

Na prawach rękopisu



Politechnika Wroclawska

WYDZIAŁ MECHANICZNO-ENERGETYCZNY

Raport serii PRE nr __/2021

**„Identyfikacja struktur przepływowych
w pulsacyjnych rurkach ciepła w warunkach
mikrogravitacji”**

ANDRZEJ IRENEUSZ NOWAK

Słowa kluczowe: pulsacyjna rurka ciepła
mikrogravitacja
struktury przepływowe

PRACA DOKTORSKA

Promotor: dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz, prof. uczelni
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Artur Nemś, prof. uczelni

Wrocław, 2022

Streszczenie

Niniejsza dysertacja podejmuje zagadnienie związane bezpośrednio z wykorzystaniem pasywnych układów transportu ciepła w technologiach kosmicznych. Jak pokazuje literatura naukowa oraz dokumenty udostępniane przez najważniejsze instytucje zajmujące się eksploracją kosmosu (między innymi japońska, amerykańska i europejska agencja kosmiczna), układy transportu ciepła opierające się na przepływach wielofazowych są obecnie najbardziej obiecującym kierunkiem w systemach zarządzających temperaturą w trakcie misji. Wynika to przede wszystkim ze stosunkowo dużej wydajności cieplnej urządzeń pasywnych, niskiej masy oraz braku urządzeń peryferyjnych takich jak np. pompy obiegowe.

We wprowadzeniu do pracy opisano najważniejsze metody transferu ciepła, stosowane obecnie w technologiach kosmicznych. Przedstawiono również zasadę działania pulsacyjnej rurki ciepła, którą uznaje się za jedno z najbardziej obiecujących urządzeń. Szczególnie skomplikowanym zagadnieniem jest w tym przypadku symulacja przepływu dwufazowego w warunkach mikrogravitacji, gdzie siły związane z oddziaływaniem pola grawitacyjnego zostają całkowicie zdominowane przez siły napięcia powierzchniowego i inercji. Niewątpliwym wkładem dysertacji w rozwój dyscypliny naukowej jest uwzględnienie przepływów dynamicznych, tj. takich w których przyspieszenie przepływu jest niezerowe.

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury, zawierający najważniejsze publikacje dotyczące struktur przepływowych występujących w rurkach zarówno kapilarnych jak i o średnicy przekraczającej średnicę kapilarną, w warunkach zarówno gravitacji ziemskiej jak również mikrogravitacji. Wykorzystywane dotychczas kryteria określające struktury przepływowe nawet po uwzględnieniu bardzo dużej liczby parametrów (średnicy, prędkości, spadku ciśnienia, lepkości, napięcia powierzchniowego itp.), nie pozwalają na dokładne zdefiniowanie kryteriów dla jakich należy spodziewać się przejścia pomiędzy strukturami przepływowymi. Pod koniec rozdziału, opisano najważniejsze liczby bezwymiarowe wykorzystywane w mechanice płynów wielofazowych oraz zaprezentowano metody obrazowania przepływu, które

były rozważane przy projektowaniu stanowiska badawczego.

W rozdziale trzecim określono cel oraz tezę rozprawy doktorskiej. W tej części dysertacji został opisany zakres pracy jaką należało wykonać na drodze uzyskania oryginalnych wyników wnoszących istotne oraz nowe treści do rozwoju dziedziny.

Proces powstawania projektu stanowiska badawczego został pokazany w rozdziale czwartym. Pierwsza część dotyczy projektu koncepcyjnego oraz procesu budowy z podziałem na część mechaniczną, przepływową oraz pomiarową. W drugiej części rozdziału umieszczono przegląd najważniejszych parametrów fizycznych (np. prędkość, amplituda i częstotliwość przepływów oscylacyjnych) występujących w pulsacyjnych rurkach ciepła co pozwoliło na badanie przepływów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

W trakcie badań prowadzono rejestrację przepływu z wykorzystaniem kamer szybko-klatkowych, w związku z tym rozdział piąty opisuje zastosowaną procedurę analizy obrazu oraz sposób automatycznej identyfikacji struktur przepływowych.

W pierwszej części rozdziału szóstego przedstawiono wyniki badań wykonanych w centrum badań mikrogravitacji w ośrodku naukowym ZARM (Brema, Niemcy). W trakcie analiz zaproponowano nową hipotezę, która została zaprezentowana i potwierdzona w tym rozdziale. W ostatniej części przedstawiono zarejestrowane obrazy wykrytych zjawisk rozpadu i łączenia bąbli parowych oraz odniesiono momenty rejestracji na mapach przepływowych. Wyniki te są wstępem do opracowania jednoznacznego kryterium, które pozwoli na przewidywanie struktur przepływowych w warunkach mikrogravitacji, a ostatecznie pozwoli na modelowanie przepływu w pulsacyjnych rurkach ciepła pod kątem technologii kosmicznych.

W ostatnim rozdziale, umieszczono podsumowanie otrzymanych wyników wraz z dyskusją wyników. Podsumowanie potwierdziło realizację tezy głównej pracy oraz potwierdziło realizację celów pomocniczych. Zdefiniowane zostały również najważniejsze prace, które należy w przyszłości wykonać, w celu dalszego rozwoju dyscypliny oraz zrozumienia zjawisk rozpadu i łączenia bąbli parowych w warunkach mikrogravitacji.

Summary

This dissertation addresses an issue directly related to the use of passive heat transfer systems in space technologies. As shown in the scientific literature and in documents made available by major space exploration institutions (including Japan, the United States, and European space agencies), heat transfer systems relying on multiphase flows are currently the most promising direction in systems for thermal management during missions. This is mainly due to the relatively high thermal performance of passive devices, the low mass, and the absence of peripheral devices such as circulating pumps.

In the Introduction, the thesis describes the most important heat transfer methods currently used in space technology. It also presents the principle of operation of a pulsating heat pipe, which is considered one of the most promising devices. A particularly complicated issue in this case is the simulation of two-phase flow under microgravity conditions, where the forces associated with the interaction of the gravitational field are dominated by the forces of surface tension and inertia. A contribution of the dissertation to the development of the scientific discipline is the inclusion of dynamic flows, i.e., flows in which the flow acceleration is nonzero.

The second chapter contains a review of the literature on flow patterns occurring in capillary and larger-than-capillary diameter tubes under conditions of both earth gravity and microgravity. The criteria used so far to define flow structures, even after taking into account a very large number of parameters (diameter, velocity, pressure drop, viscosity, surface tension, etc.), fail to accurately define the criteria for which a transition between flow structures should be expected. At the end of the chapter, the most important dimensionless numbers used in the fluid mechanics of multiphase flows are described, and the flow imaging methods considered in the design of the experimental set-up are presented.

The third chapter defines the objectives and thesis of the dissertation. This section describes the scope of work needed to be carried out to obtain original results that contribute significant and new knowledge to the development of the

discipline.

The development process of the research setup is shown in Chapter 4. The first part deals with the conceptual design and construction process divided into mechanical, flow, and measurement parts. The second part of the chapter provides an overview of the most important physical parameters (e.g., velocity, amplitude, and frequency of oscillatory flows) occurring in pulsating heat pipes, which makes it possible to study the flows under conditions similar to those in real applications.

Throughout the study, flow registration was carried out using high-speed cameras; therefore, chapter five describes the implemented image analysis procedure and the method of automatic identification of flow structures.

The first part of Chapter 6 presents the results of research carried out at the ZARM Microgravity Research centre (Bremen, Germany). During the analyses, a new hypothesis was proposed, which is presented and confirmed in this chapter. The last section presents the recorded images of the detected vapour bubble break-up and coalescence phenomena and correlates the moments of registration on the flow maps. These results are a prelude to the development of a criterion for predicting flow structures in microgravity and, ultimately, modelling flow in pulsating heat pipes for space technologies.

In the last chapter, a summary of the results is provided together with a discussion of the results. The summary confirms the thesis statement and confirms that the supporting objectives have been met. The most important work to be done in the future, to further develop the discipline and to understand the phenomena of vapour bubble break-up and coalescence under microgravity conditions, is also identified.

Podziękowania

*“(...) są rzeczy, które albo rozumie się w lot, nawet bez słów,
albo do których zrozumienia trzeba dać coś od siebie.”*

parafrazując Andrzeja Sapkowskiego, Chrząst Ognia

Naukowiec w oczach dziecka wydaje się być wynalazcą spędzającym czas na zabawie, jednak bardzo szybko dowiaduje się o istnieniu reguł, których każdy naukowiec musi przestrzegać, a każdy kolejny krok edukacji dodaje coraz większą liczbę reguł. Wydaje się niemożliwym czerpanie przyjemności z podążania drogą nimi przepełnionej. I tak jest faktycznie... jeśli na swojej drodze nie spotka się bratnich dusz. Na mojej spotkałem ich więcej niż mógłbym zamarzyć, chciałbym każdemu z osobna podziękować za siłę, którą się ze mną dzielią.

Mojemu promotorowi dr. hab. inż. Sławomirowi Pietrowiczowi, dziękuję za wiele lat, które poświęcił, ucząc mnie jak odnaleźć się w świecie nauki. Za wszystkie rozmowy w ciągu dnia i za te nocne rozmowy; jestem przekonany, że jego zasługą jest moja niesłabnąca motywacja do podejmowania kolejnych niełatwych wyzwań naukowych. Cierpliwość, pasja, wiedza, ale też humor i świetna atmosfera, to wszystko było i jest podstawą naszej współpracy, za co bardzo dziękuję.

Promotorowi pomocniczemu dr. hab. inż. Arturowi Nemsowi, dziękuję szczególnie za pomysły w trakcie projektowania stanowiska badawczego. Każda rada pomogła mi przy jego budowie i pomogła w osiągnięciu sukcesu.

Mojemu mentorowi Henrykowi Frynasowi, dziękuję za natchnienie, gdy nadeszło zwątpienie, dziękuję też za wszystkie rady będące zagadkami i zagadki będące radami. Obiecuję, że podejmę rękawicę, którą rzuciłeś mi tak dawno temu. Gdziekolwiek teraz jesteś, mam nadzieję, że jesteś ze mnie dumny.

Many thanks to Professor Marco Marengo for the cooperation on the μCOFfEe proposal, for the analyses during the intensive experiments despite the pandemic, for the months of effort that led to this dissertation. Thanks to Luca Pietrasanta for the discussions and ideas in results postprocessing and for insightful feedback. Thanks to Daniele Mangini for all ideas in the early stages of preparing the grant application and the great welcome in Brighton.

Bardzo dziękuję towarzyszom w nauce, Cezaremu Czajkowskiemu za niemal sześciolletnią wspólną pracę nad tak wieloma zadaniami i za wszystkie odskocznie pozwalające mi zachować świeży umysł, Adamowi Róziewiczowi za rozmowy we wspólnej ławce o nauce i nie tylko, Agnieszce Ochman, dzięki której łatwiej było mi się odnaleźć w dydaktyce, ale też tak szybko odnalazłem się w naszym zespole, Józefowi Rakowi za odpowiedzi, które jemu wydawały się pozbawione sensu, a dla mnie były załącznikiem rozwiązania, Przemysławowi Błasiakowi za gotowość do dzielenia się swoją ogromną wiedzą. Dziękuję dr. hab. inż. Piotrowi Kolasińskiemu za słowa które zawsze pomagały mi pozytywnie podchodzić do codziennych wyzwań i za uwagi, które pomogły mi w trakcie analiz wyników pracy, dr. inż. Markowi Lewkowiczowi za rozmowy o modelowaniu pulsacyjnych rurek ciepła, to te rozmowy pomogły mi zrozumieć, jaki temat podejmę po obronie, dr. inż. Michałowi Pomorskiemu za wielką pomoc przy dydaktyce, gdyby nie on, droga do doktoratu znacząco by się wydłużyła, dr. inż. Jerzemu Szaryngerowi za liczne konsultacje dotyczące przepływów dwufazowych i analizy wymiarowej. Dziękuję również Pawłowi Barańskiemu, który w szczytnym celu, gotów jest pracować nawet w środku nocy. Dziękuję Aleksandrowi Krzywdzińskiemu za podzielenie się całym jego doświadczeniem przy wykonywaniu stanowisk badawczych.

W szczególny sposób chcę podziękować mojej narzeczonej Kasi, z którą dzielę nie tylko pasję do tańca, ale również pasję do poznawania nowej wiedzy. Dziękuję za to, że zawsze we mnie wierzysz, i że potrafisz mnie pocieszyć w chwilach zwątpienia. Każdy dzień, który z Tobą dzielę, napędza mnie pewnością w dążeniu do kolejnych celów. Moim przyjaciółom Kubie, Martynie, Dawidowi, Sabinie, Ani, Oli i Mateuszowi, dziękuję za tak wiele lat wspólnej zabawy i spotkań. Wam zawdzięczam to, kim jestem teraz.

Najtrudniej podziękować osobom, które są zawsze blisko, tymczasem to rodzinie zawdzięczam najwięcej. Dziękuję mojej mamie Dorocie za nieustające wsparcie we wszystkich ważnych dla mnie decyzjach, za to że zawsze jesteś gotowa ze mną porozmawiać, pocieszyć i zmotywować gdy nadchodzą trudne chwile. Dziękuję za to, że poszerzasz moje horyzonty pokazując świat inny niż moja codzienność, jednocześnie jednak rozumiesz i pomagasz mi we wszystkich wyzwaniach. Tacie Ireneuszowi za nauczanie cierpliwości i ciekawości do zagadnień inżynierskich, bardzo cenię ten wspólnie spędzany czas. Bratu Stanisławowi, który zawsze we mnie wierzył i z którym dzielę tak dużo wspólnych pasji. Dziękuję też babci i dziadkowi za gotowość do pomocy w każdej sytuacji. Poniższa praca jest również Waszą zasługą, rodziny wspierającej tak mocno.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	ix
Wprowadzenie	1
1 Aktualny stan technologii	3
1.1 Systemy kontroli temperatury	3
1.2 Dwufazowa wymiana ciepła	6
1.3 Klasyczna rurka ciepła	7
1.4 Pulsacyjna rurka ciepła	8
1.4.1 Podstawowa zasada działania	8
1.4.2 Struktura przepływowa	11
1.4.3 Wpływ struktury na wydajność wymiany ciepła	14
1.4.4 Charakterystyka przepływu w pulsacyjnych rurkach ciepła	15
1.4.5 Podsumowanie	16
2 Przegląd literatury	19
2.1 Cel przeglądu literatury	19
2.2 Struktury przepływowe w warunkach ziemskich	20
2.2.1 Kanały pionowe	20
2.2.2 Kanały poziome	23
2.2.3 Przepływy przyspieszone	25
2.3 Spadek ciśnienia	27
2.3.1 Spadek ciśnienia w warunkach ziemskich	27
2.3.2 Spadek ciśnienia w warunkach mikrogravitacji	28
2.4 Struktury przepływowe w warunkach mikrogravitacji	30
2.5 Średnica krytyczna w warunkach mikrogravitacji	32
2.6 Liczby kryterialne	35
2.6.1 Teoria II Buckinghamma	36
2.7 Sposoby obserwacji przepływów dwufazowych	40
2.7.1 Obserwacja światła widzialnego	40
2.7.2 Obrazowanie neutronowe	41

2.7.3	Podsumowanie	42
3	Cel, teza i zakres pracy	43
4	Stanowisko badawcze	45
4.1	Zasada działania	47
4.2	Opis stanowiska - część przepływowa	50
4.3	Opis stanowiska - część mechaniczna	52
4.4	Układ pomiarowy	53
4.5	Procedura badawcza	56
4.6	Prędkość i częstotliwość w PHP	60
4.7	Wybór czynnika roboczego	65
4.8	Tablica badań	69
4.9	Dokładność	70
5	Procedura analizy obrazu	72
5.1	Operacje morfologiczne	72
5.2	Połączenie obrazów z kamer	75
5.3	Identyfikacja bąbla parowego	77
5.4	Prędkości w objętości kanału - PIV	78
5.5	Prędkości bąbli parowych	79
5.6	Śledzenie bąbla parowego	80
5.7	Identyfikacja zjawisk rozpadu i łączenia	81
6	Wyniki badań doświadczalnych	83
6.1	Wyniki badań w kontekście literaturowym	84
6.2	Korelacja wyników z liczbami bezwymiarowymi	88
6.3	Wizualizacja przepływu	94
7	Podsumowanie	99
	Bibliografia	103
	Spis ilustracji	115
	Spis tablic	118

Wykaz ważniejszych oznaczeń

g_0	–	przyspieszenie ziemskie, $9,81 \text{ m/s}^2$
\dot{q}	–	gęstość strumienia ciepła, W/m^2
v	–	prędkość przepływu w rurce (zazwyczaj dotycząca prędkości granic fazy ciekłej i gazowej), m/s
$a, \frac{dv}{dt}$	–	przyspieszenie przepływu w rurce (zazwyczaj dotyczące przyspieszenia granic fazy ciekłej i gazowej), m/s^2
Bo	–	Liczba Bonda, –
Re	–	Liczba Reynoldsa, –
We	–	Liczba Webera, –
Ca	–	Liczba kapilarna, –
Fr	–	Liczba Froude'a, –
Fo	–	Liczba Fouriera, –
Ka	–	Liczba Kapitza, –
Sc	–	Liczba Schmidta, –

Użyte skróty:

- ESA – Europejska Agencja Kosmiczna (European Space Agency)
- CORA – ciągły nabór wniosków na granty badawcze ogłoszony przez Europejską Agencję Kosmiczną (ang. Continously Open Research Announcement)
- TCS – podsystemy kontroli termicznej (ang. Thermal Control Systems)
- MLI – izolacja wielowarstwowa (ang. Multi-Layer Insulation)
- PHP – pulsacyjna rurka ciepła (ang. Pulsating Heat Pipe)
- ISS – Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (ang. International Space Station)
- LEO – niska orbita okołozemska (ang. Low Earth Orbit)
- PIV – anemometria obrazowa (ang. Particle Image Velocimetry)
- ZARM – Centrum Stosowanych Technologii Kosmicznych i Mikrogravitacji (niem. Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation)

Indeksy dolne:

- l – frakcja cieczowa
- v – frakcja parowa

Wprowadzenie

W przestrzeni kosmicznej na niskiej orbicie okołoziemskiej znajduje się około 6542 różnych satelitów (raport organizacji Union of Concerned Scientists [85]), z tej liczby aż 3372 uznaje się za aktywne. Według tego samego raportu tylko w 2020 roku wystrzelono 1203 satelity różnej wielkości, a spodziewany czas misji ma trwać od 2 do 20 lat, z czego większość na orbicie będzie pracować 4 lata. Te liczby pokazują, że rosnąca liczba misji kosmicznych wymaga również coraz lepszych, tańszych i wydajniejszych technologii niezbędnych do zakończenia ich sukcesem. Również rosnąca liczba inwestorów prywatnych wzmacnia konkurencję w rozwoju każdego z podsystemów statków kosmicznych składających się na końcowy produkt.

Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) w 2018 roku opublikowała dokument [95] mający na celu wyznaczenie orientacyjnych terminów, w których człowiek zacznie eksplorację głębokiego kosmosu. Jest to tzw. mapa drogowa precyzująca, które badania będą miały największe znaczenie, tym samym będą również miały większą szansę na finansowanie. Poszczególne rozdziały tego dokumenty określają pola, na których członkowie ESA powinni szczególnie skupić swoje działania:

- Badanie podstawowych zjawisk fizyki
- Fizyka materii złożonej
- Wymiana ciepła w przepływach dwufazowych
- Właściwości termofizyczne płynów i ciał stałych
- Astrobiologia
- Wpływ grawitacji (i jej braku) na procesy biologiczne
- Wsparcie działalności człowieka w misjach pozaziemskich
- Adaptacja ludzkiego organizmu w warunkach obniżonej grawitacji i izolacji
- Promieniowanie kosmiczne jako zagrożenie eksploracji układu słonecznego

Analiza tego dokumentu pokazuje, że wśród najważniejszych badań, to właściwości termofizyczne, przepływy dwufazowe i promieniowanie kosmiczne są kierunkami, które szczególnie wpłyną na technologie budowy statków kosmicznych. Podsystemy kontroli termicznej (TCS) statków kosmicznych utrzymują komponenty w dopuszczalnych granicach temperatury przez cały okres ich eksploatacji. Trudność w osiągnięciu tego celu jest podyktowana wymaganiami misji, ponieważ to one określają, między innymi, środowisko termiczne i sposoby działania podzespołów, na jakie będą narażone statki. Problem ten potęguje fakt, że napotykają one na dodatkowe komplikacje, w tym środowisko mikrogravitacji, opór aerodynamiczny (spowodowany lotem w górnej części atmosfery), tlen atomowy degradujący powierzchnie statków kosmicznych, środowisko próżni prowadzące do odgazowania, mikrometeoroidy i cząstki naładowane. Ponieważ już od kilku dekad realizowane są loty kosmiczne, również wszystkie technologie z tym związane osiągnęły wysoki poziom gotowości, a w dodatku zostały przetestowane w warunkach długotrwałej obecności w warunkach przestrzeni kosmicznej. Obserwuje się jednak coraz większe zainteresowanie lotami międzyplanetarnymi (w szczególności wzrost zainteresowania kolonizacją Marsa) oraz wykorzystaniem małych satelitów (ang. SmallSats). Zarówno loty międzyplanetarne, jak i wykorzystanie małych satelitów, są warunkowane zaadaptowaniem już wykorzystywanych technologii do nowych wymagań. Kierunki rozwoju zdefiniowane przez największe ośrodki naukowe na świecie oraz przegląd literatury przedstawiony w rozdziale 2 pokazuje, że szczególne znaczenie w technologiach kosmicznych ma wymiana ciepła związana z przepływami dwufazowymi.

Będąca tematem rozprawy, identyfikacja struktur przepływowych w kanałach o średnicach większych od kapilarnych, umożliwi w przyszłości projektowanie optymalnych wymienników ciepła, w których pracujące podzespoły bazują na przepływach dwufazowych. Co jednak szczególnie ważne, praca oprócz udowodnienia tezy prowadzącej, przedstawia hipotezę, która otwiera zupełnie nowe możliwości analizy przepływów. W tym miejscu należy podkreślić, że ze względu na charakter pracy autor ograniczył się do zdefiniowania i opisanie jedynie pasywnych systemów wymiany ciepła. Nie oznacza to, że wyniki pracy nie mogą zostać zastosowane w innych przypadkach w szczególności w aktywnych systemach kontroli temperatury. Jednak niewątpliwie będzie to wymagało dostosowania opisu zjawisk, a ze względu na przyjęte w trakcie badań warunki brzegowe może wymagać dodatkowych badań doświadczalnych.

Rozdział 1

Aktualny stan technologii

1.1 Systemy kontroli temperatury

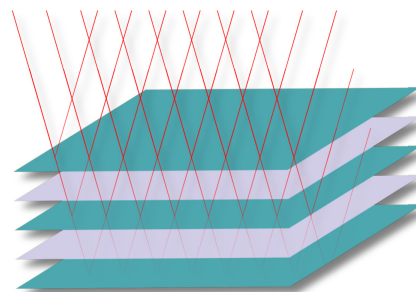
Pasywne systemy kontroli temperatury w technologiach kosmicznych zazwyczaj utrzymują wymaganą temperaturę komponentów bez użycia urządzeń wspomagających wymagających dodatkowego zasilania. Pozwala to na ograniczenie kosztów produkcji, całkowitej masy systemów i ryzyka awarii oraz zwiększenie ilości dostępnego miejsca. Tym samym są idealnym rozwiązaniem dla statków kosmicznych o ograniczonej masie, dostępnej przestrzeni i mocy elektrycznej. Dwa najważniejsze problemy napotymane w procesie transportu ciepła w przestrzeni kosmicznej, to duże zyski cieplne związane z bezpośrednim lub pośrednim promieniowaniem słonecznym oraz brak konwekcyjnej wymiany ciepła (spowodowanym warunkami bliskimi próżni doskonałej).

Pierwszą barierą stosowaną jako pasywny system kontroli termicznej, jest wielowarstwowa izolacja (ang. MLI, rysunek 1.1) zmniejszająca przewodzenie ciepła w wewnętrznych i zewnętrznych przegrodach statku kosmicznego. Osłona MLI składa się zazwyczaj z wielu wewnętrznych warstw cienkiego materiału o niskiej emisyjności w zakresie promieniowania podczerwonego oraz wytrzymałej warstwy zewnętrznej. Dzięki temu wymiana ciepła przez promieniowanie jest ograniczona przez wiele warstw elementów refleksyjnych. Dodatkowo często wykorzystuje się perforacje lub przeplatanie cienką siatką, co zapobiega przewodzeniu ciepła przez warstwy (perforacje pozwalają dodatkowo MLI na odprowadzanie uwieczonego gazu po dotarciu na orbitę). Najważniejszą funkcją izolacji wielowarstwowych jest bariera promieniowania cieplnego, zarówno do ochrony statków kosmicznych przed napływającym strumieniem promieniowania słonecznego i podczerwonego, jak i do zapobiegania niepożądanemu promieniowaniu cieplnemu (nadmiernym wychłodzeniem). MLI są powszechnie stosowane do utrzymywania wymaganej temperatury elektroniki i akumulatorów na orbicie.

1.1. Systemy kontroli temperatury

Zastosowanie wielowarstwowej izolacji cieplnej znacząco „polepsza” właściwości termiczne statków kosmicznych, nie jest to jednak jedyna bariera ochronna. Zewnętrzna bariera może zostać ulepszona poprzez napylenie powłok na powierzchnie narażone na promieniowanie cieplne. Ta ochrona ma za zadanie nie tylko odbić jak największą ilość promieniowania, ale również pozwolić na wypromieniowanie maksymalnie dużej ilości ciepła. W konsekwencji powłoka powinna charakteryzować się niskim współczynnikiem absorpcji promieniowania i wysokim współczynnikiem wypromieniowania ciepła. W praktyce realizuje się to dzięki wiedzy, że energia cieplna przekazywana w warunkach kosmicznych przez promieniowanie może być podzielona na dwa podstawowe zakresy. Zakres promieniowania słonecznego $< 3 \mu\text{m}$ oraz zakres promieniowania podczerwonego $> 3 \mu\text{m}$. Jeśli materiał będzie się charakteryzował niskim współczynnikiem w zakresie promieniowania typowego dla słońca oraz wysoki w zakresie promieniowania podczerwonego, to bilans cieplny promieniowania pochłoniętego i odprowadzonego pozwoli na utrzymanie temperatury statku w oczekiwanym zakresie. Badania w tym kierunku są na zaawansowanym poziomie, jednak – jak pokazuje literatura przeglądowa [14] – nadal możliwe jest uzyskiwanie coraz lepszych parametrów powierzchni.

Celem zarówno izolacji wielowarstwowej, jak i napylenia powłok na powierzchnie zewnętrzne, jest ograniczenie zysków cieplnych od promieniowania cieplnego. Jednak jak pokazuje analiza bilansów cieplnych, równie ważnym aspektem jest generowane ciepło przez urządzenia pracujące na pokładzie statku kosmicznego. Z tego powodu stosuje się promienniki (na zewnętrznych warstwach statku lub w formie rozkładanych radiatorów), które mają za zadanie wypromieniowanie energii cieplnej. W przypadku małych satelitów niewielka powierzchnia zewnętrzna powoduje, że częstym rozwiązaniem jest wykorzystanie rozkładanych paneli z odpowiednio przygotowaną powierzchnią cieplną. Bardzo trudnym zadaniem jest jednak przewidzenie, jak zachowają się wszystkie wymienione pasywne podsystemy wymiany ciepła, biorąc pod uwagę, że cały układ jest narażony na skrajne warunki. Przykładowo międzynarodowa stacja kosmiczna, okrąża ziemię w ciągu około



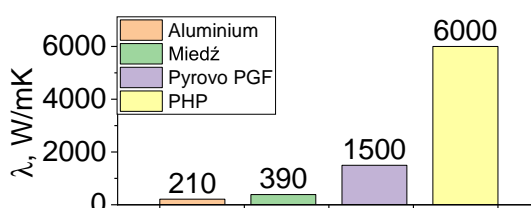
Rys. 1.1 Izolacja wielowarstwowa (MLI)

1.1. Systemy kontroli temperatury

91 minut, co oznacza, że nawet 16 razy w ciągu doby narażona jest na zmianę warunków od zaciemnionych (słońce zasłonięte przez Ziemię) do nasłonecznionych. W skrajnym przypadku pomimo wszystkich powyższych rozwiązań może dojść do sytuacji, w której statek kosmiczny jest nadmiernie chłodzony w trakcie lotu w cieniu Ziemi, a gdy jest narażony na promieniowanie słoneczne, chłodzony niedostatecznie. W związku z tym projektowane podsystemy wymagają „regulatorów” przepływu ciepła, a do niedawna najczęściej wykorzystywanym elementem były przełączniki ciepła. Są to urządzenia, które przełączają drogę przewodzenia ciepła pomiędzy silnym sprzężeniem termicznym, a słabym sprzężeniem termicznym (izolacją termiczną), aby kontrolować temperaturę elementów generujących ciepło. Przełącznik zazwyczaj łączy element wytwarzający ciepło z niskotemperaturowym pochłaniaczem, takim jak promiennik (np. rozkładanym panelem). Przełączniki ciepła różnią się od termostatów tym, że pasywnie modułują sprzężenie termiczne, podczas gdy termostaty modułują obwody wodne. Częścią wyzwania związanego z integracją wyłączników termicznych w małych satelitach jest to, że zajmują one dodatkową przestrzeń pomiędzy komponentem a radiatorem.

Jak już wspomniano bezpieczeństwo i bezawaryjność lotów kosmicznych w dużej mierze zależy od poprawnego zarządzania bilansem cieplnym układu. Jednak żaden system kontroli ciepła nie będzie w stanie zapewnić poprawnego działania bez pełnej integracji jego podsystemów. Najlepszym przykładem tego problemu jest odprowadzenie ciepła od elementu generującego znajdującego się zazwyczaj w środku układu odizolowanego od warunków zewnętrznych. Energia cieplna musi zostać odprowadzona do promiennika, co oznacza, że po drodze musi pokonać między innymi izolację wielowarstwową. Do transportu ciepła wykorzystuje się wiele różnych komponentów, dwie najważniejsze kategorie to łączniki wykorzystujące przewodzenie ciepła (np. pasek termiczny) oraz wykorzystujące termodynamiczną zmianę fazy (np. rurki ciepła).

Pasek termiczny jest elastycznym, termicznie przewodzącym łącznikiem montowanym pomiędzy źródłem ciepła a radiatorem. Jest często używany pomiędzy układami scalonymi lub komponentami o wy-



Rys. 1.2 Porównanie zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła [67, 73]

1.2. Dwufazowa wymiana ciepła

sokim rozpraszaniu ciepła a ścianą obudowy lub inną powierzchnią radiatora. Elastyczność zapobiega dodatkowym obciążeniom strukturalnym. Mogą być wykonane z metalu, tradycyjnie z miedzi lub aluminium, lub z materiałów węglowych o wysokiej przewodności, takich jak grafit. Mogą być utworzone z wielu arkuszy folii lub zwiniętych przewodów elektrycznych (zwanymi również sznurami i opłotami), z blokami na każdym końcu, aby utrzymać stabilność paska oraz w celu przymocowania całości do docelowych powierzchni. Współczynnik przewodzenia takiego paska może osiągnąć nawet 1500 W/mK (Pyrovo™ PGF, Thermotive LLC, USA), co jest wartością nawet siedmiokrotnie większą niż dla aluminium powszechnie stosowanego w technologiach kosmicznych i nawet czterokrotnie większą niż jeden z najlepiej przewodzących materiałów, tj. miedź (rysunek 1.2).

1.2 Dwufazowa wymiana ciepła

Pomimo wielu lat, mijających od czasu odkrycia, opisanego, a później zastosowania rurek ciepła, są one nadal niedoścignionym urządzeniem wykorzystywanym w transporcie ciepła. Nadal naukowcy z całego świata są w stanie udoskonalać pozornie proste urządzenie i opracowywać jego nowe wersje. Pierwsza rurka ciepła, zazwyczaj określana mianem klasycznej rurki ciepła, jest nadal z powodzeniem wykorzystywana: od chłodzenia smartfonów czy komputerów aż do wspomnianych już technologii kosmicznych. Jej cechą charakterystyczną jest struktura porowata na wewnętrznej ścianie rurki pozwalająca na odprowadzenie skroplonego czynnika oraz transfer głównego strumienia ciepła z pomocą ciepła utajonego (ciepło utajone przejścia fazowego cieczo-para). W rozdziale 1.3 dokładnie opisano konstrukcję takiej rurki oraz zasadę działania. Jak podają Marengo i Nikolayev [78], przekazywany strumień ciepła, osiąga wartość około 600 W/cm^2 , z zastrzeżeniem, że jest to wartość orientacyjna. W niektórych przypadkach strumień może osiągnąć zdecydowanie większe wartości, a w przypadkach bardzo małych urządzeń jego sprawność znormalizowana może być niższa pomimo odprowadzenia większej ilości ciepła niż z pomocą innych urządzeń.

Wynalazkiem, który zrewolucjonizował dotychczasowe podejście do rurek ciepła, są patenty z 1990 i 1993 roku złożone przez Akachiego [2, 3], są to najczęściej cytowane patenty dotyczące pulsacyjnych rurek ciepła (PHP). Zainteresowanie tą technologią wśród naukowców, spowodowało również powstanie zmodyfikowanych rozwiązań [29] oraz publi-

1.3. Klasyczna rurka ciepła

kacji mających na celu opracowanie i wdrożenie coraz wydajniejszych urządzeń.

Zaletami, decydującymi o sukcesie koncepcji w środowisku naukowym, są przede wszystkim prostota konstrukcji oraz koszt budowy podobnych układów PHP. W praktyce możliwe jest zbudowanie całego układu wymiany ciepła z pomocą jedynie rurki kapilarnej, lutownicy oraz czynnika roboczego (może nim być każda substancja przechodząca przemianę fazową w projektowanej temperaturze). W wersji niewiele bardziej skomplikowanej wymaga się również zastosowania pompy próżniowej, co zwiększa jednostkowy koszt produkcji, jednak zazwyczaj jest to wydatek jednorazowy. W porównaniu z klasyczną rurką ciepła, w której specjalna struktura porowata powstaje zazwyczaj poprzez spiekanie metalu na powierzchni wewnętrznej, produkcja PHP jest znacznie prostsza i mniej narażona na błędy.

1.3 Klasyczna rurka ciepła

Połączenie wszystkich wyżej opisanych technologii wymaga również transportu ciepła w odpowiednie miejsca statku kosmicznego. W tym celu niemal idealnym urządzeniem okazują się różne odmiany rurek ciepła.

Rurki ciepła są urządzeniami, które z dużą efektywnością wykorzystują zjawiska odparowania i skraplania czynnika roboczego w celu transportu ciepła. Bez względu na to, jaki typ rurki ciepła jest analizowany, zawsze można ją podzielić na trzy części: (1) parowacz; (2) skraplacz; (3) część adiabatyczna (niekoniecznie jednakowe rozmiarem). W przypadku klasycznej rurki ciepła urządzenie przybiera formę szczelnie zamkniętego cylindra, wypełnionego częściowo czynnikiem roboczym (przed wprowadzeniem czynnika do cylindra odpompowuje się znajdujący się w nim gaz).

Gdy do parowacza dostarczane jest ciepło, rośnie temperatura czynnika przy proporcjonalnym wzroście ciśnienia nasycenia. Jednocześnie temperatura skraplacza jest niższa od temperatury parowacza, co powoduje również, że ciśnienie nasycenia jest niższe. Wytworzona różnica ciśnień powoduje ruch par czynnika roboczego w kierunku parowacz \rightarrow skraplacz. Ponieważ ciepło jest dostarczane i odbierane nieprzerwanie, to stale występują również przemiany fazowe (ciecz \rightarrow para w parowaczu oraz para \rightarrow ciec w skraplaczu). Ostatnim elementem, niezbędnym do poprawnego działania każdej rurki ciepła, a w szczególności klasycznej rurki ciepła, jest odprowadzenie skroplonej cieczy w kierunku parowacza. Najczęściej stosowaną metodą jest zastosowanie struktury porowatej

1.4. Pulsacyjna rurka ciepła

(efektu kapilarnego) na ściankach wewnętrznych cylindra, ale znane są również w literaturze układy wykorzystujące środowisko, w którym pracują do transportu skroplonej cieczy na przykład: siły grawitacji [91], elektrostatycznej [18] czy odśrodkowej [22].

Z punktu widzenia termodynamiki, rurki ciepła są niczym innym jak obiegiem termodynamicznym, w którym część energii cieplnej zostaje przekształcona na pracę wykorzystywaną następnie do transportu czynnika roboczego. Ponieważ jednak, w przeciwieństwie do zazwyczaj rozpatrywanych obiegów, praca nie jest dostarczana spoza układu ani dostarczana do układu, obieg taki można nazwać pasywnym. Energia kinetyczna będąca wynikiem obiegu jest wykorzystywana w trakcie ruchu czynnika, a opory przepływu związane z tarciem pomiędzy cieczą i parą powodują rozproszenie tej energii.

