



prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz

Katedra Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok.
tel. 571 443 089
505 835 170
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Białystok, 24.06.2022

Recenzja rozprawy doktorskiej **mgr inż. Andrzeja Ireneusza Nowaka** *Identyfikacja struktur przepływowych w pulsacyjnych rurkach ciepła w warunkach mikrogravitacji*

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej, Pana Dr hab. inż. Roberta Króla, Prof. Uczelni, pismo W9/PW/347/2022 z dnia 22 kwietnia 2022.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest Dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz, Prof. Uczelni, zaś promotorem pomocniczym jest Dr hab. inż. Artur Nems, Prof. Uczelni.

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 119 stron. Rozprawa składa się z następujących części: streszczenia w języku polskim i angielskim, podziękowań, zestawienia ważniejszych oznaczeń, wprowadzenia, przeglądu aktualnego stanu technologii (Rozdział 1) oraz przeglądu literatury (Rozdział 2), opisu celu, tezy i zakresu pracy (Rozdział 3), części badawczej pracy obejmującej opis stanowiska badawczego, procedury analizy obrazu, wyniki badań doświadczalnych (Rozdziały 4 – 6), podsumowania (Rozdział 7), zestawienia bibliograficznego, spisu tablic i ilustracji. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Wprowadzenie**, w którym Autor dokonał przeglądu stanu potrzeb badawczych w zakresie technologii kosmicznych.
2. **Aktualny stan technologii**, w którym podjęto syntetyczną ocenę stanu rozwoju technologii systemów cieplnych w technice kosmicznej, w tym pulsacyjnych rurek ciepła.
3. **Przegląd literatury**, w którym omówiono aktualny stan badań w zakresie przepływów dwufazowych formujących się w warunkach grawitacji i mikrogravitacji.
4. **Cel, zakres i teza pracy**. W rozdziale w sposób zwięzły sformułowany został cel oraz zakres pracy, a także sformułowana jej teza.
5. **Stanowisko badawcze**. W rozdziale tym Doktorant przedstawił szczegółowe rozwiązanie techniczne dedykowanego stanowiska badawczego oraz metodologię badań.
6. **Procedura analizy obrazu**. W rozdziale tym Doktorant zamieścił szczegółowy opis procedur obróbki obrazów uzyskiwanych w trakcie badań.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

49/522/2022

Wpłynęło dnia 04.07.22, 1 z 9

7. **Wyniki badań doświadczalnych.** W rozdziale zaprezentowane zostały uzyskane wyniki w zakresie identyfikacji struktur przepływu dwufazowego oraz ich szczegółowa analiza.
8. **Podsumowanie.** W Rozdziale tym Doktorant dokonał syntetycznego podsumowania uzyskanych wyników i wskazał rekomendacje w zakresie dalszych prac.
9. **Bibliografia** zawierająca wykaz 127 pozycji literatury, obejmująca najnowsze publikacje z renomowanych czasopism międzynarodowych oraz publikacje monograficzne z dziedziny badań pulsacyjnych rurek ciepła, przepływów dwufazowych, zagadnień mikrogravitacji i technologii kosmicznych. W spisie literatury znalazło się 110 artykułów naukowych z renomowanych czasopism specjalistycznych z listy JCR, 12 pozycji książkowych i monograficznych, 2 referaty konferencyjne, 2 źródła internetowe i bazy danych, 1 patent. Dobór źródeł literaturowych uznaję za adekwatny w odniesieniu do zakresu rzeczowego rozprawy. Należy podkreślić, że w zestawieniu bibliograficznym znalazły się 3 pozycje współautorstwa Doktoranta: prace [30] oraz [31] opublikowane w czasopiśmie *Applied Thermal Engineering*, które jest jednym z najbardziej renomowanych czasopism naukowych w obszarze techniki cieplnej, oraz referat [84] wygłoszony na międzynarodowej konferencji naukowej.

