

## R E C E N Z J A

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Gabrieli Stanisławy Rafalko nt.:**

**„Zastosowanie analizy obrazu do identyfikacji struktur przepływu dwufazowego  
oraz badania ich dynamiki”**

Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Romuald Paweł Mosdorf, a promotorem pomocniczym dr inż. Paweł Dzienis.

Opinia została opracowana na zlecenie Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Białostockiej dr hab. inż. Małgorzaty Grądzkiej-Dahlke, prof. PB z dnia 05.04.2023 r. (Umowa o dzieło nr 28/WM/2023).

### **1. Zawartość rozprawy**

Recenzowana rozprawa obejmuje 220 stron i jest podzielona na sześć rozdziałów. Dodatkowo podano streszczenie pracy w języku polskim i angielskim, wykaz oznaczeń i symboli, bibliografię oraz trzy załączniki. W rozprawie zawarto:

1. **Wstęp**, w którym ogólnie scharakteryzowano przepływy dwufazowe w mini i w mikrokanalach. Wskazano, jak duże znaczenie w technice mają przemiany fazowe czynników roboczych w przepływie. Podkreślono, że zjawiskom przepływu towarzyszą często niestabilności, które szczególnie nasilają się w kanałach o małej średnicy, czego efektem mogą być przepływy wsteczne zakłócające przepływ w wyznaczonym kierunku. Wzdłuż drogi przepływu ulegają zmianie wzajemne udziały cieczy i gazu w mieszaninie dwufazowej. Oznacza to, że analiza zmian struktur przepływów dwufazowych i ich dynamiki w procesach niestacjonarnych ma istotne znaczenie do określenia efektywności wymiany ciepła i masy w tych układach.
2. **Analiza literatury w zakresie zastosowania analizy obrazu w badaniach przepływów dwufazowych w mini i mikrokanalach.** Scharakteryzowano wybrane, istniejące metody analizy obrazu służące do wyznaczania charakterystyki przepływów dwufazowych i badania ich dynamiki. Określono również motywację podjęcia tematyki pracy wynikającą z przeprowadzonego przeglądu literatury.

3. **Cel i teza pracy.** Podano, że celem pracy było opracowanie metod analizy obrazu z uwzględnieniem „szumu świetlnego” oraz zastosowanie opracowanych metod do identyfikacji struktur przepływów i badania dynamiki procesów zachodzących w trakcie ich trwania. Na podstawie analizy literatury przedstawiono również tezę pracy.
4. **Prezentacja zastosowanych w pracy algorytmów analizy serii obrazów.** Przedstawiony opis zawiera metodykę badań i charakterystykę opracowanych metod analizy obrazu. Opisano opracowane przez autorkę pracy metody analizy obrazu służące do badania podobieństwa rozkładu faz, oraz przedstawiono adaptacje metod wykorzystujących entropię wieloskalową służących do badania złożoności wieloskalowego rozkładu faz.
5. **Zastosowanie metod analizy obrazu do badania przepływów dwufazowych,** w tym do: oceny stopnia synchronizacji niestacjonarnych przepływów dwufazowych w równoległych minikanalach, identyfikacji struktur przepływu, oceny dynamiki przepływu dwufazowego podczas wrzenia i statystycznej analizy dystrybucji. Ponadto przeprowadzono analizę porównawczą opracowanych metod. Dokonano oceny dokładności metod pomiarowych na podstawie analizy błędu toru pomiarowego. Opisano również także stanowiska pomiarowe i zgromadzone dane eksperymentalne.
6. **Podsumowanie,** które zawiera skondensowany opis przeprowadzonych badań i sformułowane wnioski.
7. **Rozprawę kończy spis literatury oraz trzy załączniki,** które zawierają: A – Opis zastosowanych metod oceny stopnia synchronizacji niestacjonarnych przepływów dwufazowych we wrzeniu w celu oceny stabilności przepływu w ramach pojedynczego minikanalu, B - Analizę działania metody opartej na podobieństwie rozkładu faz służącej do oceny dynamiki zmiany fazy, C - Analizę działania metody opartej na wielowymiarowej entropii wieloskalowej (MMSE) służącej do oceny dynamiki zmiany fazy.

