

dr hab. Sylwia Hożejowska, prof. PŚk
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego
tel.: (41) 3424394
email: ztpsf@tu.kielce.pl

Kielce, 11 lutego 2020 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Płaczkowskiego pt.
*„Zastosowanie techniki fotograficznej do jednoczesnej rejestracji
struktur przepływu dwufazowego i pomiaru stopnia zapelnienia”*

Niniejsza recenzja została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku prof. dr hab. inż. Janusza Zielińskiego (pismo z dnia 16.12.2019 r.).

1. Charakterystyka pracy - ocena ogólna

Rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Płaczkowskiego zatytułowana *Zastosowanie techniki fotograficznej do jednoczesnej rejestracji struktur przepływu dwufazowego i pomiaru stopnia zapelnienia* liczy 96 stron. Praca składa się z sześciu rozdziałów, załączników oraz wykazu literatury zawierającego 52 pozycje bibliograficzne, w tym trzy pozycje, których współautorem jest Doktorant. Tradycyjny układ pracy tj. kwerenda bibliograficzna, uzasadnienie podjęcia tematu, opis stanowisk badawczych wraz z metodyką badań i wynikami eksperymentów, rozdziały aplikacyjne będące zasadniczą częścią dysertacji oraz podsumowanie ze wskazaniem dalszych kierunków badań jest spójny i logiczny.

Przedmiotem rozprawy mgr. inż. Krzysztofa Płaczkowskiego jest wykazanie możliwości wykorzystania techniki filmowej i fotograficznej do jednoczesnej rejestracji struktur przepływu dwufazowego i pomiaru lokalnych wartości stopnia zapelnienia przy wrzeniu w przepływie w minikanalach. Praca zawiera analizę wyników badań eksperymentalnych

przeprowadzonych na dwóch stanowiskach badawczych, gdzie główny moduł pomiarowy zawierał prostokątny poziomy minikanal. Przepływająca przez minikanal ciecz ogrzewana była od spodu przez folię grzejną (stanowisko pomiarowe nr 1) lub przez cztery elementy grzejne umieszczone w wyprofilowanym bloku miedzi (stanowisko pomiarowe nr 2). Budowa obu kanałów, poprzez zastosowanie szklanych ścian, umożliwiała obserwację i rejestrację struktur przepływu powstających w czynniku roboczym jakim był etanol (stanowisko pomiarowe nr 1) oraz woda destylowana (stanowisko pomiarowe nr 2). Stanowisko nr 1 pozwalało na obserwację wnętrza kanału z jednej strony, zaś stanowisko nr 2 – z trzech stron. Do synchronizacji pozycji kamer, jednoczesnego przesuwu kamery termowizyjnej i filmowej o zadaną odległość, ewentualnych indywidualnych ustawień kamer oraz odczytu i zapisu mierzonych parametrów zastosowano oprogramowania sterujące napisane przez Doktoranta z wykorzystaniem G-codu. W czasie eksperymentu akwizycji danych podlegały takie parametry jak: temperatura i ciśnienie cieczy na wlocie i wylocie z minikanalu, strumień objętości przepływającej cieczy, natężenie i napięcie prądu dostarczanego do grzejnika, dwuwymiarowe rozkłady temperatury zewnętrznej powierzchni izolującej grzejnik (stanowisko nr 1), temperatury wewnątrz miedzianego grzejnika w ustalonych punktach pomiarowych (stanowisko nr 2) oraz obrazy przepływu dwufazowego w wybranych przekrojach wzdłuż jego długości. Na pierwszym stanowisku badawczym pomiary temperatury elementu obudowy minikanalu realizowane były za pomocą kamery termowizyjnej, a drugim - za pomocą trzech termopar umieszczonych wewnątrz miedzianego bloku. Zgromadzone dane w postaci filmów i zdjęć struktur przepływu dwufazowego, zostały poddane analizie z wykorzystaniem autorskich skryptów napisanych w środowisku MathWorks Matlab o szerokim spektrum zastosowań. Skrypty pozwoliły na wyznaczenie stopnia zapełnienia w przypadku pojedynczych małych pęcherzy pary, pęcherzy dużych i wydłużonych całkowicie widocznych oraz pęcherzy wydłużonych częściowo widocznych, występujących przy przepływie filmowym. Obliczenia uwzględniały przestrzenną budowę pęcherzy (kulistą, elipsoidalną i walcową) oraz pozwoliły na wyznaczenie błędu identyfikacji stopnia zapełnienia. Wyniki badań posłużyły zarówno do określenia udziału fazy gazowej w minikanale, a także do budowy map przepływu dwufazowego dla obu wersji minikanalów.

2. Ocena merytoryczna pracy

Postęp technologiczny zmierzający w kierunku miniaturyzacji urządzeń jest przyczyną wzrostu wymagań co do zachowania wysokiej sprawności tychże urządzeń. W ten trend wpisują się badania prowadzące do opracowania kompaktowych wymienników ciepła, które

wykorzystując zmianę fazy czynnika chłodniczego, charakteryzują się wysoką gęstością strumienia ciepła przy małej różnicy temperatur między powierzchnią grzejną a płynem. Przekazywanie ciepła do wrzącej cieczy przepływającej przez wąskie kanały jest nowoczesnym rozwiązaniem intensyfikacji wymiany ciepła i stanowi przedmiot badań wielu ośrodków naukowych na całym świecie.