II. Cel i zakres rozprawy

Doktorant sformułował cel oraz zasadniczy zakres rozprawy w Rozdziale 3 wskazując na potrzebę realizacji prac badawczych w zakresie rozpoznania struktur przepływu dwufazowego formującego się w warunkach mikrogravitacji oraz uwarunkowań fizycznych umożliwiających predykcję takich struktur. Przesłanką do podjęcia tych badań są potrzeby wynikające z aplikacji pulsacyjnych rurek ciepła w zastosowaniach do systemów kontroli termicznej w technice kosmicznej.

Doktorant sformułował tezę w postaci jawnej w Rozdziale 3 w następującej postaci: „Opis struktury przepływu może być określony przez nową liczbę kryterialną, która będzie niezależna od składowej grawitacyjnej, natomiast uwzględni dominujące w warunkach mikrogravitacji składowe, takie jak średnica charakterystyczna, siły powierzchniowe, gęstość i lepkość czynnika roboczego oraz prędkość charakterystyczną”. Tak postawiona teza nie dotyczy kwestii dobrze rozpoznanych naukowo i jej udowodnienie stanowi rzeczywiste wyzwanie o charakterze poznawczym oraz metodycznym.

Cel, zakres rzeczowy oraz teza rozprawy zostały sformułowane na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy przedstawionej w Rozdziałach 1 oraz 2 rozprawy doktorskiej w zakresie zagadnień dotyczących rozwoju technologii kosmicznych, zwłaszcza w aspekcie systemów kontroli termicznej obiektów, zastosowań pulsacyjnych rurek ciepła oraz stanu ich badań, a także stanu badań w zakresie struktur przepływu dwufazowego w warunkach grawitacyjnych i mikrogravitacyjnych. Przedstawiony w sposób syntetyczny zakres rozprawy uznaję za adekwatny w kontekście potrzeb badawczych oraz metodycznych dla postawionej powyżej tezy. Należy wziąć pod uwagę, że rozprawa podejmuje zagadnienia intensywnie podejmowane w literaturze naukowej, wobec czego uzyskanie znaczących poznawczo oraz metodycznie rezultatów stanowi rzeczywiste wyzwanie naukowe. Także w tym kontekście wskazany cel oraz tezę postawioną w rozprawie uznaję za adekwatne.

Biorąc pod uwagę zawarte w rozprawie rezultaty badań eksperymentalnych oraz przeprowadzoną ich szczegółową wnikliwą analizę opartą na postulowanych w tezie liczbach kryterialnych – stwierdzam, że odpowiadają one sformułowanemu celowi rozprawy. Zakres

rzeczowy rozprawy oraz zaproponowany jej zakres korespondują ze sformułowaną tezą rozprawy i pozwalają na uzyskanie rezultatów pozwalających na jej udowodnienie.

III. Treść rozprawy

We Wprowadzeniu do rozprawy Doktorant zamieścił omówienie ogólnych aspektów związanych z potrzebami badawczymi w obszarze technologii kosmicznych. Wskazał on, że zagadnienia związane z kontrolą termiczną obiektów, a zwłaszcza zagadnienia z nimi związane z zakresu przepływów dwufazowych w warunkach mikrogravitacji należą do kluczowych wyzwań badawczych.

W Rozdziale 1 przedstawiony został aktualny stan rozwoju technologii kontroli termicznej w zastosowaniach kosmicznych. W tym zakresie przedstawione zostały współczesne rozwiązania techniczne systemów kontroli temperatury, jak również zademonstrowano szczególną rolę rurek ciepła. Przedstawione zostały w sposób syntetyczny konwencjonalne, jak również pulsacyjne rurki ciepła. Z uwagi na kluczowy aspekt w ich działaniu związany z formowaniem się różnych struktur przepływu dwufazowego w trakcie transportu ciepła, omówiona została typologia struktur przepływu dwufazowego w warunkach konwencjonalnych, a także w specyficznych uwarunkowaniach występujących w pulsacyjnych rurkach ciepła.

