

## Ocena rozprawy doktorskiej

mgr inż. Gabrieli Stanisławy Rafalko

pt.: „Zastosowanie analizy obrazu do identyfikacji struktur przepływu dwufazowego oraz badania ich dynamiki”

*Promotor: prof. dr hab. inż. Romuald P. Mosdorf*

*Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Dzieńis*

### 1. Zawartość pracy

Przedłożona do opinii praca liczy 220 stron i została podzielona na 6 rozdziałów, spis literatury, 1 dodatek oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

We **wstępie** (rozd. 1) bardzo dobrze uzasadniono powody, dla których podjęto tematykę rozprawy. Podkreślono znaczenie identyfikacji struktur przepływu zarówno w układach cieczech-gaz, jak i podczas wrzenia w przepływie. Wskazano przy tym na istotne problemy w przypadku analizy dynamicznych zmian nie tylko struktur przepływu, ale też samego przepływu, na przykład w postaci przepływu wstecznego. Słusznie zauważono, że trudności te potęgują się w przypadku przepływów w mini- i mikrokanałach.

W dalszej części wstępu podano skrótowo cel i metodykę badań, a także zwięźle przedstawiono zawartość poszczególnych rozdziałów pracy.

Nie ulega najmniejszej wątpliwości, że tematyka rozprawy jest w pełni aktualna naukowo, a także istotna ze względów praktycznych,

**Rozdz. 2** zawiera przegląd metod analizy obrazu stosowanych w badaniach przepływów dwufazowych. Tytuł rozdziału sugeruje, że będą omawiane metody stosowane w odniesieniu do mini- i mikrokanałów, ale przedstawione metody są powszechnie stosowane również w badaniach przepływów w kanałach konwencjonalnych. Podział na metody konwencjonalne i wspomagane komputerowo jest więcej niż umowny, gdyż w chwili obecnej praktycznie każda metoda wizualizacji przepływu jest wspomagana komputerowo.

Poza tym szkoda, że Doktorantka nie przedstawiła w sposób uporządkowany struktur przepływu, co pozwoliłoby na uniknięcie wielokrotnego tłumaczenia nazw angielskich podawanych w omawianych artykułach.

Nie zmienia to faktu, że podane wiadomości bardzo dobrze świadczą o przygotowaniu merytorycznym Doktorantki z zakresu zjawisk fizycznych towarzyszących przepływowi dwufazowym, a także zaletom i wadom stosowanych metod wizualizacji przepływów dwufazowych.

W **rozd. 3** zaprezentowano zwięźle cel i tezę rozprawy.

W **rozd. 4** przedstawiono metodykę zastosowanych w pracy sposobów analizy obrazu. W szczególności Doktorantka badała podobieństwo rozkładu faz przez analizę zmian uśrednionych jasności pikseli w wybranym obszarze na kolejnych klatkach filmu oraz (badała) złożoność wieloskalowego rozkładu faz przez analizę wieloskalowego rozkładu jasności pikseli. Obie metody wymagają doskonałego przygotowania merytorycznego, które obejmuje część eksperymentalną (laboratoryjną), teoretyczną (matematyczną) i znajomość przepływów dwufazowych. Przygotowanie eksperymentalne, to m.in. problemy oświetleniowe, zapewnienie odpowiedniej rozdzielczości obrazów czy właściwa częstotliwość rejestracji obrazów. Przygotowanie matematyczne to umiejętność obróbki olbrzymiej ilości danych pomiarowych, ale także znajomość matematyki wyższej i programowania. Wreszcie przygotowanie merytoryczne, które oznacza znajomość fizyki analizowanych procesów, a w tym powiązanie wiedzy ściśle matematycznej z dokumentowanymi strukturami przepływu dwufazowego. Czytelność opisu zastosowanych algorytmów, a także liczne szczegóły techniczne, jak np. dobór wartości progowej, świadczą o dogłębnej znajomości tematyki podjętej przez Doktorantkę.

**Rozdz. 5** jest poświęcony prezentacji wyników badań przepływów dwufazowych z zastosowaniem metod analizy obrazów opisanych w rozdz. 4.

