywanej przez Autora tematyki dotyczącej identyfikacji stopnia zapelnienia i struktur przepływu podczas wrzenia w przepływie przez minikanaly rurowe. Zagadnienia te są szczególnie trudne do zrealizowania od strony eksperymentalnej z czym moim zdaniem Autor opracowania poradził sobie w sposób prawidłowy i innowacyjny. W zasadzie można stwierdzić, że obecnie jest to jedna z niewielu prac z tego zakresu jaka została opublikowana, a w tym przypadku w formie rozprawy doktorskiej. Praca ta może stanowić istotny przyczynek i wskazać kierunek dalszych badań oraz możliwości zastosowania opracowanych metod identyfikacyjnych i obliczeniowych dla określenia stopnia zapelnienia i struktur przepływu innych czynników roboczych. Przykładowo można podjąć się określenia struktur przepływu dla nowych proekologicznych czynników chłodniczych, które zgodnie z nowymi uregulowaniami prawnymi wprowadzane są do użytkowania w miejsce obecnie wycofywanych. Uważam, że należy w tym obszarze szukać możliwości aplikacyjnych powyższego opracowania.

Podsumowując stwierdzam, że opracowanie spełnia warunki stawiane pracom doktorskim, zgodnie z wymogami określonymi w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki.

W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Sławomira Płaczkowskiego do publicznej obrony.

Wojciech Kuczyński