## 2. Teza pracy

Doktorantka w rozdziale trzecim przedstawiła cel swojej pracy i tezę. Podała, że celem pracy jest: 1 - opracowanie metod służących do badania podobieństwa rozkładu faz w przestrzeni i w czasie w trakcie przepływu dwufazowego w mini i mikrokanalach, 2 - opracowanie metod służących do badania złożoności wieloskalowego rozkładu faz w przestrzeni i w czasie w trakcie przepływu dwufazowego w mini i mikrokanalach, 3 - zastosowanie opracowanych metod do identyfikacji struktur przepływów dwufazowych, 4 - zastosowanie opracowanych metod do badania procesów zachodzących podczas wrzenia w mini i mikrokanalach.

Sformułowała tezę twierdząc, że *„Informacja zawarta w „szumie świetlnym” pochodzącym z bezpośredniej rejestracji przepływów dwufazowych w mini i mikrokanalach analizowana z wykorzystaniem metod służących do badania podobieństwa oraz złożoności wieloskalowego rozkładu faz w przestrzeni i w czasie w trakcie przepływu dwufazowego w mini i mikrokanalach pozwala na identyfikację struktur przepływów dwufazowych oraz badanie procesów zachodzących we wrzeniu.*

Mając na uwadze udowodnienie powyższej tezy Doktorantka dokonała analizy dostępnej literatury w zakresie metod analizy obrazu służących do badania cech przepływów dwufazowych w mini i mikrokanalach. Opracowała metody analizy obrazu, które opierają się na analizie „szumu świetlnego”. Wykorzystała dwa rodzaje metod analizy obrazu: metodę analizy służącą do badania podobieństwa rozkładu faz oraz metodę opartą na koncepcji entropii wieloskalowej, zaadaptowaną w pracy do badania przepływów dwufazowych.

Stosując modyfikację metody służącej do badania podobieństwa rozkładu faz i wielowymiarowej entropii wieloskalowej przeprowadziła identyfikację fragmentu kanału, w którym zachodziły najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji faz na podstawie filmów przedstawiających przepływ dwufazowy z wrzeniem czynnika roboczego. Wykazała, że za pomocą metody służącej do badania podobieństwa rozkładu można wyznaczyć początkowy obszar najbardziej gwałtownych zmian rozkładu faz w kanałach, a metoda oparta na koncepcji entropii wieloskalowej służy do określenia maksymalnego położenia tego obszaru. Przedstawione wyniki i ich analizy potwierdziły, że szum świetlny zawarty na zarejestrowanych filmach jest cechą reprezentatywną przepływów dwufazowych. Oznacza to, że poprzez realizację wyżej wymienionego zakresu prac w pełni uzasadniła postawioną tezę swojej pracy.

### 3. Rozwinięcie tezy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy badania struktur przepływu dwufazowego w kanałach o małej średnicy, to jest w mini i mikrokanałach. Od kilku lat obserwuje się stały trend związany z miniaturyzacją wymienników ciepła stosowanych w instalacjach grzewczych i chłodniczych. Charakteryzują się one przeniesieniem dużych gęstości strumienia ciepła na małej powierzchni. Dotyczy to w szczególności mini parowników i skraplaczy. Znajdują one szerokie zastosowanie w wielu działach gospodarki, w tym w elektronice, chłodnictwie, klimatyzacji, medycynie, technice kosmicznej itp. O ile przepływy dwufazowe w kanałach konwencjonalnych są stosunkowo dobrze zbadane, to w przypadku mini i mikrokanałów jest jeszcze wiele do zrobienia. Ciągły postęp w technice pomiarowej dostarcza nową aparaturę badawczą i nowych możliwości pomiarowych, które są niezmiernie potrzebne do prowadzenia badań w mini i mikro przestrzeni oraz w małych przedziałach czasowych. Jest to szczególnie istotne w badaniu przepływów dwufazowych, gdzie obok tradycyjnych parametrów jak ciśnienie, temperatura czy natężenie przepływu występują wielkości charakteryzujące ośrodek dwufazowy, w tym stopień suchości, stopień wypełnienia czy rodzaj struktury przepływu. Znajomość tych parametrów jest niezmiernie istotna, ponieważ ich wartości w sposób bezpośredni wpływają na intensywność wymiany ciepła i opory przepływu. Prowadzone w ostatnich latach badania wykazują, że nie można w sposób bezpośredni przenosić opisów przepływu dwufazowego w kanałach konwencjonalnych na przepływy w mini i w mikrokanałach. Dlatego należy prowadzić nowe badania w tym zakresie. Dobrze się stało, że Doktorantka podjęła się przeprowadzenia badań eksperymentalnych i teoretycznych oraz opracowania nowych metod badawczych. Zaplanowała opracowanie metod analizy obrazu z uwzględnieniem „szumu świetlnego” służących do badania cech przepływów dwufazowych w mini i mikrokanałach oraz zastosowanie opracowanych metod do identyfikacji struktur przepływów i badania dynamiki procesów zachodzących w trakcie ich trwania.