Rozdział 2 poświęcony został przeglądowi aktualnego stanu wiedzy naukowej w zakresie struktur przepływu dwufazowego. Szczególną uwagę zwrócono na aspekty predykcji struktur przepływu dwufazowego z zastosowaniem map struktur przepływu. W przeglądzie tym uwzględniono specyficzny aspekt dotyczący przypadku struktur przepływu dwufazowego formującego się w warunkach dynamicznych, co ma szczególne znaczenie w przypadku pulsacyjnych rurek ciepła. Rozpatrzony został stan badań w zakresie identyfikacji struktur przepływu dwufazowego formującego się w warunkach mikrogravitacji. Podniesiony został także aspekt spadków ciśnienia towarzyszących przepływowi dwufazowemu o różnej strukturze w warunkach grawitacji i mikrogravitacji. Podjęto analizę liczb kryterialnych stosowanych w badaniach przepływów dwufazowych. Dokonano analizy krytycznej średnicy rurki pulsacyjnej. Przeanalizowano stosowane metody badawcze w zakresie identyfikacji struktur przepływu dwufazowego, w tym zwłaszcza metody optyczne oraz metody oparte na obrazowaniu neutronowym.

W Rozdziale 3 zamieszczono sformułowanie celu, zakresu oraz tezy rozprawy – do czego odniosłem się w punkcie II niniejszej recenzji.

W Rozdziale 4 przedstawiono w sposób szczegółowy opracowane stanowisko badawcze oraz metodykę prowadzonych prac eksperymentalnych. Rozdział rozpoczęto od analizy uwarunkowań zaplanowanych prac badawczych wymagających przeprowadzenia eksperymentów w zakresie mikrogravitacji. Realizacja prac badawczych będących przedmiotem recenzowanej rozprawy wymagała podjęcia współpracy z ośrodkiem badawczym posiadającym infrastrukturę niezbędną do realizacji badań w warunkach mikrogravitacji. Badania takie zrealizowane zostały w ośrodku badawczym ZARM Drop Tower w Bremen, który jako jedyny w Europie posiada system katapulty pozwalający na realizację badań w warunkach mikrogravitacji w zakresie czasu pomiarów do 9.3 sekundy. Z oczywistych racji – rozwiązanie stanowiska badawczego oraz metodyka prowadzonych prac eksperymentalnych - wymagały uwzględnienia specyficznych uwarunkowań związanych z

prowadzeniem badań w warunkach kapsuły w wieży zrzutowej. W rozdziale tym zamieszczono opis ogólny stanowiska badawczego dostosowanego do zamontowania w kapsule, a następnie omówiono sposób wytwarzania ruchu w przepływie w części przepływowej układu. Omówiono przejęte kryteria do opracowania geometrii dwururowego układu przepływowego. Przedstawiono także uwarunkowania mechaniczne działania układu badawczego, a także sposób kontroli jego pracy. Przedstawiono wyposażenie pomiarowe stanowiska w zakresie pomiaru ciśnienia i temperatury, a także system obrazowania struktur z zastosowaniem układu trzech kamer. W sposób bardzo szczegółowy przedstawiono metodykę realizacji prac eksperymentalnych w warunkach wieży zrzutowej. Realizacja prac w warunkach adiabatycznych z mechanicznie wymuszonym przepływem wymagała dodatkowego przeanalizowania parametrów pracy stanowiska w zakresie występujących prędkości w przepływowych sekcjach testowych stanowiska, jak również osiągniętej częstotliwości mechanicznych wymuszeń przepływu tak, aby miały one związek z zakresem parametrów występujących w pulsacyjnych rurkach ciepła. Kolejnym aspektem w zakresie realizowanych prac jest wybór czynnika roboczego do badań. Doktorant dokonał szczegółowej analizy uwarunkowań związanych z doбором substancji roboczej w aspekcie jej zastosowania w pulsacyjnych rurkach ciepła, jak również w aspekcie zaplanowanych prac badawczych. Przyjęto do analizy doboru czynnika roboczego liczbę kryterialną Reynoldsa oraz Bonda. W ostateczności jako substancje robocze wytypowano: wodę, etanol oraz polifluorokarbon FC-72. Na podstawie powyższych rozważań opracowano tablicę badań w zakresie średnic części przepływowej, amplitudy i częstotliwości wymuszeń mechanicznych ruchu płynu dla trzech badanych płynów roboczych. Przeanalizowano dokładność identyfikacji struktur metodą obrazową wraz z oceną prędkości ruchu powierzchni międzyfazowej oraz pomiaru temperatury i ciśnienia.