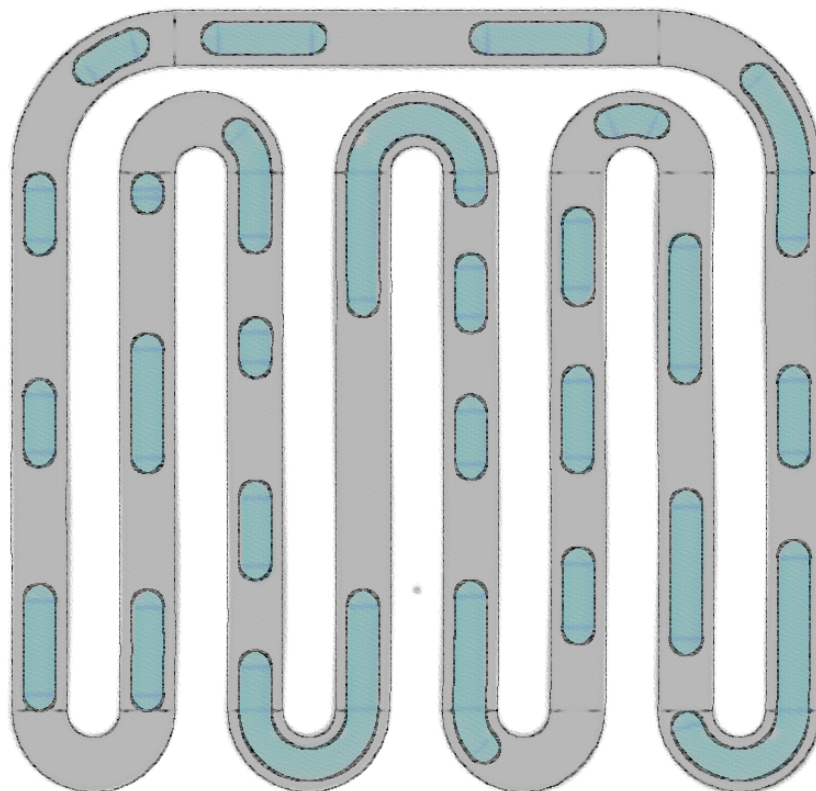
1.4 Pulsacyjna rurka ciepła

Największym problemem (choć nie jedynym) w urządzeniach pracujących w warunkach mikrogravitacji jest brak siły zdolnej wymusić przepływ w jednym kierunku, którą w warunkach ziemskich często jest grawitacja ziemską. Z tego powodu głównym sposobem wymiany ciepła w technologiach kosmicznych są klasyczne rurki ciepła niewrażliwe na warunki grawitacji, urządzenia bazujące na przepływie wymuszonym oraz te bazujące na przewodzeniu ciepła. Jednak wraz z rozwojem technologii, coraz więcej urządzeń postrzega się jako możliwe do zastosowania w tych warunkach. Jednym z takich urządzeń są pulsacyjne rurki ciepła jako urządzenie pasywne, co potwierdzają prace finansowane przez czołowe agencje kosmiczne na świecie (między innymi Japońska Agencja Kosmiczna [50], Europejska Agencja Kosmiczna [95]).

1.4.1 Podstawowa zasada działania

Pulsacyjna rurka ciepła (ang. Pulsating Heat Pipe – PHP) ma wiele elementów wspólnych z klasycznymi rurkami ciepła. Jej przeznaczeniem jest transport ciepła pomiędzy dwoma źródłami o różnej temperaturze, a efektywność znacząco lepsza niż przy wykorzystaniu efektu przewodzenia ciepła. Również czynniki robocze i materiały wykorzystane do produkcji mogą być niemal identyczne, ponieważ warunki temperaturowe i środowiskowe, w których pracują, będą się pokrywać. Tym, co jednak wyróżnia PHP od jej klasycznej odmiany, jest ilość wymaganego miejsca, znacznie prostszy proces produkcyjny oraz niska cena i awaryjność. Jednak skomplikowość oraz stochastyczność zjawisk za-

1.4. Pulsacyjna rurka ciepła



Rys. 1.3 Pulsacyjna rurka ciepła – schematyczna przykładowa konstrukcja wymiennika z typową strukturą czynnika dwufazowego

chodzących w PHP powoduje, że modele jednowymiarowe przewidują jej działanie tylko w wąskim zakresie warunków brzegowych, a numeryczne modelowanie całego urządzenia nawet z możliwościami dzisiejszych klastrów obliczeniowych, nie pozwala na przeprowadzenie obliczeń w czasie umożliwiającym praktyczne zastosowanie.

Podstawowa zasada działania pulsacyjnej rurki ciepła jest stosunkowo prosta i intuicyjna. Urządzenie składa się z meandrycznie uformowanej rurki kapilarnej, jak to pokazano na rysunku 1.3, podobnie do klasycznej rurki ciepła składa się ze stref: (1) parowacza; (2) skraplacza; (3) strefy adiabatycznej. Ogrzewanie czynnika w parowaczu powoduje wzrost temperatury, a w konsekwencji wzrost ciśnienia nasycenia. Jednocześnie niższa temperatura w skraplaczu oznacza, że występujące ciśnienie nasycenia jest

1.4. Pulsacyjna rurka ciepła

również niższe niż w parowaczu. Wygenerowana różnica ciśnień, wymusza przepływ czynnika z parowacza do skraplacza, jednak w przeciwieństwie do klasycznej odmiany, gdzie osobno transportowana jest para (parowacz \rightarrow skraplacz), a osobno ciecz, w przypadku PHP ruch obu faz jest „połączony” ze względu na małą średnicę. Jak podaje Ma w swojej książce [70] większość ciepła transportowana w PHP jest transportowana za pomocą ciepła właściwego. Kierując się tym argumentem, można stwierdzić, że główną siłą napędową przepływu jest przejście fazowe, ale sama wymiana ciepła występuje przede wszystkim w cieczy. Jest to bardzo ważny wniosek, ponieważ pokazuje, że poza wymianą ciepła związaną ze skraplaniem cieczy w pulsacyjnych rurkach ciepła występuje również wymiana ciepła od cieczy do ścianek wymiennika.

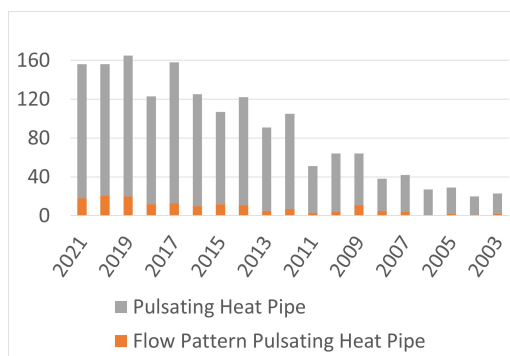
1.4.2 Struktura przepływowa

Bardzo ważnym aspektem związanym z pracą pulsacyjnych rurek ciepła jest występująca struktura przepływowa, według bazy danych Clarivate Web of Science¹ do roku 2021 opublikowanych zostało 158 prac związanych ze strukturą przepływową w PHP². Już sama liczba publikacji sugeruje, że niemożliwe jest dokładne przeanalizowanie pracy urządzenia bez uwzględnienia charakteru przepływu i pomimo faktu, że w pulsacyjnych rurkach ciepła występuje kilka struktur zdefiniowanych dla ogólnych przepływów dwufazowych, które były opisywane już od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku [81, 49], nadal wiele pracy musi zostać wykonane, aby móc dokładnie zrozumieć zjawiska w nich zachodzące. Powszechnie przyjęty podział został zebrany i opisany przez wielu autorów książek dotyczących PHP [70, 78, 82, 34]. Rozróżniają oni kilka najbardziej charakterystycznych przepływów pokazanych na rysunku 1.5: pęcherzykowe, korkowe, przejściowe (pianowe) i pierścieniowe. Dodatkowo ze względu na temat rozprawy warto również wyróżnić przepływ stratyfikowany, który może wystąpić w obecności grawitacji, ale jest właściwie niespotykany przy przepływie w kanałach w mikrogravitacji. W szczególnych przypadkach można zdefiniować jeszcze więcej struktur przepływowych takich jak falowy czy pierścieniowy zamglony, jednak w niniejszej pracy nie będą one analizowane.

Przewidywanie struktury przepływowej na podstawie dwóch wartości prędkości (fazy ciekłej i fazy gazowej, rysunek 1.6), jest do tej pory najczęstszym sposobem opisywania przepływów w literaturze dotyczącej nie tylko pulsacyjnych rurek ciepła. Jednak jak pokazuje praktyka, w zależności od wybranego czynnika, średnicy kanału i wielu innych

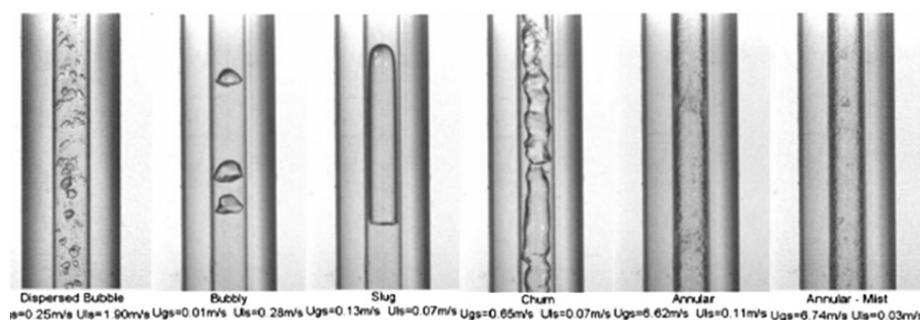
¹Certain data included herein are derived from Clarivate Web of Science. ©Copyright Clarivate 2022. All rights reserved.

²Zapytanie w bazie danych sformułowane jako: „flow pattern heat pipe AND oscillating OR pulsating”, a następnie zawężone do lat 2003–2021



Rys. 1.4 Porównanie liczby publikacji dotyczących struktur przepływowych z ogólną liczbą dotyczących PHP

1.4. Pulsacyjna rurka ciepła



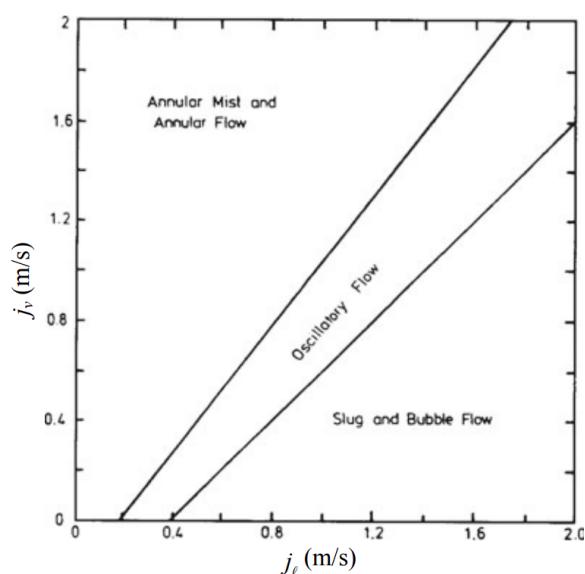
Rys. 1.5 Struktury przepływowe w pulsacyjnych rurkach ciepła – w kolejności przepływ pęcherzykowy, korkowy, przejściowy, pierścieniowy, pierścieniowy rozproszony

parametrów brak jest korelacji pomiędzy wynikami.

1. **Przepływ pęcherzykowy** cechuje się rozproszonymi bąblami parowymi unoszącymi się w objętości ciekłego czynnika roboczego. Średnica bąbli parowych jest znacznie mniejsza od średnicy kanału, w którym płynie mieszanina dwufazowa, a objętościowy stosunek frakcji parowej do frakcji ciekłej jest zdecydowanie mniejszy od wartości 0,5. Zazwyczaj przepływ pęcherzykowy w pulsacyjnej rurce ciepła jest wynikiem nukleacji i odparowania stojącej lub wolno płynącej mieszaniny. Jeśli jednak przepływ frakcji parowej będzie zdecydowanie wyższy niż frakcji ciekłej, to przepływ pęcherzykowy może przerodzić się w przepływ bąbelkowy i dalej korkowy.
2. **Przepływ korkowy** cechuje się połączeniem wielu rozproszonych bąbli pary w większe wypełniające niemal cały przekrój kanału. Jak już wspomniano, może zostać wygenerowany poprzez wymuszenie przepływu o zadanej prędkości, jednak nie jest to jedyny warunek, przy którym może wystąpić. Drugim parametrem wpływającym na strukturę jest stosunek objętości pary do cieczy, jeśli stosunek ten jest wystarczająco duży, struktura korkowa może utrzymywać się nawet bez przepływu. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na fakt, do tej pory celowo pominięty w rozważaniach, jeśli średnica kanału przekracza definiowalną wartość krytyczną, struktura korkowa nie będzie mogła się utrzymać przy niskich prędkościach. Najczęściej cytowaną pracą definiującą tę granicę wykonali Kew i Cornwell, którzy na podstawie badań eksperymentalnych wyznaczyli zależność:

$$Co = \frac{\sqrt{\sigma/(g(\rho_l - \rho_g))}}{d}$$

1.4. Pulsacyjna rurka ciepła



Rys. 1.6 Struktury przepływowe w zależności od prędkości przepływu frakcji cieczowej i gazowej [40, 35]

Ta powszechnie stosowana metoda ma wadę polegającą na nieuwzględnianiu prędkości przepływu, co zostanie dokładnie pokazane w rozdziale 2.

- Przepływ stratyfikowny** charakteryzuje się rozdzieleniem frakcji cieczowej płynącej dolną częścią kanału oraz frakcji gazowej płynącą górną częścią kanału, z tego wynika, że wystąpić może jedynie w przypadku kanałów w orientacji poziomej. Występuje przy spełnieniu dwóch warunków: kanał musi spełniać warunek kapilarności oraz prędkości frakcji cieczowej i gazowej muszą być stosunkowo niskie, co zostanie pokazane w przeglądzie literatury.
- Przepływ burzliwo-korkowy** (pianowy) jest stanem przejściowym pomiędzy przepływem korkowym oraz przepływem pierścieniowym. Jego charakterystyka jest mocno chaotyczna, wynikająca z chwilowych rozpadów i połączeń bąbli parowych. Powodem tak chaotycznego zjawiska jest naprzemienny spadek znaczenia sił napięcia powierzchniowego utrzymujących kształt bąbla parowego i wzrost znaczenia sił wynikających z gradientu ciśnienia wzdłuż rurki oraz sił potencjalnych wynikających z przyspieszenia grawitacyjnego. W przypadku gdy średnica jest stosunkowo mała, przepływ burzliwo-korkowy może nie zaistnieć, a zastąpi go bezpośrednio przejście z przepływu korkowego do pierścieniowego.

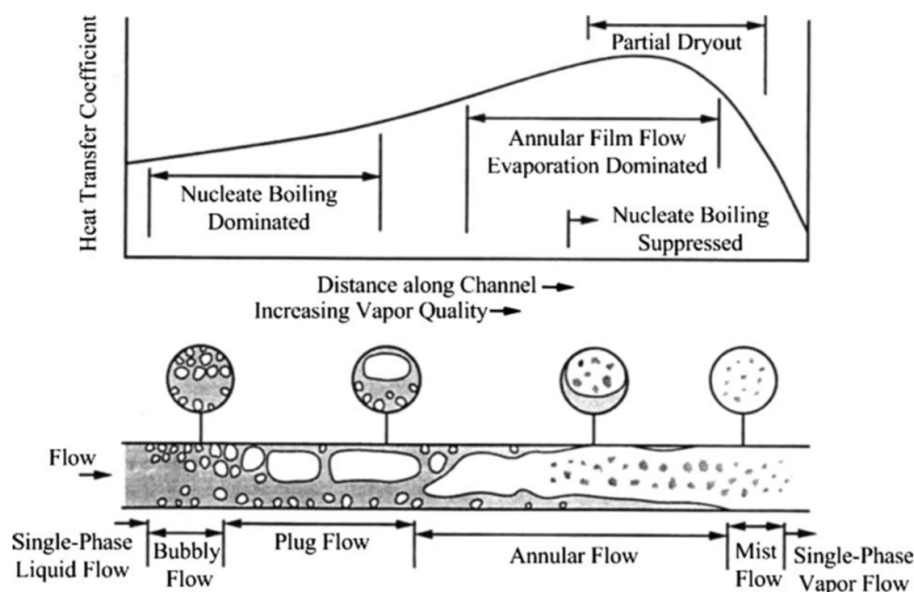
5. **Przepływ pierścieniowy** spotykany w pulsacyjnych rurkach ciepła najczęściej w przypadku przenoszenia stosunkowo wysokich mocy cieplnych. W centralnej części przekroju kanału przepływa frakcja parowa, natomiast na ściankach kanału przepływa frakcja cieczowa. Charakteryzuje się wysokim stosunkiem objętościowym frakcji parowej do frakcji cieczowej oraz dużą wartością prędkości frakcji gazowej w porównaniu do prędkości frakcji cieczowej. Dużo wyższa prędkość pary oraz oddziaływania na granicy faz bardzo często powodują zjawisko falowania określane jako pierścienie.

1.4.3 Wpływ struktury na wydajność wymiany ciepła

Badania procesów wymiany ciepła w przepływie dwufazowym w kanałach mają bezpośrednie przełożenie na zjawiska zachodzące w pulsacyjnych rurkach ciepła. Wiedząc, że dominująca struktura przepływowa zależy od mocy przenoszonej przez układ, można optymalnie określić geometrię PHP, czynnik roboczy czy warunki, w których powinna pracować. Jak pokazuje Gupta i inni [43] przepływ korkowy (bąble Taylora) w porównaniu do przepływu cieczowego jednofazowego zwiększa wymianę ciepła wyrażoną liczbą Nusselta 2,5 krotnie. Przepływ pierścieniowy jeszcze bardziej zwiększa możliwości wymiany ciepła, Kattan i inni [55, 56, 57] udowodnili wzrost przenoszonej mocy, badając wymuszony przepływ w poziomym kanale o średnicy 12 mm. Również Yang i inni [115] sztucznie wymuszając pierścieniową strukturę przepływową dzięki hydrofobowemu rdzeniowi umieszczonego w środku kanału osiągnęli wzrost wymiany ciepła (3 krotny) w porównaniu z kanałem bez rdzenia. Dalszy wzrost przenoszonego ciepła może jednak doprowadzić do wysuszenia kanału [116] (ang. dry-out), a tym samym znacznego ograniczenia współczynnika wymiany ciepła. Jest to bardzo niekorzystny efekt spotykany również w pulsacyjnych rurkach ciepła.

Podsumowując, ważnym jest dopasowanie projektowanego wymiennika do przewidywanych warunków pracy, poprzez zapewnienie, że PHP będzie pracowało w zakresie, który gwarantuje, że struktura przepływowa czynnika jest na całej długości wymiennika korkowa, co obrazuje rysunek 1.7 zaproponowany przez Chenga i innych [23].

1.4. Pulsacyjna rurka ciepła



Rys. 1.7 Zależność współczynnika wymiany ciepła i struktury przepływowej [23]

1.4.4 Charakterystyka przepływu w pulsacyjnych rurkach ciepła

W całej powyższej części pracy tylko pobieżnie wspomniano, że przepływ w pulsacyjnej rurce ciepła może mieć charakter oscylacyjny. Nie jest to jednak prosty przypadek ruchu harmonicznego znanego z podstaw fizyki, mimo że często modeluje się go jako przepływ składający się z wielu połączonych układów mas, sprężyn i tłumików (ciecz, gaz i tarcie). Występuje on jedynie w wąskim zakresie pracy pulsacyjnej rurki ciepła, a skomplikowanie zjawisk w nim zachodzących powoduje, że jak do tej pory nie istnieje rozwiązanie analityczne. Jak już wspomniano, struktura przepływowa jest zależna od mocy cieplnej przenoszonej przez PHP. Również charakterystyka przepływu jest pośrednio zależna od procesu przenoszenia ciepła, a wraz ze wzrostem wartości strumienia ciepła, można wyróżnić kilka charakterystyk [107, 59, 111]:

1. Oscylacje o niskiej amplitudzie
2. Oscylacje o normalnej amplitudzie
3. Przepływ kierunkowy ze stochastycznymi oscylacjami
4. Jednostajny przepływ kierunkowy (zazwyczaj powiązany ze zmianą struktury na pierścieniową)

1.4. Pulsacyjna rurka ciepła

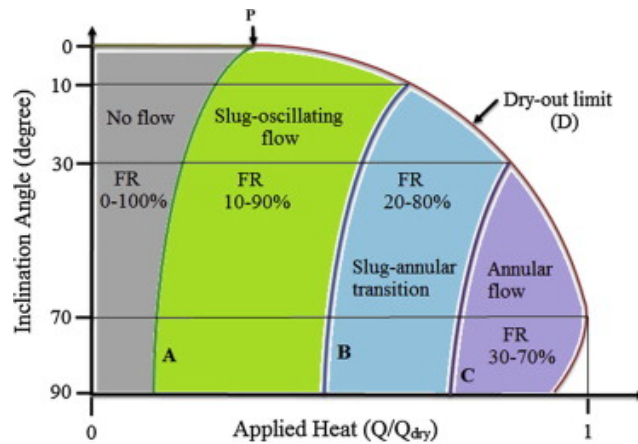
Wyniki badań pokazują, że wraz z oscylacjami bąbli parowych i korków cieczowych również wartości temperatur w parowaczu i skraplaczu wykazują się oscylacjami. Każda z charakterystyk wyróżnia się innym widmem częstotliwościowym, a dominujące częstotliwości są definiowane przez wielu autorów za pomocą metod przetwarzania obrazu z kamer szybko-klatkowych i termowizyjnych oraz pomiaru z pomocą termopar [100, 53, 74]. Metody, które są w literaturze wykorzystywane, pozwalają na zdefiniowanie dominującej częstotliwości, jednak procesy zachodzące w PHP są na tyle chaotyczne, że pomijanie pozostałych przy modelowaniu procesów wymiany ciepła może doprowadzić do znaczących rozbieżności z wynikami doświadczalnymi. Ze względu na przejrzystość pracy w rozdziale 4.6 przedstawione zostaną dokładniejsze rozważania dotyczące częstotliwości występujących w pulsacyjnych rurkach ciepła.

1.4.5 Podsumowanie

Autorzy kilku przeglądów literatury i książek dotyczących pulsacyjnej rurki ciepła [123, 70, 78, 82] pokazali kolejne cele badawcze, które muszą zostać przeanalizowane do opracowania kompletnego modelu, umożliwiającego symulowanie PHP. Wnioski z nich płynące sugerują, że w obecnym momencie najważniejsze i nadal nierozwiązane są:

1. **Ciepło utajone i ciepło właściwe.** Początkowe badania [121, 98, 97] pokazywały, że tylko 10% transferu ciepła zachodzi poprzez odparowanie i skraplanie czynnika roboczego. Jak jednak pokazują nowe doniesienia [52, 80], wartość ta wynosi od 66% do 74%.
2. **Objętościowe wypełnienie układu.** Przy niskim wypełnieniu czynnikiem roboczym, poniżej 30% PHP nie jest w stanie pracować z pełną wydajnością ze względu na szybkie wysuszenie parowacza (ang. dry-out), podobnie przy wypełnieniu powyżej 70% wydajność układu spada, co jest spowodowane dużymi oporami przy przepływie cieczy [60]. Przyjmuje się, że najlepszą wydajność pulsacyjnej rurki ciepła osiągają pomiędzy 50% i 70%, przy czym im są dłuższe i narażone na większe moce cieplne, tym większy współczynnik wypełnienia jest preferowany [9, 30].
3. **Wpływ kąta pochylenia.** Dużą zaletą PHP jest możliwość formowania skomplikowanych geometrii wymiennika. Z tego powodu należy również uwzględnić, w jakiej orientacji najlepiej pracują takie układy. Jak pokazują badania [93, 84], może

1.4. Pulsacyjna rurka ciepła



Rys. 1.8 Wydajność pulsacyjnych rurek ciepła - struktura przepływowa i kąt pochylenia [93]

istnieć pewien optymalny kąt, dla którego PHP działa z największą wydajnością, ale również istnieje pewien kąt, poniżej którego przestaje działać (rysunek 1.8).

4. **Wysuszenie parowacza (ang. dry-out).** W literaturze, określając limit przy prowadzący do wysuszenia parownika, stosuje się często liczbę Kutateladze (zdefiniowaną równaniem 1.1), jednak jak pokazują badania, dokładność jest albo niewystarczająca [94] albo ograniczona do specyficznych przypadków [96].

$$Ku = \frac{\dot{q}}{r\sqrt{\rho_v}}[\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad (1.1)$$

5. **Struktura przepływowa.** Najważniejszy brakujący element z punktu widzenia niniejszej rozprawy, pozwoli przewidywać pracę pulsacyjnej rurki ciepła dla różnych warunków brzegowych, a tym samym projektować urządzenia z optymalnymi parametrami.

Pulsacyjne rurki ciepła są niewątpliwie jednym z najbardziej obiecujących pasywnych urządzeń, mogących wpłynąć na rozwiązania stosowane w przyszłych misjach kosmicznych, zarówno w przestrzeni bliskiej naszej macierzystej planety, jak również w misjach tzw. głębokiego kosmosu. Nie należy ich jednak uznawać za konkurencję dla obecnie stosowanych pasywnych wymienników ciepła, a raczej jako kolejny krok rozszerzający możliwości układów kontrolujących założone zakresy temperatur. Największym wyzwaniem, które musi zostać pokonane przed osiągnięciem ostatniego poziomu gotowości (TRL 9),

1.4. Pulsacyjna rurka ciepła

jest opracowanie modelu, będącego w stanie przewidywać ich działanie w szerokim spektrum geometrii, zastosowanych materiałów, czynników roboczych i warunków brzegowych. Jak do tej pory, pomimo wielu starań nie udało się w pełni wyjaśnić, dla jakich parametrów przepływu wystąpią poszczególne struktury przepływowe, dokładna analiza literaturowa zostanie przedstawiona w rozdziale 2.

Rozdział 2

Przegląd literatury

Przepływy wielofazowe są podstawą wielu dziedzin inżynierii, począwszy od procesów chemicznych [21], wydobywania ropy naftowej i gazu ziemnego [1] do zarządzania termicznego w szerokim zakresie strumieni ciepła (elektronika [12], nuklearna [69]). Każda z tych dziedzin skupia się na innych właściwościach czynników roboczych, a optymalna charakterystyka przepływu jest identyfikowana dla każdego zastosowania osobno. Charakterystyka przepływu zależy od wielu właściwości fizycznych płynu roboczego, takich jak napięcie powierzchniowe, gęstość, czy lepkość, ale także od geometrii kanału, w którym przepływa ciecz dwufazowa.

2.1 Cel przeglądu literatury

Celem niniejszego rozdziału jest wprowadzenia czytelnika w rozległy obszar przepływów dwufazowych, ze szczególnym uwzględnieniem przepływów spotykanych w pulsacyjnych rurkach ciepła. Oczywiście jest, że literatura dotycząca tego tematu jest bardzo rozległa, jednak jak zostanie pokazane, nadal brak jest jednoznacznego opisu zjawisk fizycznych, który następnie mógłby zostać wykorzystany w modelowaniu docelowych urządzeń.

Dotychczas przeprowadzone badania przepływów wielofazowych, a szczególnie badania struktur przepływowych, z powodzeniem opisywały przepływy ustalone i nieustalone w warunkach ziemskich bez zmiany kierunku przepływu, co zostanie pokazane w podrozdziale 2.2. Część z tych modeli wykorzystuje w swoich algorytmach spadek ciśnienia, z tego powodu w podrozdziale 2.3, zaprezentowano kilka najważniejszych modeli, które mogą zostać wykorzystane w połączeniu z badaniami struktur przepływowych. W rzeczywistości bardzo rzadko spotyka się przepływy o stałej prędkości lub stałym przyspieszeniu, w szczególności przepływy w wymiennikach ciepła bazujących na przepływach wielofazowych zazwyczaj charakteryzują się nieustalonymi przepływami, z tego powodu w podrozdziale 2.2 poza opisem struktur przepływowych o stałej charakterystyce pokazano również

2.2. Struktury przepływowe w warunkach ziemskich

przepływy dynamiczne. Jeszcze słabiej przebadanym środowiskiem jest mikrogravitacja, w przypadku której problemem się pojawiającym jest stosunkowo duży koszt badań eksperymentalnych. Pomimo tego również w mikrogravitacji przeprowadzone zostało wiele badań na ten temat, co zostanie pokazane w podrozdziale 2.4. W podrozdziale 2.6 zostanie przedstawiona metoda określenia najważniejszych właściwości fizycznego danego zjawiska pozwalająca na uniezależnienie wyników badań od wymiarów oraz zostaną zdefiniowane i pokrótce omówione najważniejsze liczby bezwymiarowe stosowane w literaturze do opisu przepływów wielofazowych. W ostatnim podrozdziale (2.7) omówione zostaną metody obserwacji przepływu przepływów dwufazowych, które autor rozprawy analizował pod kątem wykorzystania w badaniach eksperymentalnych.

2.2 Struktury przepływowe w warunkach ziemskich

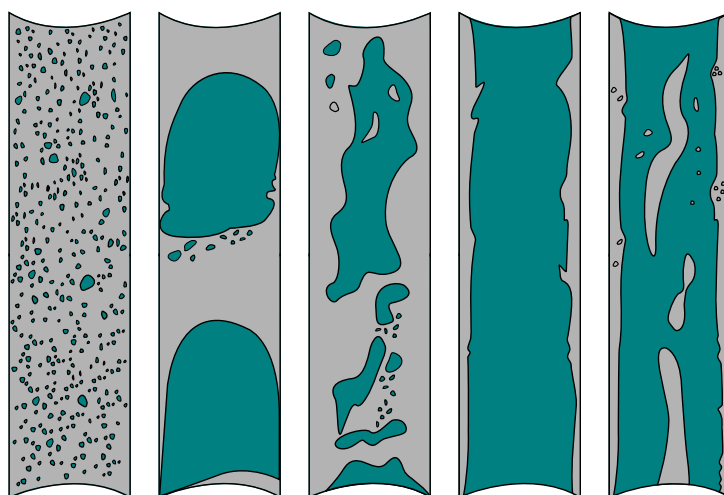
2.2.1 Kanały pionowe

Przepływ dwufazowy w rurce pionowej jest zwykle bardziej symetryczny niż w przypadku kanałów pochylonych lub poziomych, powodem jest kierunek działania siły gravitacji działający jednakowo w całym przekroju kanału. Odgrywa ona dominującą rolę w fazie ciekłej, lecz pośrednio wpływa również na cały przepływ dwufazowy. Dla różnych charakterystyk przepływu dwufazowego (w tym pokazanych na rysunku 2.1) spadek ciśnienia i wymiana ciepła są znacząco różne, co zostało już pokazane w rozdziale 1.4, dlatego skorelowanie warunków przepływu ze strukturami przepływowymi jest koniecznym warunkiem poprawnego modelowania przepływów dwufazowych.

Opierając się na danych doświadczalnych, opracowano wiele półempirycznych korelacji, które pozwalały określić moment przejścia pomiędzy strukturami przepływowymi. Korelacje te zazwyczaj zostają przekształcane w proste narzędzia, które pozwalają na opracowanie szeregu diagramów graficznych zwanych mapami przepływu. Diagramy te przedstawiają przepływ z wykorzystaniem ważnych i użytecznych parametrów, dostarczając informacji o natężeniu przepływu i parametrach pracy, takich jak współczynnik wymiany ciepła i spadek ciśnienia, a także charakterystyki przepływowe reprezentujące różne frakcje cieczy i gazu, następnie podczas projektowania urządzeń dla danych warunków przepływu można szybko określić oczekiwaną charakterystykę przepływu.

Dokładność każdej mapy przepływu zależy od metod użytych do jej opracowania.

2.2. Struktury przepływowe w warunkach ziemskich



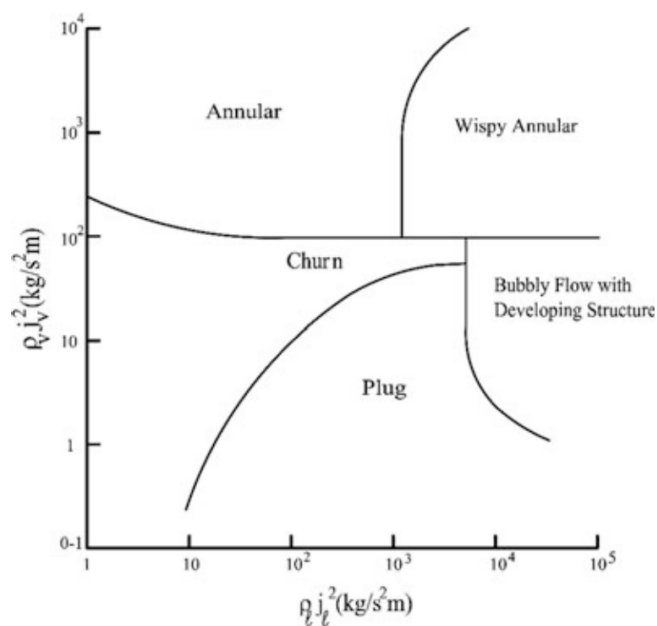
Rys. 2.1 Dwufazowe struktury przepływowe występujące w kanałach pionowych

Na przykład, mapa przepływu opracowana na podstawie danych doświadczalnych dla jednej cieczy roboczej niekoniecznie musi być reprezentatywna dla innej cieczy roboczej. Z drugiej strony, gdy wykorzystuje się dużą ilość danych dla różnych cieczy i warunków pracy, możliwe jest uzyskanie bardziej reprezentatywnej mapy przepływu. Jednym z ograniczeń danych eksperymentalnych lub operacyjnych jest subiektywność danych podawanych przez obserwatora. Ponadto, nie zawsze łatwo jest odróżnić jedną charakterystykę przepływu od drugiego.

Mapy charakterystyk przepływowych są zwykle podawane w dziedzinie prędkości interfejsów lub innych uogólnionych parametrów przepływu dla cieczy i pary. Zaobserwowane charakterystyki przepływowe są oddzielone liniami, które reprezentują warunki przejścia pomiędzy nimi. Mapa przepływowa zaproponowana przez Hewitta i Roberta [48], która reprezentuje szeroki zakres danych doświadczalnych dla przepływu dwufazowego w pionowych rurkach, została pokazana na 2.2. Oś odcięta i rzędna wykresu są proporcjonalne odpowiednio do energii kinetycznej fazy ciekłej i gazowej, według autorów pracy granice oddzielające poszczególne charakterystyki przepływowe można opisać jako zależność jedynie tych dwóch parametrów.

Oprócz mapy przepływu opracowanej przez Hewitta i Roberta [48], w literaturze dostępnych jest wiele map przepływu. Ponieważ identyfikacja wzorca przepływu, a nawet nazwa charakterystyki przepływu jest subiektywna i może się różnić w zależności od obserwatora, przedstawienie wszystkich korelacji dla wszystkich charakterystyk i stanowisk

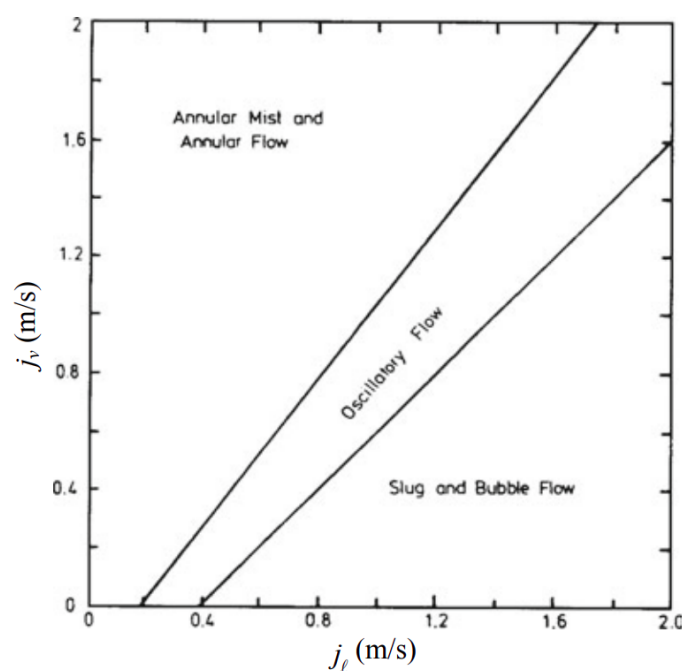
2.2. Struktury przepływowe w warunkach ziemskich



Rys. 2.2 Mapa przepływowa opracowana przez Hewitt'a i Roberta [48] i odtworzona przez Faghri'ego i Zhanga [34]

badawczych jest dużym wyzwaniem. Omówione powyżej reżimy przepływu mają zastosowanie do pionowego przepływu dwufazowego w górę. Choć przepływ dwufazowy w dół znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach, to istnieje bardzo mało danych o mapach przepływowych dla tego przypadku. Ograniczone badania wskazują, że w pionowym przepływie w dół dominuje przepływ pierścieniowy, który różni się od przepływu w górę. Mapa wzoru przepływu oparta na danych dotyczących przepływu powietrza i wody pod niskim ciśnieniem zaproponowana przez Golana i Stenninga [40] jest pokazana na rysunku 2.3.

