J. Banaszek, T.A. Kowalewski,
P. Furmański, M. Rebow,
A. Cybulski, T. S. Wiśniewski

Konwekcja naturalna z przemianą fazową w układach jednoskładnikowych i binarnych

3/2000

Prace IPPT - IFTR Reports

Warszawa 2000

Niniejsza praca została zrealizowana w ramach grantu KBN Nr 3T09c00212 - ***Eksperymentalne i numeryczne badanie konwekcji naturalnej z przemianą fazową w układach binarnych***

J. Banaszek[*], T.A. Kowalewski[**],
P. Furmański[*], M. Rebow[*],
A. Cybulski[**], T. S. Wiśniewski[*]
[*]**Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Warszawska**
[**]**Zakład Mechaniki i Fizyki Płynów IPPT PAN**

Konwekcja naturalna z przemianą fazową w układach jednoskładnikowych i binarnych

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych konwekcji swobodnej w zamarzających układach jednoskładnikowych (woda, n-octadecan) i binarnych (wodne roztwory soli). Celem tych studiów było dokładniejsze, jakościowe i ilościowe, poznanie fizyki złożonych mechanizmów wymiany ciepła w procesach przemian fazowych ciecz-ciało stałe, występujących powszechnie w naturze i technice. Na zbudowanym stanowisku pomiarowym przeprowadzono wnikliwe badania procesu zamarzania czystej wody poprzez wizualizację chwilowych pól prędkości i temperatury, przy wykorzystaniu zawiesiny ciekłych kryształów jako cząstek wskaźnikowych, sekwencyjnej korelacji i komputerowej rejestracji obrazów przepływu oraz termografii w podczerwieni do pomiaru i rejestracji pola temperatury ścianek bocznych kuwety pomiarowej. Uzyskane szczegółowe obrazy struktury przepływu, pól prędkości i temperatury oraz chwilowych położeń granicy rozdziału faz dają obraz znaczącej roli konwekcji swobodnej w przebiegu analizowanego zjawiska. Mogą być też wykorzystane jako eksperymentalny wzorzec do weryfikacji dokładności i wiarygodności modeli symulacji komputerowej procesów przemian fazowych w układach jednoskładnikowych. Badania wizualizacyjne konwekcji swobodnej w zamarzających wodnych roztworach chlorku sodu pokazują stagnację przepływu w stanie ustalonym. W celu lepszego poznania przyczyn tego efektu dokonano pomiaru stężenia soli NaCl metodą sond rezystancyjnych z jednoczesną rejestracją pola prędkości oraz analizy frontu zmiany gęstości, wywołanej zmianą koncentracji NaCl, przy użyciu techniki smugowej Schlierena. Wstępne rezultaty pomiarów pola prędkości i koncentracji wskazują na wyraźną stratyfikację przepływu. Zaproponowano nową metodę opisu procesów wymiany ciepła i składnika w obszarze dwufazowym („mushy zone"), pojawiającym się przy krzepnięciu układów binarnych, w której makroskopowe, efektywne właściwości termofizyczne wyznaczane są na podstawie uśrednień po zbiorze różnych realizacji mikrostruktury ośrodka. Opracowano modele numeryczne i bibliotekę programów metody elementów skończonych do symulacji nieustalonych zjawisk krzepnięcia i topnienia z konwekcją w fazie ciekłej dla układów binarnych o złożonej, dwuwymiarowej geometrii. Oparto je na modelu pojedynczego kontinuum, teorii roztworów, entalpowym opisie procesu przemiany fazowej oraz modelowaniu obszaru dwufazowego jako anizotropowego medium porowatego. Obliczeniowo-efektywne algorytmy tych programów uzyskano przez zastosowanie sekwencyjnego i iteracyjnego rozwiązania sprzężonych układów równań zachowania masy, pędu, składnika i energii oraz różnych technik rozdziału w czasie. Wykorzystano je następnie w analizie wpływu anizotropii przepuszczalności i przewodności cieplnej oraz dyspersji ciepła na procesy transportu w obszarze dwufazowym, na przykładzie rozcieńczonych roztworów wodnych chlorku amonu.