Przed przystąpieniem do prac badawczych Doktorantka przeprowadziła szczegółową analizę dostępnej literatury w zakresie podjętej tematyki rozprawy doktorskiej. Stwierdziła, że wizualne metody służące do badania przepływów dwufazowych, wspomagane komputerowo, umożliwiają uzyskanie ilościowych rezultatów dotyczących charakterystyk i dynamiki przepływu. Nieliniowe metody analizy, stosowane w celu badania dynamiki przepływów, pozwalają na identyfikację zmian charakteru przepływu w czasie. Stosowanie kilku miar jednocześnie w analizie danych przedstawiających przepływ dwufazowy umożliwia badaczom weryfikację ich skuteczności. Stwierdziła, że pomimo szeregu zalet, wizualne metody analizy obrazu przedstawione w dotychczasowych pracach mają też swoje wady, do

których można zaliczyć: początkowy etap analizy stanowią często zaawansowane i wieloetapowe operacje przetwarzania obrazów, część z zaprezentowanych badań wymaga binaryzacji czy filtracji obrazu, np. w celu detekcji krawędzi struktur przepływu, a wiele z uzyskanych rezultatów stanowiły uśrednione wielkości opisujące charakterystyki i dynamikę przepływu.

Dlatego Doktorantka zaplanowała opracowanie metod analizy obrazu opierających się na analizie tzw. „szumu świetlnego”, czyli zmian jasności pikseli na poszczególnych klatkach filmu, które nie wiążą się z wieloetapowym przetwarzaniem obrazu. Mając powyższe na uwadze opracowała metodykę badań i nową charakterystykę opracowanych metod analizy obrazu. Zaproponowała metody analizy obrazu służące do badania podobieństwa rozkładu faz oraz dokonała adaptacji metod wykorzystujących entropię wieloskalową, służących do badania złożoności wieloskalowego rozkładu faz. Obiektem badań były obrazy cyfrowe zarejestrowane podczas przepływów dwufazowych w mini i mikrokanalach. Badano wybrane fragmenty obrazu stosując analizę zmian uśrednionych jasności pikseli w wybranym obszarze na kolejnych klatkach filmu oraz analizę złożoności wieloskalowego rozkładu jasności pikseli. Zaproponowane metody analizy obrazu pozwoliły na badanie podobieństwa rozkładu faz i złożoności wieloskalowego rozkładu faz.

Doktorantka opracowała również metodę pozwalającą na ocenę stopnia synchronizacji niestacjonarnych przepływów dwufazowych we wrzeniu w równoległych minikanalach. Swoją analizę oparła na identyfikacji udziału fazy ciekłej we fragmencie kanału. Zaproponowaną metodę zastosowała również do badania synchronizacji niestacjonarnych struktur przepływu dwufazowego w czasie w pojedynczym kanale. Przeprowadziła także statystyczną analizę stopnia synchronizacji niestacjonarnych przepływów w sąsiadujących kanałach, co pozwoliło na ocenę zmian korelacji udziału fazy ciekłej w trakcie całego przepływu. W zaproponowanej metodzie identyfikacji struktur przepływu dwufazowego w minikanalach zastosowała tzw. „bramki”, czyli fragmenty analizowanych obrazów. Opracowany algorytm uwzględnia przesuwanie się „bramki” w czasie i wzdłuż kanału, co różni go istotnie od propozycji innych badaczy. Przeprowadzona analiza opiera się na badaniu korelacji zmian jasności pikseli w poszczególnych bramkach. Nowa metoda uwzględnia również charakter zmian tych korelacji w czasie.

Doktorantka wykazała, że metoda analizy pozwalająca na ocenę dynamiki procesu wrzenia może być pomocna w wyznaczeniu obszaru występowania charakterystycznych struktur wrzenia. W tym celu dokonała jej modyfikacji opierając się na badaniu podobieństwa rozkładu faz z wykorzystaniem współczynnika korelacji Pearsona. W zmodyfikowanej metodzie oba typy „bramek”, referencyjne i ruchome, są przesuwane wzdłuż kanałów. Dodatkowo w celu wyznaczenia fragmentu kanału, w którym zachodzą najbardziej gwałtowne zmiany rozkładu faz został opracowany kod obliczeniowy w programie Matlab.