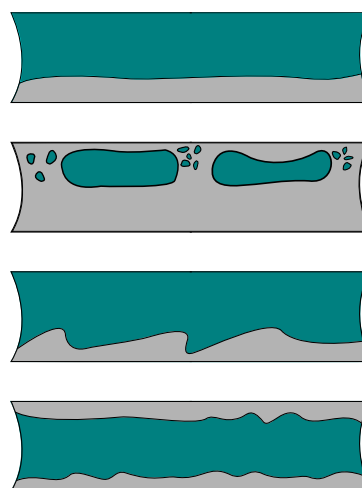
2.2. Struktury przepływowe w warunkach ziemskich



Rys. 2.3 Mapa przepływowa opracowana przez Golana i Stenninga [40] dla przepływu pionowego w dół

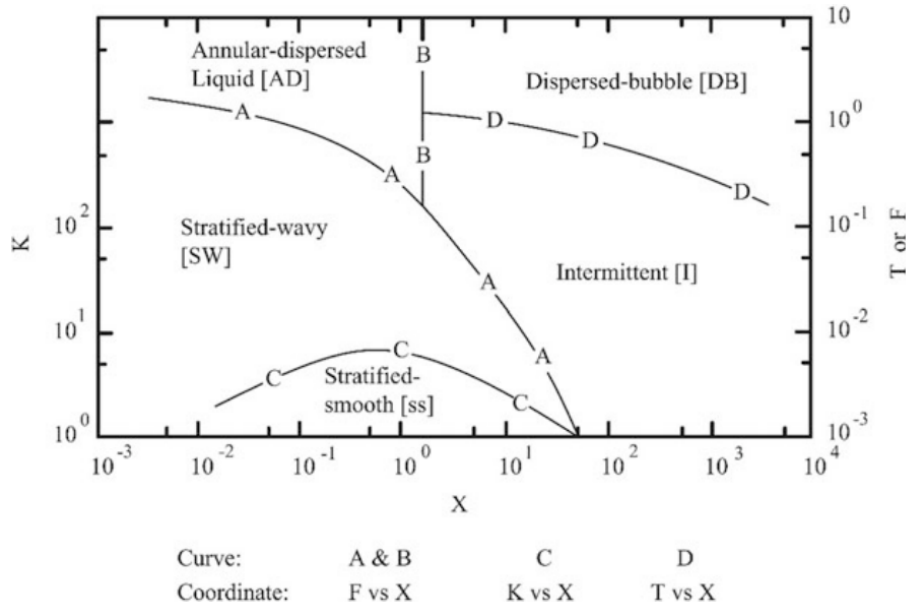
2.2.2 Kanały poziome

W poziomym przepływie dwufazowym występujące charakterystyki przepływowe różnią się od przepływu pionowego. Wynika to z faktu, że siła ciężkości działa prostopadle do kierunku przepływu powodując niesymetryczny rozkład frakcji ciekowej i gazowej. Nieosiowy przepływ w rurce powoduje również, że jest bardziej złożony niż pionowy przepływ dwufazowy. Struktury przepływowe spotykane w poziomym przepływie dwufazowym zostały przedstawione na rysunku 2.4, pomimo po-



Rys. 2.4 Dwufazowe struktury przepływowe występujące w kanałach poziomych

2.2. Struktury przepływowe w warunkach ziemskich



Rys. 2.5 Struktury przepływowe za Taitelem i Duklerem [103] w zależności od warunków przepływu. Dla krzywych A i B - należy wykorzystać współrzędne F i X (równania 2.2 i 2.1), analogicznie dla krzywych C i D

dobieństw z mapami przepływowymi dla kanałów pionowych bardzo dobrze widać niesymetryczność wszystkich przepływów poza przepływem pierścieniowym.

Na rysunku 2.5 pokazano często stosowaną mapę przepływu dla poziomego przepływu dwufazowego, zaproponowaną przez Taitela i Duklera [103]. Osią odciętych mapy jest parametr Martinelliego:

$$X = \sqrt{\frac{(dp/dx)_l}{(dp/dx)_v}} \quad (2.1)$$

gdzie $(dp/dx)_l$ i $(dp/dx)_v$ są gradientami ciśnienia dla fazy ciekłej i fazy gazowej wzdłuż kanału. Osie rzędnych są określone jako:

$$F = \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_l - \rho_v}} \frac{j_v}{\sqrt{Dg \cos \Theta}} \quad (2.2)$$

2.2. Struktury przepływowe w warunkach ziemskich

$$K = \sqrt{\frac{\rho_v j_v^2}{(\rho_l - \rho_v) D g \cos \Theta} \frac{D j_l}{\nu_l}} \quad (2.3)$$

$$T = \sqrt{\frac{(dp/dx)_l}{(\rho_l - \rho_v) g \cos \Theta}} \quad (2.4)$$

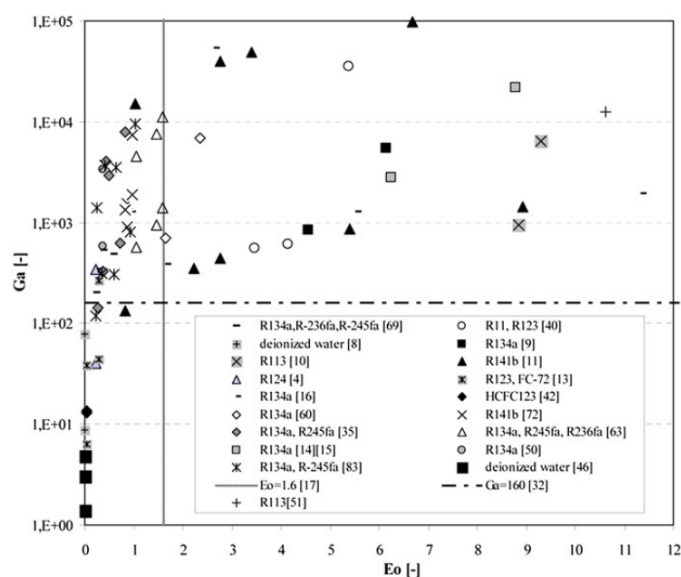
Określenie charakterystyki przepływu za pomocą mapy Taitela i Duklera [103] wymaga określenia gradientu ciśnienia dla fazy ciekłej i fazy parowej przepływającej wzdłuż kanału, który może być wyznaczony za pomocą odpowiednich modeli przepływu (podrozdział 2.3). Należy zaznaczyć, że przedstawiona mapa przepływu została opracowana dla adiabatycznego przepływu dwufazowego, natomiast granice przejścia pomiędzy różnymi charakterystykami przepływu mogą również zależeć od strumienia ciepła. Niemniej jednak, są często używane do określenia charakterystyk przepływu również dla parowania i skraplania wewnątrz rur.

O wiele bardziej uproszczone podejście opisali w swojej pracy Baldassari'ego i Marengo [13], jednocześnie jednak podkreślając niedokładność tej metody. Odzworowane na rysunku 2.6 punkty, pokazują wartości liczb Bonda [108] (nazwa funkcjonuje wymiennie z liczbą Eötvös'a) i Garimella'ego [47] z badań dostępnych w literaturze. Wynika z niego, że osiem z dziewiętnastu przedstawionych punktów badawczych można uznać za mikroprzepływy według obu kryteriów, oraz cztery prace, w których warunki eksperymentu spełniają kryterium mikroprzepływów Eötvös'a, ale nie spełniają kryterium Garimella'ego, brak jest prac, w których kryterium Garimella'ego byłoby spełnione przy jednoczesnym niespełnieniu kryterium Eötvös'a. Ponieważ kryterium przejścia od skali mikro do makroprzepływów zostało praktycznie powiązane z prędkością przepływu (definicja kryterium Garimella'ego), a mimo to istnieje duża liczba prac udowadniających, że pulsacyjna rurka ciepła poprawnie pracuje poza tym zakresem, konieczne jest zastosowanie bardziej wyrafinowanej korelacji w celu zdefiniowania jednoznacznego i uniwersalnego kryterium przejścia.

2.2.3 Przepływy przyspieszone

W literaturze istnieje bardzo mało prac, które opisywałyby struktury przepływowe w warunkach dynamicznych pomimo faktu, że dynamika może mieć na nie decydujący wpływ (jak podają wspomniani Rouhani i Sohal [92]). Większość autorów badań symulacyjnych przyjmuje kryteria wyznaczone dla przepływów stałych, a błąd wynikający z tego

2.2. Struktury przepływowe w warunkach ziemskich



Rys. 2.6 Uproszczone kryterium ograniczoności wyniki literaturowe [13]

przybliżenia uznaje za nieznaczący. Nie zmniejsza to przydatności opracowanych modeli, jednak z naukowego punktu widzenia oraz mając na uwadze dokładność przyszłych modeli, nie można pominąć kwestii dynamiki przepływu.

Taki przypadek poruszyli Patel i Mehta [86], analizując przepływy w pulsacyjnej rurce ciepła. W przypadku ich stanowiska badawczego, krytyczna wartość prędkości, powyżej której przepływ przechodzi w pierścieniowy, wynosiła 2,25 m/s. Z dwóch powodów jest to jednak niedoskonałe kryterium: opisuje jedynie wspomniane stanowisko badawcze oraz nie jest zależne od własności fizykochemicznych czynnika, które są funkcją temperatury (np. zależność ciśnienia nasycenia i temperatury). Bardziej ogólne badania przeprowadzili Han i Shikazono [45], którzy skupili się na badaniu grubości filmu cieczy w mikrokanałach, rozszerzając swoje wcześniejsze badania prowadzone w warunkach ustalonych [44]. Zastosowali kanały o przekroju okrągłym i średnicach wewnętrznych 0,5, 0,7 i 1,0 mm, wypełnione częściowo etanolem, wodą i FC-40. Na podstawie wyników opracowali korelację grubości warstwy cieczy w przepływach przyspieszonych w zależności od liczby kapilarnej i liczby Bonda na podstawie przyspieszenia przepływu, zgodnie z ich wnioskami udało się skorelować grubość filmu cieczowego z rozrzutem na poziomie 15% (im mniej tym lepiej).

Skomplikowanie zjawisk występujących w przepływie dynamicznym oraz coraz prężniej rozwijające się analizy bazujące na metodach uczenia maszynowego i sztucznej inte-

2.3. Spadek ciśnienia

ligencji powodują, że w ostatnim czasie pojawiają się próby analiz z ich wykorzystaniem. W pracy Niu i innych [83] przedstawiono badania mające na celu określenie ogólnych zasad opisywania przepływu na podstawie chwilowych parametrów przepływu poprzez wyeliminowanie przypadkowych zmienności, stosując metody sztucznej inteligencji: automatycznym rozpoznawaniu obrazu oraz uśrednianiu z wielu punktów pomiarowych. Opracowane metody pozwoliły na przewidywanie struktur przepływowych, a autorzy określili dokładność na leżącą w zakresie od 92,5 do 100 %.

Podjęte są również nieliczne próby doświadczalnego zbadania wymiany ciepła z powierzchnią pionowego kanału w przepływie oscylacyjnym, czego przykładem jest praca Akdaga i Ozguca [4]. W oparciu o dane eksperymentalne otrzymali empiryczne równanie dla uśrednionej cyklicznie liczby Nusselta jako funkcji kinetycznej liczby Reynoldsa i bezwymiarowej amplitudy. Ich wyniki pokazują, że współczynnik wymiany ciepła jest zależny od częstotliwości i amplitudy, natomiast ich praca nie zagłębia się w kwestię określenia struktury przepływowej.

2.3 Spadek ciśnienia

2.3.1 Spadek ciśnienia w warunkach ziemskich

Spadek ciśnienia jest kluczową informacją wykorzystywaną w projektowaniu układów bazujących na przepływach wielofazowych [31, 30]. Informacja ta może być istotna nie tylko przy projektowaniu układów, ale również w modelowaniu CFD [16] oraz w modelowaniu analitycznym [29]. Obecnie coraz większa liczba urządzeń może być prawidłowo zaprojektowana przy użyciu wystarczająco dokładnych modeli przewidujących reżimy przepływu oraz spadek ciśnienia na podstawie prędkości przepływu. Crowley i Izenson [28] pokazali, że dla warunków przepływu ustalonego możliwe jest przewidywanie charakterystyk przepływu dwufazowego w akceptowalnym marginesie błędów dla zastosowań przemysłowych. Li i inni [64] przedstawili analizę przepływów wygenerowanych z zastosowaniem wysokociśnieniowego zbiornika azotu oraz wody łączących się w jeden kanał w niewielkiej odległości od obserwowanej rurki o przekroju prostokątnym i trójkątnym (boki prostokąta $2\text{ mm} \times 0,81\text{ mm}$; trójkąt równoboczny o bokach 2 mm). Na podstawie prędkości przepływu oraz zarejestrowanych wahań ciśnienia metodą analizy widmowej określili mapy przepływowe w dziedzinie częstotliwości i prędkości. Jednakże, duża część przepływów

2.3. Spadek ciśnienia

spotykanych w aparaturze przemysłowej jak również w technologiach kosmicznych nie zachowuje charakteru przepływu ustalonego. Jak stwierdzili Rouhani i Sohal [92] wpływ dynamiki może mieć decydujące znaczenie dla charakterystyki przepływu. Na przykład, symulacje numeryczne przeprowadzone przez Muramatsu i innych [79] oraz badania eksperymentalne przeprowadzone przez Youna i innych [120] pokazują, że przyspieszenie przepływu korkowego silnie wpływa na grubość filmu cieczy przy ścianie, tym samym musi również wpływać na strukturę przepływu.

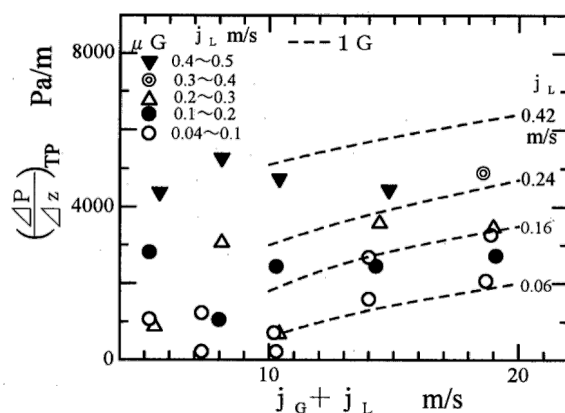
Jak już wspomniano powstało kilka publikacji dotyczących przyspieszania przepływu [92, 79], jednak tylko kilku badaczy rozważało przepływy o zmiennym kierunku przepływu pomijając przepływy z tylko jednym kierunkiem preferencyjnym [117, 89]. Yang i inni [117] zajmowali się badaniem oporów przepływu w pulsującym przepływie dwufazowym, główne zastosowanie znalazły w pompach ciepła, klimatyzacji i technologiach chłodniczych. Ich wyniki pokazują, że stabilny przepływ ma znacznie większe opory przepływu niż zmienny przepływ. Pierwsze badania nad przejściem struktur przepływowych w oscylującym, aktywowanym termicznie przepływie zostały przeprowadzone przez Pietrasantę i innych [89]. Ich badania były prowadzone w pulsacyjnych rurkach ciepła, a na ich podstawie zaproponowali nową mapę przepływową, która uwzględnia zarówno siły tarcia jak i napięcia powierzchniowego. Zaproponowana zmodyfikowana liczba Bonda nie uwzględnia wartości przyspieszenia grawitacyjnego (jak w przypadku klasycznego podejścia), lecz rzeczywiste przyspieszenie przepływu cieczy.

2.3.2 Spadek ciśnienia w warunkach mikrogravitacji

Drugim rzadko omawianym warunkiem jest mikrogravitacja, szczególnie dla przepływów w kanałach większych od średnicy krytycznej określonej w warunkach ziemskich na podstawie liczby Bonda. Badania te mają duże znaczenie, gdyż w odróżnieniu od warunków naziemnych, w mikrogravitacji dominują siły napięcia powierzchniowego. Takie badania pozwalają na dokładne zbadanie wpływu sił napięcia powierzchniowego na przepływ bez „zaburzających” sił przyspieszenia grawitacyjnego. Wpływ różnych poziomów przyspieszenia grawitacyjnego został zbadany między innymi przez Fujii i innych [37]. Na podstawie badań eksperymentalnych przeprowadzonych w wieży zrzutów, pokazali, że wraz z malejącą wartością przyspieszenia grawitacyjnego malał również mierzony spadek ciśnienia, jak to pokazano na rysunku 2.7.

Podobnie jak w przypadku normalnej grawitacji, również w mikrogravitacji naukowcy

2.3. Spadek ciśnienia



Rys. 2.7 Wpływ przyspieszenia grawitacyjnego na spadek ciśnienia w przepływie [37]

skupiają się przede wszystkim na przepływach ustalonych, a w szczególności badane są straty ciśnienia w zależności od struktury przepływu. Adaptacja idealnego modelu spadku ciśnienia do warunków mikrogravitacji jest głównym zadaniem badań eksperymentalnych. Prowadzili je m.in. Choi i inni [26], którzy badali adiabatyczny przepływ mieszaniny wody i powietrza w kanale o średnicy 10 mm, wykazując, że wpływ mikrogravitacji na strukturę przepływu jest szczególnie widoczny dla małych prędkości, poniżej 0,2 m/s ($Re < 1500$). Co ciekawe, w ich przypadku wyższe prędkości, czyli powyżej 0,5 m/s ($Re > 3800$), nie wpłynęły znacząco na zachowanie przepływu przy porównaniu mikrogravitacji i normalnej grawitacji.

Awad i Muzychka [10] porównali wyniki eksperymentalne z lat 1989-2000 dla warunków mikrogravitacji, uzyskując w każdym przypadku lepsze dopasowanie niż najczęściej stosowany model Lockharta-Martinellogo z klasyczną zależnością Chisholma [24]. Mimo że model ich jest bardzo prosty i wymaga dopasowania do każdego wyniku eksperymentalnego, wydaje się być bardzo ciekawym modelem do zaimplementowania w konkretnych przebadanych już przypadkach. Fang i inni [36] porównali istniejące modele dla normalnej grawitacji i mikrogravitacji (do roku 2013), a następnie porównali wyniki z literatury (10 doświadczeń). Na podstawie swoich wyników uzyskali znacznie lepsze dopasowanie dla wszystkich dostępnych badań eksperymentalnych niż dla najlepszych dostępnych w tym czasie modeli gradientu ciśnienia.

2.4 Struktury przepływowe w warunkach mikrogravitacji

Zhao i inni [124] badali przepływ dwufazowy w rurce o średnicy 10 mm na rosyjskiej stacji kosmicznej Mir, używając organicznego związku chemicznego (wycofanego z użytku węglodloru, ang. carbogal) oraz wody jako czynników roboczych, a następnie opracowali mapy przepływu na podstawie prędkości cieczy i gazu. Podobnie, kilka lat później, Choi i inni [25] analizowali przepływ wody i powietrza w rurce o średnicy 10 mm podczas lotu parabolicznego. Ich wyniki potwierdzają, że największa różnica pomiędzy $0g$, $1g$ i $2g$ występuje przy przepływach z niską prędkością, natomiast dla dużych prędkości na wyniki nie ma wpływu poziom grawitacji. Lowe i inni [68] na podstawie przepływu w rurce o średnicy około 9,5 mm i opracowali model oparty na liczbie Webera, który okazał się przewidywać zarówno przejścia pomiędzy strukturą korkową a przejściową, jak i dla przejścia pomiędzy przepływem przejściowym a pierścieniowym. Bousman i inni [17] przebadali kanały o średnicach przekroju kołowego 12,7 mm i 25,4 mm w locie parabolicznym. Zastosowali oni trzy cieczki: wodę, mieszaninę wody i gliceryny oraz wodę z surfaktantem. W zakresie ich badań, na lokalizację przejścia od przepływu korkowego do kanalikowego nie ma wpływu średnica kanału, lepkość płynu, ani napięcie powierzchniowe. Czynniki te miały wpływ jedynie na przejście pomiędzy przepływem pęcherzykowym i korkowym.

Jeśli chodzi o geometrię kanału, prawie wszystkie badania koncentrują się na przekrojach kołowych, jednak istnieje również kilka badań uwzględniających inne geometrie. Na przykład Zhao i inni [127] badali średnice o przekroju kwadratowym i wymiarach $12 \times 12 \text{ mm}^2$, opracowując empiryczny model oparty na liczbie Webera. Określili oni próg przejścia pomiędzy przepływem pęcherzykowym a korkowym oraz pomiędzy przepływem korkowym a pierścieniowym. W kolejnej pracy Zhao i inni [126] wykorzystali kanał o wymiarach $1 \times 1 \text{ mm}^2$ i według ich danych, przejście pomiędzy przepływem pęcherzykowym i korkowym w kanałach o przekroju kołowym i kwadratowym jest widoczne w podobnym zakresie parametrów przepływu, co oczywiście średnice hydrauliczne muszą być takie same. Jednakże ich badania w tym zakresie ograniczały się do kanałów kapilarnych i z powodu braku wyników dla większych prędkości nie byli w stanie zaobserwować przejścia do przepływu pierścieniowego. Jak pokazują, w przypadku modelowania w tzw. małej skali, tj. przy użyciu modeli z grawitacją ziemską i średnicą kapilary do symulacji

2.4. Struktury przepływowe w warunkach mikrogravitacji

zachowania większej średnicy w mikrogravitacji, nie było możliwe przewidzenie przejścia między przepływem pęcherzykowym a korkowym.

Niemniej jednak, istnieją modele z powodzeniem stosowane do przewidywania struktur przepływu w mikrogravitacji. Według wiedzy autora, najobszerniejszą pracę przeglądową dotyczącą przepływu dwufazowego w mikrogravitacji napisał Zhao [125]. W pracy tej opisał i przeanalizował większość modeli map przepływu i strat ciśnienia opartych na danych doświadczalnych. Najczęściej stosowane modele analityczne map przepływowych są następujące:

1. Dukler i inni [32] – oparty na prędkości fazy ciekłej i gazowej.
2. Bousman [17] – oparty na liczbie Webera dla fazy ciekłej i gazowej.
3. Jayawardena i inni [51] – oparte na liczbie Reynoldsa i Suratmana.

Wszystkie te modele, według wielu autorów, dawały równie dobre przewidywania przejścia pomiędzy charakterystykami przepływu.

Kryterium przejścia struktury przepływowej potwierdzające wyniki eksperymentalne przedstawili między innymi Situ i inni [99], którzy stwierdzili zgodnie z wynikami pomiarów, że mikrogravitacja i częściowa mikrogravitacja ($0,020$, $0,165$, $0,378 g_0$) w porównaniu do poziomu grawitacji ziemskiej ma silny wpływ tylko wtedy, gdy wartość prędkości przepływu jest stosunkowo niewielka. Modelowanie CFD z wykorzystaniem metody Volume of Fluid (VoF) dla grawitacji o zmniejszonej wartości przedstawili Liu i inni [66] dla średnic w zakresie od 7 do 10 mm i dla poziomów grawitacji $10^{-4}g_0$, $0,17g_0$, $0,38g_0$ i $1g_0$. Potwierdzają one, że przy dużych prędkościach przepływu wpływ mikrogravitacji jest niewielki, natomiast przy małych prędkościach różnica w charakterystykach przepływu nie może być pomijana. Autorzy niedawno opublikowanych prac dotyczących numerycznego modelowania CFD przepływu bąbli Taylora [8] oraz przepływu samo-wzbudzanego gradientem temperatury [16], podkreślają jednak, że nadal potrzebne jest wiele prac eksperymentalnych pozwalających na weryfikację prac teoretycznych. Andredaki i inni [8] skupili się na modelowaniu CFD rozpadu bąbli parowych, proponując nową mapę przepływu dla przyspieszonego przepływu w kanałach kapilarnych. W celu oceny wyników, model CFD został również porównany z przypadkami wzorcowymi (ang. benchmark) [105, 39]. Błasiak i inni [16] analizowali termicznie wzbudzany przepływ dwufazowy z wykorzystaniem modelowania CFD. Porównanie dostępnych modeli z wynikami badań eksperymentalnych pozwoliło na weryfikację porównywanych modeli i otrzymanych wyników numerycznych.

2.5. Średnica krytyczna w warunkach mikrogravitacji

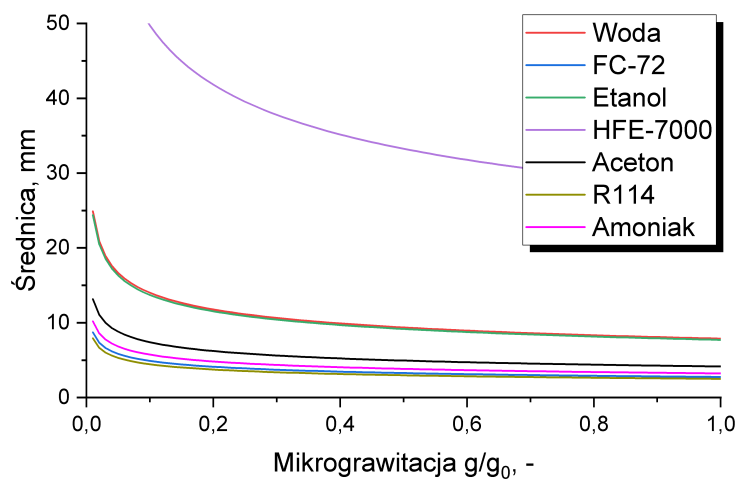
Polegało ono na obserwowalnym porównaniu reżimów przepływu oraz liczbowym porównaniu prędkości przepływu. Na tej podstawie autorzy dokonali wyboru najlepszego modelu numerycznego autorstwa Xu et al. [114], jednak jak wspomniano autorzy zwracają uwagę na nadal ograniczoną liczbę dostępnych badań eksperymentalnych.

Badania eksperymentalne przepływów dwufazowych w kanałach wymagają określenia parametrów podlegających kontroli i obserwacji. Do najważniejszych, które należy określić należą: prędkość, przyspieszenie i struktura przepływu. To właśnie korelacja pomiędzy prędkością i charakterystyką przepływu jest zwykle uważana za najważniejszą przy charakteryzowaniu map przepływowych. Dopiero niedawno zwrócono uwagę, że duży wpływ mogą mieć zaburzenia wynikające przyspieszenia przepływu, przewidując jednocześnie znaczną liczbę potencjalnych zastosowań [89]. Intuicyjnie można się spodziewać, że przepływ, w którym prędkość maleje do zera, a następnie zmienia kierunek, będzie miał znaczący wpływ na charakterystykę przepływu. Dlatego ważne jest, aby określić, czy istniejące modele oparte na warunkach ustalonych są w stanie przewidzieć potencjalnie występujące struktury przepływowe.

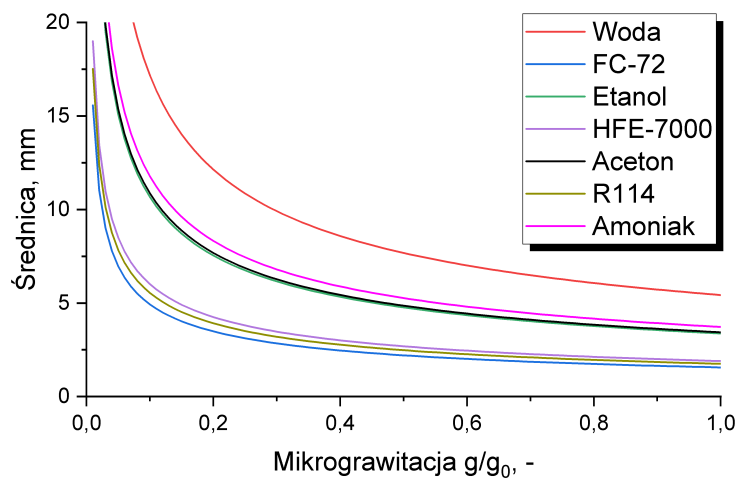
2.5 Średnica krytyczna w warunkach mikrogravitacji

Dotychczasowe badania pulsacyjnych rurek ciepła w mikrogravitacji opierały się głównie na kryterium Bonda. Na przykład Kawaji [6] dla czynnika roboczego R-114, określił zakres krytycznej średnicy kanału kapilarnego jako 0,5 do 2,0 mm, w kolejnej pracy Gu, Kawaji i inni [41] i wykorzystując zmodyfikowane kryterium Webera dla tego samego czynnika roboczego określili krytyczną średnicę jako 5 mm. Gu i inni [42] przeprowadzili badania w locie parabolicznym i z wykorzystaniem nowego stanowiska o średnicy kanału 1,6 mm dla czynnika roboczego R-114 oraz na wcześniejszym stanowisku badawczym [41] dla czynnika R-134a. Ando i inni [7] badali nowatorską metodę wymuszania przepływu kierunkowego w PHP z wykorzystaniem zaworów zwrotnych i średnicy kanału 0,8 mm dla czynnika roboczego R-134a. Wszystkie te stanowiska były projektowane z wykorzystaniem kryteriów dostosowanych do warunków ziemskich, w związku z tym jedyne, co udało się udowodnić to fakt, że pulsacyjne rurki ciepła z powodzeniem mogą być wykorzystywane w warunkach mikrogravitacji. Dopiero niedawno Marengo i jego zespół [75, 27, 76, 71] zastosowali kryterium Garimella'ego [38] dostosowanego do mikrogravitacji, do obliczenia krytycznej średnicy kanału PHP dla czynnika roboczego FC-72 i na tej podstawie

2.5. Średnica krytyczna w warunkach mikrogravitacji



Rys. 2.8 Średnica krytyczna w zależności od poziomu mikrogravitacji - kryterium Garimelli (Kew i inni [38])



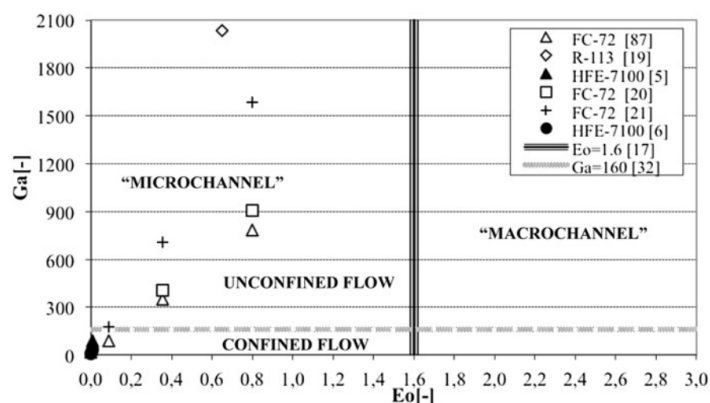
Rys. 2.9 Średnica krytyczna w zależności od poziomu mikrogravitacji - kryterium Bondi (Kew i inni [58])

2.5. Średnica krytyczna w warunkach mikrogravitacji

przeprowadzili badania ze średnicą kanału 3 mm. Po raz pierwszy w badaniach pulsacyjnych rurek ciepła w warunkach mikrogravitacji, prędkość przepływu została uwzględniona w kryterium ograniczoności, jednak przywołana definicja Garimella’i podobnie definicja bazująca na kryterium Bonda, jest stosunkiem sił grawitacji do sił napięcia powierzchniowego, a więc średnica kanału kapilarnego w idealnej mikrogravitacji byłaby nieskończona, co pokazano na rysunkach 2.8 i 2.9.

Chociaż kryterium oparte na liczbie Bonda jak i Garimella’ego wydaje się być dobrym sposobem na określenie granicy pomiędzy mikro- i makroprzepływami, wyniki doświadczalne tego nie potwierdzają, co nie pozwala na ostateczne określenie granicy przejścia struktur przepływowych. Paradoksalnie dla grawitacji równej $0,01 g_0$ przepływ spełniałby kryterium Bonda dla średnicy wewnętrznej mniejszej niż 55 mm bez względu na prędkość, a przy założeniu prędkości równej $1 m/s$ przepływ spełniałby kryterium Garimella’ego dla średnic mniejszych niż 25 mm. Jak pokazują badania przepływu w warunkach mikrogravitacji z wrzeniem przeprowadzone przez Celata’ę i innych [20], mogą również występować przepływy w tzw. skali makro (siły napięcia powierzchniowego zdominowane przez siły inercji). W celu weryfikacji, czy kryterium Garimella’ego może być uznane za prawdziwe w warunkach mikrogravitacji, na rysunku 2.10 przedstawiono liczby Eötvös’a i Garimella’ego związane z wynikami literaturowymi w mikrogravitacji przedstawionymi w pracy Baldassari’ego i Marengo [13]. Jedynie cztery wyniki mogą być uznane za mikroprzepływy zarówno zgodnie z kryterium Garimella’ego i Bonda. Pozostałe zgodnie z tym kryterium powinny sugerować zaburzenia w przepływie, należy tu jednak podkreślić, że autorzy zakładają wartość grawitacji równą $0,01 g_0$ co jest jedynie przybliżeniem i niekoniecznie jest prawdziwe we wszystkich pokazanych badaniach. Pozostałe wymienione w publikacji prace nie opisują struktur przepływowych, w związku z tym bardzo ważnym aspektem będzie przeprowadzenie większej liczby badań doświadczalnych w tym kierunku.

2.6. Liczby kryterialne



Rys. 2.10 Weryfikacja kryterium Garimella'ego [13]

2.6 Liczby kryterialne

Wielu autorów koncentrowało swoje wysiłki na prędkości przepływu, aby skorelować warunki przepływu z jego strukturą. Jak pokazuje teoria, prędkość przepływu jest bezpośrednio związana z oporami na ściankach kanałów, a więc również z siłami bezwładności co przekłada się na strukturę przepływu. Problemem z opisywaniem wyników badań jedynie na podstawie wartości prędkości jest fakt, że geometria kanału jak również właściwości fizykochemiczne czynników roboczych zazwyczaj znacząco się różnią. Tym samym, dla każdego przypadku należałoby przeprowadzić osobne badania.

Nawet jeśli postać równania opisująca przepływ w kanałach nie jest znana, analiza wymiarowa umożliwia określenie zależności pomiędzy właściwościami fizycznymi i fizykochemicznymi oraz badanymi zjawiskami fizycznymi poprzez wyprowadzenie liczb bezwymiarowych. W poniższym podrozdziale, w sposób uproszczony zostaną opisane podstawowe liczby bezwymiarowe, które są najczęściej wykorzystywane w analizie przepływów dwufazowych jak również zostanie wyjaśnione ich zastosowanie. Na koniec przedstawiony będzie kontekst wykorzystania tych liczb w warunkach mikrogravitacji oraz zbiór pozostałych liczb bezwymiarowych, które w dalszej części pracy zostały pominięte ze względu na brak korelacji z wynikami eksperymentalnymi, lecz mogą być w przyszłości przydatne przy większej liczbie eksperymentów.

2.6.1 Teoria Π Buckinghama

Najczęściej stosowaną liczbę bezwymiarową w mechanice płynów jest liczba Reynoldsa (zaproponowana przez Osborne'a Reynoldsa w XIX wieku). W polskiej literaturze dotyczącej stosowania analizy wymiarowej, bardzo często pomija się jednak sposoby wyprowadzania liczb bezwymiarowych. Wykorzystuje się je jako wcześniej wyznaczone zależności, a sposoby ich wyznaczania opisuje analiza wymiarowa. Jednym z podejść jest twierdzenie zaproponowane w XX wieku przez Edgara Buckinghama [19] nazywane inaczej teorią Π . Zgodnie z tym twierdzeniem zależność funkcyjna między zmiennymi n może być zredukowana o liczbę niezależnych wymiarów k występujących w tych zmiennych, dając zbiór niezależnych liczb bezwymiarowych $p = n - k$.

Przykładowo strata ciśnienia w jednofazowym przepływie w rurociągu jest funkcją jego średnicy i długości oraz gęstości, lepkości i prędkości płynu. Oznacza to, że liczba zmiennych wynosi $n = 6$, a liczba niezależnych wymiarów wynosi $k = 3$ (długość L , m ; czas T , s ; masa M , kg). Ostatecznie zgodnie z twierdzeniem, zależności można zredukować do trzech ($p = 6 - 3 = 3$) niezależnych liczb bezwymiarowych:

$$\Pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho v^2} \quad (2.5)$$

$$\Pi_2 = \frac{L}{d} \quad (2.6)$$

$$\Pi_3 = \frac{\mu}{dv\rho} \quad (2.7)$$

Stosując twierdzenie Π w przypadku przepływu dynamicznego w rurce o niewielkiej średnicy, a w szczególności w warunkach mikrograwitacji, możliwe jest wyznaczenie najważniejszych liczb bezwymiarowych. Wskazane przez tę analizę liczby: kapilarna, Bonda, Reynoldsa, Webera i Froude'a zostały zestawione w górnej części tabeli 2.1 i opisane niżej. W dolnej części tabeli zestawiono pozostałe liczby bezwymiarowe, które potencjalnie mogą zostać wykorzystane w analizach, jednak ze względu na brak porównawczych badań w literaturze oraz fakt, że nie pozwoliły w niniejszej pracy wyznaczyć jednoznacznych charakterystyk zostały zebrane jedynie w celu informacyjnym.