Natural convection with phase change in one-component and binary systems

Abstract

The paper presents results of both experimental and theoretical analyses of natural convection in solidifying one-component (pure water, n-octadecan) and binary (aqueous solutions of salt) systems. The main purpose of this study was to explicate qualitative and quantitative aspects of complex transport phenomena accompanying the solid-liquid phase transition of single- and two-component systems. Experimental set-up had been designed and constructed, where the visualization of temporal flow patterns and temperature fields in the solidifying pure water, enclosed in a cubic cavity, was then carried out for diverse thermal boundary conditions. Thermochromic Liquid Crystals were there used as tracers along with the Particle Image Velocimetry and Thermometry techniques and the infrared thermography was applied to measure temperature distribution within the walls confining the experimental cavity. Thus obtained pictures of flow pattern, velocity and temperature fields and temporal positions of the interface show a significant influence of natural convection and thermal boundary conditions on the progress of the liquid-solid phase transition. Moreover, these detailed data of local temperature and velocity fields create the experimental benchmark, which can be used as a reference standard in the code validation procedure of various computer simulation models for the phase change phenomena of a one-component system driven by conduction and convection. Visualization of flow structure and temperature distribution in solidifying dilute solutions of water and sodium chloride shows the flow stagnation at the steady state. To clarify the phenomenon, this experimental analysis was supplemented with the estimation of the local solute concentration changes, through measuring the electrical resistance of the liquid by small electrodes placed in the fluid, and with the measurement of the liquid density changes through the use of the Schlieren's method. The preliminary results show the effect of flow stratification. New model of complex heat and species transport occurring in the two-phase region ("mushy zone") was developed. The macroscopic equations (energy and solute conservation equations and the basic macroscopic constitutive relations) describing the process of solidification in binary systems were obtained on the basis of the ensemble averaging technique rather than via commonly used the volume averaging technique. In general these relations are non-local and they account for non-equilibrium processes. The state of the local thermodynamic equilibrium was comprehensively discussed and formulae for enthalpy and porosity of the mushy zone were developed. Numerical models and their FEM programs have been created to simulate transient solid-liquid phase change phenomena with convection in fluid for binary systems of complex two-dimensional geometry. They are based on the single continuum model, theory of mixtures, the enthalpy approach and the anisotropic porous medium model of the mushy zone. Computationally effective algorithms of these computer simulation codes were obtained through the use of the sequential and iterative solution of the set of coupled mass, momentum, energy and species conservation equations and through the use of some time-splitting techniques. Thus developed computational tool was applied to show the significant impact of permeability and thermal conductivity of the mushy zone and negligible influence of thermal dispersion on the transport processes occurring in the two-phase region of the solidifying dilute solutions of water and ammonium chloride.

Spis treści str.

Streszczenie		3
1.	Wprowadzenie	7
2.	Badania eksperymentalne, metodyka, zakres pomiarów, wyniki	15
2.1	Metodyka badań eksperymentalnych i zakres pomiarów	15
2.1.1	Stanowisko badawcze	16
2.1.2	Opis geometrii kanału pomiarowego	18
2.1.3	Metoda wyznaczania pola temperatury	19
2.1.4	Metoda wyznaczania pola prędkości	21
2.1.5	Tory cząstek	24
2.1.6	Wyznaczanie położenia i kształtu fazy stałej	25
2.1.7	Pomiar koncentracji chlorku sodu	26
2.1.8	Zastosowanie termografii do pomiaru temperatury ścianek kuwety	32
2.2	Wyniki badań eksperymentalnych	34
2.2.1	Badania konwekcji naturalnej	38
2.2.2	Badania konwekcji naturalnej z przemianą fazową	42
2.2.3	Badanie przemiany fazowej w roztworach binarnych	56
3.	Modelowanie procesów transportu energii i składników w obszarze dwufazowym	61
3.1	Podstawowe pojęcia i definicje w metodzie uśrednień statystycznych po zbiorze realizacji mikrostruktury ośrodka dwufazowego	63
3.2	Makroskopowe równanie stężenia substancji rozpuszczonej	64
3.2.1	Lokalna równowaga fazowa w obszarze dwufazowym przy makroskopowym opisie procesu transportu składników	66
3.3	Równanie energii	68
3.3.1	Makroskopowy opis lokalnej równowagi termicznej w obszarze dwufazowym	70
3.4	Entalpia i porowatość obszaru dwufazowego w warunkach lokalnej równowagi termodynamicznej	70
3.5	Uwagi i wnioski końcowe	72
4.	Symulacja komputerowa procesów przemian fazowych ciecz-ciało z konwekcją w układach jednoskładnikowych i binarnych	75
4.1	Cel i zakres modelowania, uzyskane rezultaty	75
4.2	Równania MES, algorytmy obliczeniowe	79
4.2.1	Model matematyczny	79
4.2.2	Dyskretyzacja przestrzenna MES	82
4.2.3	Efektywne schematy całkowania w czasie	84
4.3	Weryfikacja dokładności modelu numerycznego	89
4.4	Analiza wiarygodności modelu symulacji komputerowej metodą MES	93
4.5	Numeryczna analiza anizotropii własności obszaru dendrytycznego w solidyfikacji binarnych roztworów rozcieńczonych	103
4.6	Symulacja komputerowa procesów makro-segregacji i mikro-segregacji składników roztworu binarnego	114
5.	Wnioski końcowe, kierunki dalszych prac	123
6.	Literatura	127
6.1	Literatura do rozdziału 2	127
6.2	Literatura do rozdziału 3	128
6.3	Literatura do rozdziału 4	130