W celu przeprowadzenia badania złożoności wieloskalowego rozkładu faz Doktorantka opracowała metodę identyfikacji struktur przepływu dwufazowego z wykorzystaniem entropii wieloskalowej (CMSE) oraz metodę oceny dynamiki zmiany fazy w układach wielokanałowych. Zaproponowane metody pozwalają na szczegółowe badanie procesów przemian fazowych czynników roboczych i ich ocenę jakościową oraz ilościową.

Rozdział piąty recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy zastosowania opracowanych przez Doktorantkę metod analizy obrazu do badania przepływów dwufazowych. Są one zalecane do: oceny stopnia synchronizacji niestacjonarnych przepływów dwufazowych w równoległych minikanalach, identyfikacji struktur przepływu, oceny dynamiki przepływu dwufazowego podczas wrzenia i statystycznej analizy dystrybucji faz. Przeprowadzono analizę porównawczą opracowanych metod oraz ocenę dokładności metod pomiarowych na

podstawie analizy błędu toru pomiarowego. Opisano także stanowiska pomiarowe i bazę danych eksperymentalnych.

Na podkreślenie zasługuje to, że Autorka zastosowała w swojej pracy adekwatne do potrzeb narzędzia formalne dotyczące analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych, opracowania i prezentacji wyników, a także doboru aparatury badawczej, które w pełni odpowiadają założonym celom badań doświadczalnych. Wykazała się bardzo dobrym opanowaniem podstaw teoretycznych zjawisk zachodzących podczas przepływów dwufazowych, struktur przepływu, rejestracji i analizy obrazu, warsztatu badawczego oraz metod obliczeniowych. Przedstawiony program badań jest obszerny i szczegółowy, cechuje się nowością zastosowanych procedur obliczeniowych, obfituje dużą liczbą otrzymanych danych. Uzyskane wyniki prac badawczych charakteryzują się dużym potencjałem poznawczym i wdrożeniowym. Układ pracy oceniam jako właściwy, a zastosowane metody badawcze w postaci wykorzystania wiedzy wynikającej z analiz teoretycznych, badań eksperymentalnych i procedur obliczeniowych są adekwatne do rozwiązywanych problemów.

#### **4. Oryginalność i wartości poznawcze pracy**

Prezentowana rozprawa dotyczy bardzo istotnego zagadnienia w technice cieplnej dotyczącego poszukiwania nowych, ulepszonych metod badania przepływów dwufazowych w mini i mikrokanalach. Zjawiska te są jeszcze stosunkowo mało zbadane. Dopiero obecnie wraz z rozwojem nowoczesnych metod badawczych w mini przestrzeni i w mini przedziałach czasowych możliwe jest prowadzenie szczegółowych i precyzyjnych badań w ograniczonej przestrzeni. Dotyczy to w szczególności przepływów dwufazowych czynników roboczych. Nowoczesne szybkoklatkowe kamery umożliwiają rejestrację obrazów z częstotliwością tysięcy klatek na sekundę. Umożliwia to badanie dynamiki procesu oraz jej opis. Jednak zakup i zastosowanie nowoczesnej aparatury nie wystarczy, aby uzyskać oczekiwany rezultat. Należy opracować i zastosować właściwe procedury obliczeniowe z wykorzystaniem oprogramowania komputerowego. Mając powyższe na uwadze Doktorantka przeprowadziła wnikliwą analizę danych literaturowych na ten temat, która zasługuje na wyróżnienie. Zapoznała się z metodami analizy obrazu służącymi do wyznaczania charakterystyki przepływów dwufazowych i badania ich dynamiki. Uznała, że istnieje potrzeba ich dalszego doskonalenia i adaptacji do występujących potrzeb. Opracowała więc dwie udoskonalone metody analizy obrazu, które opierają się na analizie tzw. „szumu świetlnego”. Zaproponowała metodę analizy opartą na mierze dwuwymiarowego współczynnika korelacji służącą do badania podobieństwa rozkładu faz oraz metodę opartą na koncepcji entropii wieloskalowej do badania przepływów dwufazowych. Obie metody zastosowała do identyfikacji struktur przepływu dwufazowego. Metoda służąca do badania podobieństwa rozkładu faz umożliwia analizę zmian struktur przepływu w czasie, natomiast metoda oparta na koncepcji entropii umożliwia analizę stopnia uporządkowania zmian jasności pikseli na danej klatce filmu. Wykazano, że za pomocą metody służącej do badania podobieństwa rozkładu można wyznaczyć początkowy obszar najbardziej gwałtownych zmian rozkładu faz w kanałach. Metoda oparta na koncepcji entropii wieloskalowej służy natomiast do określenia maksymalnego położenia tego obszaru (względem wlotu do kanałów). Zaproponowane metody wpisują się w jakościowy i ilościowy opis mechanizmu przepływu dwufazowego w mini i mikrokanalach. Stanowi to znaczny postęp w badaniu tych zjawisk. Rodzaj struktury przepływu dwufazowego decyduje o intensywności wymiany ciepła i wpływa na wartości spadków ciśnienia. Znajomość stopnia suchości i stopnia zapełnienia, to jest istotnych para-