1. **Liczba kapilarna (Ca)** jest miarą stosunku sił lepkości i sił kapilarnych. W przypadku korków cieczowych w rurce kapilarnej, liczba kapilarna może być postrzegane jako miara siły oporu pochodzącej od lepkości i siły kapilarnej lub zwilżającej. Charakteryzuje przede wszystkim grubość warstwy cieczy (δ) otaczającej fazę gazową w korku dwufazowym gaz-ciecz.

$$Ca = \frac{\mu_l v}{\sigma}$$

2. **Liczba Bonda (Bo)** reprezentuje stosunek sił grawitacyjnych i kapilarnych (napięcia powierzchniowego). Używana w konwencjonalnej definicji charakterystyczna długość to średnica kanału. Gdy $Bo < 4$ siły grawitacyjne w rozpatrywanym kanale mogą być zaniedbane, w rezultacie inne siły takie jak siła napięcia powierzchniowego, bezwładność gazu i siła ścinająca w fazie ciekłej, okazują się być najważniejszymi siłami charakteryzującymi przepływ dwufazowy.

$$Bo = \frac{gd^2(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \quad \rho_l \gg \rho_v \rightarrow \frac{\rho_l gd^2}{\sigma}$$

3. **Liczba Reynoldsa (Re)** tradycyjnie definiowana jako stosunek sił bezwładności do sił lepkości, najczęściej jest używana do określenia, czy przepływ jest laminarny czy burzliwy. Jednak biorąc pod uwagę, że rozkład prędkości w cieczy może wpływać na struktury przepływowe dwóch lub więcej faz, stosuje się ją również przy ich określaniu.

$$Re = \frac{\rho_l dv}{\mu}$$

4. **Liczba Webera (We)** stanowi miarę stosunku sił inercyjnych do sił kapilarnych. Bardzo często wykorzystywana przy opisie zjawisk zachodzących w zarówno klasycznych jak i pulsacyjnych rurkach ciepła. Jednym z najważniejszych zastosowań jest określenie kiedy ciecz płynąca w warstwie porowatej klasycznej rurki ciepła zostanie częściowo porwana i rozproszona w przepływającej parze w środkowej części rurki.

$$We = \frac{\rho_l dv^2}{\sigma}$$

5. **Liczba Froude'a (Fr)** stanowi miarę sił inercyjnych i sił pola zewnętrznego (zazwyczaj grawitacji). Najczęstszym przykładem zastosowania liczby Froude'a jest określenie wystąpienia skoku hydraulicznego, wartości nieznacznie przekraczającej jedność występuje ciąg stacjonarnych falowań swobodnej powierzchni (granicy faz).

2.6. Liczby kryterialne

Podobnie jak w przypadku liczby Webera, prędkość występuje podniesiona do drugiej potęgi co oznacza, że bardzo duże znaczenia może mieć dyssypacja energii związana z siłami inercyjnymi.

$$Fr = \frac{\rho v^2}{\rho g d}$$

Tab. 2.1 Liczby bezwymiarowe wykorzystywane w mechanice płynów dwufazowych

Nazwa	Oznaczenie	Równanie	Interpretacja	Dziedzina
Liczba Bonda	Bo	$\frac{(\rho_l - \rho_v)gL^2}{\sigma}$		
Liczba Reynoldsa	Re	$\frac{UL}{\nu}$		
Liczba Webera	We	$\frac{\rho U^2 L}{\sigma}$		
Liczba kapilarna	Ca	$\frac{\mu U}{\sigma}$		
Liczba Frouda	Fr	$\frac{U^2}{gL}$		
Liczba Fouriera??	Fo	$\frac{\alpha t}{L^2}$		
Liczba Kapitza	Ka	$\frac{\mu_l g}{(\rho_l - \rho_v)\sigma^3}$		
Liczba Schmidta??	Sc	$\frac{\nu}{L}$		

2.7 Sposoby obserwacji przepływów dwufazowych

Jak opisano w poprzednich rozdziałach, przepływ dwufazowy nawet w przypadku braku wymiany ciepła jest bardzo skomplikowany. Aby lepiej zrozumieć zjawiska w nim zachodzące stosowany jest szereg metod obserwacji, z których dwie najczęściej stosowane metody wizualizacji obejmują technikę obrazowania światłem widzialnym i radiografię neutronową. Technika obrazowania światła widzialnego jest najczęściej stosowana, ale również ograniczona ze względu na fakt, że rurki mogą być wykonane wyłącznie z przezroczystego materiału, takiego jak szkło lub kanały jednostronnie pokryte przezroczystymi materiałami. Dużo lepszym rozwiązaniem w wielu przypadkach może okazać się radiografia neutronowa, która używana jest do wizualizacji ruchów cieczy dwufazowej w rurce wykonanej z materiałów metalicznych (takich jak miedź i aluminium). W tym rozdziale, zostaną wymienione jedynie te dwie metody jako najpowszechniej stosowane i wyróżniające się prowadzeniem obserwacji w znacząco różnych warunkach. Pozostałe metody są bardzo podobnymi pod względem warunków stosowania (materiał z którego wykonane są obserwowane kanały), a umożliwiają obserwację dodatkowych parametrów (temperatura – obserwacja termowizyjna) lub zwiększają dokładność pomiaru (obserwacja protonowa).

2.7.1 Obserwacja światła widzialnego

Światło widzialne jest falą elektromagnetyczną, którą dzieli się na kilka kategorii w zależności od długości fali. Najczęściej wyróżnia się ultrafiolet, światło widzialne i podczerwień, poza tym również, promieniowanie gamma, rentgenowskie oraz mikrofałe i fale radiowe. Wykorzystanie fali elektromagnetycznej z zakresu światła widzialnego niesie za sobą szereg zalet, do których należy szeroka dostępność źródeł światła i rejestratorów oraz wyjątkowo prosty układ pomiarowy. Wspomnianą we wstępie wadą jest fakt, że jedynie niektóre materiały są wystarczająco przezroczyste w zakresie światła widzialnego i zazwyczaj posiadają jednocześnie bardzo niski współczynnik przewodzenia ciepła. Powoduje to, że większość urządzeń, w których zachodzi wymiana ciepła do czynnika roboczego musi zostać podzielona na część, w której zachodzi transfer ciepła, zazwyczaj wykonaną z materiałów metalicznych (miedź, aluminium, itp.) oraz część, w której prowadzone są obserwacje (szkło kwarcowe, szkło akrylowe, itp.). Ostatecznie uzyskujemy niepełny i niedoskonały obraz pracy urządzenia ze względu na zaburzenia w przepływie masy, w szczególności na połączeniu materiału przezroczystego i metalicznego.

2.7. Sposoby obserwacji przepływów dwufazowych

Ciecz dwufazowa porusza się w środku kanału ze znaczną prędkością, a w przypadku rurek ciepła, jest to ruch oscylacyjny ze znacznymi wartościami przyspieszenia. Powoduje to, że najważniejszą zasadą, którą powinien się kierować eksperymentator, jest dobór odpowiednio silnego źródła światła, pozwalającego na rejestrowanie obrazu z krótkim czasem naświetlania oraz dobór kamery rejestrującej obraz ze wystarczającą częstością. W przypadku większości badań nad PHP przyjmuje się [70], że wystarczającą wartością będzie 1000 fps. Drugą ważną kwestią przy doborze urządzenia rejestrującego jest jego rozdzielczość, w zależności od tego, co jest celem doświadczenia, można przyjąć różne minimalne zakresy rozdzielczości. Przykładowo, jeśli celem jest rejestracja długości przepływającego bąbla parowego L_v , w obserwowalnej długości kanału L , to zapewnienie błędu na poziomie 1% wymaga zastosowania rozdzielczości wyznaczonej ze wzoru:

$$N_{px} = \frac{L}{0,01L_v} \quad (2.8)$$

Jeśli przyjmiemy następujące wartości długości:

$$L = 300 \text{ mm}$$

$$L_v = 20 \text{ mm}$$

To ostatecznie otrzymamy minimalną wartość rozdzielczości równą:

$$N_{px} = 1500 \text{ px}$$

2.7.2 Obrazowanie neutronowe

Obrazowanie neutronowe jest techniką obrazowania wykorzystującą neutrony jako źródło światła. Podstawową zaletą tego rozwiązania jest wykorzystanie jego właściwości przenikania materiałów nieprzezroczystych dla innych technik obrazowania, działanie jest podobne jak w przypadku promieniowania rentgenowskiego najczęściej stosowanego w medycynie. Urządzenia do obrazowania neutronowego składają się głównie z trzech części: źródła wiązki neutronów, badanej próbki i detektora, czyli analogicznie jak w przypadku obrazowania światłem widzialnym. Wiązka neutronów jest wytwarzana ze źródła neutronów, a następnie część neutronów jest pochłaniana lub rozpraszana podczas uderzenia w próbkę, a pozostała część neutronów przenika przez próbkę i dociera do detektora.

2.7. Sposoby obserwacji przepływów dwufazowych

Na podstawie ilości zebranych neutronów przez detektor, urządzenie pomiarowe przekształca tę informację na ostateczny obraz. Najważniejszą zaletą tej metody obrazowania jest niski współczynnik tłumienia (absorpcji) neutronów przez miedź lub aluminium, a jednocześnie wysoki współczynnik tłumienia dla wodoru. Jeśli więc czynnik roboczy wykorzystany w układzie składa się między innymi z atomów wodoru (woda, aceton, itp.), to w obszarze fazy ciekłej wiązka neutronów zostanie wytłumiona, a w obszarze fazy gazowej będzie wytłumiona zdecydowanie słabiej.

Z punktu widzenia obserwacji przepływu w pulsacyjnych rurkach ciepła jest to metoda nieporównywalnie doskonalsza niż obserwacja z wykorzystaniem światła widzialnego. Jednak ze względu na ograniczone dostępne miejsce w trakcie badań oraz skomplikowanie samego urządzenia została odrzucona na etapie przeglądu literatury. Dodatkowym argumentem przemawiającym za odrzuceniem obrazowania neutronowego jest fakt, że w przypadku przepływu adiabatycznego nie ma wymogu co do wykorzystania materiału, z którego wykonany jest rurka, możliwe jest w związku z tym wykorzystanie materiału przezroczystego w zakresie światła widzialnego.

2.7.3 Podsumowanie

W powyższym rozdziale przedstawiono dwie najczęściej stosowane metody obrazowania przepływu dwufazowego. Celem rozdziału było określenie, która z tych metod jest bardziej odpowiednia w badaniach będących przedmiotem rozprawy. Ze względu na dostępność urządzeń oraz fakt, że badany był adiabatyczny przepływ dwufazowy, wybrana została metoda obrazowania światłem widzialnym. Na podstawie prostych obliczeń wyznaczona została również minimalna rozdzielczość urządzenia rejestrującego, dla którego błąd pomiaru długości bąbla nie będzie przekraczać 1% (rozdzielczość wzdłuż rurki około 1500 px).

Rozdział 3

Cel, teza i zakres pracy

Niniejsza praca dotyczy analizy eksperymentalnej, mającej na celu lepsze poznanie procesów zachodzących w przepływie dwufazowym, w kanałach cylindrycznych w warunkach mikrogravitacji. Praca dotyczy przepływów charakterystycznych dla pulsacyjnych rurek ciepła, tj. przepływów nieustalonych, w których przyspieszenie przepływu ma niezerową wartość. Średnice hydrauliczne kanałów zostały dobrane w taki sposób, aby przekraczały kryterium kapilarności wyznaczone dla warunków ziemskich. Celem głównym rozprawy jest identyfikacja struktur przepływowych w warunkach mikrogravitacji, co pozwoli na opracowanie nowej liczby kryterialnej korelującej strukturę przepływową z parametrami przepływu.

Jak pokazało studium literaturowe, nawet istniejące już modele przewidujące dwufazowe struktury przepływowe w warunkach ziemskich są przedmiotem ciągłych ulepszeń i badań doświadczalnych. Natomiast w warunkach mikrogravitacji brak składowej przyspieszenia grawitacyjnego, powoduje, że zjawiska zachodzące w przepływie są jeszcze bardziej skomplikowane, a dotychczasowe badania w mikrogravitacji prowadzone przez wielu autorów skupiały się przede wszystkim na tzw. przepływach ustalonych, tj. o stałej prędkości. Istnieje kilka prac, których wyniki wprost pokazują, że nieuwzględnienie możliwości wystąpienia przyspieszonego przepływu prowadzi do znacznych różnic w porównaniu istniejących kryteriów i wyników badań eksperymentalnych. Najważniejszym wnioskiem płynącym z przeglądu literatury jest nie tylko ograniczona liczba badań dotyczących przepływu przyspieszonego (lub spowalniającego), ale również brak badań, w których przepływ w kanale może zmienić swój kierunek.

Na podstawie przeprowadzonego studium literatury, z uwzględnieniem aktualnego trendu badań eksperymentalnych, treść tezy niniejszej pracy została zdefiniowana następująco:

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 średnice charakterystyczną, siły powierzchniowe, gęstość i lepkość czynnika roboczego oraz prędkość charakterystyczną.

Dodatkowo, w ramach pracy, zdefiniowano cele pomocnicze stanowiące pomoc w uzyskaniu celu głównego:

1. Wytypowanie parametrów wpływających na procesy zachodzące w kanałach kapilarnych.
2. Wstępne sformułowanie liczby kryterialnej niezależnej od składowej grawitacyjnej.
3. Zaprojektowanie oraz wykonanie stanowiska badawczego.
4. Przeprowadzenie badań w warunkach mikrogravitacji.
5. Analiza wyników otrzymanych z doświadczenia w warunkach mikrogravitacji.
6. Korelacja wyników eksperymentalnych z wartościami liczby kryterialnej oraz opracowanie zaleceń projektowych pulsacyjnych rurek ciepła do zastosowań kosmicznych.

Rozdział 4

Stanowisko badawcze

Podstawowym celem pracy jest identyfikacja struktur przepływowych występujących w pulsacyjnej rurce ciepła w warunkach mikrogravitacji. Jak pokazała analiza literaturowa przedstawiona w rozdziale 2, istnieje kilka badań zarówno teoretycznych, jak i eksperymentalnych pokazujących, jakie zjawiska przepływowe zachodzą w PHP. Wiadomo również, że przeprowadzone zostały już pierwsze podejścia do zdefiniowania, przy jakich warunkach dochodzi do takich zjawisk jak rozpad i łączenie bąbli parowych [39, 89] czy zmian grubości filmu cieczowego [44]. Jednak nadal brak jest jednoznacznego kryterium potwierdzonego przez niezależne zespoły badawcze, który definiowałyby, kiedy należy spodziewać się odpowiedniej struktury przepływowej. Opracowane i wybudowane stanowisko badawcze, które zostało zaprezentowane w poniższym rozdziale, pozwoli na poszerzenie wiedzy związanej ze wspomnianymi zjawiskami.

Jak pokazano w przeglądzie literaturowym, nie jest możliwe przeprowadzenie badań przepływu dwufazowego w warunkach ziemskiej grawitacji, symulujących przepływ w warunkach mikrogravitacji. Natomiast głównym problemem związanym z badaniami w warunkach mikrogravitacji jest to, że jedynie w kilku ośrodkach na świecie istnieją instalacje umożliwiające ich osiągnięcie. Pierwszym sposobem, który mógłby zostać zaproponowany, jest umieszczenie badanego urządzenia lub obiektu w statku kosmicznym lecącym na orbicie okołoplanetarnej, a najsłynniejszym ośrodkiem prowadzącym takie badania jest Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (ISS) na niskiej orbicie okołoziemskiej (LEO). Trzy najważniejsze powody, dla których jest to nadal najlepszy sposób na uzyskanie mikrogravitacji to: teoretycznie nieograniczony i nieprzerwany czas trwania eksperymentu; jakość mikrogravitacji na poziomie $g = 10^{-4}g_0$ przez większość trwania badań poza momentami, w których przeprowadzane są prace na stacji (np.: przyłączanie kapsuły transportowej); obsługa eksperymentu przez doświadczoną załogę kosmonautów, co pozwala na korektę badań, np. w celu zmiany warunków brzegowych. Badania wykonane w ramach rozprawy zostały zaprojektowane, w sposób pozwalający na przeprowadzenie ich w bardzo krótkim czasie (<10 s), co powoduje, że nie jest wymagane wykorzystanie stacji kosmicznej.

Co więcej, większość badań prowadzonych na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej zostało wcześniej przeprowadzone z wykorzystaniem innych infrastruktur badawczych.

W kolejności dostępnego czasu trwania jest lot paraboliczny, szczególnym przypadkiem takiego lotu jest wykorzystanie tzw. rakiety sondującej (ang. sounding rocket), która w sprzyjających warunkach pozwala na osiągnięcie 15 min mikrograwitacji o jakości $g = 10^{-5}g_0$. Drugim często wykorzystywanym sposobem jest lot paraboliczny na pokładzie samolotu, który pozwala na badanie w czasie wahającym się zazwyczaj w zakresie od 20 do 25 s, jego wadą jest jednak stosunkowo niska jakość mikrograwitacji na poziomie około $g = 10^{-2}g_0$.

Ostatnią infrastrukturą badawczą pozwalającą jednak na najkrótszy czas badań jest wieża zrzutów (od 1 do 9 s). Jej zaletą jest jakość mikrograwitacji, która zazwyczaj nie przekracza $g = 10^{-6}g_0$ oraz możliwość wykonania wielu badań w krótkim czasie (w porównaniu do wspomnianych platform). Na świecie istnieje kilka wież zrzutów, które osiągają czasy dłuższe od 2 s (między innymi w Stanach Zjednoczonych i Japonii). Tak krótki czas badań pozwala jednak przeprowadzić jedynie eksperymenty charakteryzujące się niemal zerową inercją. Istnieje tylko jedna infrastruktura na świecie, w której możliwe jest uzyskanie dłuższego czasu mikrograwitacji. Ośrodek badawczy ZARM Drop Tower w Bremen na terenie Niemiec jest jedynym ośrodkiem, który z pomocą specjalnego systemu katalpuly [109] pozwala na przeprowadzenie badań w ciągu 9,3 s nawet 3 razy w ciągu jednego dnia.

To właśnie ten ośrodek został w pracy wytypowany jako najbardziej odpowiedni do przeprowadzenia badań będących tematem niniejszej rozprawy doktorskiej. Jakość mikrograwitacji pozwoliła na pominięcie wpływu dodatkowych składowych przyspieszenia i tym samym rozpatrywaniu jedynie sił inercyjnych pochodzących od prędkości i przyspieszenia przepływu oraz sił napięcia powierzchniowego. W poniższych podrozdziałach zostanie przedstawiona koncepcja stanowiska badawczego, omówione komponenty, z których składa się stanowisko oraz zostaną określone niepewności pomiarowe najważniejszych elementów pomiarowych. Najważniejszym celem projektowanego stanowiska badawczego była poprawna realizacja założeń eksperymentu oraz osiągnięcie wyników, które po dalszej obróbce pozwolą udowodnić lub obalić tezę postawioną w rozdziale 3. Drugim najważniejszym celem, który był wymagany do pełnego sukcesu kampanii pomiarowej, było połączenie wszystkich elementów w taki sposób, by przeciążenia podczas startu (dochodzące do wartości $40g_0$) oraz podczas lądowania (dochodzące do wartości $50g_0$) nie spowodowały

4.1. Zasada działania

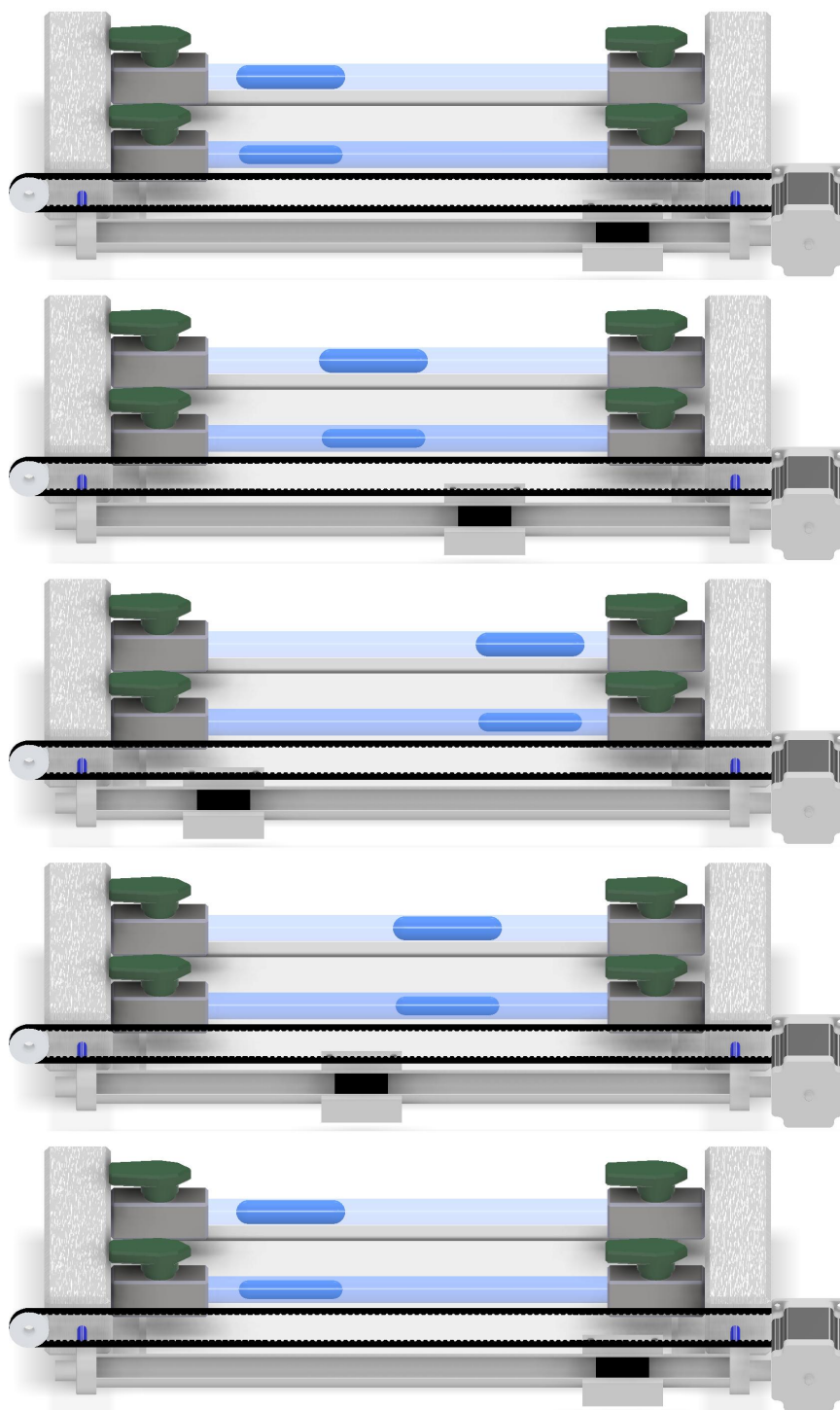
wały uszkodzenia stanowiska. Wynika to bezpośrednio z warunków, które oddziałują na badane stanowisko w trakcie eksperymentu. Przed osiągnięciem mikrograwitacji kapsuła wraz z zamontowanym w niej urządzeniem jest poddana przyspieszeniu związanym z katapultowaniem u podstawy wieży, następnie przez 9 s możliwe jest badanie zjawiska. Zakończenie lotu amortyzowane jest z wykorzystaniem cylindra wypełnionego granulkami polistyrenu (<10 mm), jednak pomimo amortyzowanego lądowania przeciążenia osiągają wartości nawet do 50 g. Na każdym kroku projektowania uwzględniane były powyższe cele, jednak nawet tak dokładna kontrola realizowana przez prowadzących badania oraz konsultacje z producentami każdego urządzenia, nie pozwoliła na całkowite ominięcie awarii. Autor uważa, że również ten element powinien zostać wspomniany, aby kolejni badacze byli w stanie zaprojektować stanowisko bez wspomnianych wad.

4.1 Zasada działania

Celem nadrzędnym badań była identyfikacja struktur przepływowych w pulsacyjnych rurkach ciepła. Ponieważ czas eksperymentu w wieży zrzutów jest znacząco ograniczony, wymagane było inne podejście niż w standardowych badaniach PHP. Po pierwsze brak jest możliwości osiągnięcia ustalonej pracy, co pokazali również Mangini i inni [76], osiągając stan pseudo-ustalony dopiero po około 15-20 sekundach. Drugim aspektem jest chłodzenie układu, wieże zrzutów są wyposażone w chłodzone obiegi wodne, możliwe jest więc zapewnienie chłodzenia przed startem eksperymentu, jednak na około 10 minut przed startem układ ten jest odłączany, co powoduje, że sekcja skraplacza PHP nie pracowałaby w stałej temperaturze. Ostatnim i według autora najważniejszym problemem, z którym należałoby się zmierzyć, jest kwestia chaotycznego charakteru procesu, według którego pracuje PHP. Oznacza to, że w trakcie badań nie byłoby możliwości kontroli nad obserwowanym zjawiskiem i należałoby wykonać wiele doświadczeń, z których tylko nieliczne pozwalałyby na wykorzystanie w dalszej analizie.

Wszystkie te argumenty przemawiają za tym, żeby mieć pełną kontrolę nad przepływem w rurce. Jest to możliwe jedynie wtedy, gdy jest on kontrolowany mechanicznie i właśnie to podejście zostało wykorzystane przy projektowaniu stanowiska. Wymuszenie przepływu zaczyna się poprzez układ mechaniczny dokładniej opisany w podrozdziale 4.3 połączony z beztłoczkowym siłownikiem pneumatycznym ze sprzężeniem magnetycznym, a kończy na układzie przepływowym przedstawionym w rozdziale 4.2. Siłownik

4.1. Zasada działania



Rys. 4.1 Schematyczne działanie stanowiska badawczego

4.1. Zasada działania

pneumatyczny pod wpływem ruchu wymusza przepływ z jednej komory do drugiej, tym samym generując przepływ w szklanych rurkach. Na rysunku 4.1 pokazano schematycznie działanie stanowiska. Wyzwaniem może być dostosowanie średnicy siłownika beztlóczyskowego w taki sposób, żeby możliwe było wykorzystanie go dla jak najszerszego spektrum parametrów wymuszających przepływ. Na podstawie założonych prędkości (Spinato i inni [101]) oraz równania 4.1 wyznaczono średnicę minimalną siłownika.

$$D_{capMax}^2 \cdot v_{max} = D_{sil}^2 \cdot v_{sil} \quad (4.1)$$

Gdzie:

D_{capMax} - maksymalna średnica rurki szklanej

v_{max} - maksymalna przewidywana prędkość przepływu w szklanej rurce

D_{sil} - przewidywana średnica siłownika beztlóczyskowego

v_{sil} - wynikowa maksymalna prędkość tłoczyska siłownika

Maksymalna prędkość tłoczyska została dobrana w taki sposób, żeby przy wszystkich założonych parametrach wymuszenia przepływu nie przekroczyła bezpiecznej granicy ruchu (nie nastąpiła kolizja z innymi elementami stanowiska). Innymi słowy tłoczysko nie powinno dotrzeć do skrajnych położeń, co zostało zapewnione z wykorzystaniem czujników krańcowych oraz obliczone na podstawie maksymalnej prędkości i przyspieszenia według wyrażenia 4.2.

$$v_{sil} = \frac{ds}{dt} \quad (4.2)$$

Natomiast biorąc pod uwagę, że idealny przepływ oscylacyjny można opisać funkcją okresową to również równanie ruchu tłoka można zapisać jako:

$$s = \frac{L_{sil}}{2} \cos(2\pi ft) \quad (4.3)$$

Po podstawieniu do równania 4.2 otrzymujemy:

$$v_{sil} = -\pi f L_{sil} \sin(2\pi ft) \quad (4.4)$$

Po przekształceniu równań 4.3 i 4.4 oraz podstawieniu do równania 4.1 łatwo zauważyć, że:

$$D_{sil} = D_{capMax} \sqrt{\frac{v_{max}}{\pi f L_{sil}}} \quad (4.5)$$

4.2 Opis stanowiska - część przepływowa

Najważniejszym celem opracowanego stanowiska eksperymentalnego było zbadanie wpływu sił inercyjnych pochodzących od przyspieszenia przepływu w kanałach kapilarnych w warunkach mikrogravitacji na obiekcie badawczym ZARM Drop Tower. Najważniejszym powodem zastosowania tej infrastruktury jest bardzo niska wartość przyspieszenia resztkowego, które w pozostałych rozpatrywanych platformach są wynikiem oporów powietrza, pracy silników lub innych urządzeń pracujących równolegle. Dzięki temu w analizach wyników możliwe jest badanie wpływu sił inercyjnych przy pominięciu sił innych niż te pochodzące od wymuszonego przepływu. Kanały mają wymiary, które nie spełniają kryterium ograniczoności w warunkach ziemskich. Inaczej mówiąc, badane średnice przekraczają kryterium kapilarności zdefiniowane w dalszej części rozdziału. Celem jest określenie map przepływowych zjawisk tzw. łączenia i rozpadu bąbli parowych napędzanych siłą bezwładności, dla dwóch wybranych płynów, różnych średnic i różnych warunków wymuszonych oscylacji.

Koncepcja tego eksperymentu polegała na zastosowaniu średnicy kanału nieco większej niż średnica kapilarna obliczona dla warunków ziemskich, zdefiniowanej przez Kew i Cornwella [58]. Średnica krytyczna jest definiowana poprzez stosunek siły przyspieszenia grawitacyjnego do siły napięcia powierzchniowego, a stosując analizę wymiarową, można wykazać, że liczba Bondy wyrażona równaniem 4.6 jest najbardziej odpowiednia. Ponadto, w celu określenia wartości krytycznej dla przepływu korkowego, przyjmuje się, że liczba Bondy nie może przekraczać wartości 4, co wykazali Kew i Cornwell [58]. Biorąc pod uwagę to założenie oraz wartości właściwości fizycznych cieczy roboczej podane w tabeli 4.3, średnica krytyczna jest równa 3,37 mm dla etanolu i analogicznie 1,56 mm dla FC-72.

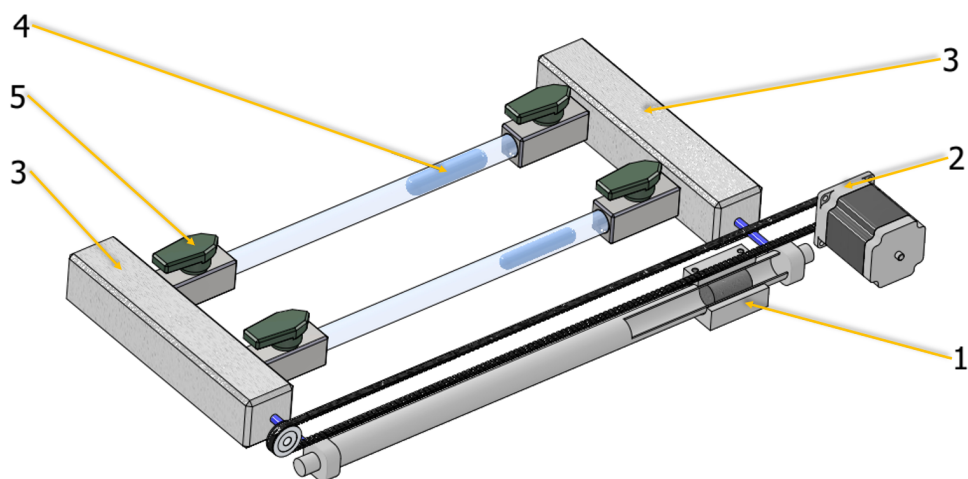
$$D_{crit} = 2\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (4.6)$$

Zaprojektowany układ eksperymentalny umożliwia dokładną kontrolę kluczowych parametrów przepływu oscylacyjnego, czyli częstotliwości i amplitudy. W uproszczonej wersji konstrukcja stanowiska badawczego pokazana jest na rysunku 4.2, a kompletne stanowisko zawierające wszystkie elementy i umieszczone w kapsule pokazane jest na rysunku 4.3.

Część przepływowa składa się z zaadaptowanego siłownika pneumatycznego wymuszającego przepływ D16x200 (1), poliuretanowych przewodów łączących (2), dwóch ko-

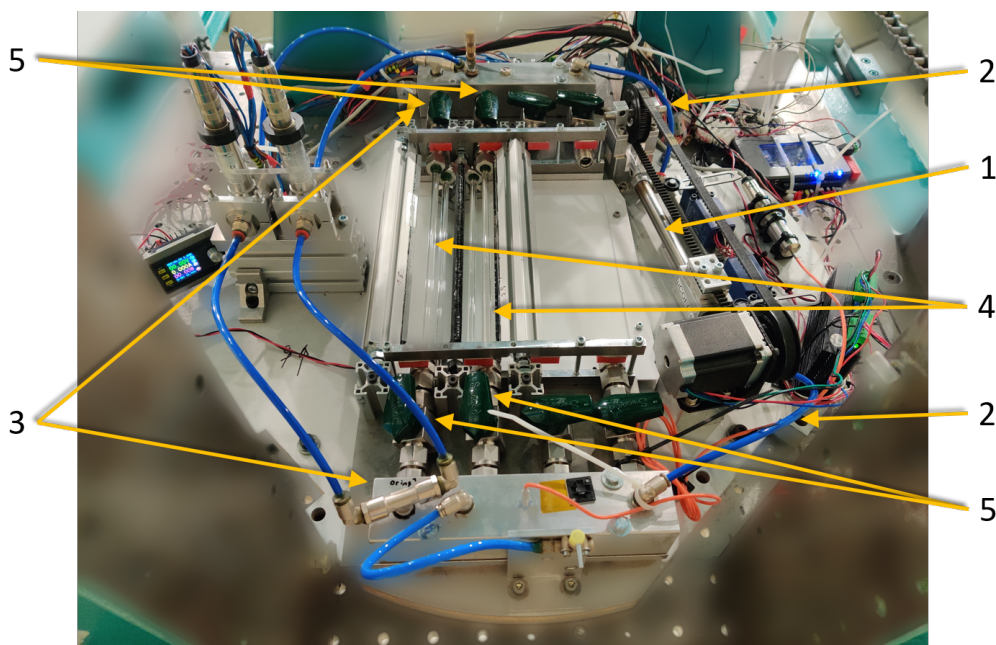
4.2. Opis stanowiska - część przepływowa

lektorów (3) oraz szklanych rurek o różnych średnicach wewnętrznych i jednakowej długości (4). Układ doświadczalny umożliwia wymuszenie przepływu przez cztery rurki szklane jednocześnie. Jednak ze względu na duże obciążenia mechaniczne, na jakie narażona jest kapsuła podczas startu i lądowania (stanowisko badawcze w kapsule musi wytrzymać obciążenie równoważne 50 g) oraz ograniczone możliwości nagrywania szerokiego obrazu, wykorzystywano jedynie dwie rurki szklane, a rurki zapasowe oraz system zaworów Swagelok® SS-8P6T (5) zostały zaprojektowane w sposób umożliwiający szybką wymianę w przypadku uszkodzenia.



Rys. 4.2 Uproszczony model 3D stanowiska badawczego

4.3. Opis stanowiska - część mechaniczna



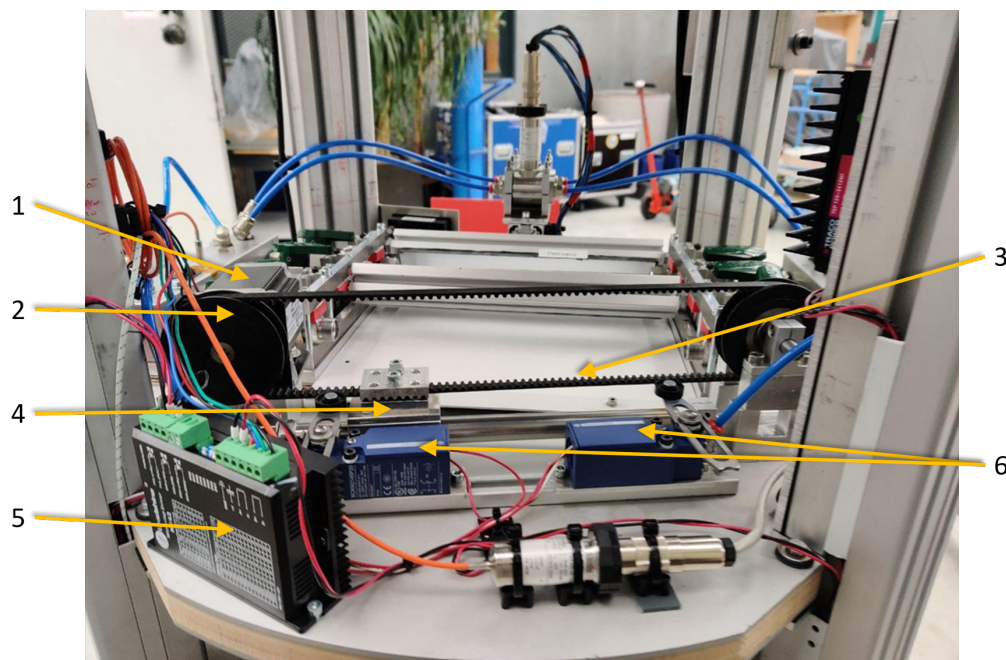
Rys. 4.3 Zdjęcie stanowiska badawczego - część przepływowa

4.3 Opis stanowiska - część mechaniczna

Część mechaniczna odpowiada za precyzyjne wymuszenie ruchu wewnętrznej części tłoka w cylindrze siłownika, który wymusza przepływ. Ruch posuwisto-zwrotny może być realizowany na wiele sposobów, jednak ze względu na precyzję i szeroki zakres prędkości, który może zostać zastosowany, wybrano silnik krokowy SM 57/76-2804A (1) połączony poprzez koło zębate (2) oraz pasek klinowy (3) z magnetycznie sprzężoną zewnętrzną częścią tłoka (4). Sprzężenie magnetyczne odpowiada za przełożenie ruchu zewnętrznej części tłoka na ruch części wewnętrznej. Zabudowane magnesy neodymowe pozwalają na przeniesienie sił wystarczająco dużych, żeby można było uznać, że opóźnienie ruchu wynikające z bezwładności masowej było mierzone w μs , czyli uznane za pomijalnie małe. Sterowanie silnika zostało zaprogramowane w mikrokomputerze National Instruments[®] myRIO (umieszczone w pobliżu elementów sterujących dostarczonych przez instytut ZARM) i przekazane sygnałem impulsowym do sterownika silnika krokowego Leadshine[®] M542 (5). Bezpieczeństwo stanowiska zostało zapewnione dzięki zamontowaniu dwóch czujników położenia krańcowego (6) odłączających zasilanie silnika krokowego i całkowicie zatrzymujących ruch tłoka zanim dojdzie do zderzenia. Ze względu na wysokie przeciąże-

4.4. Układ pomiarowy

nia występujące w trakcie lądowania kapsuły możliwe było tzw. utracenie kroków, czyli zatrzymania tłoka bez przekazania tej informacji do oprogramowania sterującego.