Na podstawie przeprowadzonej przez Doktoranta kwerendy literatury można stwierdzić, że wpływ parametrów cieplno-przepływowych na proces wrzenia w przepływie przez minikanaly o różnej geometrii i orientacji przestrzennej, nie został jednoznacznie określony. Ponadto Doktorant wykazał, że nie opracowano żadnej prostej, efektywnej i wydajnej bezinwazyjnej metody analizy stopnia zapełnienia w minikanalach dla dowolnej geometrii oraz dowolnej orientacji przestrzennej kanału.

Podjęty przez Doktoranta problem jest zatem aktualny i odnosi się do zagadnień o dużej wartości poznawczej i praktycznej. Przeprowadzony przegląd literatury oraz doświadczenie własne Autora z zakresu badań eksperymentalnych nad wrzeniem w przepływie w minikanalach pozwoliło sformułować cel badawczy pracy jakim jest *„wykazanie możliwości jednoczesnego wykorzystania techniki fotograficznej i filmowej do rejestracji struktur przepływu dwufazowego z wrzeniem i pomiaru lokalnych i chwilowych wartości stopnia zapełnienia minikanalu”*. Odpowiedzią na zadane pytanie, wynikające z problemu badawczego było sformułowanie hipotezy, że *„właściwie wykonane i opracowane wyniki badań fotograficznych i filmowych przepływu dwufazowego z wrzeniem z wystarczającą dla badań inżynierskich dokładnością opisują struktury przepływu dwufazowego i mogą stanowić alternatywę dla innych technik pomiaru stopnia zapełnienia”*. Wybór tematu rozprawy był podyktowany istotnym zagadnieniem jakim jest rozpoznawanie tworzących się w przepływającej mieszaninie dwufazowej struktury przepływu oraz zmierzenie udziału fazy gazowej w kanale. Od nich bowiem zależne są zjawiska przenoszenia pędu, ciepła i masy. Rodzaj struktury przepływu, a co za tym idzie udział fazy gazowej, determinuje również metody obliczania współczynnika przejmowania ciepła, oporów przepływu czy współczynnika wnikania ciepła i masy. Badany i analizowany nieadiabatyyczny przepływ wrzących cieczy w asymetrycznie ogrzewanych minikanalach wprowadza dodatkowe utrudnienia w rozpoznawaniu struktur przepływu oraz identyfikacji stopnia zapełnienia, charakteryzującego udział fazy gazowej w minikanale.

Za osiągnięcie Doktoranta można uznać opracowanie autorskiej metody bezinwazyjnego pomiaru stopnia zapełnienia w minikanale na podstawie analizy filmów przepływu dwufazowego, jak również rejestrację struktur przepływu. Zastosowana procedura, poprzez

dobór odpowiedniego skryptu zależnego od rodzaju struktury przepływu, pozwala na poprawę jakości przetwarzanego obrazu, utworzenie mapy binarnej obrazu poprzez zastosowanie przekształceń morfologicznych; nadto umożliwia analizę geometryczną wykrytych dwuwymiarowych obiektów i ich trójwymiarową transformację, wyznaczenie stopnia wypełnienia, wizualizację końcowych wyników oraz poszczególnych etapów przetwarzania obrazu. Opracowanej metody nie ogranicza geometria kanału, jego orientacja i warunki w nim panujące. Zaproponowana metoda, choć niepozbawiona wad wskazanych przez Doktoranta, obarczona jest zdecydowanie mniejszym błędem maksymalnym dla poszczególnych typów struktur przepływu dwufazowego w porównaniu do wyników badań eksperymentalnych prezentowanych w literaturze. Dla analizowanych przypadków przedstawiono także mapy przepływu dwufazowego oraz dokonano porównania otrzymanych wyników z korelacjami stopnia wypełnienia przytaczanymi najczęściej w literaturze.

Wymienione wyżej efekty rozprawy potwierdzają jej naukowy charakter i są ważne z punktu widzenia poznawczego i praktyki inżynierskiej; świadczą też, że cel pracy został zrealizowany. Podsumowując, można stwierdzić, że Autor wniósł istotny wkład w rozwiązanie postawionego zagadnienia. Wykazał się znajomością problematyki, głęboką wiedzą dotyczącą rozważanego zagadnienia i umiejętnością wnioskowania.