W Rozdziale 5 przedstawiono w sposób szczegółowy metodykę obróbki uzyskanych obrazów struktur przepływu dwufazowego. W pierwszej kolejności opisane zostały operacje morfologiczne obrazów w celu uwydatnienia struktur przepływu dwufazowego w badanych sekcjach przepływowych. Obrazy uzyskiwano z trzech kamer rozlokowanych na długości sekcji przepływowej, w związku z czym przedstawiono procedurę łączenia obrazów z kamer tak, aby uzyskać w rezultacie spójny obraz o pożądanej jakości dla całej długości sekcji przepływowej. Z uwagi na to, że w zasadniczej części badań przedmiotem analiz były struktury intermitentne przepływu, zasadniczym aspektem jest identyfikacja położenia i geometrii pęcherza parowego w przepływie. Doktorant przedstawił w syntetyczny sposób metodykę w tym zakresie. W dalszej kolejności zaprezentowano metodykę identyfikacji pól prędkości z zastosowaniem metodyki analogicznej jak w metodyce PIV (Particle Image Velocimetry). W końcowej części rozdziału Doktorant przedstawił metodykę identyfikacji procesów łączenia się i rozpadu pęcherzy parowych na podstawie obrobionych zdjęć sekcji przepływowej stanowiska.

Rozdział 6 poświęcony został prezentacji uzyskanych rezultatów oraz szczegółowej ich analizie. W pierwszej kolejności Doktorant przeanalizował kwestię przyjmowanych dotąd w literaturze kryteriów w zakresie przejścia przepływu rzutowego do/z przepływu pierścieniowego. W istocie w warunkach analizowanych w rozprawie, co do zasady odpowiadających warunkom występującym w pulsacyjnych rurkach ciepła – występuje przepływ o charakterze struktur intermitentnych, w których pojedyncze pęcherze pary łączą się lub rozdzielają. W przypadku połączenia pęcherzy tworzy się pęcherz o znacznej długości, który można identyfikować lokalnie jako sub-strukturę pierścieniową. Stąd w analizie literaturowej Doktorant przestudiował przyjmowane kryteria zmian struktur przepływu w

kontekście kryterium łączenia się lub rozpadu pęcherzy parowych. Kluczowym aspektem tej analizy jest stwierdzenie, że przyjmowane kryteria nie stanowią adekwatnej i racjonalnej podstawy do predykcji zjawiska łączenia się bądź rozpadu pęcherzy parowych w strukturach intermitentnych. Stąd wynika konieczność opracowania nowego kryterium zwłaszcza w warunkach mikrogravitacji, gdzie kryteria uwzględniające przyspieszenie ziemskie nie powinny być brane pod uwagę. Doktorant postawił hipotezę – stanowiąca w istocie kluczowy aspekt rozprawy doktorskiej, że „występowanie zjawisk rozpadu i łączenia bąbli parowych jest zależne od znaku stojącego przy prędkości i przyspieszeniu przepływu w rurce kapilarnej”. W hipotezie tej Doktorant przyjął nomenklaturę, w której sekcja przepływowa nazywana jest rurką kapilarną. Należy wziąć pod uwagę, że w opracowanym sposobie obróbki obrazów Doktorant uzyskał możliwość identyfikacji prędkości przepływu, co w efekcie dało mu możliwość identyfikacji również przyspieszeń w przepływie, które można identyfikować z siłami masowymi bezwładności dla płynu w obydwu fazach. Analizę prędkości i przyspieszeń Doktorant oparł na liczbie Reynoldsa (zawierającej prędkość) oraz zmodyfikowanej liczbie Bonda opartej nie na przyspieszeniu grawitacyjnym, lecz na przyspieszeniu generowanym w przepływie dwufazowym. Doktorant przedstawił zatem rezultaty badań w formie wykresów zależności liczby Reynoldsa (dodatniej lub ujemnej – w zależności od kierunku wektora prędkości powierzchni rozdziału faz) oraz zmodyfikowanej liczby Bonda (dodatniej lub ujemnej – w zależności od kierunku przyspieszenia powierzchni rozdziału faz). Doktorant wykazał, że przyjęta hipoteza może zostać uznana za skuteczne kryterium łączenia się lub rozpadu pęcherzy parowych w warunkach mikrogravitacji. Doktorant wskazał, że aspekt łączenia się pęcherzy parowych stanowi jednakże bardziej złożone zjawisko, gdyż przejście struktury od rzutowej do pierścieniowej jest związane z formowaniem się struktur o charakterze pośrednim. Stąd, podobnie jak w każdym przypadku postulowanych podejść kryterialnych – proponowane podejście wymaga dalszej analizy w celu wypracowania poglądu w zakresie ewentualnych potrzeb identyfikacji struktur pośrednich, zwłaszcza w warunkach nieustalonych, tj. w przepływie oscylacyjnym. Tym niemniej uzyskane rezultaty pozwalają na potwierdzenie, że opracowane zostało racjonalne kryterium dotyczące predykcji struktur przepływu w warunkach mechanicznie wymuszonego przepływu oscylacyjnego w warunkach mikrogravitacji. W ten sposób udowodniona została teza postawiona w Rozdziale 3 rozprawy.