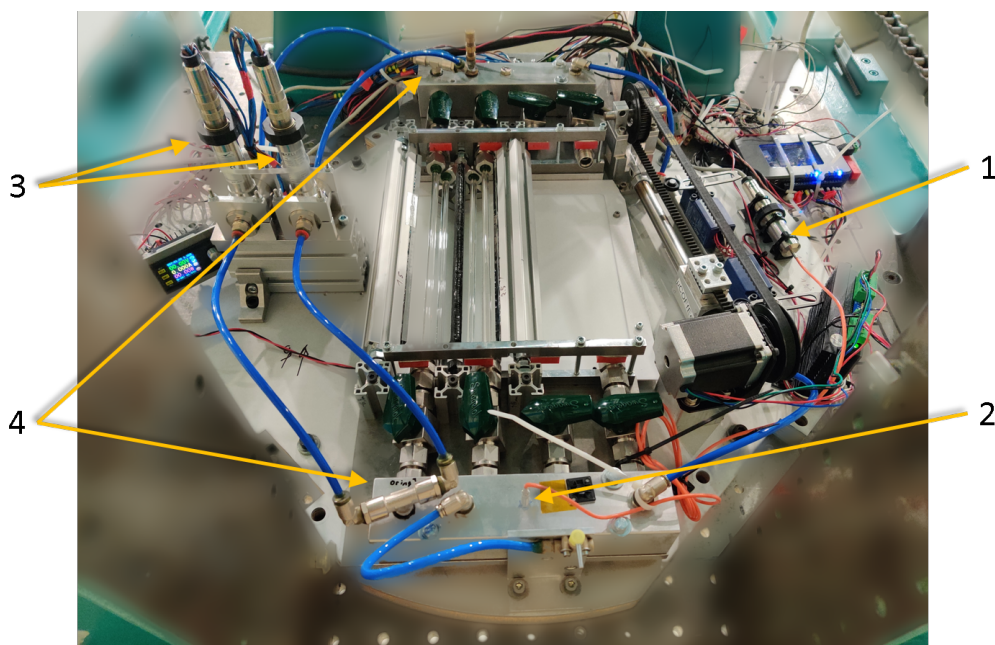


Rys. 4.4 Zdjęcie stanowiska badawczego - część mechaniczna

4.4 Układ pomiarowy

Podczas badań temperatura była rejestrowana w dwóch przypadkach, temperatura otoczenia w kapsule oraz temperatura kolektora przekładająca się na temperaturę cieczy roboczej, oba pomiary miały na celu kontrolę stałych właściwości fizykochemicznych. Wartości temperatury były mierzone przy użyciu termopar typu K ($\pm 2,2^{\circ}\text{C}$). Ciśnienie układu rejestrowano za pomocą czujnika ciśnienia absolutnego (1) zainstalowanego w środku jednego z kolektorów (2), a jego głównym celem było sprawdzenie, czy w trakcie lub przed badaniem nie wykryto nieszczelności. Piezorezystancyjny przetwornik ciśnienia posiada zakres pomiarowy 0 do 3 bar (Keller[®] M5HB), a dokładność pomiaru wynosi $\pm 0,1\%FS$ (3 mbar). Najważniejsze czujniki ciśnienia względnego (3) zostały zainstalowane w pobliżu wejścia do szklanych rurek na kolektorach, a ich celem było mierzenie różnicy ciśnień pomiędzy kolektorami, a tym samym zmierzenie spadku ciśnienia w przepływie w szklanych rurekach. Takie same piezorezystancyjne przetworniki ciśnienia mają zakres

4.4. Układ pomiarowy

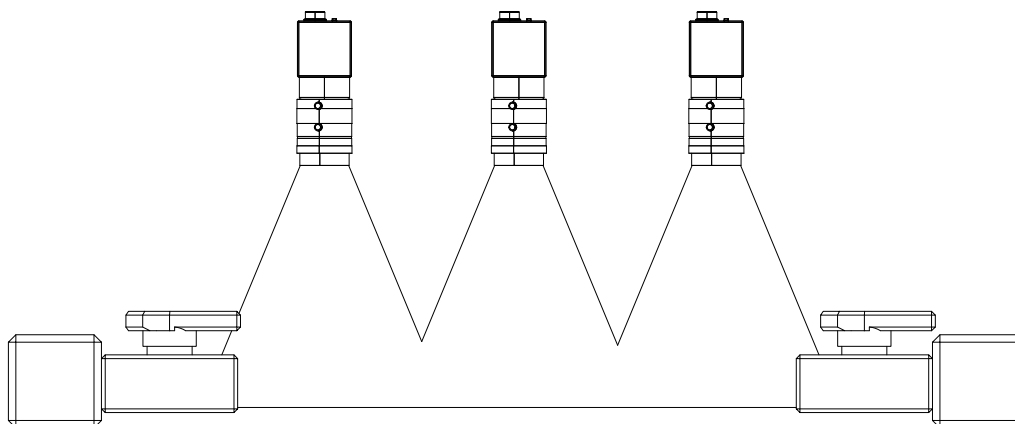


Rys. 4.5 Zdjęcie stanowiska badawczego - część pomiarowa

pomiarowy 0 do 0,3 bar (Keller[®] PD-33X), a dokładność pomiaru wynosi $\pm 0.2 \%FS$ (0,6 mbar). Wszystkie dane pomiarowe, takie jak temperatura, ciśnienie absolutne i ciśnienie względne, zostały zarejestrowane przy użyciu dostępnych w ZARM Drop Tower urządzeń, w skład których wchodzi: National Instruments[®] PXI-6031E (wejścia analogowe), PXI-6527 (zdalne sterowanie urządzeniem) oraz PXI-1000B (jednostka centralna).

Obrazy przepływu były rejestrowane przez trzy kamery (rysunek 4.6), obserwujące całą sekcję pomiarową. Do obserwacji przepływu dwufazowego w rurkach szklanych użyto dwóch szybkich systemów wizyjnych FASTCAM[™] MC2. Każdy z tych systemów ma możliwość podłączenia do dwóch głowic kamerowych zdolnych do rejestracji do 2000 fps (przy pełnej rozdzielczości i odpowiednio dużym czasie naświetlania), oraz wyposażonych w obiektywy Schneider Kreuznach[®] Xeoplan 1.4/23-0902. Ze względu na ograniczony obszar rejestracji szybkiej kamery możliwe jest nagrywanie jednocześnie maksymalnie dwóch rurek. Maksymalna rozdzielczość każdej głowicy wynosiła 512x512px, a prędkość przechwytywania obrazu ustawiono na 500 fps. Dodatkowo wykorzystano system luster (rysunek 4.7b) pozwalający na jednoczesną obserwację kanałów z kierunku prostopadłego do płaszczyzny, w której ułożone są kanały oraz z kierunku bocznego tworzącego kąt 90° z normalną do podstawy. Jest to o tyle istotne, że w kanałach większych niż kapilary, po-

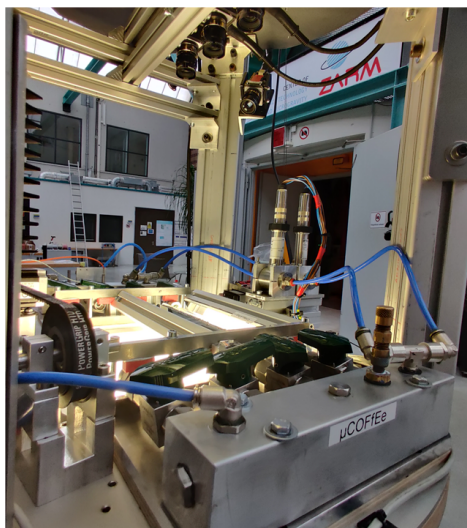
4.4. Układ pomiarowy



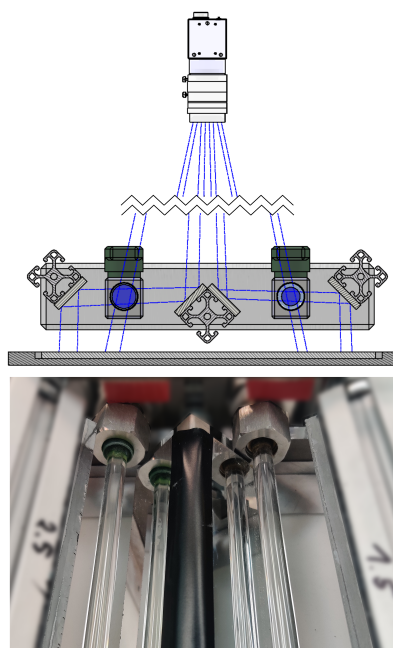
Rys. 4.6 Zakres obserwowalny przez kamery szybkoklatkowe

mimo braku sił grawitacyjnych, możliwe jest, że charakterystyka przepływu dwufazowego będzie stratyfikowana. Wysoką jakość obrazu zapewniono stosując tzw. lustro pierwszej powierzchni ($4-6\lambda$) firmy Edmund Optics[®]. W celu uzyskania jak najniższego czasu ekspozycji, zainstalowano jednorodne źródło oświetlenia – panel LED.

4.5. Procedura badawcza



(a) Zdjęcie ustawienie kamer szybkoobrotowych



(b) Ustawienie lustek uzupełniających system wizualizacji

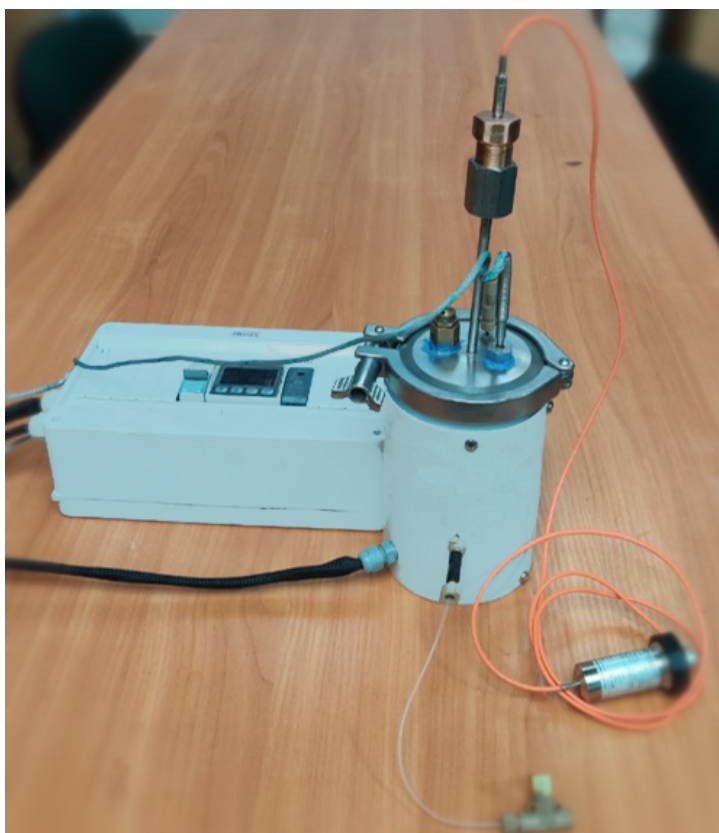
Rys. 4.7 Stanowisko badawcze – kamery szybkoobrotowe i lustra

4.5 Procedura badawcza

Przygotowanie stanowiska badawczego do eksperymentu można podzielić na dwie najważniejsze części, które muszą być ze sobą zsynchronizowane, pierwszą częścią jest przygotowanie samego stanowiska doświadczalnego, a druga część to dopasowanie się do procedur panujących w ośrodku badawczym. Standardowa procedura badawcza w ZARM Drop Tower, gdy użytkownik korzysta z tzw. katapulty, może być podzielona na cztery główne kroki:

1. Przygotowanie stanowiska badawczego w wydzielonym miejscu.
2. Zamontowanie stanowiska w kapsule, transport kapsuły na stanowisko startowe i przygotowanie stanu bliskiego próżni w wieży (ciśnienie bezwzględne poniżej 100 Pa).
3. Rozpoczęcie procedury startowej, uruchomienie systemu pomiarowego i nagrywania,

4.5. Procedura badawcza



Rys. 4.8 Układ zapewniania czynnikiem roboczym z możliwością termicznego odgazowania

a następnie rozpoczęcie eksperymentu.

4. Odzyskanie kapsuły i zapisanie danych pomiarowych.

Jedną z najważniejszych czynności przygotowawczych związanych z pierwszym etapem było odpompowanie gazów ze stanowiska badawczego do poziomu ciśnienia bezwzględnego ≤ 300 Pa, sprawdzenie szczelności detektorem helowym (Pfeiffer Vacuum[®] ASM 340). Następnie układ został napełniony czynnikiem roboczym (wodą, etanolem lub FC-72) o stałym współczynnikiem napełnienia wynoszącym 50%. Przed napełnieniem układu czynnik roboczy został odgazowany w procesie termicznym z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanego urządzenia pokazanego na rysunku 4.8. Każdy eksperyment był kontrolowany pod kątem ciśnienia nasycenia, a pomiary wskazują, że w każdym przypadku zmierzona wartość ciśnienia w porównaniu do teoretycznego ciśnienia nasycenia mieściła się w granicach błędów pomiarowego przetwornika (Keller[®] M5HB).

Wymuszony ruch siłownika został zaprogramowany w miniaturowym komputerze myRIO[™]

4.5. Procedura badawcza

(National Instruments[®]) poprzez definicję częstotliwości i amplitudę ruchu harmonicznego. Przekładają się one na prędkość i przyspieszenie przepływu oscylacyjnego w szklanych rurkach. W kapsule od początku do końca eksperymentu utrzymywane jest stałe ciśnienie około 1 atm, co pozwala na chłodzenie urządzeń elektronicznych. Po przygotowaniu stanowiska umieszczone jest w podstawie wieży zrzutów. Wewnętrzna rura wieży jest odpompowywana do ciśnienia bliskiego próżni (≤ 100 Pa) przez około godzinę. Ze względu na procedurę wytwarzania próżni, brak chłodzenia kapsuły oraz pracujące w niej urządzenia temperatura eksperymentu zmieniała w zakresie od 24 do 27 °C, co pozwoliło na przyjęcie założenia, że właściwości fizykochemiczne badanych czynników roboczych są niezależne od temperatury dla każdego eksperymentu.

Rozpoczęcie procedury startowej inicjuje szybką rejestrację różnicy ciśnień pomiędzy kolektorami oraz rejestrację za pomocą kamer szybkoklatkowych. Po wystrzeleniu kapsuły, układ sterujący odczekuje 2 sekundy, aby osiągnąć początkowy stan ustalony z charakterystyką korkową, a następnie uruchamia silnik, który wymusza zadany przepływ w kanale. Taka procedura startowa minimalizuje ryzyko uszkodzenia elementów mechanicznych przy początkowym przeciążeniu do 50g oraz pozwala na łatwe porównanie wielu eksperymentów. Następnie przez 7 sekund panują warunki mikrogravitacji, podczas których można prowadzić obserwacje przepływu. Po łącznie około 9 sekundach lotu kapsuła ląduje w materiale amortyzującym, a wieża zrzutowa zostaje wypełniona powietrzem w ciągu około pół godziny. Następnie kapsuła jest odzyskiwana, a dane są zapisywane na zewnętrznym dysku twardym.

Procedura testowa

Każdy z eksperymentów musiał być przygotowany w taki sposób, aby nie musiał być przerywany. Jest to spowodowane tym, że po umieszczeniu kapsuły w podstawie wieży zrzutów jakiegolwiek poprawki nie są możliwe. Przed badaniami została opracowana lista zadań przedstawiona w tabeli 4.1, które muszą zostać wykonane przed każdą iteracją kampanii eksperymentalnej.

Tab. 4.1 Lista zadań wykonywanych przed każdym badaniem

Przed przekazaniem stanowiska	
1	Sprawdź stan szklanych rurek
2	Sprawdź wartości ciśnienia

4.5. Procedura badawcza

- 3 Sprawdź poprawność działania panelu LED
- 4 Sprawdź nasmarowanie siłownika
- 5 Sprawdź poprawność ruchu silnika i siłownika
- 6 Sprawdź ustawienie częstotliwości
- 7 Sprawdź ustawienie amplitudy
- 8 Sprawdź wartość ciśnienia
- 9 Sprawdź ustawienia i ustawienie kamer
- 10 Sprawdź pozycję tłoka siłownika

Przed startem doświadczenia

- 1 Zatrzymaj nagrywanie - CCS stop
- 2 Uruchom nagrywanie
- 3 Przełącz nagrywanie w stan REC READY
- 4 Rozpocznij zapisywanie mierzonych parametrów
- 5 Sprawdź wartości ciśnienia
- 6 Ustaw stan wyzwalacza nagrywania na START
- 7 Sprawdź ustawienia nagrywania
- 8 Sprawdź czy panel LED działa poprawnie
- 9 Sprawdź czy każda kamera działa poprawnie

Po zakończeniu doświadczenia (po lądowaniu)

- 1 Zatrzymaj nagrywanie - CCS stop
- 2 Zapisz zmierzone parametry
- 3 Wyłącz panel LED
- 4 Sprawdź dane pomiarowe

Po odebraniu stanowiska

- 1 Pobierz nagrania i zmień nazwę
- 2 Zapisz dane i nagrania na dysku zewnętrznym
- 3 Sprawdź stan szklanych rurek
- 4 Sprawdź wartości ciśnienia

4.6 Prędkość i częstotliwość w PHP

Bardzo ważne jest odpowiednie dobranie parametrów przepływu czynnika w taki sposób, żeby badania odzwierciedlały jak największy zakres, w tym celu zastosowano metody projektowania eksperymentu [33]. Oszacowano maksymalne prędkości i przyspieszenia przepływu w pulsacyjnej rurce ciepła na podstawie wyników badań przedstawionych w literaturze [101, 100, 89], a ponieważ przepływ wielofazowy w warunkach ziemskich znacząco różni się od przepływu w mikrograwitacji, możliwe było jedynie szacunkowe dobranie parametrów początkowych, które dla założonego przepływu o charakterystyce sinusoidalnej polegało na dobraniu amplitudy i częstotliwości ruchu tłoka wymuszającego przepływ. Początkowo przyjęte parametry w trakcie badań były odpowiednio korygowane w celu zaobserwowania zjawisk rozpadu i łączenia bąbli parowych.

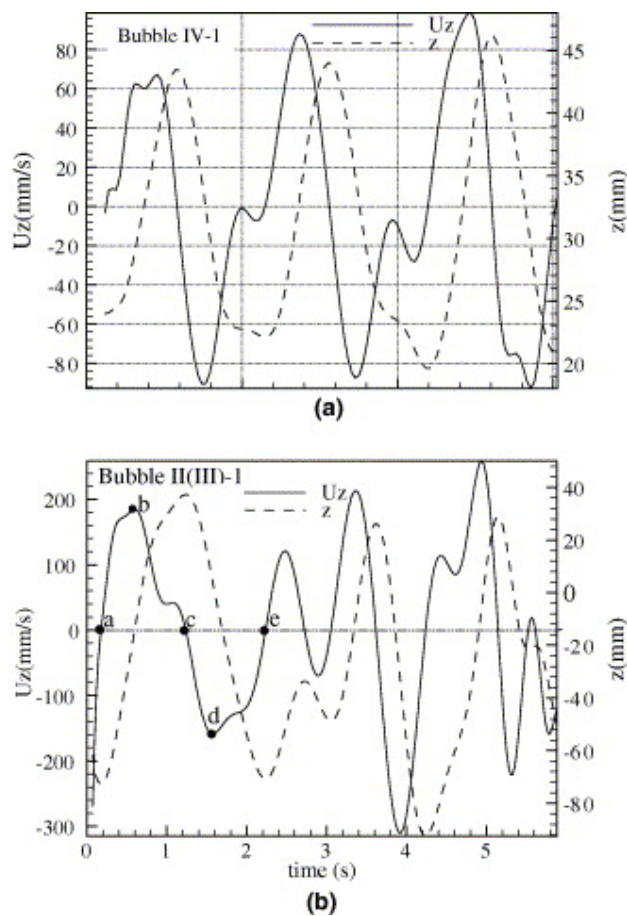
Oczywistym jest, że skoro przedmiotem badań jest przepływ w pulsacyjnej rurce ciepła (PHP), to prezentowane w rozprawie przepływy powinny być wymuszone w taki sposób, by można było odwzorować jej pracę. Ogólny opis działania PHP można znaleźć w rozdziale 1.4, w tym miejscu warto jednak zaznaczyć, że w literaturze istnieje wiele modeli matematycznych, które symulują pracę pulsacyjnych rurek ciepła, zaczynając od modeli jednowymiarowych [98, 122, 77, 29] przez numeryczne symulacje 2D [90, 16], oraz numeryczne symulacje 3D [39]. Ostatecznie jednak nadal brak jest modelu, który byłby w stanie w pełni odwzorować ich działanie. Spowodowało to, że początkowe próby znalezienia rozwiązania w dziedzinie czasu zostały rozszerzone o dziedzinę częstotliwości. Coraz większa liczba autorów uprościła podejście z początkowego rozpatrywania PHP jako całego układu do wyjaśniania pojedynczych zjawisk, takich jak: nukleacja, grubość filmu cieczowego, rozpad i łączenie bąbli parowych oraz wiele innych.

To właśnie publikacje opisujące jedynie przepływ w widocznych częściach kanałów umożliwiają określenie, jakich prędkości przepływu należy spodziewać się w pulsacyjnych rurek ciepła. Pełny przegląd literatury, w której można znaleźć informacje na temat charakterystycznych częstotliwości przepływu w PHP został przedstawiony w tabeli 4.2. Na tej podstawie dobrano parametry wymuszające przepływ w rurce, które zostaną zebrane w podrozdziale 4.8. Przykładowe wykresy, które można znaleźć we wspomnianych publikacjach, pokazują położenie bąbla parowego w czasie.

Xu i inni [112] jako jedni z pierwszych zastosowali obserwację kamerą szybkoklatkową przepływu w kanale pulsacyjnej rurki ciepła. Wyniki przedstawione na rysunku 4.9, poka-

4.6. Prędkość i częstotliwość w PHP

zują kilka ważnych kwestii bardzo ważnych z punktu widzenia poprawnego odwzorowania przepływu w doświadczeniu. Po pierwsze, w zależności od momentu, w którym został nagrany przepływ, maksymalna bezwzględna prędkość bąbla parowego mieściła się w zakresie od 0,08 do 0,3 m/s. Po drugie, charakterystyka prędkości przepływu przypomina ruch harmoniczny, w którym prędkość może być określona sumą funkcji sinusoidalnych.

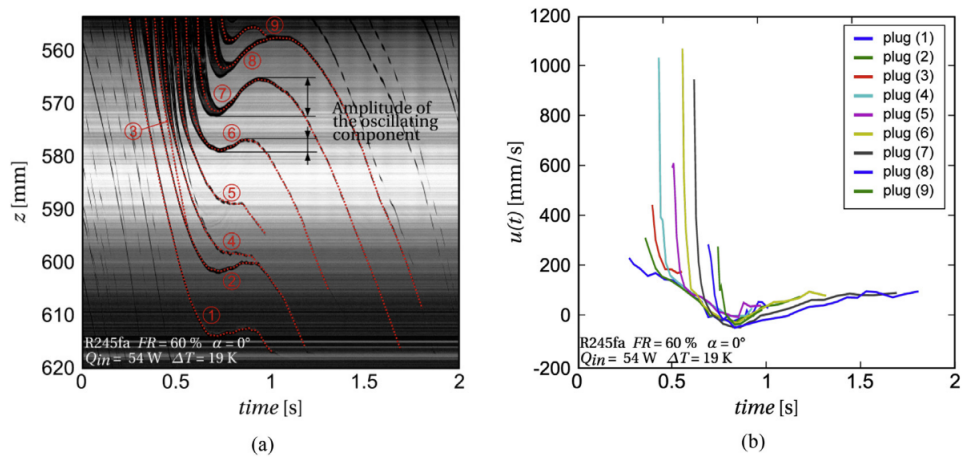


Rys. 4.9 Prędkość przepływu czynnika w pulsacyjnej rurce ciepła [112]

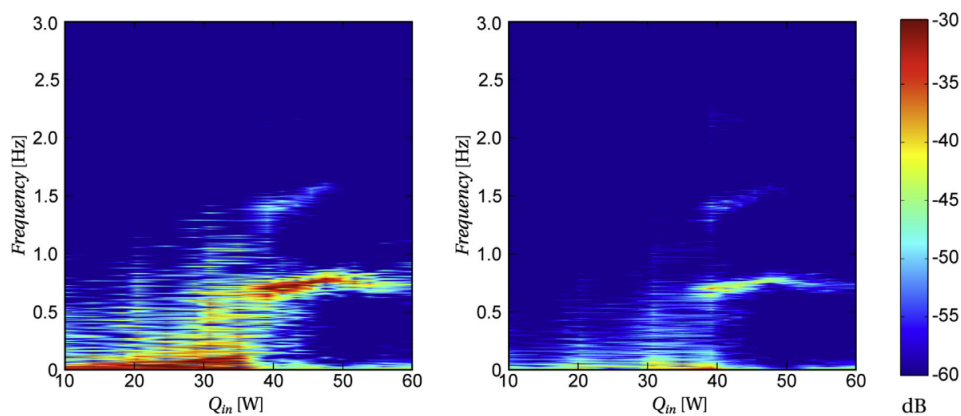
Spinato i inni [101] przedstawili podobne wykresy, które pokazano na rysunku 4.10. Pomimo że położenie bąbli parowych w czasie również przypomina funkcję harmoniczną, to już prędkość jest zdecydowanie inna. Z tego też powodu autorzy rozszerzyli swoje badania o analizę Fourierską, której efekty można zaobserwować na rysunku 4.11, wynika z niego, że częstotliwość przepływu w pulsacyjnej rurce ciepła waha się od 0 do 2 Hz. Dwa wspomniane wykresy opracowane przez Spinato i innych [101] są podstawą wszyst-

4.6. Prędkość i częstotliwość w PHP

kich publikacji wymienionych w tabeli 4.2.



Rys. 4.10 Położenie i prędkość przepływu czynnika w pulsacyjnej rurce ciepła [101]



Rys. 4.11 Charakterystyczne częstotliwości przepływu czynnika w pulsacyjnej rurce ciepła [101]

Tab. 4.2 Porównawcze wyniki dostępne w literaturze naukowej dotyczące częstotliwości przepływu w pulsacyjnych rurkach ciepła

Numer	Publikacja	Technika pomiarowa	Częstotliwość	Uwagi
1.	Spinato i inni [102]	Szybka transformacja Fouriera	<3 Hz	
2.	Spinato i inni [100]	Szybka transformacja Fouriera	0,434 do 1,215 Hz	
3.	Mameli i inni [74]	Szybka transformacja Fouriera	Brak częstotliwości charakterystycznej	
4.	Kim i inni [62]	Szybka transformacja Fouriera	0,1 do 1,5 Hz	
5.	Khandekar i inni [61]	Widmowa gęstość mocy	0,1 do 3 Hz	
6.	Xu i inni [113]	Widmowa gęstość mocy	<0,35 Hz	Składowe charakterystyczne: 0,093 Hz przy 12 W oraz 0,46 Hz przy 25,6 W
7.	Takawale i inni [104]	Szybka transformacja Fouriera	Brak częstotliwości charakterystycznej	Wraz ze wzrostem mocy cieplnej wzrastała również częstotliwość
8.	Karthikeyan i inni [54]	Szybka transformacja Fouriera	Brak częstotliwości charakterystycznej	Nanociecz CuO (0,52 do 0,63 Hz) Woda dejonizowana (0,2 do 0,35 Hz)
9.	Yoon i inni [118]	Śledzenie interfejsu bąbla parowego	40 do 50 Hz	Mikrokanaly

10.	Patel i inni [87]	Śledzenie interfejsu bąbla parowego	0,6 do 3,46 Hz	
11.	Yoon i inni [119]	Szybka transformacja Fouriera	30 do 45 Hz	Mikrokanały
12.	Perna i inni [88]	Transformacja falkowa	<3 Hz	Częstotliwość charakterystyczna w zakresie 0,6 do 0,9 Hz

4.7 Wybór czynnika roboczego

Poprawnie dobrane czynniki, dzięki szerokiemu zakresowi swoich właściwości fizykochemicznych umożliwiają wyprowadzenie uogólniających równań, które w dalszej kolejności mogą zostać zastosowane dla dowolnego podobnego (w sensie fizycznym) czynnika roboczego.

Wśród najczęściej stosowanych [30, 5] czynników stosowanych w pulsacyjnych rurkach ciepła są: woda, aceton, etanol, HFE-7000 (NOVEC™ 7000). Natomiast ilość czynników roboczych może być rozszerzona, jeśli weźmiemy pod uwagę również badania przeprowadzane w mikrograwitacji, w tym przypadku do najpopularniejszych [41, 42, 72, 11] należą: FC-72, amoniak czy R-114. W badaniach urządzeń wykorzystujących zjawisko przejścia fazowego bardzo często przyjmuje się, że najważniejsze właściwości fizykochemiczne czynnika roboczego to wartość utajonego ciepła parowania i ciepła właściwego oraz charakterystyka ciśnienia nasycenia. W przypadku pulsacyjnej rurki ciepła, niskie wartości ciepła utajonego oraz ciepła powinny sprzyjać szybszemu wymuszeniu przepływu, a tym samym szybszemu rozpoczęciu wymiany ciepła pomiędzy parowaczem i skraplaczem. Natomiast charakterystyka ciśnienia nasycenia jest wykorzystywana przy dobieraniu odpowiedniego czynnika roboczego do projektowych temperatur pracy PHP.

Niniejsze badania mimo że ukierunkowane na opisanie zjawisk przepływowych zachodzących w pulsacyjnych rurkach ciepła są przeprowadzane w warunkach izotermicznych, logicznym jest niewielki wpływ, wymienionych w poprzednim akapicie właściwości fizykochemicznych. W związku z tym większe znaczenie mają właściwości bezpośrednio wpływające na charakterystykę przepływu w kanałach o niewielkich przekrojach. Gęstość i lepkość czynnika roboczego będą miały największe znaczenie przy doborze odpowiedniego czynnika roboczego, w związku z tym wykorzystano liczbę Reynoldsa opisującą stosunek sił inercji do sił lepkości ($Re = \rho UD/\mu$). Wspomniano jednak, że przepływ w pulsacyjnych rurkach ciepła opiera się również na strukturze korkowej, nie jest możliwe uzyskanie takiej struktury w kanałach o dużym przekroju. Przy czym należy podkreślić, że określenie „duży przekrój” jest określeniem potocznym, a matematycznie wyraża się go z pomocą liczby Bonda ($Bo = \rho a D^2/\sigma$), a jak podali Kew i Cornwell [58] w pulsacyjnych rurkach ciepła wartość liczby Bonda nie powinna przekroczyć wartości 4. Na podstawie definicji liczby Bonda można stwierdzić, że poza gęstością i lepkością czynnika roboczego również napięcie powierzchniowe ma bardzo duże znaczenie. W tabeli 4.3 zebrano najważniejsze

4.7. Wybór czynnika roboczego

właściwości rozważanych czynników roboczych.

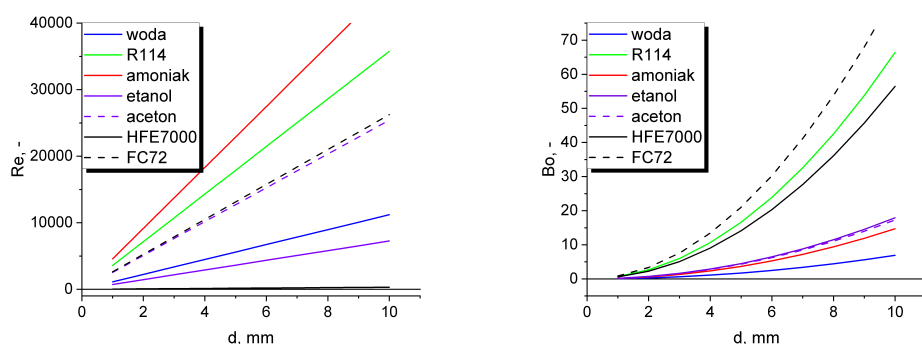
Poza właściwościami fizykochemicznymi ważne jest również optymalne dopasowanie wypełnienia układu. Na podstawie przeglądu literatury [78, 116, 30] można wnioskować, że optymalny objętościowy stosunek wypełnienia zależy przede wszystkim od przenoszonej mocy cieplnej, przy czym niższe wypełnienia (około 50%) sprzyjają niskim wartościom mocy cieplnej, a wyższe wypełnienia (około 75%) sprzyjają wyższym mocom cieplnym (nawet do kilku kilowatów mocy cieplnej [30]). Większość dostępnej literatury dotyczącej pasywnych wymienników ciepła w technologiach kosmicznych uznaje, że pojedynczy element nie powinien przenosić mocy cieplnej większej niż kilkadziesiąt do kilkuset watów. Z tego powodu badania opisane w dysertacji bazowały na wypełnieniu wynoszącym 50%.

Tab. 4.3 Właściwości fizykochemiczne czynników roboczych rozważanych w literaturze w kontekście wykorzystania w pulsacyjnych rurkach ciepła. Właściwości wyznaczone dla temperatury 25 °C

Czynnik roboczy	Woda	FC-72	Etanol	Aceton	Novac[™] 7000	Amoniak	R114
Wzór chemiczny	H_2O	C_6F_{14}	C_2H_5OH	C_3H_6O	$CF_3CF_2CF_2OCH_3$	NH_3	$C_2Cl_2F_4$
Ciśnienie nasycenia, kPa	3,14	30,9	7,82	30,5	65	998	213
Gęstość, kg/m^3	997,0	1680	785,2	784,8	1400	603,0	1455
Lepkość dynamiczna, $mPa \cdot s$	0,89	0,64	1,08	0,309	45	0,132	0,407
Napięcie powierzchniowe, N/m	0,072	0,01	0,022	0,023	0,012	0,02	0,011

4.7. Wybór czynnika roboczego

Najważniejszym kryterium doboru czynnika roboczego z aplikacyjnego punktu widzenia jest wybranie takiego czynnika, dla którego temperatura przejścia fazowego zawiera się w projektowanym zakresie temperatur oraz dostosowanie charakterystyki ciśnienia nasycenia (różnica ciśnień nasycenia pomiędzy parownikiem i skraplaczem wpływa na dynamikę pracy urządzenia). Wśród badanych w pulsacyjnych rurkach ciepła cieczy, często wymienia się: etanol, amoniak, FC-72 oraz HFE-7000.



Rys. 4.12 Wszystkie właściwości fizyczne zostały dobrane zgodnie z danymi z bazy CoolProp [15], wyjątkiem jest lepkość dla R-114 dobranej zgodnie z pracą Kumagai i Takahashiego [63] oraz komercyjne czynniki robocze firmy 3M® których właściwości przyjęto zgodnie z kartą produktu

Jak już wspomniano szczególnie ważnymi liczbami opisującymi ruch w kanałach są liczby Reynoldsa i Bonda, na rysunku 4.12 przedstawiono ich charakterystyki w zależności od średnicy wewnętrznej kanału oraz dla różnych czynników roboczych. Obliczenia przeprowadzono przy założonej prędkości 1 m/s, oraz przyspieszeniu 5 m/s².