1. Wprowadzenie

Stosowane w technice stopy metali, kryształy materiałów półprzewodnikowych, czy spotykane w naturze substancje zanieczyszczone są co najmniej układami binarnymi, a procesy zmiany fazy przebiegają w warunkach złożonej wymiany masy, ciepła i składnika rozpuszczonego, często przy braku lokalnej równowagi termodynamicznej obu faz. Podczas krzepnięcia dwuskładnikowego roztworu rejony fazy ciekłej i stałej rozdziela obszar dwufazowy, który w przypadku stopów metali ma strukturę dendrytyczną. Zachodzące w nim procesy transportu mają decydujące znaczenie na przebieg solidyfikacji i jej finalny produkt.

Ze względu na bardzo skomplikowaną mikrostrukturę rozłożenia fazy ciekłej i stałej oraz różnice właściwości faz, obszar dwufazowy jest ośrodkiem silnie niejednorodnym, w którym udział fazy stałej ulega silnym zmianom (od wartości równej jedności w pobliżu powierzchni obszaru całkowicie zestalonego do zera na powierzchni oddzielającej obszar dwufazowy od czystej fazy ciekłej). Występują w nim też lokalne źródła ciepła, związane z wydzielaniem ciepła utajonego na mikroskopowej, geometrycznie złożonej granicy ciecz-ciało stałe. Ponadto, różnice rozpuszczalności składników w fazie stałej i ciekłej powodują usuwanie jednego z komponentów na wspomnianych mikroskopowych powierzchniach kontaktu. Ten nadmiar usuniętego składnika jest transportowany w płynie na drodze ruchów konwekcyjnych, wywołanych gradientami temperatury i stężeń, i w mniejszym stopniu przez dyfuzję w obu fazach. W konsekwencji w różnych częściach obszaru pojawiają się rejony bogatsze i uboższe w składnik rozpuszczony. Te różnice mogą być znaczne, sięgać 30% i więcej. Proces segregacji obserwowany jest w dwóch skalach. W skali podziałki ramion dendrytów mówimy o *mikrosegregacji*, zjawisku istotnym szczególnie w fazie stałej, gdzie jedynym mechanizmem przenoszenia jest dyfuzja. W większej skali występuje *makrosegregacja*. Rozpoznaną już dziś przyczyną tego zjawiska jest ruch płynu lub ciała stałego w obszarze dwufazowym, spowodowany konwekcją płynu między-dendrytycznego na skutek lokalnych różnic temperatury i stężeń oraz w mniejszym stopniu skurczem solidyfikacyjnym i ruchem pojedynczych kryształów równoosiowych we wczesnej fazie procesu zestalania.

Zjawisko separacji jednej z faz i jej akumulacji w wybranych obszarach przepływu jest bardzo niekorzystne w procesach technologicznych - uważa się je za główną przyczynę niejednorodności odlewów i ich defektów strukturalnych. W naturalnych zbiornikach przepływy recyrkulacyjne, wywołane ruchami konwekcyjnymi, powodują nierównomierną dystrybucję wtrąceń i nadmierną koncentrację zanieczyszczeń.