Uzyskane w rozprawie rezultaty zostały podsumowane w Rozdziale 7. Doktorant dokonał syntetycznego opisu prac badawczych podjętych w ramach rozprawy, jak również podkreślił kluczowy jej aspekt, jakim jest udowodnienie postawionej w rozprawie tezy. Wskazał również w końcowej części rozdziału na konieczność kontynuacji prac w aspekcie poszerzonej analizy kryteriów zmian struktur przepływu dwufazowego z uwzględnieniem efektów spadku ciśnienia, a także aspektów związanych z diabatycznością przepływu.

IV. Oryginalność i wartości poznawcze rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnień o otwartym charakterze, słabo dotąd rozpoznanych w kontekście dynamicznych uwarunkowań przepływu dwufazowego formującego się w warunkach mikrogravitacji. W pracy doktorskiej podejmowane jest zagadnienie o kluczowym znaczeniu dla rozpoznania uwarunkowań fizycznych powstawania zmian struktur w przepływie dwufazowym oscylacyjnym w warunkach mikrogravitacji. Zagadnienie to ma kluczowe znaczenie dla funkcjonowania pulsacyjnych rurek ciepła, które są obecnie uważane za najbardziej efektywne rozwiązanie w systemach kontroli termicznej w obiektach techniki

kosmicznej. Realizacja prac badawczych wymagała podjęcia współpracy z renomowanym ośrodkiem badawczym oraz opracowania autorskiej metodyki badań łącznie z opracowaniem dedykowanego stanowiska badawczego uwzględniającego jego aplikację w kapsule wieży zrzutowej. Wiele aspektów dotyczących obróbki obrazów tak, aby uzyskać wiarygodne dane dotyczące identyfikacji struktur przepływu w warunkach dynamicznych, wymagało również opracowania szczegółowej metodyki badawczej. W pracy postawiono racjonalną hipotezę, którą należy udowodnić. Cennym elementem pracy jest krytyczna analiza uzyskanego własnego materiału badawczego oraz wskazanie dalszych potrzeb badawczych w zakresie struktur przepływu dwufazowego w warunkach dynamicznych i mikrogravitacji.

Powyższe sprawia, że recenzowana rozprawa wnosi poważny wkład zarówno poznawczy, jak i metodyczny. Prace badawcze zrelacjonowane w recenzowanej rozprawie zostały podjęte przez Doktoranta w sposób oryginalny, twórczy oraz z zastosowaniem właściwych, zaawansowanych narzędzi metodycznych, zaś zrealizowane badania eksperymentalne wymagały współpracy z renomowanym ośrodkiem badawczym. Podejmowane badania dotyczą obszaru identyfikowanego jako kluczowy dla rozwoju technologii kosmicznych.

