

**Recenzja pracy doktorskiej
mgr inż. Iwony Zaborowskiej**

**Badania doświadczalne i identyfikacja numeryczna dynamiki struktur przepływów
dwufazowych we wrzeniu w mini- i mikrokanalach**

1. Dane ogólne

Oceniana praca doktorska została wykonana w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej pod naukowym kierownictwem prof. dr hab. inż. Romualda Mosdorfa, promotora i dr inż. Huberta Grzybowskiego, promotora pomocniczego. Składa się ona z siedmiu rozdziałów, wykazu oznaczeń i symboli, spisu literatury i dwóch streszczeń w językach polskim i angielskim. Łączna objętość pracy wynosi 200 stron. Ponadto zawiera ona 13 tabel i 73 rysunki, cytowane jest 210 pozycji literatury.

Zgodnie z tytułem praca dotyczy badań eksperymentalnych a następnie identyfikacji numerycznej charakterystycznych cech niestacjonarnych przepływów dwufazowych we wrzeniu w kanałach o małej średnicy hydraulicznej. Ten rodzaj niestacjonarnych przepływów dwufazowych występuje w nowoczesnych wymiennikach ciepła o zwartej konstrukcji, stosowanych najczęściej do chłodzenia układów elektronicznych. Recenzowana praca ma, więc zarówno aspekt poznawczy, jak i użytkowy. Kończą ją dwa zwarte streszczenia całości, rozdział po rozdziale, w językach polskim i angielskim.

2. Omówienie treści pracy

We **Wstępie** (rozdz.1) przedstawiono krótkie wprowadzenie do zagadnień niestabilności przepływów dwufazowych z wrzeniem, podkreślając aktualność, złożoność i wagę rozważanych zagadnień dla opracowania coraz dokładniejszych modeli wymiany ciepła w kanałach o małej średnicy hydraulicznej. Określono cel i zakresy badań eksperymentalnych oraz metodykę analizy numerycznej, opartej na analizie rekurencyjnej, uwzględniającej nieliniowy charakter fluktuacji ciśnienia.

W rozdz.2 - **Dynamika wrzenia w mini- i mikrokanalach**, Autorka pracy omówiła kolejno te zagadnienia, które uznała za ważne dla realizacji celów i zakresu swoich badań eksperymentalnych i numerycznych. Trudnym i ciągle nierozwiązanym zagadnieniem jest

klasyfikacja kanałów o małej średnicy na makro-, mini- i mikro-kanały. Dominują tu dwa podejścia, pierwsze według wartości średnicy hydraulicznej i drugie, będące kombinacją rozmiarów kanału i właściwości cieplnych wrzącej cieczy. Dalej krótko omówiono najczęściej występujące, charakterystyczne struktury dwufazowe dla przepływu z wrzeniem w małych kanałach i właściwe dla nich rodzaje niestabilności, jak niestabilność Ledinegg'a, niestabilności ciśnieniowa i na skutek zmian gęstości strumienia masy, niestabilność temperaturowa i niestabilność w kanałach równoległych.

W podobny sposób opisano stosowane najczęściej w planowanych badaniach eksperymentalnych metody analizy sygnałów uzyskiwanych z czujników ciśnienia, porównywanych następnie z obrazami struktur dwufazowych, rejestrowanymi szybko kamerą filmową. Na podstawie obszernego przeglądu literatury przedmiotu dokonano kolejno analizy właściwości metod częstotliwościowych, statystycznych, sieci neuronowych i metod nieliniowych. W konsekwencji do dalszej analizy wybrano zmodyfikowaną metodę nieliniową, wykorzystującą analizę rekurencyjną i sieci neuronowe do identyfikacji struktur przepływu dwufazowego z wrzeniem.

W rozdz. 3 - **Teza, cele i zakres pracy**, postawiono tezę, że „metody analizy fluktuacji ciśnienia we wrzeniu w mini- i mikrokanalach wykorzystujące analizę rekurencyjną umożliwiają identyfikację struktur przepływu dwufazowego we wrzeniu”. Wynika ona z analizy właściwości metod badawczych, przedstawionej w poprzednim rozdziale.