To praktyczne znaczenie złożonych mechanizmów ruchu płynu, wymiany ciepła i transportu substancji rozpuszczonej, towarzyszące solidyfikacji układów dwuskładnikowych i decydujące o jakości produktu finalnego, stymuluje od kilkunastu lat prace nad głębszym poznaniem jakościowym i ilościowym tych procesów. W przypadku stopów metali poszukuje się takich sposobów sterowania rozkładami koncentracji, przez właściwe warunki prowadzenia procesu odlewniczego, by zmniejszyć niekorzystne skutki makrosegregacji i uzyskać możliwie jednorodną strukturę odlewu. Równie ważne, z aplikacyjnego punktu widzenia, są badania konwekcji swobodnej z przemianą fazową ciecz-ciało stałe w układach jednoskładnikowych - krzepnących w stałej temperaturze, oraz w substancjach bezpostaciowych, które topią się lub zestalają w skończonym przedziale temperatur, nie mają jednak wyraźnego „ostrego” frontu fazowego i obszaru dwufazowego. Istotnie, np. woda i lód są powszechnie stosowanymi substancjami w układach klimatyzacyjnych z wykorzystaniem akumulatorów energii cielnej w postaci „zimna” (np. w USA i Japonii pracuje ok. 8000 takich instalacji), zaś parafiny i woski rozpatruje się jako obiecujące media w mniejszych jednostkach magazynowania energii.

By jednak wpływać na procesy solidyfikacji, by optymalnie dobierać konstrukcje i materiały magazynów energii, nie wystarczają uproszczone związki kryterialne, tak często stosowane w zagadnieniach wymiany ciepła. Konieczne jest poznanie lokalnych pól prędkości, temperatury i koncentracji w obszarach ciała stałego, cieczy i rejonie współistnienia obu faz. Najbardziej bezpośrednią drogą gromadzenia takich informacji są eksperymenty w pełnej skali. Niestety są one najczęściej bardzo drogie, trudne i czasochłonne, szczególnie dla stopów metali krzepnących w wysokich temperaturach. Z drugiej strony ogólna dostępność komputerów i rozwój współczesnych metod numerycznych, gwarantujących coraz większą dokładność obliczeń, uzasadnia poszukiwanie odpowiedzi jakościowych i ilościowych na drodze obliczeń numerycznych. Są one jednak trudne ze względu na sprzężenia pól prędkości, ciśnienia, temperatury i koncentracji, złożone wielowymiarowe geometrie rzeczywistych obiektów oraz nieliniowe powiązania koncentracji, temperatury i entalpii w dodatkowych związkach konstytutywnych. Tym należy chyba tłumaczyć fakt, że mimo ogromnego i wciąż rosnącego zainteresowania tą problematyką, wciąż brak jest możliwie kompleksowych wyników eksperymentów, wiarygodnych i precyzyjnych modeli obliczeniowych oraz efektywnych kodów symulacji komputerowej.

Dlatego głównym celem opisywanych w niniejszym opracowaniu badań były jakościowe i ilościowe studia złożonych mechanizmów konwekcyjnej wymiany ciepła w układach jednoskładnikowych (czysta woda w zakresie temperatur obejmujących anomalię gęstości), bezpostaciowych (n-oktadekan, parafina – materiały magazynujące) oraz binarnych (wodne roztwory NaCl i chlorku amonu) w warunkach przemiany fazowej ciecz-ciało stałe. Obejmowały one eksperymentalne badanie i wizualizację pól prędkości, temperatury i koncentracji, budowę nowych modeli teoretycznych obszaru dwufazowego oraz symulację komputerową konwekcyjnej wymiany ciepła i transportu składnika w procesach krzepnięcia.