Po odrzuceniu czynników dla których liczba Reynoldsa przekracza wartość 5000 przy średnicy wewnętrznej 2 mm oraz zakładając, że badany zakres powinien być jak największy wybrano dwa czynniki robocze:

1. Etanol
2. FC-72

4.8 Tablica badań

Na podstawie wstępnych badań przeprowadzonych w warunkach grawitacji ziemskiej oszacowano, jakie powinny być parametry ruchu tłoka siłownika, a tym samym jakie powinny być wynikowe parametry przepływu oscylacyjnego w szklanych rurkach. Ponieważ jednak brak jest danych dotyczących takiego przepływu w literaturze, w trakcie badań były one dostosowywane, a ostateczna tabela pomiarowa została zaprezentowana w tabeli 4.4.

Tab. 4.4 Tabela parametrów ruchu siłownika

Częstotliwość, Hz	Amplituda, mm	Średnica, mm	Czynnik roboczy
1	90	8	Woda
1	180	8	Woda
1	160	8	Woda
1,5	80	8	Woda
2	90	8	Woda
1	160	6	Etanol
1	160	4	Etanol
1,5	160	6	Etanol
1,5	160	4	Etanol
2	120	6	Etanol
2	120	4	Etanol
1,5	120	6	Etanol
1,5	120	7	Etanol
1,5	120	6	Etanol
1,5	120	7	Etanol
2	80	6	Etanol
2	80	7	Etanol
2	120	8	Etanol
2	120	4	Etanol
2	120	8	Etanol
2	120	4	Etanol
2,5	80	8	Etanol

4.9. Dokładność

2,5	80	4	Etanol
1	150	2,5	FC-72
1	150	3	FC-72
1	100	2,5	FC-72
1	100	3	FC-72
1,5	50	2,5	FC-72
1,5	50	3	FC-72
1	90	2,5	FC-72
1	90	3	FC-72
1	50	2,5	FC-72
1	50	3	FC-72
1	25	2,5	FC-72
1	25	3	FC-72
1	160	7	Woda
1	160	6	Woda
1,5	160	7	Woda
1,5	160	6	Woda
2	160	7	Woda
2	160	6	Woda
0,5	160	7	Woda
0,5	160	6	Woda

4.9 Dokładność

Wstępny opis urządzeń pomiarowych wraz z podaniem ich dokładności zaprezentowano w podrozdziale 4.4. Otrzymane na drodze przeprowadzonych badań eksperymentalnych dane dotyczą: ciśnienia bezwzględnego w celu kontroli ciśnienia nasycenia, ciśnienia względnego z wykorzystaniem dwóch przetworników ciśnienia, temperatury w celu oszacowania aktualnych właściwości fizykochemicznych czynników roboczych, obrazu zarejestrowanego przy pomocy kamer szybkoklatkowych o ograniczonej rozdzielczości. Wartości zmierzonych ciśnień i temperatur były wykorzystywane jedynie w celu kontroli procesu w trakcie badań, natomiast obraz z kamer został wykorzystany w analizie do wyznaczenia

4.9. Dokładność

prędkości przepływu i należy oszacować względny błąd pomiarowy.

Rozdzielczość pojedynczego obrazu kamery wynosi 512x512px oznacza to, że jeśli przy każdym z trzech obrazów wykorzystana zostanie tylko jego większy fragment (nakładanie się obrazów jak na rysunku 4.6) to ostatecznie uzyskany zostanie obraz o rozdzielczości wzdłuż rurki wynoszącej 1420 px. Korzystając z własności $l_{px} = L/N$ gdzie L jest długością obserwowalnego obszaru szklanej rurki, a N jest liczbą pikseli które odwzorowują rurkę wzdłuż jej osi. Wyznaczenie niepewności pomiaru z wykorzystaniem kamery można oszacować na podstawie równania:

$$e_{vel} = 2 \cdot l_{px} \cdot f_{kam,analiza} = 0,038 \frac{m}{s} \quad (4.7)$$

Tab. 4.5 Błędy względne i bezwzględne dla parametrów pomiarowych

Nazwa	Błąd bezwzględny	Błąd względny
Ciśnienie bezwzględne	± 60 Pa	0,4%
Ciśnienie względne	± 300 Pa	–
Temperatura	$\pm 2,2$ K	–
Prędkość	$\pm 0,038$ m/s	–

Rozdział 5

Procedura analizy obrazu

Procedura przetwarzania obrazów pozwoliła uzyskać zbinaryzowany obraz na całej obserwowalnej długości rurki o średnicy wahającej się od 2,5 mm do 8 mm oraz dwóch płynów roboczych (etanolu i FC-72). Rysunek 5.4 pokazuje najważniejsze kroki prowadzące do uzyskania zbinaryzowanego obrazu, a dokładna procedura jest opisana w rozdziale 5.3. W rozdziałach 5.4 i 5.5, zostały przedstawione pomiary prędkości bąbla pary na podstawie analizy podobnej do standardowej procedury PIV (ang. Particle Image Velocimetry). Rozdział 5.6 opisuje procedurę śledzenia bąbla pary, co w konsekwencji umożliwia identyfikację zjawisk rozpadu (ang. break-up) i łączenia bąbli parowych przedstawionych w rozdziale 5.7.

5.1 Operacje morfologiczne

W trakcie przetwarzania obrazu bardzo ważne jest zastosowanie operacji, które nie obniżą dokładności pomiaru, a jednocześnie pozwolą na bezproblemową analizę zjawisk fizycznych. Poniższy rozdział ma na celu wprowadzić czytelnika w kilka najważniejszych operacji, które zostały wykorzystane w trakcie pracy nad rozprawą doktorską. Pozwoli to na lepsze zrozumienie, w jaki sposób przeprowadzona analiza pozwoliła na automatyczne wykrywanie zachodzących zjawisk rozpadu i łączenia bąbli parowych.

Filtr Wienera

Każdy sygnał, a w szczególności obraz z urządzenia rejestrującego w trudnych warunkach oświetleniowych (a do takich należy zaliczyć nagrywanie obrazu z dużą ilością klatek na sekundę) jest narażony na wystąpienie szumu. W tym celu w praktyce stosuje się filtry usuwające. Często stosowanym i dobrze sprawdzającym się filtrem w analizie obrazu jest filtr Wienera [110, 65], który matematycznie minimalizuje średni błąd kwadratowy:

5.1. Operacje morfologiczne

$$e^2 = \{[f - f']^2\} \quad (5.1)$$

Algorytm filtru wyznacza lokalne średnie dookoła każdego piksela według wzoru:

$$\bar{a} = \frac{1}{NM} \sum_{n,m \in \eta} a(n,m) \quad (5.2)$$

Następnie oblicza wariancję w sąsiedztwie piksela:

$$s^2 = \frac{1}{NM} \sum_{n,m \in \eta} a^2(n,m) - \bar{a}^2 \quad (5.3)$$

Uzyskując wzór na filtr Wienera:

$$b(n,m) = \bar{a} + \frac{s^2 - \nu^2}{s^2} [a(n,m) - \bar{a}] \quad (5.4)$$

Przy czym, oznaczenia należy rozumieć jako:

$a(n,m)$ – wartość piksela w obrazie pierwotnym (z szumem)

$b(n,m)$ – wartość piksela w obrazie pochodnym (bez szumu)

\bar{a} – lokalna średnia sąsiedztwa piksela

s^2 – lokalna wariancja sąsiedztwa piksela

n, m – współrzędne pikseli

η – sąsiedztwo z którego przyjmuje się średnią (im większy zakres tym intensywniejsze filtrowanie)

N, M – liczba elementów sąsiednich uwzględnianych w lokalnej średniej

ν^2 – w optymalnym przypadku jest to idealna wariancja lokalna szumu dla każdego piksela, ponieważ jednak zazwyczaj jej wartość nie jest znana przyjmuje się jej wartość jako średnią wartość wszystkich wariancji obrazu

Binaryzacja

Algorytm binaryzacji zastosowany w ramach przetwarzania obrazów w rozprawie, jest stosunkowo prostą metodą kompresji obrazu, pozwalającą jednocześnie na uzyskanie informacji w którym miejscu znajdują się granice faz bąbli parowych. Polega on na przypisaniu wartości 0 do obszarów osiągających nasycenie poniżej każdorazowo dopasowywanej wartości, oraz wartości 1 dla obszarów powyżej tej wartości.

Dylatacja

Najbardziej podstawowa (obok erozji) operacja morfologiczna stosowana w obróbce obrazu. Wartość piksela wyjściowego jest maksymalną wartością ze wszystkich pikseli w jego sąsiedztwie. W przypadku obrazu binarnego jest ustawiany na 1, jeśli którykolwiek z sąsiednich pikseli ma wartość 1, a pozostawiany na 0, jeśli takiego sąsiada nie ma. Dylatacja morfologiczna sprawia, że obiekty stają się bardziej widoczne i wypełnia małe przestrzenie w obiektach. W przypadku obrazu rurki, celem było uwidocznienie interfejsu bąbla parowego oraz uzupełnienie przestrzeni „pustych” będących wynikiem refleksów na zaokrąglonych szklanych powierzchniach.

Erozja

Druga najbardziej podstawowa operacja morfologiczna, jest operacją przeciwną do dylatacji. Wartość piksela wyjściowego jest minimalną wartością ze wszystkich pikseli w jego sąsiedztwie. W obrazie binarnym piksel jest ustawiany na 0, jeśli którykolwiek z sąsiednich pikseli ma wartość 0, a pozostawiany na 1 jeśli takiego sąsiada nie ma. Erozja morfologiczna usuwa wyspy (np. okręgi) i małe obiekty tak, że pozostają tylko istotne obiekty. Celem zastosowania tej operacji w przypadku obrazu z płyną ciecżą dwufazową, jest niwelacja błędu pomiaru spowodowanego zastosowaniem dylatacji. Zastosowanie dylatacji powiększa obiekty znajdujące się na obrazie, natomiast erozja „przywraca początkową wielkość”. W połączeniu pozwalają na usunięcie artefaktów z obrazu, a jednocześnie usunięcie „pustych przestrzeni” będących wynikiem refleksów na zaokrąglonych szklanych powierzchniach.

Zamknięcie wolnych obszarów linią pionową

W zarejestrowanym obrazie cieczy dwufazowej zazwyczaj odróżnienie fazy ciekłej od gazowej polega na obserwacji granicy faz a na podstawie promienia menisku możliwe jest określenie, w której części obrazu znajduje się faza gazowa – środek promienia znajduje się w obszarze fazy gazowej. W celu uproszczenia rozpoznawaniu faz przydatne jest wypełnienie obszaru fazy gazowej jednolitym kolorem, jednak zastosowanie operacji wypełnienia wymaga dodatkowego przygotowania obrazu, nie tylko zwykłą operacją dylatacji i erozji, ale również operacją połączenia przeciwległych granic faz. W tym celu zastosowano dodatkową operację dylatacji, ale zmodyfikowaną o wykrywanie poziomych

granic faz.

Wykrywanie poziomych granic faz jest realizowane przez utworzenie morfologicznego obiektu linii o ograniczonej długości, jeśli odległość poziomych granic faz jest mniejsza niż średnica rurki, to opracowany algorytm wypełnia ten obszar linią pionową. W ten sposób powstaje obraz, który może zostać w kolejnym kroku wypełniony.

Wypełnienie obszarów fazy gazowej

Wypełnienie bąbli parowych realizowane jest pojedynczą operacją morfologiczną polegającą na odnalezieniu obszarów zamkniętych w obrazie binarnym i zastąpieniu wartości 0 w środku obszaru wartością 1 – obszar uznaje się za zamknięty, jeżeli jego granica składa się z pikseli o wartości 1 sąsiadujących ze sobą zarówno we wszystkich kierunkach (łącznie jeden piksel sąsiaduje z dwiema innymi pikselami).

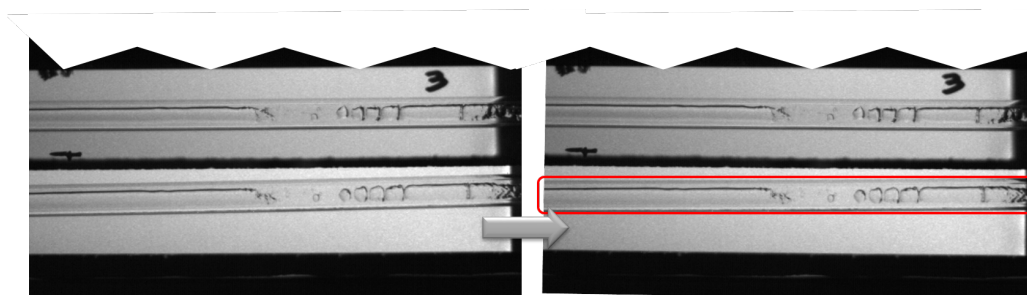
Usunięcie małych obiektów

Wszystkie operacje morfologiczne mają na celu uwydatnienie najważniejszych cech przepływu dwufazowego, jednak nawet zaawansowane filtry obrazu nie są wystarczające, by usunąć wszystkie niechciane artefakty. Z tego powodu, ostatnią operacją, którą należy w tym miejscu wymienić jest operacja usunięcia tych artefaktów. Zazwyczaj są to elementy na obrazie nieprzekraczające pola kilkunastu pikseli – poza skrajnym przypadkiem, gdy w rejestrowany obszar dostał się kawałek materiału wykorzystywanego przy amortyzowaniu lądowania całej kapsuły. Usunięcie tych artefaktów, wiąże się z automatycznym znalezieniem małych elementów w obrazie i ustawienie wartości tych pikseli na wartość 1.

5.2 Połączenie obrazów z kamer

Specyficzne warunki, ograniczone możliwości sprzętowe dostępne w centrum badań mikrogravitacji ZARM oraz wymagania dotyczące jakości nagrania spowodowały, że przetwarzanie obrazu jest czasochłonnym procesem. Długość obserwowalnego obszaru rurki szklanej jest ponad trzykrotnie większa od obserwowalnej szerokości jak pokazano na rysunku 4.6, to wymusiło zastosowanie trzech kamer z nakładającym się częściowo obrazem, ale pozwoliło osiągnąć wysoką rozdzielczość obrazu. Jednocześnie jednak wymusiło dodatkowe operacje przetwarzania obrazu przedstawione w tym podrozdziale.

5.2. Połączenie obrazów z kamer



Rys. 5.1 Ustawienie obrazu w poprawnej pozycji

1. Poziomowanie obrazu dla każdego przypadku

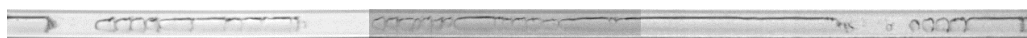
Ustawienie kamery w pozycji idealnie wypoziomowanej nie było możliwe z dwóch powodów: brak wystarczająco precyzyjnego systemu regulacji położenia, początkowe i końcowe przeciążenie towarzyszące każdemu doświadczeniu dochodzące do $50g_0$. Poziomowanie obrazu polegało na każdorazowym nieznacznym obróceniu obrazu metodą interpolacji dwuliniowej o zadany kąt z zakresu od -3 do 3° .

2. Wycięcie obrazu

W obrazie zarejestrowanym z każdej kamery znajdowały się cztery obrazy rurki (w tym dwa lustrzane), każdy z tych obrazów był wycinany i przygotowywany do połączenia z odpowiednimi obrazami z pozostałych kamer.

3. Połączenie obrazu z trzech kamer

Połączenie polegało na zintegrowaniu obrazów z wykorzystaniem oznaczeń na panelu świetlnym (zaznaczonych przed rozpoczęciem badań), a następnie dokładnym dopasowaniu (z dokładnością do 1 px) na podstawie analiz struktur przepływowych.



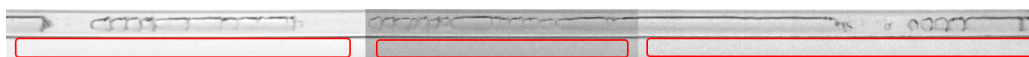
Rys. 5.2 Połączony obraz z trzech kamer

4. Korekta/normalizacja oświetlenia

Różnica w oświetleniu pojedynczego obrazu wynika z zastosowania panelu LED, który pomimo teoretycznie równomiernego natężenia światła, ze względu na swoją konstrukcję w różnych miejscach nieznacznie się tym różni. Różnica w oświetleniu pomiędzy obrazami z różnych kamer wynika z nieprecyzyjnego i niepowtarzalnego ustawiania przesłony obiektywu. Obie kwestie powodują, że system przetwarzania

5.3. Identyfikacja bąbla parowego

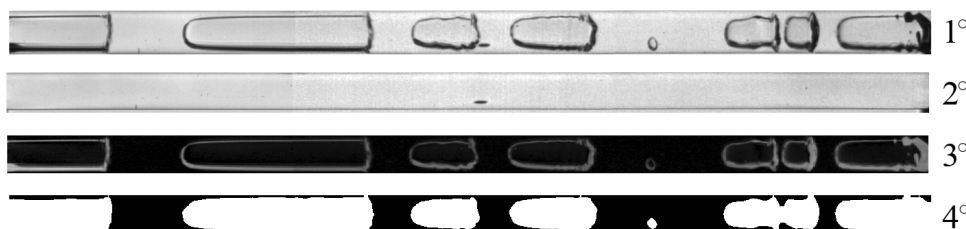
danych został zaprogramowany w taki sposób, żeby wyrównać poziom naświetlenia wzdłuż rurki (uśrednianie po kolumnach), a następnie wyrównać poziom naświetlenia pomiędzy obrazami również poprzez uśrednienie z dużego obszaru powyżej lub poniżej obserwowanej rurki.



Rys. 5.3 Uśrednienie oświetlenia w obrazach z kamer i pomiędzy obrazami z kamer (na czerwono zaznaczone obszary wykorzystane do uśredniania)

5.3 Identyfikacja bąbla parowego

Pierwszym krokiem w identyfikacji bąbla parowego jest wyodrębnienie obrazu tła (1°) (rysunek 5.4), a ponieważ celem jest znalezienie bąbli parowych za najlepsze tło można uznać obraz kanału całkowicie wypełnionego cieczą. Następnie poprzez odjęcie wartości pikseli obrazu z obserwowalnym bąblem pary od obrazu tła ($1^\circ - 2^\circ = 3^\circ$), widoczny zostaje jedynie interfejs bąbla parowego (3°). Kolejne kroki to binaryzacja i wypełnienie otworów poprzez operacje morfologiczne 4° , co ostatecznie pozwala na dokładną wizualizację przepływu w kanale.



Rys. 5.4 Procedura binaryzacji obrazu

Na podstawie zbinaryzowanego obrazu można przeprowadzić tzw. operację opisywania połączonych obiektów dokładnie opisaną przez Haralicka i Shapiro [46], w uproszczeniu polega ona na:

1. Przypisaniu kolejnych liczb (1,2,...) odpowiednio do sąsiadujących ze sobą pikseli o wartości 1 (białe obszary obrazu)

5.4. Prędkości w objętości kanału - PIV

1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	2	2	0	0
1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	2	2	0	0
1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	3	0
1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	3	0
1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	3	0
1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	3	3	0
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0

2. Przeszukaniu macierzy pod kątem pozycji skrajnych elementów każdego z obszarów.
3. Utworzenia osobnych pakietów danych dla każdego znalezionej obiektu, wraz z najważniejszymi informacjami na ich temat (między innymi: pozycja, długość i szerokość oraz objętość).

5.4 Prędkości w objętości kanału - PIV

Równoległe z procesem rozpoznawania bąbli pary, przeprowadzono analizę prędkości metodą PIV (ang. Particle Image Velocimetry) z wykorzystaniem programu MATLAB oraz dodatku PIVlab opracowanego przez Thielicke i innych [106]. W konsekwencji otrzymano macierz prędkości dla prostokątów o wymiarach $32 \text{ px} \times 8 \text{ px}$ (przy rozdzielczości $1500 \text{ px} \times 64 \text{ px}$), która po nałożeniu na oryginalny obraz przedstawia prędkości na granicach faz ciecz-para jak to pokazano na rysunku 5.5.



Rys. 5.5 Wynik analizy metodą PIV

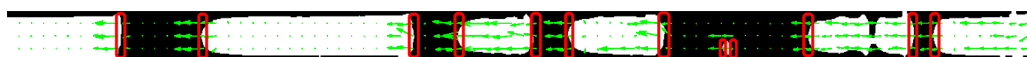
5.5 Prędkości bąbli parowych

Kolejnym etapem przy wyznaczaniu prędkości przepływu w kanale jest połączenie etapu identyfikacji bąbli parowych i wyznaczenia prędkości metodą PIV. W każdej klatce wyznaczone są prędkości lewej i prawej granicy faz, a następnie przypisywane do odpowiedniego rozpoznanego bąbla pary co pokazuje rysunek 5.6. Wartości prędkości zawierające się w czerwonych polach są następnie uśredniane w każdym kroku czasowym, czyli w każdej klatce nagrania. Uzyskane prędkości są następnie wykorzystywane do określenia funkcji interpolacyjnej, która determinuje przepływ. Ponieważ mechaniczne wymuszenie przepływu jest opisane przez funkcję sinusoidalną (patrz rozdział 4), wynikowy przepływ uznano za określony dla sumy trzech funkcji sinusoidalnych zgodnie z równaniem 5.5. Ostatnią operacją było następnie różniczkowanie względem czasu, co pozwoliło na wyznaczenie funkcji przyspieszenia (równanie 5.6).

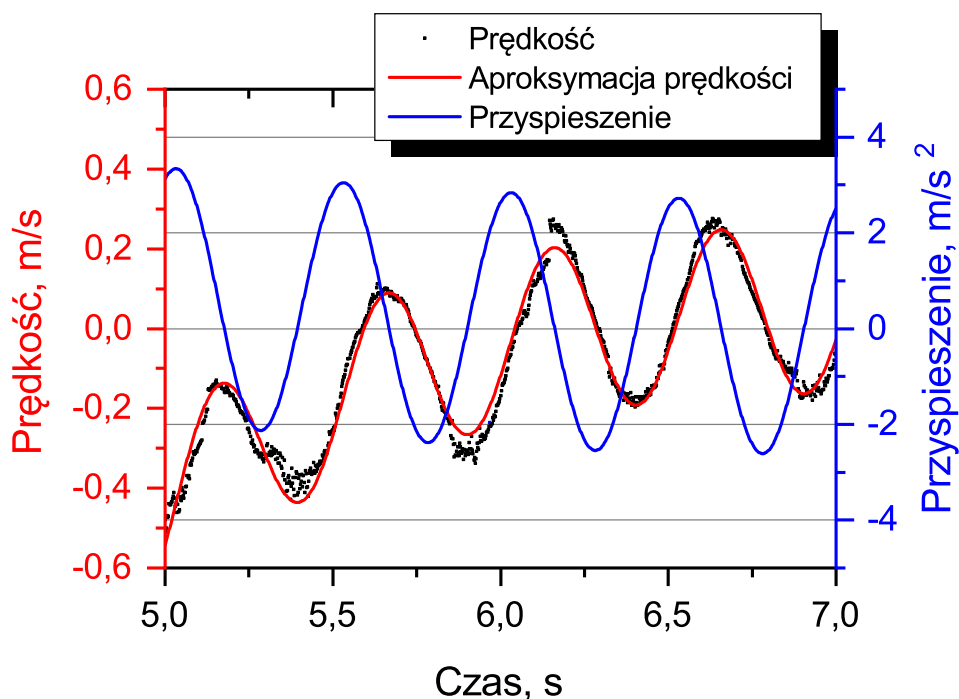
$$v(t) = a_1 \cdot \sin(b_1 t + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 t + c_2) + a_3 \cdot \sin(b_3 t + c_3) \quad (5.5)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} = a_1 b_1 \cdot \cos(b_1 t + c_1) + a_2 b_2 \cdot \cos(b_2 t + c_2) + a_3 b_3 \cdot \cos(b_3 t + c_3) \quad (5.6)$$

Równanie aproksymujące wartość prędkości w kanale było kontrolowane w celu oszacowania dokładności takiej ekstrapolacji. Wartość współczynnika R^2 nie przekraczała we wszystkich przypadkach 0,75, co jest bardzo dobrym przybliżeniem do przeprowadzenia kolejnych operacji. Na rysunku 5.7 przedstawiono kolorem szarym punkty pomiarowe wyznaczone z procedury identyfikacji i PIV (rysunek 5.7). Następnie w kolorze czerwonym przedstawiono dopasowaną funkcję prędkości, a w kolorze niebieskim wartość przyspieszenia wyznaczoną poprzez różniczkowanie równania prędkości.



Rys. 5.6 Identyfikacja prędkości interfejsów na podstawie metod PIV i identyfikacji bąbli parowych



Rys. 5.7 Nieliniowa regresja metodą najmniejszych kwadratów – suma funkcji sinusoidalnych

5.6 Śledzenie bąbla parowego

Ponieważ wszystkie poprzednie kroki nie pozwalają na śledzenie bąbla parowego, a jest to warunek konieczny do identyfikacji rozpadu i połączenia bąbli parowych, kolejnym etapem analizy jest wykorzystanie równania aproksymującego prędkość do estymacji położenia bąbla w kolejnych krokach, a tym samym śledzenie i określenie dokładnego położenia bąbla w czasie. Algorytm opracowany i zastosowany na potrzeby dysertacji wykorzystuje kilka kluczowych faz:

1. Określenie aktualnego (τ) położenia bąbli pary.
2. Określenie pozycji bąbli pary w następnym kroku ($\tau + \Delta\tau$).
3. Określenie przewidywanego położenia na podstawie bieżącego położenia i aproksymacji prędkości.

5.7. Identyfikacja zjawisk rozpadu i łączenia

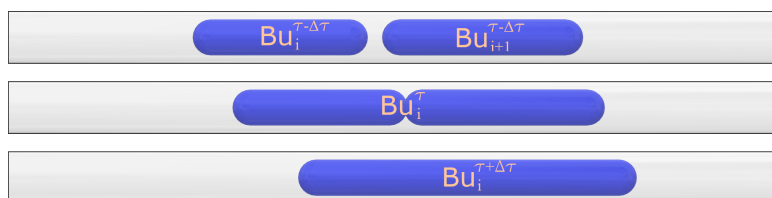
4. Porównania przewidywanej i następnej pozycji, szukając punktów wspólnych w granicach marginesu błędu 8 pikseli.
5. Jeśli bieżący bąbel parowy (τ) nie został znaleziony w następnym kroku ($\tau + \Delta\tau$), algorytm zatrzymuje śledzenie.
6. Jeśli bąbel w następnym kroku ($\tau + \Delta\tau$) nie może zostać dopasowany do poprzedniego kroku (τ), to jest on uważany za nowy.

5.7 Identyfikacja zjawisk rozpadu i łączenia

Identyfikacja połączenia bąbli pary (a także rozpadu bąbli) jest niezbędna, ponieważ określa, kiedy spodziewane jest przejście z przepływu pierścieniowego do korkowego lub odwrotnie. Algorytm, który rozpoznaje ten proces, jest zwizualizowany na rysunku 5.8a i 5.8b oraz opiera się na następujących założeniach:

1. Sprawdzenie pozycji dwóch granic faz (lewej i prawej) bąbla parowego w kroku $\tau - \Delta\tau$.
2. W czasie rozpadu τ w środku bąbla parowego i powstają dwa interfejsy, tworząc w ten sposób bąble parowe i oraz $i + 1$ w czasie $\tau + \Delta\tau$ (rysunek 5.8b).
3. W czasie połączenia τ , prawy interfejs bąbla parowego i nie jest rozpoznawany w czasie $\tau + \Delta\tau$, ale wyrównuje się z lewym interfejsem kolejnego bąbla parowego $i + 1$ (rysunek 5.8a).

5.7. Identyfikacja zjawisk rozpadu i łączenia



(a) Schemat algorytmu rozpoznania połączenia bąbli parowych



(b) Schemat algorytmu rozpoznania rozpadu bąbla parowego

Rys. 5.8 Identyfikacja rozpadu i połączenia bąbli parowych

Rozdział 6

Wyniki badań doświadczalnych

Jak pokazuje przegląd literatury przedstawiony w rozdziale 4, jednym z najważniejszych elementów analizowanych w trakcie badań Pulsacyjnej Rurki Ciepła jest struktura przepływowa. Bardzo dużo czasu i pracy poświęcono do tej pory w celu pełnego zrozumienia, od jakich parametrów przepływu i czynnika jest ona zależna. Dotychczasowe przybliżenia pozwalały na określenie przybliżonych kryteriów występowania struktur przepływu w warunkach ziemskich, ale nawet te przybliżenia nie pozwalają na zastosowanie ich w warunkach mikrogravitacji, jak pokazano w przeglądzie literatury (rozdział 2). Głównym problemem z tym związanym jest fakt, że większość stosowanych liczb kryterialnych jest zależna bezpośrednio od wartości przyspieszenia grawitacyjnego. Nowatorskie podejście przedstawione w rozprawie doktorskiej polega na wykorzystaniu zmodyfikowanych liczb kryterialnych, które zamiast przyspieszenia grawitacyjnego uwzględniają przyspieszenie przepływu czynnika roboczego. Drugim elementem wpływającym na nowatorskość pracy jest rozpatrywanie ruchu bąbla parowego, a nie cieczy, ponieważ to zaburzenia na granicy faz ciecz-para powodują rozpad bąbla lub połączenie dwóch bąbli. Do tej pory jedynie Pietrasanta i inni [89] wykorzystali podobne podejście, opracowując mapę przepływu w Pulsacyjnej Rurce Ciepła. Wyniki ich badań były uzyskane dla tzw. Pulsacyjnej Rurki Ciepła o jednym zagięciu w trakcie lotów parabolicznych, jednak ich podejście opierało się na zastosowaniu rurek o średnicy bliskiej średnicy kapilarnej liczonej dla warunków ziemskich.

W odróżnieniu jednak od badań przeprowadzonych przez Pietrasantę i innych [89], wykorzystano stanowisko pozwalające na uzyskanie różnorodnych parametrów przepływu czynnika. Dodatkowym atutem badań przedstawionych w pracy jest wykorzystanie jedynej na świecie wieży zrzutów znajdującej się w Bremie w Niemczech, która pozwala na uzyskanie 9 sekund mikrogravitacji o jakości porównywalnej lub lepszej od mikrogravitacji na satelitach badawczych. Badania przedstawione w tym rozdziale bazują na dwóch czynnikach roboczych (etanol, FC-72) i średnicach dobranych do czynnika w taki sposób, żeby przekraczały kryterium kapilarności wyznaczone przez liczbę Bondy dla warunków

ziemskich (dokładny dobór średnic i czynników przedstawiono w rozdziale 4).

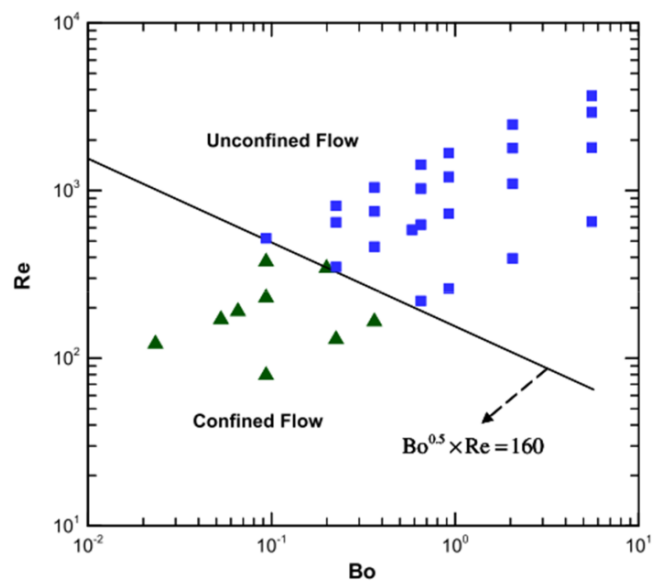
6.1 Wyniki badań w kontekście literaturowym

Badania opisane w rozdziale 2 doprowadziły do opracowania wielu map przepływowych dla wielu różnych warunków brzegowych. Badane były zarówno przypadki w polu grawitacyjnym ziemi jak i w mikrogravitacji, przepływy adiabatyczne jak i diabatyyczne, przepływy statyczne jak i dynamiczne. W związku z tym wyniki badań będących przedmiotem rozprawy należy porównać również z wynikami literaturowymi. Jednak nie został nadal opracowany jednoznaczny proces, który pozwoliłby porównać wszystkie badania na podstawie tych samych właściwości.

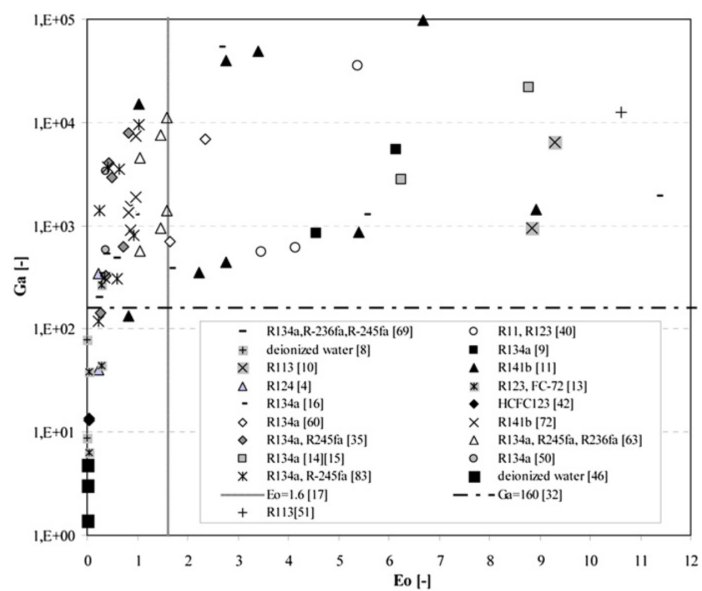
Wykorzystując hipotezę, mówiącą że przyspieszenie grawitacyjne można zastąpić przyspieszeniem występującym w przepływie czynnika, oraz korzystając z kryterium ograniczonego zdefiniowanego przez Harirchiana i Garimellę [47] jako $Bo^{1/2}Re < 160$ można porównać wyniki z wieloma wynikami dostępnymi w literaturze. Rysunek 6.1 pokazuje wyniki na podstawie, których autorzy wyznaczyli wartość kryterium ograniczonego i w ich przypadku spełnia swoje założenie. W późniejszych pracach Baldassari i Marengo [13] przeprowadzili obszerne badania literaturowe umożliwiające sprawdzenie tezy postawionej przez Harirchiana i Garimellę [47]. Pokazali, że tak zdefiniowana korelacja nie w każdym przypadku poprawnie przewiduje występującą strukturę przepływową. Na rysunku 6.2 pokazano wyniki ich pracy, poziomą linią oznaczono kryterium ograniczonego wyznaczone przez Harirchiana i Garimellę [47], a poziomą linią przedstawiono kryterium wyznaczone przez Kew i Cornwella [58]. Większość przypadków z literatury które obrazują punkty na wykresie faktycznie spełniają warunek ograniczonego Garimellego, jednak duża część tych wyników wykracza poza kryterium, a mimo to nosi znamiona tzw. przepływu ograniczonego.