metrów przepływu dwufazowego jest niezbędna do uzyskania pełnego i precyzyjnego opisu fizyki zjawisk tam występujących.

Doktorantka przeprowadziła również systematyczne badania eksperymentalne przepływów dwufazowych w pojedynczych i w zespołach równoległych mini i mikrokanalów. Uzyskała dużą bazę wyników badań eksperymentalnych. Ich wykorzystanie pozwoliło to wykazanie przydatności opracowanych metod analizy obrazu. Na szczególne wyróżnienie zasługuje opracowanie metody analizy opartej na koncepcji entropii wieloskalowej oraz metody oceny dynamiki zmiany fazy w układach wielokanałowych. Metody te pozwalają na szczegółowe badanie procesów przemian fazowych czynników roboczych i ich ocenę jakościową oraz ilościową przy jednoczesnym skróceniu i uproszczeniu dotychczas stosowanych procedur. Doktorantka po przeprowadzeniu badań eksperymentalnych wskazuje na zastosowanie opracowanych metod w stosunku do przepływów dwufazowych z wrzeniem czynników roboczych. Jednak opracowane metody można z powodzeniem stosować do przemian fazowych w procesach skraplania. Będą one również tam niezmiernie przydatne.

Zrealizowany zakres prac przyczynił się do powstania nowego, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym, opisu przepływu dwufazowego w mini i w mikrokanalach. Na wyróżnienie zasługuje również próba uproszczenia i uogólnienia dotychczasowych metod wyznaczania struktur przepływu dwufazowego i map przepływu oraz określania występujących obszarów niestabilności. Jest to nowe uniwersalne podejście stosowane tylko przez nielicznych badaczy. Wyniki modelowania wykazują dobrą zgodność z wynikami badań eksperymentalnych w szerokim zakresie zmian parametrów opisujących przepływy dwufazowe.

## 5. Wartości użytkowe pracy

Praca ma niewątpliwie walor aplikacyjny i dotyczy opracowania nowych, ulepszonych metod badania przepływów dwufazowych w mini i mikrokanalach. Autorka zaproponowała nowe metody z do identyfikacji struktur przepływu dwufazowego. Jest to metoda służąca do badania podobieństwa rozkładu faz umożliwiającą analizę zmian struktur przepływu w czasie i metoda oparta na koncepcji entropii umożliwiającą analizę stopnia uporządkowania zmian jasności pikseli na danej klatce filmu. Ponadto metoda służąca do badania podobieństwa rozkładu pozwala wyznaczyć początkowy obszar najbardziej gwałtownych zmian rozkładu faz przepływie dwufazowym. Końcowym efektem prac Doktorantki było opracowanie map przepływu, które pozwalają wyznaczyć rodzaj struktury przepływu dwufazowego w kanałach o małej średnicy. Jest to niezmiernie ważne pod względem poznawczym jak i aplikacyjny. Rodzaj struktury przepływu decyduje o zastosowaniu odpowiednich zależności obliczeniowych w zakresie wymiany ciepła i oporów przepływu. Znajduje to bezpośrednie zastosowanie w projektowaniu wymienników i miniwymienników ciepła, tzw. kompaktowych parowników i skraplaczy. Przyczyni się to do wzrostu dokładności obliczeń, bardziej precyzyjnego określenia powierzchni wymiany ciepła i rozmiarów instalacji. Wymienniki typu parowniki i skraplacze znajdują duże zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Dotyczy to zarówno tzw. dużej i małej energetyki, w tym ogrzewnictwa, chłodnictwa, klimatyzacji, a także przemysłu chemicznego, elektroniki, medycyny, transportu itp.

Zaproponowane nowe metody określania struktur przepływu dwufazowego w mini i w mikrokanalach stanowią istotny wkład Doktorantki do badania zjawiska przepływu dwufazowego w przepływie. Dotyczy to zarówno adiabatycznych przepływów, jak i przepływów z przemianami fazowymi czynników roboczych.