Za szczególne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- wypracowanie racjonalnej hipotezy odnośnie kryterium tworzenia się struktur przepływu w wymuszonym oscylacyjnie przepływie dwufazowym opartej na racjonalnie przyjętych liczbach kryterialnych uwzględniających warunki mikrogravitacji;
- opracowanie metodyki badawczej umożliwiającej identyfikację struktur oscylacyjnego przepływu dwufazowego w warunkach mikrogravitacji.

Prezentowane w rozprawie rezultaty prac mają niewątpliwie oryginalny charakter. Uzyskany materiał badawczy pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w całości zrealizowane.

Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą wkład poznawczy w dziedzinie techniki cieplnej – zwłaszcza w zakresie zagadnień energetyki cieplnej – mieszczących się w obszarze dotyczącym dyscypliny: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

V. Wartości użytkowe rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy obszaru badań, które identyfikuję jako badania podstawowe. Jednakże motywacją i bezpośrednią przesłanką do ich podjęcia są potrzeby w zakresie identyfikacji kryteriów do zmian w strukturze oscylacyjnego przepływu dwufazowego formującego się w rurkach pulsacyjnych. Rurki te stanowią współcześnie podstawowe rozwiązanie w systemach kontroli termicznej dla technologii kosmicznych. Stąd wymagane jest bardziej gruntowne rozpoznanie zjawisk przepływowych dokonujących się w przepływie w takich rurkach w warunkach mikrogravitacji. Z powyższego wynikają ważne aspekty aplikacyjne recenzowanej rozprawy. W istocie dotyczy ona bowiem zagadnień, które dla rozwoju technologii kosmicznych mają kluczowe znaczenie w aspekcie możliwości technicznych kontroli termicznej w wielu obiektach techniki kosmicznej.

Niewątpliwie przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej prace badawcze otwierają także nowe możliwości aplikacyjne w obszarze związanym z nowoczesną energetyką cieplną, w tym zwłaszcza w zakresie aplikacji pulsacyjnych rurek ciepła.

VI. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

VI.1. Uwagi o charakterze merytorycznym

W rozprawie zaprezentowano oryginalne ujęcie podejmowanych zagadnień badawczych. Zaprezentowany w rozprawie materiał wymagał znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi niewątpliwie oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii - nie umniejszają mojej jednoznacznie bardzo pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej i w znacznej mierze mają raczej charakter porządkowy, formalny bądź dyskusyjny.

1. Ważnym aspektem metodycznym jest kwestia wymuszeń mechanicznych zastosowanych do badań w ruchu oscylacyjnym w badanych kanałach przepływowych. W warunkach działania rurek pulsacyjnych w warunkach mikrogravitacji ruch ten wymuszony jest na skutek działania zmiennych w czasie sił powierzchniowych (ciśnieniowych, bezwładności, tarcia i napięcia powierzchniowego) a także siły masowej (tj. siły bezwładności). Zmienności w czasie tych sił są generowane przemianami fazowymi dokonującymi się w trakcie transportu ciepła. Jest rzeczą oczywistą, że tak skomplikowany układ zjawiska nie pozwala na proste i jednoznaczne opracowanie kryteriów, jakie należałoby do analizy zjawisk łączenia się i rozdzielania pęcherzy przyjąć dla przypadku przepływu mechanicznie wymuszonego i w warunkach adiabatycznych oraz stało ciśnieniowych tak, aby jak najwierniej odtworzyć warunki zbliżone do tych występujących w rurkach kapilarnych. Doktorant przyjął kryterium prędkości przepływu oraz częstotliwości ruchu oscylacyjnego, do czego nie wnoszę zastrzeżeń. Tym niemniej warto byłoby w rozprawie podjąć ten wątek w szerszym aspekcie uwzględniającym także kryterium oparte na działaniu sił występujących w rurkach pulsacyjnych.
2. Warto byłoby w pracy rozważyć, czy rezultaty w zakresie oscylacyjnych zmian struktury przepływu dwufazowego mogłyby zależeć także od objętościowego stopnia wypełnienia sekcji przepływowej, która z racji istotnie różniących się własności termodynamicznych płynów roboczych są związane z różnymi poziomami stopnia suchości. W badaniach zastosowano wyłącznie napełnienie 50% objętościowo dla wszystkich badanych płynów. Należy przypuszczać, że najważniejszy aspekt podejmowany w pracy, tj. kryterium łączenia się i podziału pęcherzy parowych nie wymagałoby podejmowania tego wątku. Jednakże można przypuszczać, że rezultaty w zakresie uzyskiwanych struktur przepływu byłyby jednak odmienne dla różnych stopni wypełnienia.
3. Warto byłoby w moim przekonaniu wskazać na aspekty możliwej aplikacji opracowanego kryterium łączenia się bądź rozpadu pęcherzy w modelowaniu rurek pulsacyjnych w warunkach mikrogravitacji.
4. W niektórych miejscach rozprawy zamieszczono zbyt syntetyczne opisy, które nie dają w pełni precyzyjnej informacji. Przykładowo, w opisie pulsacyjnej rurki ciepła (Rozdział 1.4.1) warto byłoby syntetycznie przedstawić kryteria fizyczne wymuszenia ruchu oscylacyjnego w rurce. W Rozdziale 2.2.2 analizowane są kryteria wystąpienia mikroprzepływów, jednakże nie zdefiniowano w pracy tej klasy przepływów. Rozdział 2.5 poświęcono zagadnieniu krytycznej średnicy kanału, której jednakże w sposób bezpośredni nie zdefiniowano.