Oceniając pozytywnie pracę Doktoranta, chciałabym zwrócić uwagę na kwestie o charakterze dyskusyjnym, a także na uchybienia i usterki zauważone w pracy. Zdaniem Recenzenta, Doktorant powinien odnieść się do następujących kwestii:

1. Na rysunkach 66 – 72 przedstawiono wartości ekperymentalnie wyznaczonego stopnia wypełnienia oraz obliczonego w oparciu o korelacje (5) – (11) w zależności od stopnia suchości dla różnych wartości strumienia ciepła oraz strumienia objętości. Uzupełnienie pracy o maksymalny błąd bezwzględny ułatwiłoby ocenę jakości dopasowania ekperymentalnie wyznaczonych stopni wypełnienia do wyników innych badaczy. Podobną rolę mogą pełnić wykresy zestawiające wyniki badań eksperymentalnych *versus* wyniki obliczeń stopnia wypełnienia z korelacji. W rozdziale 1.3 podane są jeszcze inne korelacje stopnia wypełnienia (wzory (12) i (13)), wyniki których nie są prezentowane w pracy. Jakie są więc wartości stopnia wypełnienia dla korelacji (12) i (13) oraz jak bardzo różnią się one od wyników ekperymentalnych?
2. Na rysunkach 56 – 59 przedstawiono stopień wypełnienia przy przepływie wrzącego etanolu przez minikanal. Widoczny jest, zwłaszcza na rys. 56, spadek wartości stopnia

zapełnienia w końcowym odcinku kanału. Co wpływa na taki przebieg wyznaczanego parametru?

3. W pracy nie podano, w jakim zakresie parametrów ciepłno-przepływowych oraz dla jakich kanałów można stosować opracowaną metodę. Doktorant nie podał również w jaki sposób definiuje minikanaly – w literaturze można znaleźć kilka rodzajów klasyfikacji kanałów.
4. Zaproponowanie własnego równania korelacyjnego na obliczanie stopnia zapełnienia podniosłoby znacznie wartość pracy.
5. Czy w dalszych badaniach planowana jest zmiana czynnika roboczego (zwłaszcza wody) na czynnik chłodniczy niskowrzący? Ta kwestia nie została wskazana w dalszych kierunkach badań.

Przy prezentacji tak obszernego materiału badawczego, nie sposób uniknąć błędów edytorskich i pewnych nieścisłości. Poniżej podana jest lista uwag:

- wzór (10) jest błędny, choć podany wcześniej w tekście opis parametru Lockharta – Martinelliego jest poprawny;
- na str. 20 przy opisie metody OCT średnicę pęcherzy podano w mm^2 ;
- w tabeli 12 (str. 60) do wielkości mierzonych zaliczono strumień ciepła;
- podając w tabelach 5,6,7, 9-11, 18, 21 dane pomiarowe, nie wyjaśniono na jakim stanowisku badawczym (nr 1 czy nr 2) je uzyskano. Również zawarte we wskazanych tabelach temperatury T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 nie są objaśnione i nie wiadomo, czego one dotyczą. Sam opis stanowisk badawczych, metodyki badań oraz wielkości mierzonych nie do końca jest jasny dla czytelnika, np. w sformułowaniu „...temperatura, ... na wlocie i wylocie kanału ...” - nie wiadomo, czego temperaturę mierzono;
- na str. 34, przy opisie minikanalu ze stanowiska badawczego nr 2, błędnie podane są numery rysunków;
- na str. 60, w tekście poprzedzającym tabelę 12, błędnie są podane numery tabel 12 oraz 14;
- w podpisach rysunków 33 i 34 jest zbędny przyimek „po”;
- w pracy występują liczne błędy interpunkcyjne; np. na stronach 2,13,14,18,21,49, 57,68;
- na str. 40 w tytule rozdziału 3.4 brakuje przyimka „w” ;

- w pracy pojawiają się usterki w zapisie jednostek, np. powinno być $[J/(kg\ K)]$ lub $[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$ zamiast $[J/kg\ K]$;
- w edycji tekstu rażą liczne jednoliterowe spójniki i przyimki pozostawione na końcach linii tekstu.

Powyższe uchybienia, głównie natury edytorskiej, nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy i powinny posłużyć Doktorantowi jako wytyczne przy pisaniu kolejnych prac naukowych.

3. Wniosek końcowy

Recenzowana praca, pomimo wskazanych usterek, zawiera oryginalne wyniki badań z elementami nowości. Zastosowanie zaawansowanej analizy obrazów pozwoliło na opracowanie stabilnego i efektywnego algorytmu do uzyskiwania obrazów struktur przepływu i obliczania stopnia zapelnienia przy wrzeniu w przepływie czynników chłodniczych przez minikanały. Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie wniosków o charakterze poznawczym oraz aplikacyjnym, jak też wskazujących dalsze kierunki badań. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki badań, a także umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Biorąc pod uwagę wartość naukową i poznawczą rozprawy oraz wkład własny Autora, uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Płaczkowskiego pt. *„Zastosowanie techniki fotograficznej do jednoczesnej rejestracji struktur przepływu dwufazowego i pomiaru stopnia zapelnienia”* spełnia wymogi obowiązującej ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. nr 65 poz. 595 z dnia 14 marca 2003 roku, z późniejszymi zmianami) niezbędne do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie mechanika i wnioskuję o dopuszczenia jej do publicznej obrony.

S. Kwiejona