W szczególności Doktorantka badała przydatność metody podobieństwa rozkładu faz do oceny stopnia synchronizacji niestacjonarnych przepływów podczas wrzenia wody w dwóch równoległych minikanalach o przekroju okrągłym. W tym celu wykorzystwała dostępne wyniki pomiarów. Wpływ fluktuacji ciśnienia w układzie badano przez zastosowanie jednego lub dwóch zbiorników o zmiennej objętości, umieszczonych na wlocie do sekcji grzejnej. W istocie, na podstawie analizy jasności pikseli określano udział

fazy ciekłej w minikanale. W efekcie analiz stwierdzono, że w układzie z jednym (wspólnym) zbiornikiem o zmiennej objętości na wlocie do sekcji grzejnej zmiany pomiędzy synchronizacją, a asynchronizacją występują częściej niż w przypadku dwóch zbiorników o zmiennej objętości umieszczonych na wlocie do sekcji grzejnej. *Nasuwa się pytanie, dlaczego do oceny występowania fazy ciekłej, a więc przydatności opracowanej metody analizy obrazu, nie wykorzystano danych pomiarowych z układu laser-fototranzystor – 13 na rys. 5.1?*

W dalszej kolejności Doktorantka badała struktury przepływu dwufazowego mieszaniny wody i gliceryny z powietrzem w okrągłym, krótkim kanalikach z zastosowaniem metod podobieństwa rozkładu faz oraz wieloskalowego rozkładu faz. W tym celu wykorzystwała dostępne wyniki pomiarów. Na podstawie wartości oryginalnie zdefiniowanego współczynnika procentowej miary tempa zmian rozkładu faz ( $V_v$ ) wyodrębniono trzy struktury przepływu, a uzyskaną mapę struktur przepływu porównano z wynikami opublikowanymi w literaturze, uzyskując zadowalającą dokładność. Z kolei metoda wieloskalowego rozkładu faz pozwoliła na wyodrębnienie sześciu struktur przepływu w zależności od wartości współczynnika (miary) złożoności  $CI$ . Struktury przepływu określono również metodą wizualną na podstawie bezpośredniej obserwacji. Bardzo cenne jest porównanie zidentyfikowanych struktur przepływu z zastosowaniem trzech wymienionych metod przy użyciu tzw. klasyfikatora *LibSVM*. Z porównania wynika, że metodą najbardziej efektywną okazała się analiza złożoności wieloskalowego rozkładu faz. Następnie Doktorantka badała dynamikę wrzenia w przepływie w równoległych mini- i mikrokanalach z zastosowaniem metod podobieństwa rozkładu faz oraz wieloskalowego rozkładu faz. Doktorantka uczestniczyła w pomiarach na stanowisku badawczym wyposażonym w sekcję grzejną, która umożliwiała jednoczesną wizualizację procesu. Cyfrową rejestrację przepływów zapewniała kamera do szybkiej fotografii. Doktorantka wniosła oryginalny wkład w dobór oświetlenia. Na szczególne podkreślenie zasługuje niezwykle staranność Doktorantki w wyznaczeniu błędu pomiaru. Zasadniczym celem badań było określenie lokalizacji występowania w kanalikach frontu wrzenia. Z uwagi jednak na występujące w kanalikach przepływy wsteczne dokładna lokalizacja frontu wrzenia okazała się niemożliwa, stąd w analizie ograniczono się do wyznaczenia obszaru gwałtownych zmian rozkładu faz, od którego przepływ odbywał się jedynie w kierunku wylotu z kanalików. Założono, że front wrzenia znajdował się wewnątrz tego obszaru. Ze względu na fluktuacje ciśnienia w układzie zasilania do analizy wybrano klatki filmu odpowiadające najniższemu i najwyższemu ciśnieniu na wlocie. W wyniku analizy za

pomocą metody rozkładu faz ustalono, że obszar gwałtownych zmian rozkładu faz odsuwa się od wlotu do kanalików wraz ze wzrostem strumienia masy wody, co jest zgodne z intuicją i danymi literaturowymi. Ciekawa jest analiza chaotyczności zmian lokalizacji gwałtownych zmian rozkładu faz w układzie z 11 mikrokanalami, z której wynika, że na to położenie mają wpływ procesy deterministyczne. *Szkoda, że nie pokuszono się o podanie choćby jednego z nich.* Najważniejszy wniosek z analizy złożoności wieloskalowego rozkładu faz z zastosowaniem miary w postaci wielowymiarowej entropii wieloskalowej (MMSE) jest taki, że MMSE osiąga maksimum dla lokalizacji odpowiadającej obszarowi, od którego przepływ jest tylko w kierunku wylotu z mikrokanalików. Z rys. 5.32 wynika, że odległości obszaru gwałtownych zmian rozkładu faz od wlotu do sekcji grzejnej określone przy użyciu analizy złożoności wieloskalowego rozkładu faz są większe – niezależnie od gęstości strumienia ciepła, niż określone z zastosowaniem metody rozkładu faz. Doktorantka szczegółowo wyjaśnia tę różnicę podkreślając, że metoda rozkładu faz odnosi się do pojedynczego kanalika, podczas gdy analiza złożoności wieloskalowego rozkładu faz dotyczy układu kanalików.