VI. 2. Uwagi porządkowe

Należy podkreślić staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę przejrzystość tekstu, a także wysoka jakość rysunków. Poniżej zawarte uwagi nie wpływają na moją jednoznacznie bardzo wysoką ocenę rozprawy i mają w dużej mierze charakter sugestii, które pozwalam sobie wypunktować mając na uwadze potencjalne wykorzystanie materiału zawartego w rozprawie w dalszych publikacjach Doktoranta.

- Str. 79 – uzyskany współczynnik dopasowania R^2 nie przekraczający 0.75 określono jako „bardzo dobre przybliżenie”, jednakże należałoby je określić raczej jako przybliżenie akceptowalne.
- Należałoby wskazać dla jakich warunków opracowano wykresy przedstawione na Rys. 4.12.
- Tabela 2.1 – nie zamieszczono informacji wskazanych w kolumnach „interpretacja” oraz „dziedzina”.
- Należałoby wskazać źródła literaturowe dla materiału ilustracyjnego zamieszczonego na Rys. 1.5.
- Na Rys. 2.2 oraz Rys. 2.3 zamieszczono mapy struktur z zastosowaniem nie zdefiniowanych w pracy parametrów.
- Należałoby uzupełnić szczegółowe dane bibliograficzne dla pozycji [95].

VII. Uwagi końcowe

Praca jest starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna. W pracy zamieszczono w niej wiele informacji pozwalających na szczegółowe przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad bardzo złożonymi zagadnieniami cieplno-przepływowymi zachodzącymi w analizowanych pulsacyjnych przepływach dwufazowych. Uwagi te nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

VIII. Wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest bardzo poważną, wnoszącą ważny wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla mechaniki płynów i teorii przepływów dwufazowych. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim, zarówno pod względem zakresu rzeczowego, jak poziomowi oryginalności osiągnięć badawczych, w tym poznawczych oraz metodycznych. Co więcej – istotnym walorem pracy są aspekty poznawcze wymagające zaangażowania wyjątkowego potencjału w postaci unikalnej infrastruktury badawczej, a także podjęcia współpracy z renomowanym zagranicznym ośrodkiem badawczym. Uzyskane w rozprawie rezultaty zostały opublikowane w renomowanym czasopiśmie naukowym. W moim przekonaniu Doktorant opanował w bardzo dobrym stopniu warsztat pracy badawczej w dziedzinie nauk technicznych. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Ireneusza Nowaka spełnia wymagania Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.
3. Z uwagi na wyjątkową oryginalność pracy związanej zarówno z uzyskanymi rezultatami badań o charakterze podstawowym, poważne osiągnięcia metodyczne, a także wyjątkowy charakter pracy związanej z jej realizacją we współpracy z renomowanym ośrodkiem badawczym zagranicznym – wnoszę o jej wyróżnienie.

Dariusz Brymanowski