Zbudowano stanowisko pomiarowe do trójwymiarowej wizualizacji linii przepływu i pól temperatury oraz wyznaczania rozkładu koncentracji substancji rozpuszczonej w kanale prostopadłościennym przy zastosowaniu zawiesin ciekłych kryształów, kamer wideo i cyfrowego przetwornika obrazu (cyfrowa anemometria i termometria obrazu). Zastosowano tu:

- cyfrową metodę pomiaru pól prędkości wykorzystującą cząstki wskaźnikowe (Digital Particle Image Velocimetry – DPIV) i sekwencyjną korelację obrazów przepływu
- cyfrową metodę pomiaru pola temperatury, opartą na zawiesinie ciekłych kryształów jako cząstek wskaźnikowych
- komputerową rejestrację obrazów przepływu z odpowiednim doborem ich sekwencji (liczba obrazów, ich odstęp czasowy)
- wyznaczanie rozkładu koncentracji substancji rozpuszczonej (soli NaCl w roztworze wodnym) poprzez pomiar przewodnictwa elektrycznego cieczy przy pomocy miniaturowych elektrod umieszczonych w przepływie i na ściankach przestrzeni pomiarowej
- termografię w podczerwieni do pomiaru i rejestracji pola temperatury ściany bocznej kuwety pomiarowej, które istotnie wpływa na przebieg procesów wymiany ciepła i kształtujące się struktury przepływu w układach binarnych.

Opracowano własne programy do filtracji uzyskanych obrazów, analizy pól wektorowych, barwy obrazu oraz torów cząstek.

Na zbudowanym stanowisku pomiarowym przeprowadzono wnikliwe badania procesu zamarzania czystej wody dla różnych warunków wymiany ciepła przez ścianki ograniczające kuwetę pomiarową (rozdział 2). Uzyskane szczegółowe obrazy struktury przepływu, pól prędkości i temperatury oraz chwilowych położeń granicy rozdziału faz dają obraz znaczącej roli konwekcji swobodnej w przebiegu analizowanego zjawiska.

Zebrane wyniki badań, dzięki dużej „gęstości" informacji, stanowią też cenny materiał porównawczy do weryfikacji dokładności i wiarygodności modeli obliczeniowych dla procesów

przemian fazowych w układach jednoskładnikowych. Takie oceny, uzyskiwane na podstawie porównań wyników precyzyjnych eksperymentów i obliczeń dla wybranych, wzorcowych procesów i geometrii, stosunkowo łatwych w realizacji eksperymentu w skali laboratoryjnej, są niezbędne by uwiarygodnić kod symulacji komputerowej przed jego dalszym użyciem w bardziej złożonych, praktycznych przypadkach, dla których badania doświadczalne są zbyt kosztowne i trudne. Brak jest jednak takich wzorców (w literaturze angielskiej określanych mianem „*benchmarks*") dla zagadnień ruchu płynu i wymiany ciepła w procesach przemian fazowych ciecz-ciało stałe. Dlatego autorzy projektu proponują wykorzystanie tu szczegółowych wyników ich badań wizualizacyjnych konwekcji swobodnej wody, zamarzającej w kuwecie sześciennej. Jest to bardzo wymagający test sprawdzający dla modelu obliczeniowego, ze względu na złożoną strukturę przepływu (dwa wiry o odwrotnych kierunkach cyrkulacji), będącą wynikiem anomalii gęstości wody w niskich temperaturach.

Jako modelowy układ w badaniach eksperymentalnych dla substancji dwuskładnikowych przyjęto, ze względu na ograniczony zakres temperatur, w którym można wykorzystać zawiesinę ciekłych kryształów, roztwory wodne chlorku sodu. Przeprowadzono badania wizualizacyjne konwekcji naturalnej podczas zamarzania tych mieszanin (rozdział 2). Zaobserwowano obszar, w którym następuje stagnacja przepływu w stanie ustalonym. W celu lepszego poznania przyczyn tego efektu dokonano pomiaru stężenia soli NaCl w roztworze wodnym metodą sond rezystancyjnych z jednoczesną rejestracją pola prędkości. Badania te poszerzono o analizę frontu zmiany gęstości, wywołanej zmianą koncentracji NaCl przy użyciu techniki smugowej Schlirena. Wstępne, rezultaty pomiarów, głównie pola prędkości i koncentracji wskazują na wyraźną stratyfikację przepływu. Poszerzenie zakresu tych badań pozwoli na stworzenie kolejnego wzorca, który będzie mógł być wykorzystany w przyszłej weryfikacji kodów numerycznych modelujących zjawiska transportu ciepła i masy w układach binarnych, przed ich zastosowaniem do „trudnych eksperymentalnie" substancji stosowanych w technice, takich jak ciekłe metale czy kryształy krzemu.