Doktorantka podjęła też próbę oceny stopnia synchronizacji przepływów w badanych układach kanalików z zastosowaniem metody podobieństwa rozkładu faz. Dla układu 3 minikanalów ustalono, że prawdopodobieństwo synchronizacji rozkładu faz zależy od lokalizacji w kanaliku i strumienia masy wody, a synchronizacja rozkładu faz jest najbardziej prawdopodobna dla przepływu korkowego. Dla układu 11 mikrokanalów ustalono, że położenie maksimów histogramów wzdłuż sąsiadujących kanalików miało kształt zbliżony do fali, co związane było z formowaniem się frontu wrzenia.

Należy podkreślić, że sposób opracowania i przedstawienia wyników pomiarów świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktorantki do prowadzenia badań doświadczalnych. Niezwykle istotne jest też to, że Doktorantka w każdym przypadku podjęła próbę interpretacji fizycznej osiągniętych wyników.

W **podsumowaniu** (rozdz. 6) Doktorantka podała wnioski końcowe i podkreśliła najważniejsze, z jej punktu widzenia, wyniki badań.

## 2. Teza pracy

Doktorantka podała tezę swojej pracy w sposób jawny. Stwierdza w niej, 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.*

Doktorantka jednoznacznie ustosunkowała się do przyjętej tezy, stwierdzając, że w pełni została potwierdzona jej prawdziwość (str. 180<sup>7-8</sup>).

### **3. Oryginalność pracy**

Istotne osiągnięcie Doktorantki to zaproponowanie metody analizy obrazu opartej na badaniu podobieństwa rozkładu faz do oceny synchronizacji niestacjonarnych przepływów dwufazowych oraz identyfikacji struktur przepływu.

### **4. Wartości użytkowe pracy**

Zamieszczone w pracy wyniki mogą mieć potencjalne znaczenie w udoskonaleniu metod obliczeń aparatów, w których występują przepływy dwufazowe, w tym w parownikach.

### **5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

1. str. 13<sup>8</sup> – opiniodawcy nie są znane badania przepływów dwufazowych w *nanokanalach*,
2. str. 14 i dalej – nie jest trafne stosowanie terminu „szum świetlny”; może „mapa jasności pikseli”?
3. str. 40<sup>7-8</sup> – nazwy struktur przepływu są niepoprawne,
4. str. 70<sub>6</sub> – jak – i czy w ogóle, można wyeliminować empiryczny dobór wartości progowej sumy pikseli ( $\epsilon$ )?,
5. str. 75<sub>3</sub> – czy „nieregularny charakter pojawiania się struktur przepływu” jest tożsamy chaotycznym charakterem pojawiania się struktur przepływu?
6. str. 81<sub>5</sub> - czy wartość współczynnika korelacji R zależy od liczby bramek?
7. str. 92<sup>3</sup> – jak jest dobierana wartość czynnika skalującego  $\tau$ ?
8. str. 117<sup>4</sup> – niepoprawny numer równania. Jest (4.12), a winno być (4.14),
9. str. 119<sup>7</sup> – niepoprawny numer równania. Jest (4.15), a winno być (4.16),
10. str. 119<sub>4</sub> – niepoprawny numer równania. Jest (4.22), a winno być (4.18),

11. str. 123 – na pęcherze typu „cap bubbles” M. Dziubiński proponuje nazwę „pęcherzyki parasolowate”,
12. str. 126 – niepoprawne numery równań. Jest (4.23) i (4.24), a winno być (4.24) i (4.25),
13. str. 130 – niepoprawne numery równań. Jest (4.32) i (4.33), a winno być (4.33) i (4.34),
14. str. 132<sup>2</sup> – nie ma podanej postaci funkcji  $\overline{CMSE}$ ,
15. str. 135<sup>3</sup> – określenie „biały szum” jest niezrozumiałe,
16. str. 135<sup>5</sup> – jak należy rozumieć określenie „dynamiczna mapa struktur przepływu”?
17. str. 136<sub>3</sub> – jest „wielkoskalowego”, a powinno być wieloskalowego,
18. str. 157<sup>8</sup> – według jakiego wzoru obliczano  $MMSE$ ?,
19. str. 167 – jak wyznaczano gęstość strumienia ciepła przedstawioną na rys. 5.34,

Uwaga generalna. Doktorantka zaproponowała metody identyfikacji struktur przepływu dwufazowego. W pracy nie podano wprost zakresu stosowalności tych metod. Nasuwa się np. pytanie czy metody te można stosować w przypadku przepływu pierścieniowego, który jest dominujący podczas wrzenia w przepływie?