Zdefiniowano również cel pracy, korespondujący z postawioną tezą badawczą a także szczegółowy program badań eksperymentalnych.

W rozdz.4 - **Adaptacja metod rekurencyjnych do analizy dynamiki wrzenia**, analizowano dwie grupy zagadnień. Pierwszą grupę stanowiły badania dotyczące identyfikacji struktur przepływu dwufazowego, do której wykorzystano trzy rodzaje analizy rekurencyjnej, po pierwsze połączonej z analizą głównych składowych (PCA), po drugie połączonej z sieciami neuronowymi Kohenena oraz multiskalową analizę rekurencyjną (MRQA).

Analizę diagonalnego profilu rekurencji (DCRP) zastosowano do badań synchronizacji wrzenia w sąsiadujących kanałach równoległych.

W stosowanej w tej pracy analizie rekurencyjnej uwzględniono zmienność parametrów wykorzystywanych do stworzenia wykresu rekurencyjnego, czyli wymiaru zanurzenia, czasu opóźnienia i odległości progowej, co pozwala uwzględnić zmianę dynamiki oscylacji ciśnienia w różnych przedziałach czasu. Połączenie okienkowej analizy rekurencyjnej z analizą głównych składowych prowadzi do uzyskania mapy identyfikującej dominujące struktury przepływu dwufazowego w minikanale. Kolejne połączenie analizy rekurencyjnej z sieciami neuronowymi Kohenena umożliwia uzyskanie wykresu zmian struktur dwufazowych w czasie, zaś multiskalowa

analiza rekurencyjna prowadzi do uzyskania informacji, czy badany układ dwufazowy jest układem z chaosem deterministycznym lub układem o charakterze losowym. Można ją również wykorzystać do analizy porównawczej dwóch sygnałów.

Zastosowane w tej pracy rozwinięcia i modyfikacje okienkowej analizy rekurencyjnej są oryginalnymi pomysłami Autorki pracy doktorskiej.

Analiza diagonalnego profilu rekurencji umożliwia analizę dynamiki różnych układów, poszukiwanie podobnych wzorców dopasowania w dwóch układach oraz badanie zależności czasowych pomiędzy dwoma podobnymi układami. W tym przypadku Autorka pracy wykorzystała metodę powstałą w innej pracy do analizy synchronizacji ciśnienia wlotowego i wylotowego.

W rozdz.5 – **Wybrane testy zaproponowanych metod analizy wrzenia**, zastosowano omówione poprzednio metody identyfikacji struktur dwufazowych w oparciu o dane z numerycznego modelu przepływu dwufazowego w minikanale, opracowanego przez promotorów pracy. Rozważany model fluktuacji ciśnienia w minikanale umożliwił analizę niestabilności spadku ciśnienia i zastosowanie w tym celu kolejno ilościowej analizy rekurencyjnej (RQA), analizy rekurencyjnej połączonej z sieciami neuronowymi Kohenena, analizy rekurencyjnej połączonej z analizą głównych składowych (PCA) oraz multiskalowej analizy rekurencyjnej (MRQA). Wymienione kolejno metody analizy zastosowano do prostych szeregów czasowych, wynikających z zastosowanego modelu, co wskazuje na ich skuteczność, ale nie może stanowić potwierdzenia tezy pracy, gdyż dane uzyskiwane z badań eksperymentalnych procesu wrzenia w minikanale są znacznie bardziej złożone.

Ta samokrytyczna konkluzja jest ważna dla oceny jakości zrealizowanych w pracy badań eksperymentalnych i numerycznych.