## 6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

### Uwagi o charakterze merytorycznym

1. Autorka opracowała nowe metody określania struktur przepływu dwufazowego w mini i w mikrokanalach. Wykazała ich praktyczne zastosowanie w przypadku przepływu pęcherzykowego i korkowego. Istnieje pytanie o zakres stosowania tych metod. Czy można je wykorzystywać w przypadku innych przepływów dwufazowych, np. przepływu pierścieniowego, falowego, mgłowego itp.?
2. W pracy użyto angielskiego pojęcia „*void fraction*” w celu określenia udziału objętościowego fazy gazowej w całej mieszaninie dwufazowej ciecz – gaz. Po przetłumaczeniu na język polski Autorka stosuje dwie nazwy: „*stopień zatrzymania gazu*” i „*stopień zapełnienia*”. Należy zdecydować się na jedną nazwę z tym, że w zdecydowanej większości w polskiej literaturze naukowej stosuje się tę drugą. W drugiej części pracy również Autorka ją stosuje w opisie przepływów dwufazowych.
3. W rozdziale 4.3.1 przedstawiono metodę identyfikacji struktur przepływu z wykorzystaniem entropii wieloskalowej (CMSE). Doktorantka przedstawiła podstawy teoretyczne tej metody i sposób postępowania. Podanie sensu fizycznego tej metody zapewne ułatwiłoby czytelnikowi lepsze jej zrozumienie.
4. W rozdziale 4.3.2 podano opis metody oceny dynamiki zmiany fazy w układach wielokanałowych. Umożliwia ona badanie w wymiennikach wielokanałowych interakcji pomiędzy kanałami podczas przepływu dwufazowego. Istnieje pytanie, czy zaproponowaną metodę można również wykorzystać w przypadku wystąpienia tzw. *przepływów wstecznych* w niektórych kanałach wymiennika.
5. W rozdziale piątym Doktorantka podjęła próbę opracowania map struktur przepływu dwufazowego. Za wyjątkiem jednej (rys. 5.12) są to mapy we współrzędnych wymiarowych dla przepływu dwóch czynników: mieszaniny woda-gliceryna i powietrza. Czy Doktorantka próbowała opracować mapy przepływu we współrzędnych bezwymiarowych? Takie podejście uogólnione zwiększyłoby zakres ich zastosowania, szczególnie dla innych czynników.

### Uwagi edytorskie

1. Należy podkreślić wysoki poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod względem stylistycznym i edytorskim. Praca została napisana profesjonalnie. Praktycznie brak jest błędów w tekście.
2. Pewne zastrzeżenia występują w stosunku do jakości niektórych rysunków w postaci fotografii, które niekiedy są mało czytelne. Dotyczy to rysunków przedstawiających wyniki obserwacji struktur przepływu dwufazowego, np.: 5,19, 5,25, 5,26, 5,29, 5,33, 5,35, 5,38 itp. Zapewne w wersji elektronicznej ten problem nie występuje, ale w wersji drukowanej tak.

## 7. Uwagi końcowe

Praca napisana jest bardzo zwięźle i w sposób zrozumiały. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktorantki do dalszych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy.

## 8. Wniosek do Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorantka wykazała się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazała także umiejętności wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu techniki cieplnej przy prowadzeniu badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Dotyczy to również metod rejestracji i przetwarzania obrazu. Praca stanowi oryginalny wkład do badań struktur przepływu, wymiany ciepła i pędu w ośrodkach dwufazowych. **Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Gabrieli Stanisławy Rafalko, jako rozprawy doktorskiej** odpowiadającej warunkom określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz.U. z 2022 r., poz. 574) **i o dopuszczenie jej do publicznej obrony.** Praca ta stanowi znaczące osiągnięcie Autorki i jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich metod badawczych w zakresie identyfikacji zjawisk cieplno-przepływowych w ośrodkach dwufazowych. Uzyskane wyniki przeprowadzonych analiz i badań eksperymentalnych przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie szeroko pojętej inżynierii mechanicznej.

Mając na uwadze wysoki poziom naukowy rozprawy, opracowanie nowych metod badawczych, ich wdrożenie we własnych badaniach eksperymentalnych oraz opublikowanie w wielu międzynarodowych czasopismach wysokopunktowanych **wnioskuje o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Gabrieli Stanisławy Rafalko.** Stanowi ona bardzo dobry przykład dla innych badaczy w zakresie wysokiej jakości i solidności prowadzonych badań naukowych.