Pomimo niedoskonałości wspomnianego kryterium, postanowiono przeanalizować, czy wyniki przedstawione w pracy doktorskiej spełniają to kryterium lub nie. Na rysunku 6.3 przedstawiono wyniki badań oraz naniesiono linię określającą kryterium ograniczonego. Jak można zauważyć, zdecydowana większość punktów pomiarowych (rozpad i łączenie bąbli parowych) leży poza kryterium. W związku z tym wywnioskowano, że w przypadku badań będących podstawą dysertacji kryterium przedstawione przez Harirchiana i Garimellę [47] nie jest wystarczające do określenia, w jakich warunkach należy spodziewać się

6.1. Wyniki badań w kontekście literaturowym

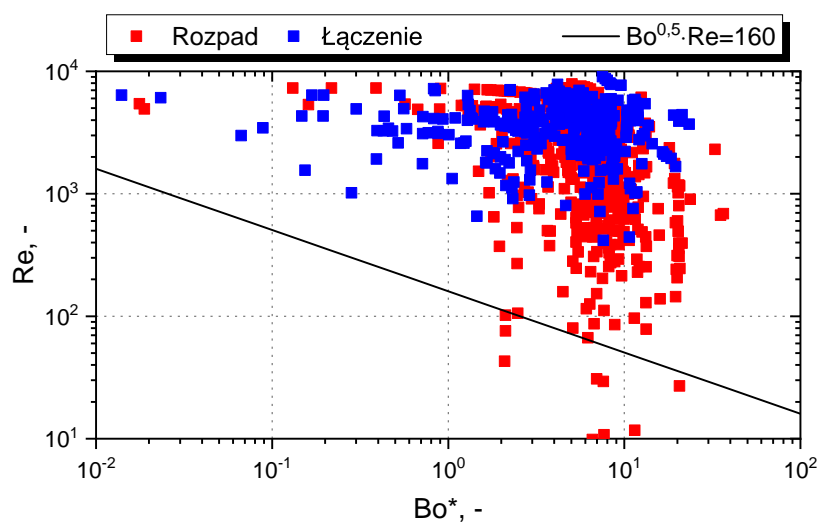


Rys. 6.1 Kryterium ograniczoności wyznaczone przez Harirchiana i Garimellę [47]



Rys. 6.2 Kryterium Garimellego [47] oraz kryterium Bonda [58], sprawdzone na podstawie pracy Baldassariego i Marengo [13]

6.1. Wyniki badań w kontekście literaturowym

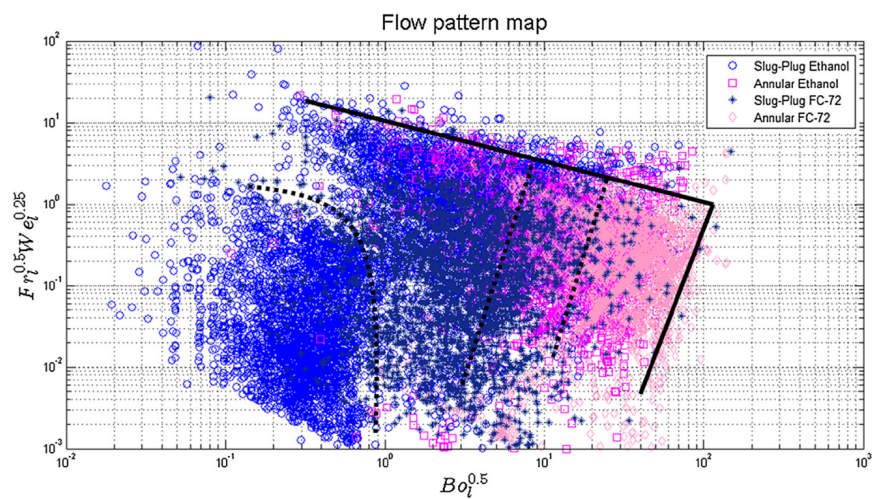


Rys. 6.3 Kryterium Garimellego [47], sprawdzone na podstawie badań autora rozprawy

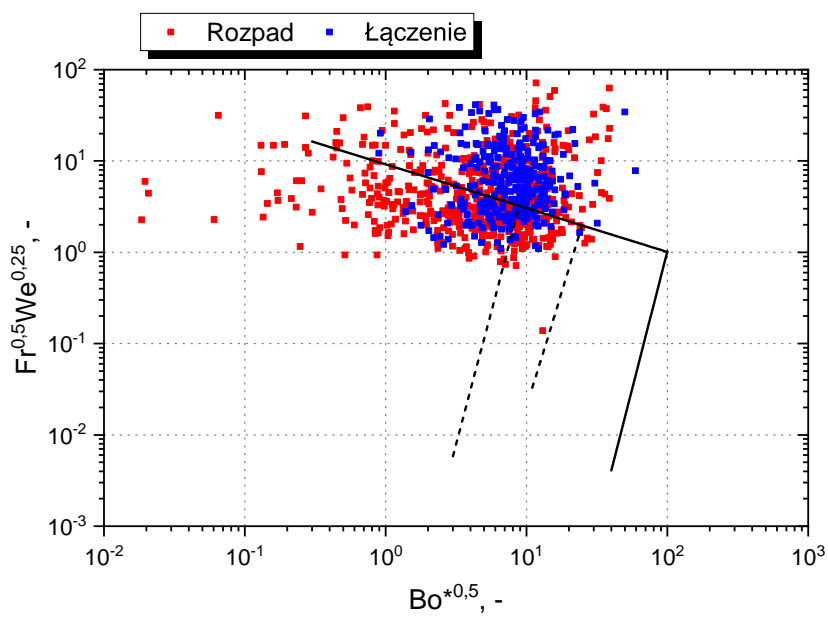
tych zjawisk.

Obiecującą tezę przedstawili i sprawdzili eksperymentalnie Pietrasanta i inni [89], w przeciwieństwie do poprzednich prac, a podobnie do podejścia przedstawionej w niniejszej rozprawie wykorzystali przyspieszenie bąbla parowego jako parametr wpływający na rozpad i łączenie oraz uwzględnili go w liczbie Bonda. Jak pokazały ich wyniki przedstawione na rysunku 6.4 możliwe jest określenie, w którym momencie przepływ jest pierścieniowy, a kiedy korkowy. Podobnie jak w przypadku kryterium Garimellego [47] na rysunku 6.5 naniesiono punkty pomiarowe wyników badań będących podstawą dysertacji. Dane te nie układają się zgodnie z wynikami przedstawionymi przez Pietrasantę i innych [89]. W związku z tym postanowiono, że należy opracować mapy przepływowe na podstawie nowych liczb kryterialnych.

6.1. Wyniki badań w kontekście literaturowym



Rys. 6.4 Mapy przepływowe opracowane przez Pietrasanta'ę i innych [89]



Rys. 6.5 Mapy przepływowe na podstawie wyników badań oraz linie ograniczające na podstawie pracy Pietrasanta'y i innych [89]

6.2 Korelacja wyników z liczbami bezwymiarowymi

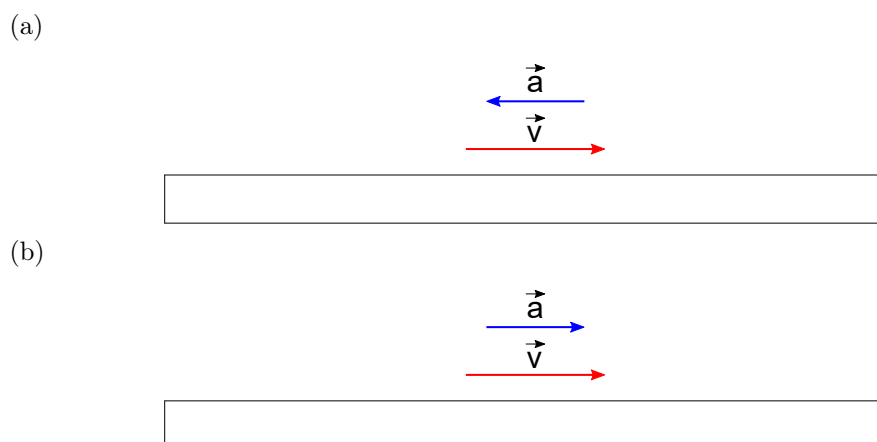
Gdy prędkość przepływu związana z bąblem parowym wzrasta, czyli przyspieszenie i prędkość mają ten sam znak (rysunek 6.6a), zwiększa się prawdopodobieństwo połączenia bąbli parowych, a co za tym idzie, bardziej prawdopodobne jest przejście z przepływu korkowego do przepływu pierścieniowego. Analogicznie, jeśli przyspieszenie ma przeciwny znak w stosunku do prędkości (tzn. prędkość maleje; rysunek 6.6a), prawdopodobieństwo rozpadu powinno wzrosnąć, a struktura przepływowa może zmieniać się od pierścieniowej do korkowej. Dobrze obrazuje to rysunek 6.7, z którego wynika, że najwięcej zjawisk połączenia bąbli parowych obserwuje się, gdy Re i Bo^* mają ten sam znak. Taka charakterystyka jest również widoczna dla zjawisk rozpadu, gdzie większość z nich obserwowana jest dla Re i Bo^* o przeciwnych znakach.

Jest to obserwacja, którą należy potwierdzić w dalszych badaniach, dlatego w pracy zostanie ona nazwana hipotezą znaku:

Występowanie zjawisk rozpadu i łączenia bąbli parowych jest zależne od znaku stojącego przy prędkości i przyspieszeniu przepływu w rurce kapilarnej.

Następnym krokiem jest porównanie wyników dla tego samego czynnika roboczego, ale przy różnych średnicach kanałów. Wyniki pokazują, że przy zastosowaniu liczb kryterialnych Renoldsa i zmodyfikowanej liczby Bondy, nie ma znaczenia, jaka jest średnica rurki; otrzymane wyniki układają się w dokładnie ten sam sposób i nie istnieje żadna granica je rozdzielająca (rysunek 6.8). Warto zauważyć, że nie tylko potwierdza się hipoteza o jednakowych znakach prędkości i przyspieszenia dla łączenia bąbli parowych dla wszystkich średnic (i analogicznie różnych znakach dla rozpadu), ale również fakt, że niektóre przypadki łączenia bąbli parowych występują poza tą hipotezą. Na rysunku 6.9, czerwone i niebieskie obszary wskazują odpowiednio przypadki rozpadu i łączenia, które wykraczają poza tę definicję. W trakcie analiz zaobserwowano również, że wydłużone bąble parowe (często widoczne tylko częściowo) w naturalny sposób ewoluują w przepływ pierścieniowy. Sugeruje to, że istnienie wydłużonych bąbli parowych może mieć wpływ na częstość rozpadu i łączenia, jednak nie jest to czynnik dominujący. Ponieważ podczas badań zaobserwowano tylko kilka przypadków bardzo długich bąbli, w celu opracowania odpowiedniej tezy i sprawdzenia jej wymagana będzie większa liczba badań.

6.2. Korelacja wyników z liczbami bezwymiarowymi

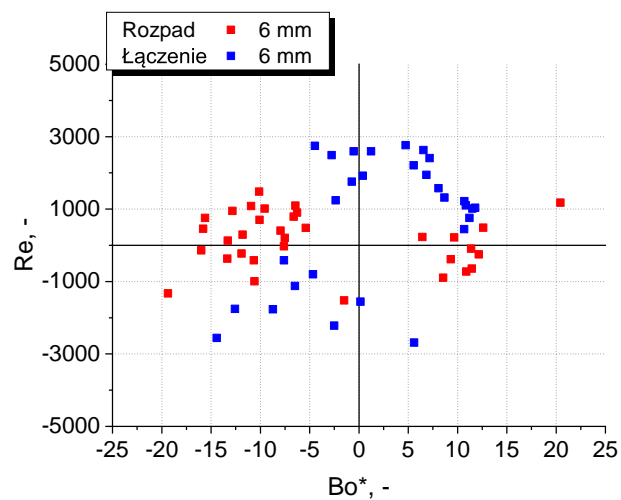


Rys. 6.6 Prędkość i przyspieszenie prowadzące do rozpadu (a) i łączenia (b) bąbli parowych

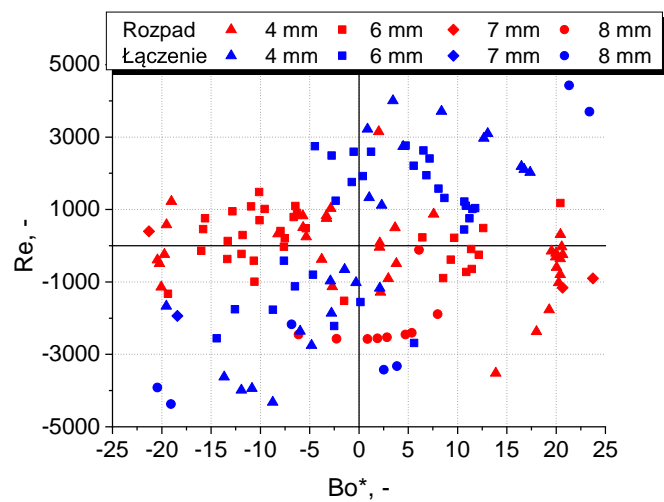
Jak już wspomniano, kluczowym zagadnieniem przy sprawdzeniu hipotezy znaku jest wyjaśnienie powodu, dla którego część zjawisk łączenia i rozpadu bąbli parowych zachodzi w obszarach niespełniających warunków hipotezy. W tym celu rozważono wartości liczb bezwymiarowych (Re , Bo^*) nie tylko w momencie wykrycia zjawiska przez algorytm przetwarzania obrazu, ale również tuż przed jego wystąpieniem. Rysunek 6.10 pokazuje cztery mapy przepływowe, różniące się od siebie czasem, który przedstawiają (każda kolejna mapa przepływowa przedstawia parametry przepływu w czasie cofniętym o 10 ms). Widać wyraźnie, że im dalej w czasie cofnięta jest wartość Re i Bo^* , tym mocniej linia rozdzielająca wyniki łączenia i rozpadu zbliża się do osi współrzędnych. Wynik ten sugeruje, że system automatycznej analizy obrazu nie jest w stanie w pełni uchwycić czasu, w którym zachodzą odpowiednie warunki do wystąpienia zdarzenia rozpadu lub łączenia, a jedynie rejestruje moment jego zajścia. Jednak we wszystkich zbadanych przypadkach, charakterystyka uzyskana z danych wcześniejszych niż moment wykrycia zjawiska, nadal potwierdza hipotezę znaku.

Stosując różne czynniki robocze z odpowiednio szerokim zakresem właściwości fizykochemicznych, można zbadać ich wpływ na dane zjawisko fizyczne. Pierwszym co można zaobserwować z rysunku 6.11, dla nowego czynnika (FC-72) zjawiska łączenia i rozpadu, są znacznie liczniejsze niż dla etanolu. Może to wynikać z faktu, że niezależnie od badanej średnicy, długość kanału jest stała (260 mm). Daje to stosunek średnicy kanału do obserwowalnej długości wynoszący $\sim 10^{-2}$ dla najmniejszej średnicy dla FC-72 i $\sim 1,5 \cdot 10^{-2}$ dla najmniejszej średnicy dla etanolu. Jednak właściwości fizyczne cieczy roboczych rów-

6.2. Korelacja wyników z liczbami bezwymiarowymi

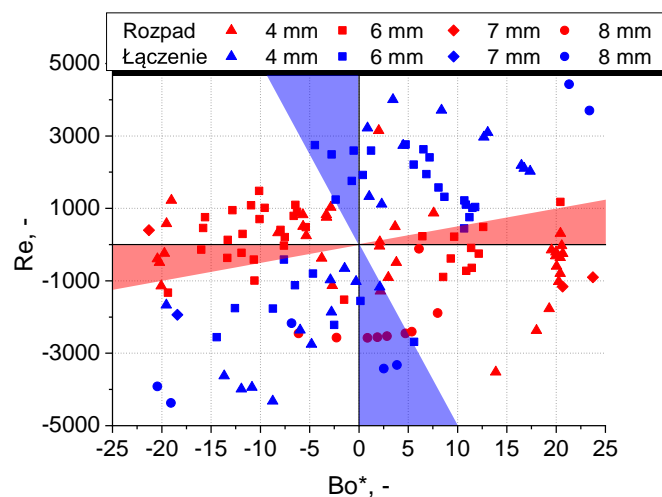


Rys. 6.7 Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w zależności od liczby Reynoldsa i zmodyfikowanej liczby Bonda – wyniki dla etanolu i średnicy 6 mm

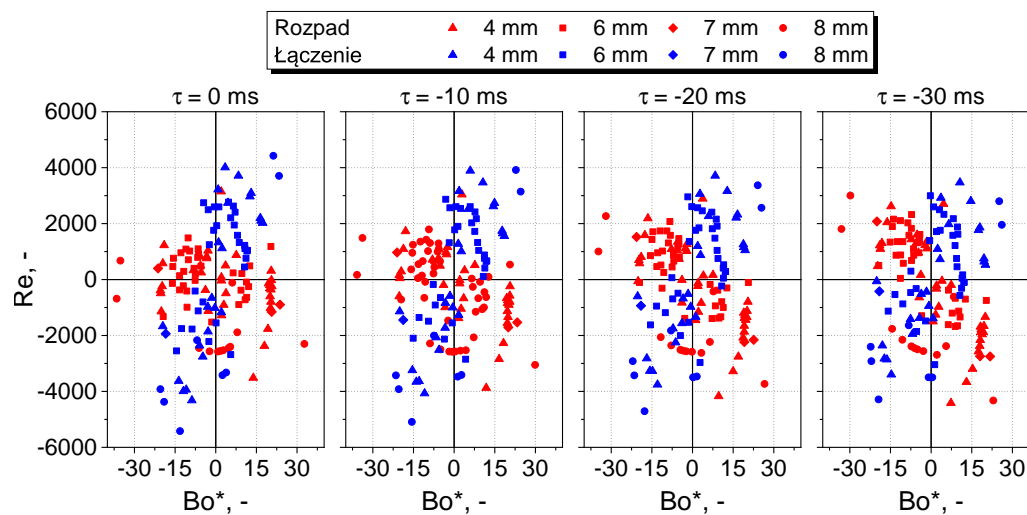


Rys. 6.8 Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w zależności od liczby Reynoldsa i zmodyfikowanej liczby Bonda – wyniki dla etanolu i średnic z zakresu 4 do 8 mm

6.2. Korelacja wyników z liczbami bezwymiarowymi

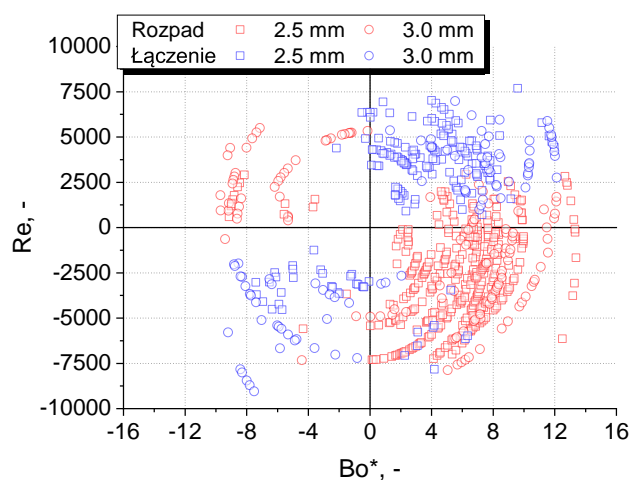


Rys. 6.9 Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych z zaznaczonymi obszarami wykracającymi poza hipotezę znaku – wyniki dla etanolu i średnic z zakresu 4 do 8 mm



Rys. 6.10 Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w kolejnych krokach czasowych przed wykryciem zjawiska – wyniki dla etanolu i średnic z zakresu 4 do 8 mm

6.2. Korelacja wyników z liczbami bezwymiarowymi

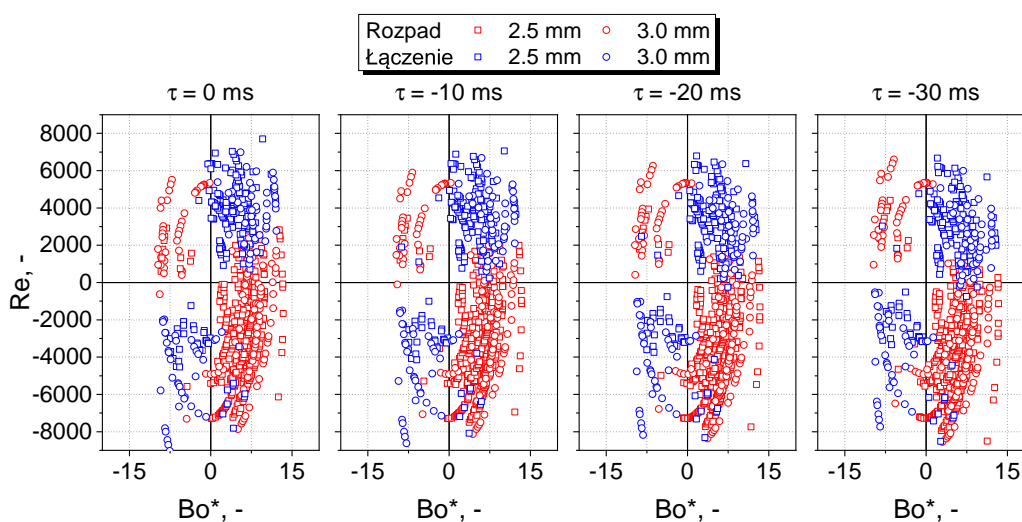


Rys. 6.11 Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w zależności od liczby Reynoldsa i zmodyfikowanej liczby Bonda – wyniki dla FC-72 i średnic z zakresu 2,5 do 3 mm

niez znacznie się różnią. W związku z tym na ten moment nie jest możliwe określenie przyczyn dużej różnicy w liczbie zaobserwowanych zjawisk. Podobnie jak w przypadku zaobserwowanych długich bąbli parowych również w tym przypadku, dalsze badania z wykorzystaniem większej liczby czynników roboczych będą bardzo ważne w celu uzyskania odpowiedzi na to pytanie i mogą przyczynić się do pogłębienia wiedzy nad genezą zjawisk rozpadu i łączenia bąbli parowych.

Mapy przepływowe zaobserwowane dla etanolu potwierdzają się również dla FC-72, tzn. jeżeli prędkość i przyspieszenie mają ten sam znak, jest większa szansa na wystąpienie zjawiska połączenia. Jeżeli prędkość i przyspieszenie mają przeciwne znaki, to istnieje znacznie większa szansa na wystąpienie zjawiska rozpadu. Dodatkowo, podobnie jak w przypadku etanolu, niektóre zjawiska rozpadu i łączenia wykraczają poza hipotezę znaku dla liczb Bonda i Reynoldsa (rysunek 6.9). Ponownie, może to wynikać z trudności w automatycznym wykrywaniu momentu, w którym spełnione są warunki wystąpienia zjawiska. Jak pokazano na rysunku 6.12, jeśli przepływ jest mierzony w czasie, a więc przed momentem, w którym zjawisko zostało wykryte przez automatyczną procedurę przyczyną rozpadu był właśnie fakt, że kilkadziesiąt milisekund wcześniej przyspieszenie było przeciwne do prędkości przepływu. Analogicznie łączenie bąbli parowych występuje, jeśli przyspieszenie miało ten sam znak co prędkość przepływu kilkadziesiąt milisekund wcześniej.

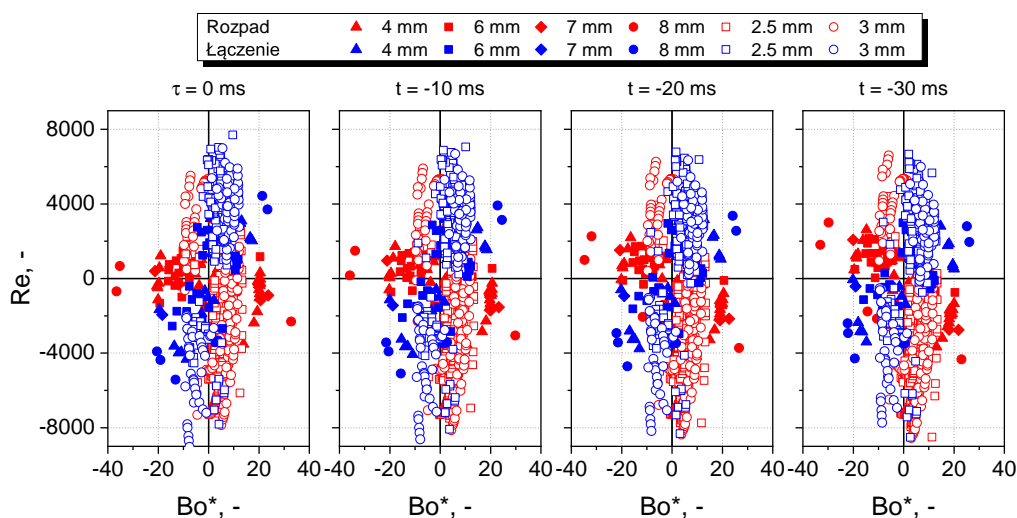
6.2. Korelacja wyników z liczbami bezwymiarowymi



Rys. 6.12 Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w kolejnych krokach czasowych przed wykryciem zjawiska – wyniki dla FC-72 i średnic z zakresu 2,5 do 3 mm

Podsumowując, na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że łączenie bąbli występuje wtedy, gdy prędkość i przyspieszenie mają ten sam znak, czyli gdy przepływ przyspiesza, niezależnie od tego, jaki czynnik roboczy został zastosowany i jaka jest średnica kanału. Zjawisko rozpadu występuje, gdy przyspieszenie i prędkość mają przeciwne znaki, czyli gdy przepływ zwalnia. Przejście pomiędzy przepływem korkowym a pierścieniowym można określić w tych przepływach tylko wtedy, gdy możliwe jest wyznaczenie dokładnych wartości prędkości i przyspieszeń, przy których następuje zjawisko rozpadu lub łączenia bąbli parowych. Ze względu na charakter badań niemożliwe było znalezienie jednoznacznej granicy, co oznacza, że w trakcie przyszłych badań powinno się zwrócić szczególną uwagę na wyjaśnienie, kiedy przepływ przechodzi pomiędzy tymi charakterystykami. Zaproponowana mapa przepływowa uwzględniająca wszystkie otrzymane wyniki (rysunek 6.13) jest pierwszą próbą na świecie w tym kierunku i w przyszłości może być wykorzystana w modelach jednowymiarowych i modelowaniu CFD.

6.3. Wizualizacja przepływu



Rys. 6.13 Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w kolejnych krokach czasowych przed wykryciem zjawiska – wyniki dla etanolu i FC-72

6.3 Wizualizacja przepływu

Rozpad bąbla parowego, który może być powiązany z przejściem od przepływu pierścieniowego do korkowego, zachodzi, jak pokazano w podrozdziale 6.2, w przypadku, gdy prędkość i przyspieszenie przepływu mają różne znaki. Ze względu na możliwość korelacji przyszłych modeli numerycznych i analitycznych, w tym podrozdziale zostanie pokazana wizualizacja zjawisk zaobserwowanych w trakcie badań.

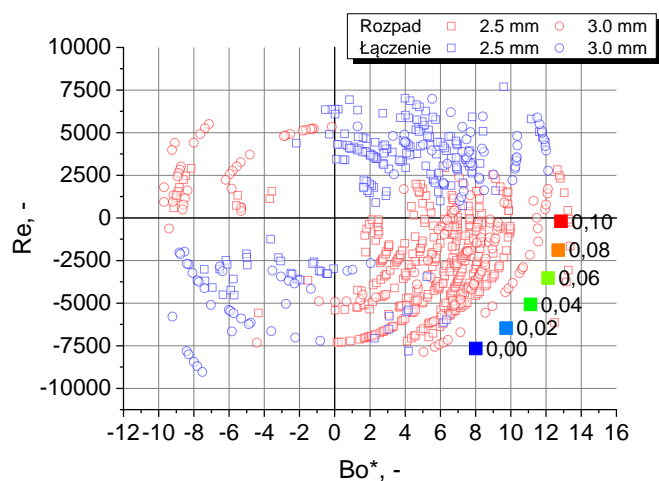
Na rysunku 6.14a pokazano kolejne ujęcia z nagrania, na których widoczne jest zjawisko rozpadu, w kanale o średnicy $\sim 2,5$ mm wypełnionym czynnikiem roboczym FC-72. Jak wykazano wcześniej, przejście pomiędzy strukturami przepływowymi rozpoczyna się, gdy prędkość i przyspieszenie mają różne znaki (hipoteza znaku), ale samo zjawisko zerwania może wystąpić nawet kilka ms później, gdy znaki prędkości i przyspieszenia są już takie same. Jest to szczególnie widoczne na rysunku 6.14b, gdzie zaznaczone punkty określają aktualną wartość zmodyfikowanej liczby Bondy (Bo^*) oraz liczby Reynoldsa podczas przepływu i odpowiadają kolejnym klatkom na rysunku 6.14a.

Na rysunku 6.15a pokazano przypadek (3 mm, FC-72), w którym wartość prędkości przepływu zmniejsza się, a ostatecznie przy 40 ms zmienia swój zwrot. Kierując się wynikami przedstawionymi w rozdziale 6.2 oraz na rysunku 6.14, naturalnym powinno być, że

6.3. Wizualizacja przepływu



(a) Kolejne klatki rozpadu bąbla parowego



(b) Mapy przepływowe i zaznaczone kolejne punkty odpowiadające klatkom nagrania

Rys. 6.14 Przejście przepływu z pierścieniowego do korkowego (średnica 2,5 mm, czynnik roboczy FC-72)

jeśli przyspieszenie przepływu jest skierowane przeciwnie do prędkości, zjawisko rozpadu powinno występować częściej. Rzeczywiście, w kolejnych klatkach przedstawionego nagrania powstają coraz mniejsze bąble parowe, co potwierdza sformułowaną tezę. Znajduje to odzwierciedlenie na rysunku 6.15b, pokazującym, że kolejne punkty mapy bazującej na liczbie Reynoldsa i zmodyfikowanej liczbie Bonda mają przeciwne znaki. Opisany przypadek przemawia za dwoma stwierdzeniami: hipoteza znaku znajduje swoje potwierdzenie;

6.3. Wizualizacja przepływu

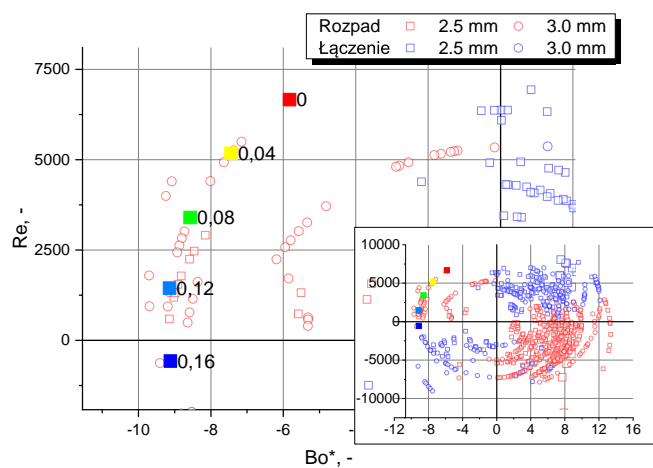
jeśli doszło do rozpadu poza granicą hipotezy, to prawdopodobnie wynika to z niemożności określenia dokładnego czasu wystąpienia przyczyn zajścia zjawiska rozpadu.

Zjawisko łączenia bąbli parowych podczas przepływu jest związane ze wzrostem prędkości, innymi słowy występuje ono, gdy prędkość i przyspieszenie mają ten sam znak. W rejonie, w którym zaobserwowano wiele przypadków koalescencji (rysunek 6.16b), hipoteza znaku mogłaby sugerować, że prowadzi ona bezpośrednio do przepływu pierścieniowego. Jednakże, jak widać na rysunku 6.16a (2,5 mm, FC-72), nie jest to w pełni rozwinięty przepływ pierścieniowy. Dlatego też, pomimo wyznaczenia obszaru, w którym zachodzą zjawiska rozpadu i łączenia za pomocą hipotezy znaku, granice przepływów pierścieniowych i korkowych nie mogą być jeszcze określone w sposób ostateczny.

6.3. Wizualizacja przepływu



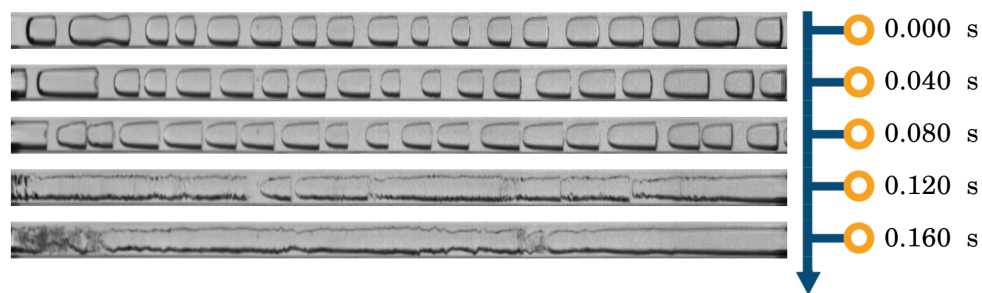
(a) Kolejne klatki rozpadu bąbla parowego



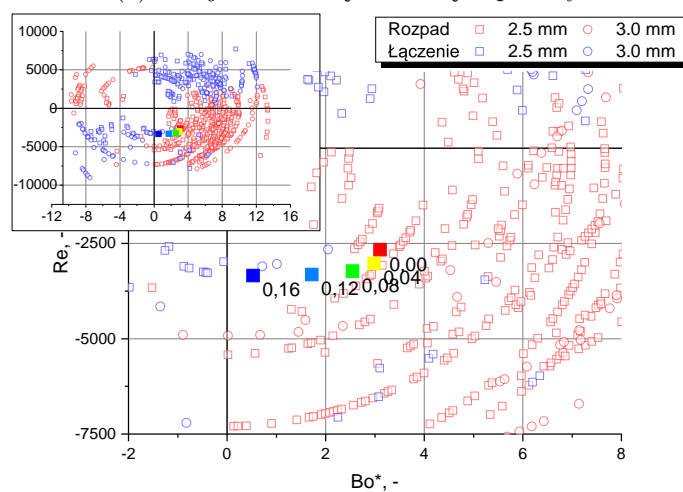
(b) Mapy przepływu i zaznaczone kolejne punkty odpowiadające klatkom nagrania

Rys. 6.15 Przejście przepływu z pierścieniowego do korkowego (średnica 3,0 mm, czynnik roboczy FC-72)

6.3. Wizualizacja przepływu



(a) Kolejne klatki łączenia bąbli parowych



(b) Mapy przepływowe i zaznaczone kolejne punkty odpowiadające klatkom nagrania

Rys. 6.16 Przejście przepływu z korkowego do pierścieniowego (średnica 2,5 mm, czynnik roboczy FC-72)

Rozdział 7

Podsumowanie

Przepływ dwufazowy jest podstawą działania wielu urządzeń wymiany ciepła, a w szczególności urządzeń pasywnych. Pomimo prób badania zjawisk w nim zachodzących, które sięgają XIX w., nadal duża część nie ma jednoznacznego opisu pozwalającego na precyzyjne modelowanie tych urządzeń. W ostatnim czasie bardzo dużym zainteresowaniem cieszy się pulsacyjna rurka ciepła, co spowodowane jest prostotą konstrukcji i wysokimi parametrami wymiany ciepła nawet w porównaniu z takimi materiałami jak grafen. Również z tego powodu widoczne jest zainteresowanie osób nie tylko zajmujących się pracą naukową, ale również ze strony pracowników przemysłu naziemnego i kosmicznego. Już wprowadzenie do niniejszej pracy pokazało, że głównymi podmiotami finansującymi badania pulsacyjnych rurek ciepła nie są już tylko instytucje nauk podstawowych, ale również instytucje sektora kosmicznego (ESA, JAXA czy NASA) i sektor prywatny.

W przedstawionej rozprawie podjęto za cel opracowanie korelacji pomiędzy nową liczbą kryterialną, a wynikami badań eksperymentalnych. Zgodnie z tezą pracy nowa liczba kryterialna powinna być zależna od sił napięcia powierzchniowego, gęstości i lepkości czynnika roboczego, średnicy charakterystycznej kanału, w którym płynie czynnik oraz od prędkości charakterystycznej. Jednocześnie liczba kryterialna powinna być niezależna od składowej grawitacji, co zostało uwzględnione poprzez zastąpienie składowej grawitacji składową przyspieszenia czynnika roboczego płynącego w kanale.

Na potrzeby tezy głównej dysertacji sformułowano cele pomocnicze, które następnie w trakcie trwania pracy były systematycznie realizowane.

1. Wytypowanie parametrów wpływających na procesy zachodzące w kanałach kapilarnych.

Na podstawie opisanej w rozdziale 2.6.1 teorii II Buckinghamma potwierdziły się początkowe założenia, mówiące że identyfikacja struktur przepływowych zależy od sił napięcia powierzchniowego, gęstości i lepkości czynnika roboczego oraz średnicy charakterystycznej kanału i prędkości charakterystycznej przepływu. Jednocześnie wytypowano dodatkowe zależności wpływające na strukturę przepływową, do których należą długość bąbli parowych, spadek ciśnienia oraz przyspieszenie przepływu.

2. Wstępne sformułowanie liczby kryterialnej niezależnej od składowej grawitacyjnej.

Kontynuując analizę na podstawie teorii Buckinghamma, określono, że wykorzystanie przyspieszenia przepływu w liczbie kryterialnej pozwoli na uniezależnienie jej od przyspieszenia grawitacyjnego. Jednocześnie zdecydowano, że ze względu na założone w tezie warunki uwzględnianie spadku ciśnienia nie powinno być realizowane. Wynika to również z punktu 6 celów pomocniczych, który mówi o opracowaniu zaleceń projektowych pulsacyjnych rurek ciepła. Wykorzystanie spadku ciśnienia znacząco skomplikowałoby projektowanie urządzenia.

3. Zaprojektowanie oraz wykonanie stanowiska badawczego.

Początkowa koncepcja stanowiska badawczego została opracowana we współpracy z międzynarodowym zespołem z Uniwersytetu w Brighton (Anglia). Następnie wykonano projekt oraz zostało wybudowane stanowisko badawcze. Dokładny opis stanowiska badawczego wraz z ostatecznymi zdjęciami został przedstawiony w rozdziale 4. Oprogramowanie sterujące oraz pomiarowe zostało przygotowane we własnym zakresie.

4. Przeprowadzenie badań w warunkach mikrogravitacji.

Przeprowadzenie badań w warunkach mikrogravitacji jest niewątpliwie jednym z największych wyzwań niniejszej pracy doktorskiej. Po opracowaniu tezy i celów badawczych oraz wstępnej koncepcji stanowiska został złożony wniosek do Europejskiej Agencji Kosmicznej w ramach programu CORA (ang. Continously Open Research Announcement), który został następnie bardzo wysoko oceniony i przyznany został

dostęp do wnioskowanej infrastruktury badawczej w ZARM Drop Tower (Brema, Niemcy). Badania zostały podzielone na trzy części w odstępach dwumiesięcznych, w ramach których wykonano 24 eksperymenty o czasie trwania około 9 s.