W rozdz.6 poświęconym **Analizie dynamiki wrzenia w mini- i mikrokanalach** zastosowano sprawdzone wcześniej na modelu numerycznym metody analizy rekurencyjnej, w których uwzględniono nieliniowy charakter mierzonych fluktuacji ciśnienia. Do analizy wykorzystano dane eksperymentalne uzyskane na czterech dedykowanych stanowiskach pomiarowych, kolejno z jednym okrągłym minikanalem, z dwoma okrągłymi minikanalami i jedną wspólną objętością ściśliwą, z dwoma okrągłymi minikanalami i osobnymi objętościami ściśliwymi, jak również dla wymiennika ciepła z jedenastoma równoległymi minikanalami. Szczegółowo opisano konstrukcję badanych minikanalów, zastosowaną aparaturę pomiarową oraz wyniki analizy rekurencyjnej połączonej z okienkową analizą głównych składowych pulsacji ciśnienia. Na podstawie analizy głównych składowych (PCA) uzyskano ich macierz, zawierającą wyłącznie cztery główne składowe. Połączone zastosowanie metody rekurencyjnej i analizy

głównych składowych umożliwiło uzyskanie map z dominującymi strukturami przepływu dwufazowego.

Identyfikacja dominujących struktur przepływu dwufazowego jest niewystarczająca dla identyfikacji zmian w czasie struktur przepływu dwufazowego podczas długotrwałych pulsacji ciśnienia w minikanale. Dla wykonania tego zadania zastosowano okienkową metodę ilościowej analizy rekurencyjnej (RQA) połączonej z sieciami neuronowymi Kohenena (SOM). W wyniku wielokrotnie powtarzanych wyróżniono cztery charakterystyczne struktury przepływu dwufazowego z wrzeniem w minikanale: przepływ z małymi pęcherzykami, przepływ pęcherzykowy, przepływ korkowy i przepływ długich korków. Zrealizowana metoda badawcza umożliwia również uzyskanie wykresów zmian w czasie obserwowanych i wyróżnionych struktur przepływu dwufazowego.

Cechą szczególną badanych minikanalów jest podłączenie ich w różny sposób do dużych objętości ściśliwych. Do zbadania wpływu sposobu podłączenia dwóch różnych konfiguracji objętości ściśliwej na dynamikę wrzenia w dwóch minikanalach równoległych zastosowano okienkową multiskalową analizę rekurencyjną (WMRQA). Obserwacja fluktuacji współczynnika W , pozwoliła jedynie na wyodrębnienie obszarów charakteryzujących się różną dynamiką w jednym cyklu długookresowych fluktuacji ciśnienia.

W rozdz.7 **Podsumowanie** podsumowano zwięźle wyniki badań eksperymentalnych i zastosowanych metod chaosu deterministycznego do identyfikacji struktur dwufazowego przepływu z wrzeniem w minikanale. Zarówno eksperyment, jak i analizę teoretyczną oparto na analizie fluktuacji ciśnienia w minikanale. Eksperyment zrealizowano dla wody, dla której wyróżniono przepływ z małymi pęcherzykami, przepływ pęcherzykowy, przepływ korkowy, przepływ długich korków i przepływ pary dla największych wartości dostarczanego strumienia ciepła.

Do analizy oscylacji ciśnienia w minikanale z wrzącą cieczą wykorzystano kilka wariantów analizy rekurencyjnej, co umożliwiło uwzględnienie złożonych i nieliniowych fluktuacji ciśnienia. Wobec znacznej różnorodności rozpatrywanych przypadków oscylacji ciśnienia należało zastosować kilka metod ich analizy teoretycznej, jak analiza rekurencyjna połączona z sieciami neuronowymi Kohenena, analiza rekurencyjna połączona z analizą głównych składowych, multiskalowa analiza rekurencyjna oraz analiza diagonalnego profilu rekurencji. Krytycznie odniesiono się do dokładności i możliwości stosowania użytych metod analitycznych, wskazując ich zalety i ewidentne ograniczenia. Ten fragment recenzowanej pracy wskazuje, moim zdaniem, na dojrzałość naukową Autorki pracy.