## 6. Uwagi redakcyjne, terminologia, jednostki

Terminologia stosowana w rozprawie jest poprawna, chociaż Doktorantka nie ustrzegła się niewłaściwych terminów czy niezręcznych sformułowań.

Przykładowo:

- str. 13<sub>8</sub> – sformułowanie „...przekazywane są duże wartości strumieni ciepła...” jest niezręczne,
- str. 22 i dalej – wielokrotnie podawane są nazwy angielskie struktur przepływu – czasami odmienne,
- str. 44 i dalej – zamiast „termopara” powinno być termoelement,
- str. 45<sub>2</sub> – zamiast „nanoprzewodów” powinno być nanodrucików,
- str. 66 – zamiast „prostopadłościennych” powinno być prostokątnych,
- str. 72 – zamiast „fronty dwóch korków pary” powinno być front i tył dwóch korków pary”,
- str. 126<sub>2</sub> – zdanie „szeregi x’ pobrane z klitek filmu” jest niezręczne,
- str. 135<sub>2</sub> – jest Wakaito, a powinno być Waikato,
- str. 165 i dalej – jest „dystrybucji faz”, a dotychczas używano określenia „rozkład faz”,
- str. 182<sub>7</sub> – jest „reprezentacyjną”, a powinno być reprezentatywną.

Praca jest napisana na dobrym poziomie edytorskim, z dobrze dobranym materiałem ilustracyjnym. Niestety, nie jest zachowana właściwa numeracja wzorów. Nie wszystkie przywołane w tekście prace znajdują się w spisie literatury. Np. na str. 21: Balasubramanian i Kandlikar, 2005, Bohdal i in. 2015, Yaun i in., 2019. Poza tym część prac ma niewłaściwą datę, np. Wang i in. – jest 1997, a w spisie – 2003. Wiele tytułów czasopism w spisie literatury jest napisanych z małej litery.

Drobniejsze uchybienia redakcyjne i stylistyczne zaznaczyłem w dostarczonym egzemplarzu pracy.

Przedstawione powyżej uwagi mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i redakcyjny i w niczym nie umniejszają wartości merytorycznej pracy, którą oceniam bardzo wysoko.

## **7. Wniosek końcowy**

Stwierdzam, że przedłożona praca zawiera oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autorkę naukowych metod doświadczalnych, a także analityczno-numerycznych stosowanych w inżynierii mechanicznej, a tym samym wyczerpuje warunki określone przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i uzasadnia dopuszczenie jej do publicznej obrony.

### ***Wniosek o wyróżnienie rozprawy***

Wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Gabrieli Stanisławy Rafałko ze względu na przedstawienie oryginalnej propozycji rozwiązania problemu naukowego identyfikacji struktur przepływu dwufazowego i oceny synchroniczności niestacjonarnych przepływów dwufazowych w mini- i mikrokanalach. W szczególności Doktorantka:

1. opracowała oryginalną metodę analizy obrazu cyfrowego z zastosowaniem podobieństwa rozkładu faz,
2. uczestniczyła w badaniach eksperymentalnych wrzenia w przepływie udowodniając przydatność zaproponowanej metody podobieństwa rozkładu faz,
3. wykazała wiarygodność zaproponowanej metodyki w oparciu o dane literaturowe i drugą z zastosowanych metod, tj. analizę złożoności wieloskalowego rozkładu faz,
4. stworzyła podstawy do dalszego rozwoju metod analizy obrazu, m.in. z zastosowaniem sztucznej inteligencji.

Publikacje:

1. Rafałko G., Grzybowski H., Mosdorf R.: An image analysis method of liquid phase distribution during boiling in parallel minichannels. *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 139, 106453 (140 pkt.)
2. Rafałko G., Mosdorf R., Górski G.: Two-phase flow pattern identification in minichannels using image correlation analysis. *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 113, 104508 (140 pkt.)
3. Rafałko G., Zaborowska I., Grzybowski H., Mosdorf R.: Boiling synchronization in two parallel minichannels – image analysis. *Energies*, 2020, 13, 1409 (140 pkt.)
4. Rafałko G., Grzybowski H., Dzienis P., Mosdorf R., Adamowicz A.: Image analysis of flow maldistribution during boiling in parallel minichannels. *Chemical Engineering and Technology*, 2021, 44, 1978-1985 (70 pkt.)
5. Rafałko G., Mosdorf R., Litak G., Górski G.: Complexity of phase distribution in two-phase flow using composite multiscale entropy. *European Physical Journal Plus*, 2020, 135 (70 pkt.)

A handwritten signature in blue ink, reading "J. Górski". The signature is stylized, with a large, sweeping initial "J" that extends downwards and to the left, and the name "Górski" written in a cursive script to its right.