5. Analiza wyników otrzymanych z doświadczenia w warunkach mikrogravitacji.

Do analizy wyników został opracowany kod w oprogramowaniu MATLAB®, dokładny opis procedury został opisany w rozdziale 5. Celem procedury było wyznaczenie prędkości, przyspieszenia, położenia bąbli w czasie oraz momentów ich rozpadu i łączenia. Cel został z powodzeniem zrealizowany co zostało pokazane pod koniec wspomnianego rozdziału.

6. Korelacja wyników eksperymentalnych z wartościami liczby kryterialnej oraz opracowanie zaleceń projektowych pulsacyjnych rurek ciepła do zastosowań kosmicznych.

Na podstawie wyników badań w warunkach mikrogravitacji oraz opracowanego oprogramowania uzyskano dane dotyczące prędkości i przyspieszenia przepływu w kanałach oraz zależność rozpadu i łączenia bąbli parowych w dziedzinie czasu. Następnie na podstawie przeglądu literatury porównano korelacje opracowane przez autorów publikacji, w których analiza eksperymentalna była prowadzona w podobnych warunkach. Zgodnie z tym porównaniem, wyniki przedstawione w dysertacji nie potwierdzają wspomnianych korelacji, co z kolei wymusiło opracowanie nowego podejścia. Zauważono, że na podstawie wyników możliwe jest przedstawienie hipotezy nazwanej w pracy hipotezą znaku. Hipoteza w pierwszej kolejności została potwierdzona na podstawie wyników dla etanolu w zakresie średnic 4 do 8 mm, a następnie dla FC-72 w zakresie średnic 2,5 do 3 mm. W ramach zaleceń projektowych, w podrozdziale 6.3 pokazano, jakie struktury przepływowe występują w przepływie dwufazowym w kanałach z zakresów wspomnianych wyżej.

Na podstawie powyższego, udowodniono, że możliwe jest określenie liczby kryterialnej, która pozwoli na identyfikację struktur i będzie niezależna od składowej grawitacji. Zastosowana w rozprawie liczba kryterialna uwzględnia dominujące w warunkach mikrogravitacji składowe, takie jak średnicę charakterystyczną, siły powierzchniowe, gęstość i lepkość czynnika roboczego oraz prędkość charakterystyczną. Podsumowując, pomocnicze cele pracy przedstawione podczas otwarcia rozprawy zostały zrealizowane, a teza pracy została potwierdzona.

W trakcie opracowywania wyników pracy oraz przeglądu literatury zwrócono uwagę na kilka znaczących kwestii, które mogą poszerzyć wiedzę na temat zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych. W ramach dalszych prac autora, planowane są dodatkowe analizy z wykorzystaniem przedstawionych w rozprawie danych jednak z wykorzystaniem spadku ciśnienia jako parametru wpływającego na zjawisko, dalsze analizy wymiarowe, które pozwolą na uwzględnienie długości bąbla jako parametru wpływającego na zjawisko. Ostatnim elementem, na który wskazuje niniejsza praca, jest wpływ wymiany ciepła i idące za tym odparowanie lub skraplanie na struktury przepływowe w kanałach w mikrogravitacji. Ponieważ dane dostępne w literaturze są ograniczone, planowane jest przeprowadzenie kolejnych badań na zmodyfikowanym stanowisku doświadczalnym w warunkach mikrogravitacji w czasie znacznie dłuższym niż dotychczasowe 9 s.

Bibliografia

- [1] Syed Amjad Ahmed, Bibin John. Liquid - Liquid horizontal pipe flow - A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168:426–447, 2018.
- [2] Hisateru Akachi. Structure of a heat pipe, Maj 1 1990. US Patent 4,921,041.
- [3] Hisateru Akachi. Structure of micro-heat pipe, Czerwiec 15 1993. US Patent 5,219,020.
- [4] Unal Akdag, A. Feridun Ozguc. Experimental investigation of heat transfer in oscillating annular flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(11):2667–2672, 2009.
- [5] Mohammad Alhuyi Nazari, Mohammad H. Ahmadi, Roghayeh Ghasempour, Mohammad Behshad Shafii. How to improve the thermal performance of pulsating heat pipes: A review on working fluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91:630–638, 2018.
- [6] The American Society of Mechanical Engineers. *Studies of Vibration-Induced Multiphase Fluid Phenomena and Pulsating Heat Pipe Performance Under Microgravity*, wolumen Volume 2: Symposia, Parts A, B, and C, 07 2003.
- [7] Makiko Ando, Atsushi Okamoto, Kosuke Tanaka, Masakatsu Maeda, Hiroyuki Sugita, Takurou Daimaru, Hiroki Nagai. On-orbit demonstration of oscillating heat pipe with check valves for space application. *Applied Thermal Engineering*, 130:552–560, 2018.
- [8] Manolia Andredaki, Anastasios Georgoulas, Nicolas Miché, Marco Marengo. Accelerating Taylor bubbles within circular capillary channels: Break-up mechanisms and regimes. *International Journal of Multiphase Flow*, 134:103488, 2021.
- [9] M. Arab, M. Soltanieh, M.B. Shafii. Experimental investigation of extra-long pulsating heat pipe application in solar water heaters. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 42(Complete):6–15, 2012.
- [10] M. M. Awad, Y. S. Muzychka. Review and modeling of two-phase frictional pressure gradient at microgravity conditions. *American Society of Mechanical Engineers*,

- Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM*, 1(PARTS A, B AND C):987–1002, 2010.
- [11] Vincent Ayel, Luca Pietrasanta, Gildas Lalizel, Cyril Romestant, Yves Bertin, Marco Marengo. Thermo-Hydraulic Analysis of Semi-Transparent Flat Plate Pulsating Heat Pipes Tested in 1 g and Microgravity Conditions. *MICROGRAVITY SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 31(4):403–415, AUG 2019.
- [12] Vincent Ayel, Maksym Slobodeniuk, Rémi Bertossi, Cyril Romestant, Yves Bertin. Flat plate pulsating heat pipes: A review on the thermohydraulic principles, thermal performances and open issues. *Applied Thermal Engineering*, 197(July), 2021.
- [13] Chiara Baldassari, Marco Marengo. Flow boiling in microchannels and microgravity. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(1):1–36, 2013.
- [14] Gilvan Barroso, Quan Li, Rajendra K. Bordia, Günter Motz. Polymeric and ceramic silicon-based coatings – a review. *J. Mater. Chem. A*, 7:1936–1963, 2019.
- [15] Ian H. Bell, Jorrit Wronski, Sylvain Quoilin, Vincent Lemort. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6):2498–2508, 2014.
- [16] Przemysław Błasiak, Marcin Opalski, Parthkumar Parmar, Cezary Czajkowski, Sławomir Pietrowicz. The thermal—flow processes and flow pattern in a pulsating heat pipe—numerical modelling and experimental validation. *Energies*, 14(18), 2021.
- [17] W. S. Bousman, J. B. McQuillen, L. C. Witte. Gas-liquid flow patterns in microgravity: Effects of tube diameter, liquid viscosity and surface tension. *International Journal of Multiphase Flow*, 22(6):1035–1053, 1996.
- [18] James E Bryan, Jamal Seyed-Yagoobi. Heat transport enhancement of monogroove heat pipe with electrohydrodynamic pumping. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 11(3):454–460, 1997.
- [19] Edgar Buckingham. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Physical review*, 4(4):345, 1914.
- [20] Gian Piero Celata, Maurizio Cumo, M. Gervasi, Giuseppe Zummo. Flow pattern analysis of flow boiling in microgravity. *Multiphase Science and Technology*, 19(2):183–210, 2007.

- [21] Ana T.S. Cerdeira, João B.L.M. Campos, João M. Miranda, José D.P. Araújo. Review on microbubbles and microdroplets flowing through microfluidic geometrical elements. *Micromachines*, 11(2), 2020.
- [22] Jiajia Chen, Huafei Jiang, Yucan Fu, Ning Qian. Heat transfer performance of an axially rotating heat pipe for cooling of grinding. *Energies*, 13(21):5745, 2020.
- [23] Lixin Cheng, Gherhardt Ribatski, John R. Thome. Two-Phase Flow Patterns and Flow-Pattern Maps: Fundamentals and Applications. *Applied Mechanics Reviews*, 61(5), 07 2008. 050802.
- [24] D. Chisholm. A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10(12):1767–1778, 1967.
- [25] Buhong Choi, Terushige Fujii, Hitoshi Asano, Katsumi Sugimoto. A study of gas-liquid two-phase flow in a horizontal tube under microgravity. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 974:316–327, 2002.
- [26] Buhong Choi, Terushige Fujii, Hitoshi Asano, Katsumi Sugimoto. A study of the flow characteristics in air-water two-phase flow under microgravity (results of flight experiments), 2003.
- [27] F Creatini, G M Guidi, F Belfi, G Cicero, D Fioriti, D Di Prizio, S Piacquadio, G Becatti, G Orlandini, A Frigerio, S Fontanesi, P Nannipieri, M Rognini, N Morganti, S Filippeschi, P Di Marco, L Fanucci, F Baronti, M Mameli, M Manzoni, M Marengo. Pulsating heat pipe only for space (PHOS): results of the REXUS 18 sounding rocket campaign. *Journal of Physics: Conference Series*, 655:012042, nov 2015.
- [28] Christopher J Crowley, Michael G Izenon. Design manual for microgravity two-phase flow and heat transfer. Raport instytutowy, CREARE INC HANOVER NH, 1989.
- [29] Cezary Czajkowski, Przemysław Błasiak, Józef Rak, Sławomir Pietrowicz. The development and thermal analysis of a u-shaped pulsating tube operating in a rotating system of coordinates. *International Journal of Thermal Sciences*, 132:645–662, 2018.

- [30] Cezary Czajkowski, Andrzej I Nowak, Przemysław Błasiak, Agnieszka Ochman, Sławomir Pietrowicz. Experimental study on a large scale pulsating heat pipe operating at high heat loads, different adiabatic lengths and various filling ratios of acetone, ethanol, and water. *Applied Thermal Engineering*, 165:114534, 2020.
- [31] Cezary Czajkowski, Andrzej I Nowak, Sławomir Pietrowicz. Flower shape oscillating heat pipe—a novel type of oscillating heat pipe in a rotary system of coordinates—an experimental investigation. *Applied Thermal Engineering*, 179:115702, 2020.
- [32] A. E. Dukler, J. A. Fabre, J. B. McQuillen, R. Vernon. Gas-liquid flow at microgravity conditions: Flow patterns and their transitions. *International Journal of Multiphase Flow*, 14(4):389–400, 1988.
- [33] L Eriksson, E Johansson, N Kettaneh-Wold, C Wikström, S Wold. Design of experiments. *Principles and Applications, Learn ways AB, Stockholm*, 2000.
- [34] Amir Faghri, Yuwen Zhang. *Fundamentals of multiphase heat transfer and flow*. Springer, 2020.
- [35] Amir Faghri, Yuwen Zhang. *Two-Phase Flow and Heat Transfer*, strony 535–621. Springer International Publishing, Cham, 2020.
- [36] Xiande Fang, Yu Xu. Correlations for two-phase friction pressure drop under microgravity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56(1-2):594–605, 2013.
- [37] Terushige Fujii, Takeshi Nakazawa, Hitoshi Asano, Hiroyuki Yamada, Takashi Yoshiyama. Flow characteristics of gas-liquid two-phase annular flow under microgravity: Experimental results utilizing a drop tower. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 41(3):561–567, 1998.
- [38] Srinivas Garimella, Jesse D. Killion, John W. Coleman. An Experimentally Validated Model for Two-Phase Pressure Drop in the Intermittent Flow Regime for Noncircular Microchannels. *Journal of Fluids Engineering*, 125(5):887, 2003.
- [39] Anastasios Georgoulas, Manolia Andredaki, Marco Marengo. An enhanced VOF method coupled with heat transfer and phase change to characterise bubble detachment in saturated pool boiling. *Energies*, 10(3), 2017.
- [40] L. P. Golan, A. H. Stenning. Two-phase vertical flow maps. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, 184(3):108–114, 1969.

- [41] JJ Gu, M Kawaji, R Futamata. Effects of gravity on the performance of pulsating heat pipes. *JOURNAL OF THERMOPHYSICS AND HEAT TRANSFER*, 18(3):370–378, JUL-SEP 2004.
- [42] Junjie Gu, Masahiro Kawaji, Ryosuke Futamata. Microgravity Performance of Micro Pulsating Heat Pipes. *MICROGRAVITY SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 16(1-4):181–185, MAR 2005.
- [43] Raghvendra Gupta, David F. Fletcher, Brian S. Haynes. Cfd modelling of flow and heat transfer in the taylor flow regime. *Chemical Engineering Science*, 65(6):2094–2107, 2010.
- [44] Youngbae Han, Naoki Shikazono. Measurement of liquid film thickness in micro square channel. *International Journal of Multiphase Flow*, 35(10):896–903, 2009.
- [45] Youngbae Han, Naoki Shikazono. The effect of bubble acceleration on the liquid film thickness in micro tubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31(4):630–639, 2010.
- [46] R.M. Haralick, L.G. Shapiro. *Computer and Robot Vision*. Number t. 2 serii Computer and Robot Vision. Addison-Wesley, 1993.
- [47] Tannaz Harirchian, Suresh V. Garimella. A comprehensive flow regime map for microchannel flow boiling with quantitative transition criteria. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13):2694–2702, 2010.
- [48] G. F. Hewitt, D. N. Roberts. Studies of two-phase flow patterns by simultaneous x-ray and fast photography. *U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information*, 2 1969.
- [49] G.F. HEWITT, N.S. HALL-TAYLOR. Chapter 2 - regimes of flow. G.F. HEWITT, N.S. HALL-TAYLOR, redaktorzy, *Annular Two-phase Flow*, strony 4–20. Pergamon, Amsterdam, 1970.
- [50] Naoko Iwata, Hiroyuki Ogawa, Yoshiro Miyazaki, Hiroki Kawai, Seisuke Fukuda. Innovative thermal design satellite with networked variable-conductance oscillating heat pipes. *Heat Pipe Science and Technology, An International Journal*, 8(1):51–67, 2017.

- [51] Subash S. Jayawardena, Vemuri Balakotaiah, Larry C. Witte. Flow Pattern Transition Maps for Microgravity Two-Phase Flows. *AIChE Journal*, 43(6):1637–1640, 1997.
- [52] Jaeyeong Jo, Jungho Kim, Sung Jin Kim. Experimental investigations of heat transfer mechanisms of a pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 181:331–341, 2019.
- [53] V.K. Karthikeyan, Sameer Khandekar, B.C. Pillai, Pavan K. Sharma. Infrared thermography of a pulsating heat pipe: Flow regimes and multiple steady states. *Applied Thermal Engineering*, 62(2):470–480, 2014.
- [54] VK Karthikeyan, K Ramachandran, BC Pillai, A Brusly Solomon. Understanding thermo-fluidic characteristics of a glass tube closed loop pulsating heat pipe: flow patterns and fluid oscillations. *Heat and Mass Transfer*, 51(12):1669–1680, 2015.
- [55] N. Kattan, J. R. Thome, D. Favrat. Flow Boiling in Horizontal Tubes: Part 1—Development of a Diabatic Two-Phase Flow Pattern Map. *Journal of Heat Transfer*, 120(1):140–147, 02 1998.
- [56] N. Kattan, J. R. Thome, D. Favrat. Flow Boiling in Horizontal Tubes: Part 2—New Heat Transfer Data for Five Refrigerants. *Journal of Heat Transfer*, 120(1):148–155, 02 1998.
- [57] N. Kattan, J. R. Thome, D. Favrat. Flow Boiling in Horizontal Tubes: Part 3—Development of a New Heat Transfer Model Based on Flow Pattern. *Journal of Heat Transfer*, 120(1):156–165, 02 1998.
- [58] Peter A. Kew, Keith Cornwell. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels. *Applied Thermal Engineering*, 17(8-10):705–715, 1997.
- [59] Sameer Khandekar, Piyanun Charoensawan, Manfred Groll, Pradit Terdtoon. Closed loop pulsating heat pipes part b: visualization and semi-empirical modeling. *Applied Thermal Engineering*, 23(16):2021–2033, 2003.
- [60] Sameer Khandekar, Nicolas Dollinger, Manfred Groll. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 23(6):707–719, 2003.

- [61] Sameer Khandekar, Anant Prasad Gautam, Pavan K Sharma. Multiple quasi-steady states in a closed loop pulsating heat pipe. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(3):535–546, 2009.
- [62] Jong-Soo Kim, Ngoc Hung Bui, Hyun-Seok Jung, Wook-Hyun Lee. The study on pressure oscillation and heat transfer characteristics of oscillating capillary tube heat pipe. *KSME international journal*, 17(10):1533–1542, 2003.
- [63] A Kumagai, S Takahashi. Viscosity of saturated liquid fluorocarbon refrigerants from 273 to 353 k. *International journal of thermophysics*, 12(1):105–117, 1991.
- [64] Hong-Wei Li, Yun-Long Zhou, Yan-Dong Hou, Bin Sun, Yue Yang. Flow pattern map and time–frequency spectrum characteristics of nitrogen–water two-phase flow in small vertical upward noncircular channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54:47–60, 2014.
- [65] Jae S Lim. Two-dimensional signal and image processing. *Englewood Cliffs*, 1990.
- [66] Xiangdong Liu, Yongping Chen, Mingheng Shi. Influence of gravity on gas-liquid two-phase flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 41:23–35, 2012.
- [67] Thermotive LLC. Thermotive | high conductance thermal straps for cryocooler & cryogenics. <http://www.thermotive.com/thermalstraps.html>. (Accessed on 12/10/2021).
- [68] D. C. Lowe, K. S. Rezkallah. Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals. *International Journal of Multiphase Flow*, 25(3):433–457, 1999.
- [69] Qi Lu, Yu Liu, Jian Deng, Xiaowei Luo, Zhiyong Deng, Zhengpeng Mi. Review of interdisciplinary heat transfer enhancement technology for nuclear reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 159, 2021.
- [70] H. Ma. *Oscillating Heat Pipes*. Springer, 2015.
- [71] M. Mameli, L. Araneo, S. Filippeschi, L. Marelli, R. Testa, M. Marengo. Thermal response of a closed loop pulsating heat pipe under a varying gravity force. *International Journal of Thermal Sciences*, 80:11–22, 2014.

- [72] Mauro Mameli, Andrea Catarsi, Daniele Mangini, Luca Pietrasanta, Nicholas Miche, Marco Marengo, Paolo Di Marco, Sauro Filippeschi. Start-up in microgravity and local thermodynamic states of a hybrid loop thermosyphon/pulsating heat pipe. *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, 158, JUL 25 2019.
- [73] Mauro Mameli, Marco Marengo, Sameer Khandekar. Local heat transfer measurement and thermo-fluid characterization of a pulsating heat pipe. *International Journal of Thermal Sciences*, 75:140–152, 2014.
- [74] Mauro Mameli, Marco Marengo, Sameer Khandekar. Local heat transfer measurement and thermo-fluid characterization of a pulsating heat pipe. *International journal of thermal sciences*, 75:140–152, 2014.
- [75] D. Mangini, M. Mameli, A. Georgoulas, L. Araneo, S. Filippeschi, M. Marengo. A pulsating heat pipe for space applications: Ground and microgravity experiments. *International Journal of Thermal Sciences*, 95:53–63, 2015.
- [76] Daniele Mangini, Mauro Mameli, Davide Fioriti, Sauro Filippeschi, Lucio Araneo, Marco Marengo. Hybrid Pulsating Heat Pipe for space applications with non-uniform heating patterns: Ground and microgravity experiments. *Applied Thermal Engineering*, 126:1029–1043, 2017.
- [77] M. Manzoni, M. Mameli, C. de Falco, L. Araneo, S. Filippeschi, M. Marengo. Advanced numerical method for a thermally induced slug flow: application to a capillary closed loop pulsating heat pipe. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 82(7):375–397, 2016.
- [78] Marco Marengo, Vadim S Nikolayev. Pulsating heat pipes: experimental analysis, design and applications. *ENCYCLOPEDIA OF TWO-PHASE HEAT TRANSFER AND FLOW IV: Modeling Methodologies, Boiling of CO₂, and Micro-Two-Phase Cooling Volume 1: Modeling of Two-Phase Flows and Heat Transfer*, strony 1–62. World Scientific, 2018.
- [79] Kenshiro Muramatsu, Youngjik Youn, Youngbae Han, Yosuke Hasegawa, Naoki Shikazono. Numerical study on the effect of initial flow velocity on liquid film thickness of accelerated slug flow in a micro tube. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 54:77–86, 2015.

- [80] Iaroslav Nekrashevych, Vadim S. Nikolayev. Pulsating Heat Pipe Simulations: Impact of PHP Orientation. *MICROGRAVITY SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 31(3):241–248, JUN 2019.
- [81] D.J. Nicklin, J.F. Davidson, redaktorzy. *The onset of instability on two phase slug flow*. Institution of Mechanical Engineers, 1962.
- [82] Vadim S Nikolayev, Marco Marengo. Pulsating heat pipes: basics of functioning and modeling. *ENCYCLOPEDIA OF TWO-PHASE HEAT TRANSFER AND FLOW IV: Modeling Methodologies, Boiling of CO₂, and Micro-Two-Phase Cooling Volume 1: Modeling of Two-Phase Flows and Heat Transfer*, strony 63–139. World Scientific, 2018.
- [83] Haoyi Niu, Yuqi Huang. Application of the phase-averaged pre-processing method in identification of oscillatory two-phase flow patterns based on textural features. *Flow Measurement and Instrumentation*, 77:101872, 2021.
- [84] Andrzej I Nowak, Cezary Czajkowski, Przemysław Błasiak, Sławomir Pietrowicz. Thermal performances of a pulsating heat pipe with different inclination angles, filling ratios and working fluids. *International Symposium on Oscillating/Pulsating Heat Pipes, Daejeon, Korea, 25-28 September, 2019*.
- [85] Union of Concerned Scientists. Ucs satellite database.
- [86] Vipul M. Patel, Hemantkumar B. Mehta. Channel wise displacement-velocity-frequency analysis in acetone charged multi-turn closed loop pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 195:367–383, 2019.
- [87] Vipul M Patel, Hemantkumar B Mehta. Channel wise displacement-velocity-frequency analysis in acetone charged multi-turn closed loop pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 195:367–383, 2019.
- [88] Roberta Perna, Mauro Abela, Mauro Mameli, Alessandro Mariotti, Luca Pietrasanta, Marco Marengo, Sauro Filippeschi. Flow characterization of a pulsating heat pipe through the wavelet analysis of pressure signals. *Applied Thermal Engineering*, 171:115128, 2020.
- [89] Luca Pietrasanta, Mauro Mameli, Daniele Mangini, Anastasios Georgoulas, Nicholas Michè, Sauro Filippeschi, Marco Marengo. Developing flow pattern maps for

- accelerated two-phase capillary flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 112(January 2019):109981, apr 2020.
- [90] S.M. Pouryousefi, Yuwen Zhang. Numerical investigation of chaotic flow in a 2d closed-loop pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 98:617–627, 2016.
- [91] D.A. Reay, P.A. Kew, R.J. McGlen. Chapter 2 - heat transfer and fluid flow theory. D.A. Reay, P.A. Kew, R.J. McGlen, redaktorzy, *Heat Pipes (Sixth Edition)*, strony 15–64. Butterworth-Heinemann, Oxford, wydanie sixth edition, 2014.
- [92] S. Z. Rouhani, M. S. Sohal. Two-phase flow patterns: A review of research results. *Progress in Nuclear Energy*, 11(3):219–259, 1983.
- [93] Nandan Saha, P.K. Das, P.K. Sharma. Influence of process variables on the hydrodynamics and performance of a single loop pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 74:238–250, 2014.
- [94] Phrut Sakulchangsattajai, Niti Kammuang-Lue, Kritsada On-Ai, Pradit Terdtoon. Correlations to predict thermal performance affected by working fluid's properties of vertical and horizontal closed-loop pulsating heat pipe. *Thermal Science*, 20(5):1555–1564, 2016.
- [95] Human Spaceflight Science Department of European Space Agency, Exploration Directorate. A redefinition of strategic goals for future space research on the iss and supporting research platforms, 2018.
- [96] M. B. Shafii, S. Arabnejad, Y. Saboohi, H. Jamshidi. Experimental investigation of pulsating heat pipes and a proposed correlation. *Heat Transfer Engineering*, 31(10):854–861, 2010.
- [97] MB Shafii, A Faghri, Yuwen Zhang. Analysis of heat transfer in unlooped and looped pulsating heat pipes. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2002.
- [98] Mohammad B. Shafii, Amir Faghri, Yuwen Zhang. Thermal Modeling of Unlooped and Looped Pulsating Heat Pipes . *Journal of Heat Transfer*, 123(6):1159–1172, 05 2001.
- [99] R. Situ, T. Hibiki, R. J. Brown, T. Hazuku, T. Takamasa. Flow regime transition criteria for two-phase flow at reduced gravity conditions. *International Journal of Multiphase Flow*, 37(9):1165–1177, 2011.

- [100] Giulia Spinato, Navid Borhani, Brian P d'Entremont, John R Thome. Time-strip visualization and thermo-hydrodynamics in a closed loop pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 78:364–372, 2015.
- [101] Giulia Spinato, Navid Borhani, John R. Thome. Understanding the self-sustained oscillating two-phase flow motion in a closed loop pulsating heat pipe. *Energy*, 90:889–899, 2015.
- [102] Giulia Spinato, Navid Borhani, John R Thome. Operational regimes in a closed loop pulsating heat pipe. *International Journal of Thermal Sciences*, 102:78–88, 2016.
- [103] Yemada Taitel, A. E. Dukler. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE Journal*, 22(1):47–55, 1976.
- [104] Anand Takawale, Satyanand Abraham, Axel Sielaff, Pallab Sinha Mahapatra, Arvind Pattamatta, Peter Stephan. A comparative study of flow regimes and thermal performance between flat plate pulsating heat pipe and capillary tube pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 149:613–624, 2019.
- [105] Emanuele Teodori, Pedro Pontes, Ana Moita, Anastasios Georgoulas, Marco Marengo, Antonio Moreira. Sensible heat transfer during droplet cooling: Experimental and numerical analysis. *Energies*, 10(6), 2017.
- [106] William Thielicke, Eize J. Stamhuis. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2, 2014.
- [107] B.Y Tong, T.N Wong, K.T Ooi. Closed-loop pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 21(18):1845–1862, 2001.
- [108] Amos Ullmann, Neima Brauner. The prediction of flow pattern maps in minichannels. *Multiphase Science and Technology*, 19(1):49–73, 2007.
- [109] Peter von Kampen, Ulrich Kaczmarczik, Hans J. Rath. The new Drop Tower catapult system. *Acta Astronautica*, 59(1-5):278–283, 2006.
- [110] Norbert Wiener. *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*. The MIT Press, 1964.

- [111] J.L. Xu, Y.X. Li, T.N. Wong. High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(16):3338–3351, 2005.
- [112] J.L. Xu, Y.X. Li, T.N. Wong. High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(16):3338–3351, 2005.
- [113] JL Xu, XM Zhang. Start-up and steady thermal oscillation of a pulsating heat pipe. *Heat and Mass Transfer*, 41(8):685–694, 2005.
- [114] Zhi Xu, Yaning Zhang, Bingxi Li, Jingqi Huang. Modeling the phase change process for a two-phase closed thermosyphon by considering transient mass transfer time relaxation parameter. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101:614–619, 2016.
- [115] Fanghao Yang, Xianming Dai, Yoav Peles, Ping Cheng, Jamil Khan, Chen Li. Flow boiling phenomena in a single annular flow regime in microchannels (i): Characterization of flow boiling heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 68:703–715, 2014.
- [116] Honghai Yang, S. Khandekar, M. Groll. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 28(1):49–59, 2008.
- [117] Peng Yang, Yuheng Zhang, Sophie Wang, Yingwen Liu. Experimental study on liquid-vapor two-phase pressure drop of pulsating flow in an evaporator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 158:119998, 2020.
- [118] Aejung Yoon, Sung Jin Kim. Characteristics of oscillating flow in a micro pulsating heat pipe: Fundamental-mode oscillation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109:242–253, 2017.
- [119] Aejung Yoon, Sung Jin Kim. Experimental and theoretical studies on oscillation frequencies of liquid slugs in micro pulsating heat pipes. *Energy Conversion and Management*, 181:48–58, 2019.
- [120] Young Jik Youn, Youngbae Han, Naoki Shikazono. Liquid film thicknesses of oscillating slug flows in a capillary tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124:543–551, 2018.

- [121] Yuwen Zhang, Amir Faghri. Heat transfer in a pulsating heat pipe with open end. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(4):755–764, 2002.
- [122] Yuwen Zhang, Amir Faghri. Oscillatory flow in pulsating heat pipes with arbitrary numbers of turns. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 17(3):340–347, 2003.
- [123] Yuwen Zhang, Amir Faghri. Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes. *Heat transfer engineering*, 29(1):20–44, 2008.
- [124] J.-F. Zhao, J. C. Xie, H. Lin, W. R. Hu, A. V. Ivanov, A. Yu Belyaev. Experimental studies on two-phase flow patterns aboard the Mir space station. *International Journal of Multiphase Flow*, 27(11):1931–1944, 2001.
- [125] Jian.-Fu Zhao. Two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity. *International Journal of Multiphase Flow*, 36(2):135–143, 2010.
- [126] Jian.-Fu Zhao, Gang Liu, Bin Li. Two-phase flow patterns in a square mini-channel. *Journal of Thermal Science*, 13(2):174–178, 2004.
- [127] Jian.-Fu Zhao, Jingchang Xie, Hai Lin, Wenrui Hu. Experimental study on two-phase gas-liquid flow patterns at normal and reduced gravity conditions. *Science in China, Series E: Technological Sciences*, 44(5):553–560, 2001.

Spis rysunków

1.1	Izolacja wielowarstwowa (MLI)	4
1.2	Porównanie zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła [67, 73] . . .	5
1.3	Pulsacyjna rurka ciepła – schematyczna przykładowa konstrukcja wymiennika z typową strukturą czynnika dwufazowego	9
1.4	Porównanie liczby publikacji dotyczących struktur przepływowych z ogólną liczbą dotyczących PHP	11
1.5	Struktury przepływowe w pulsacyjnych rurkach ciepła – w kolejności przepływ pęcherzykowy, korkowy, przejściowy, pierścieniowy, pierścieniowy rozproszony	12
1.6	Struktury przepływowe w zależności od prędkości przepływu frakcji cieczonej i gazowej [40, 35]	13
1.7	Zależność współczynnika wymiany ciepła i struktury przepływowej [23] . .	15
1.8	Wydajność pulsacyjnych rurek ciepła - struktura przepływowa i kąt pochyleńia [93]	17
2.1	Dwufazowe struktury przepływowe występujące w kanałach pionowych . .	21
2.2	Mapa przepływowa opracowana przez Hewitt’a i Roberta [48] i odtworzona przez Faghri’ego i Zhanga [34]	22
2.3	Mapa przepływowa opracowana przez Golana i Stenninga [40] dla przepływu pionowego w dół	23
2.4	Dwufazowe struktury przepływowe występujące w kanałach poziomych . .	23
2.5	Struktury przepływowe za Taitelem i Duklerem [103] w zależności od warunków przepływu. Dla krzywych A i B - należy wykorzystać współrzędne F i X (równania 2.2 i 2.1), analogicznie dla krzywych C i D	24
2.6	Uproszczone kryterium ograniczoneści wyniki literaturowe [13]	26
2.7	Wpływ przyspieszania grawitacyjnego na spadek ciśnienia w przepływie [37]	29
2.8	Średnica krytyczna w zależności od poziomu mikrogravitacji - kryterium Garimelli (Kew i inni [38])	33
2.9	Średnica krytyczna w zależności od poziomu mikrogravitacji - kryterium Bonda (Kew i inni [58])	33

2.10	Weryfikacja kryterium Garimella'ego [13]	35
4.1	Schematyczne działanie stanowiska badawczego	48
4.2	Uproszczony model 3D stanowiska badawczego	51
4.3	Zdjęcie stanowiska badawczego - część przepływowa	52
4.4	Zdjęcie stanowiska badawczego - część mechaniczna	53
4.5	Zdjęcie stanowiska badawczego - część pomiarowa	54
4.6	Zakres obserwowalny przez kamery szybkoobrotowe	55
4.7	Stanowisko badawcze – kamery szybkoobrotowe i lustro	56
4.8	Układ zapełniania czynnikiem roboczym z możliwością termicznego odgazowania	57
4.9	Prędkość przepływu czynnika w pulsacyjnej rurce ciepła [112]	61
4.10	Położenie i prędkość przepływu czynnika w pulsacyjnej rurce ciepła [101] .	62
4.11	Charakterystyczne częstotliwości przepływu czynnika w pulsacyjnej rurce ciepła [101]	62
4.12	Wszystkie właściwości fizyczne zostały dobrane zgodnie z bazą CoolProp [15], wyjątkiem jest lepkość dla R-114 dobranej zgodnie z pracą Kumagai i Takahashiego [63] oraz komercyjne czynniki robocze firmy 3M® których właściwości przyjęto zgodnie z kartą produktu	68
5.1	Ustawienie obrazu w poprawnej pozycji	76
5.2	Połączony obraz z trzech kamer	76
5.3	Uśrednienie oświetlenia w obrazach z kamer i pomiędzy obrazami z kamer (na czerwono zaznaczone obszary wykorzystane do uśredniania)	77
5.4	Procedura binaryzacji obrazu	77
5.5	Wynik analizy metodą PIV	78
5.6	Identyfikacja prędkości interfejsów na podstawie metod PIV i identyfikacji bąbli parowych	79
5.7	Nieliniowa regresja metodą najmniejszych kwadratów – suma funkcji sinusoidalnych	80
5.8	Identyfikacja rozpadu i połączenia bąbli parowych	82
6.1	Kryterium ograniczoności wyznaczone przez Harirchiana i Garimellę [47] .	85

6.2	Kryterium Garimellego [47] oraz kryterium Bonda [58], sprawdzone na podstawie pracy Baldassariego i Marengo [13]	85
6.3	Kryterium Garimellego [47], sprawdzone na podstawie badań autora rozprawy	86
6.4	Mapy przepływowe opracowane przez Pietrasanta'ę i innych [89]	87
6.5	Mapy przepływowe na podstawie wyników badań oraz linie ograniczające na podstawie pracy Pietrasanta'y i innych [89]	87
6.6	Prędkość i przyspieszenie prowadzące do rozpadu (a) i łączenia (b) bąbli parowych	89
6.7	Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w zależności od liczby Reynoldsa i zmodyfikowanej liczby Bonda – wyniki dla etanolu i średnicy 6 mm	90
6.8	Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w zależności od liczby Reynoldsa i zmodyfikowanej liczby Bonda – wyniki dla etanolu i średnic z zakresu 4 do 8 mm	90
6.9	Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych z zaznaczonymi obszarami wykraczającymi poza hipotezę znaku – wyniki dla etanolu i średnic z zakresu 4 do 8 mm	91
6.10	Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w kolejnych krokach czasowych przed wykryciem zjawiska – wyniki dla etanolu i średnic z zakresu 4 do 8 mm	91
6.11	Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w zależności od liczby Reynoldsa i zmodyfikowanej liczby Bonda – wyniki dla FC-72 i średnic z zakresu 2,5 do 3 mm	92
6.12	Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w kolejnych krokach czasowych przed wykryciem zjawiska – wyniki dla FC-72 i średnic z zakresu 2,5 do 3 mm	93
6.13	Zjawiska rozpadu i łączenia bąbli parowych w kolejnych krokach czasowych przed wykryciem zjawiska – wyniki dla etanolu i FC-72	94
6.14	Przejście przepływu z pierścieniowego do korkowego (średnica 2,5 mm, czynnik roboczy FC-72)	95
6.15	Przejście przepływu z pierścieniowego do korkowego (średnica 3,0 mm, czynnik roboczy FC-72)	97
6.16	Przejście przepływu z korkowego do pierścieniowego (średnica 2,5 mm, czynnik roboczy FC-72)	98

Spis tablic

2.1	Liczby bezwymiarowe wykorzystywane w mechanice płynów dwufazowych	39
4.1	Lista zadań wykonywanych przed każdym badaniem	58
4.2	Porównawcze wyniki dostępne w literaturze naukowej dotyczące częstotliwości przepływu w pulsacyjnych rurkach ciepła	63
4.3	Właściwości fizykochemiczne czynników roboczych rozważanych w literaturze w kontekście wykorzystania w pulsacyjnych rurkach ciepła. Właściwości wyznaczone dla temperatury 25 °C	67
4.4	Tabela parametrów ruchu siłownika	69
4.5	Błędy względne i bezwzględne dla parametrów pomiarowych	71