3. Uwagi krytyczne i ocena pracy

3.2. Uwagi redakcyjne

Recenzowana praca zawiera bardzo duży zbiór danych eksperymentalnych, na ogół starannie opracowany. Widać wyraźnie znacznie dokładniejsze opracowanie rozdziałów omawiających wyniki własnych badań eksperymentalnych i teoretycznych. Niestety błędów redakcyjnych jest dość sporo, a szczególnie dotkliwe są te, które dotyczą błędów w numeracji rysunków i tabel. Podam kilka przykładów, dla zwrócenia uwagi Autorki. Przy numerowaniu tabel w rozdz.2 zgubiono ostatnią tabelę, brakuje rysunków 2.4 i 2.5. Szczególnie utrudniający czytanie pracy, zwłaszcza pierwszej jej części, jest brak opisu w Wykazie oznaczeń dla angielskich skrótów: CRQA, CRP, DCRP, DWO, MRQA, PCA, RQA, SOM, SVD, SVM, WMRQA. Pełne objaśnienia są podane jedynie w różnych miejscach w tekście.

Imponujący swą obszernością spis literatury zawiera pozycje o nieukończonym opisie, utrudniającym dotarcie do oryginału, jak np. pozycje 91, 174.

Praca sprawia wrażenie pośpiesznie przygotowywanej do druku, stąd obecność prostych pomyłek, których przykłady wskazałem. Szkodzą one interesującej merytorycznie, obszernej i rzetelnie zrealizowanej pracy doktorskiej.

3.2. Uwagi merytoryczne

Za prawidłową i zręczną uważam konstrukcję pracy doktorskiej. O wysokiej jakości wykonanych badań i analiz teoretycznych wypowiadałem się wcześniej, omawiając kolejno dokonania Autorki pracy.

W pierwszych rozdziałach Autorka wprowadza czytelnika w zagadnienia dynamiki wrzenia w mini- i mikrokanałach, oparte na bardzo obszernym przeglądzie literatury przedmiotu. Dalej analizę aktualnego stanu wiedzy ukierunkowuje na zagadnienia dotyczące później sformułowanej tezie pracy. Tymi zagadnieniami są charakterystyczne dla wrzenia w przepływie przez minikanaly niestabilności tego procesu oraz właściwe do ich badania metody analizy danych doświadczalnych. W oparciu o stan wiedzy, wynikający z analizy literatury przedmiotu oraz wyniki analiz, po pierwsze charakterystycznych niestabilności dla wrzenia w minikanale i po drugie adekwatnych do zagadnienia metod doświadczalnych formułuje tezę pracy. W tezie pracy Autorka wiąże nowoczesną metodę analizy rekurencyjnej fluktuacji ciśnienia z możliwością identyfikacji właściwych dla wrzenia w minikanale struktur przepływu dwufazowego. Jak wykazałem w opisie treści pracy, rozdziały 4, 5 i 6 teza została przez Autorkę dowiedziana z wystarczającą dla pracy doktorskiej dokładnością, a wskazane wcześniej samokrytyczne i właściwe oceny ograniczeń zastosowanych metod analitycznych dowodzą rzetelności wykonanych badań.

Z przedstawionych wyżej wniosków dowodnie wynika, że postawiona w pracy teza, że metody analizy fluktuacji ciśnienia we wrzeniu w mini- i mikrokanalach wykorzystujące analizę rekurencyjną umożliwiają identyfikację struktur przepływu dwufazowego we wrzeniu została eksperymentalnie i analitycznie potwierdzona.

4. Wniosek końcowy

Sumując uwagi krytyczne i słowa uznania jednoznacznie pozytywnie oceniam pracę doktorską mgr inż. Iwony Zaborowskiej. Uważam, że spełnia ona wszystkie wymagania ustawy o stopniach i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Mgr inż. Iwona Zaborowska wyniki swoich prac, jako współautorka, publikowała w renomowanych czasopismach naukowych: International Journal of Heat and Mass Transfer, Forschung Im Ingenieurwesen-Engineering Research oraz Applied Sciences. Wyniki Jej prac były również prezentowane na renomowanych międzynarodowych konferencjach naukowych: 15th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT2021) oraz 11th International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer: ICCHMT 2018. Na uwagę zasługują również prace nie związane bezpośrednio z tematyką pracy doktorskiej, w których zastosowano opracowane metody analizy do badania innych procesów. Prace te opublikowano również w renomowanych czasopismach: Tribology International oraz Adv. Med. Sci.

Wziąwszy pod uwagę dorobek publikacyjny mgr inż. Iwony Zaborowskiej wnioskuję o wyróżnienie jej pracy.