W ramach prac teoretycznych zaproponowano nową metodę opisu złożonych procesów wymiany ciepła i składników w obszarze dwufazowym ("*mushy zone*") układu binarnego podlegającego przemianie ciecz - ciało stałe (rozdział 3).

Złożona mikrostruktura tego obszaru powoduje, że do analizy przepływu ciepła i masy w takim ośrodku używa się zwykle opisu makroskopowego, w którym wygładzane są lokalne różnice w wartościach temperatur i stężeń składników, spowodowane np. obecnością dendrytów. W związku z tym, zanim przeprowadzone zostaną jakiekolwiek przewidywania teoretyczne dotyczące rozkładu komponentów w obszarze dwufazowym, konieczne jest opracowanie odpowiedniego modelu opisującego zjawiska transportu energii i masy na poziomie makroskopowym. Zastępowanie mikroskopowych procesów transportu w obszarze dwufazowym makroskopowym opisem ośrodka o efektywnych właściwościach, nazywane jest homogenizacją. Stosowane są tu różne metody, takie jak spektralne, wariacyjne, objętościowe - oparte na uśrednieniu po objętości elementarnej, statystyczne - oparte na uśrednianiu po zbiorze różnych realizacji mikrostruktury ośrodka. Ostatnią z technik z sukcesem stosowano w analizie zjawisk transportu zachodzących w ośrodkach niejednorodnych. Nie była ona jednak dotąd wykorzystywana w zagadnieniach krzepnięcia układów dwuskładnikowych.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono pierwszą próbę jej aplikacji do sformułowania równań makroskopowego opisu procesów transportu w obszarze dwufazowym wypełnionym roztworem binarnym. Ten niejednorodny obszar (poziom mikroskopowy) modelowany jest zastępczym ośrodkiem ciągłym o pewnych efektywnych właściwościach (poziom makroskopowy), przez wykorzystanie statystycznych uśrednień wielkości polowych po zbiorze dopuszczalnych konfiguracji (*ensemble averaging*). Przejście od opisu mikroskopowego do makroskopowego prowadzi do pojawiania się dodatkowych efektów (zjawisk dyspersji

składników i ciepła, występowania sprzężeń między przepływem ciepła i składników - efekt Dufoura, sprzężeń między przewodzeniem ciepła a źródłami ciepła występującymi na granicach międzyfazowych). W przeprowadzonych rozważaniach (rozdział 3) wykazano, że forma związków konstytutywnych, wiążących wielkości makroskopowe, nie musi być postulowana, ale może być wyprowadzona z odpowiednich związków dla wielkości mikroskopowych, niezależnie od założenia dotyczącego skal długości wpływających na rozpatrywane procesy.

Wykazano również, że omawiane związki konstytutywne są nielokalne. Ten aspekt opisu procesów transportu w obszarze dwufazowym nie był dotychczas poruszany w literaturze. Nielokalność związana jest z problemem braku lokalnej równowagi termodynamicznej makroskopowych procesów zachodzących w obszarze dwufazowym. Nie jest w związku z tym konieczne do opisu procesów nierównowagowych przyjmowanie dodatkowych, uzupełniających modeli (np. tzw. modeli dyfuzji) noszących często charakter postulatywny. Jeśli spektrum skal, związanych z opisem mikrostruktury "*mushy zone*", jest rozłączne ze spektrum skal związanych z przestrzennym rozkładem i zmiennością czasową makroskopowych pól stężeń i temperatury, możliwe jest stosowanie uproszczonej, lokalnej formy związków konstytutywnych, które mają postać podobną do prawa Ficka czy Fouriera, słusznego dla ośrodków jednorodnych. Związki te odnoszą się do procesów, w których warunki równowagi cieplnej czy fazowej są zachowane.

Badania eksperymentalne dostarczają informacji o zachowaniu układów fizycznych o prostych geometriach, możliwych do analizy w warunkach laboratoryjnych. Tymczasem w rzeczywistych problemach inżynierskich obszary mają krzywoliniowe, złożone brzegi. Przeniesienie wyników pomiarów z prostych geometrii na złożone kształty jest często bardzo zgrubnym przybliżeniem, które w przypadku ruchu płynu może gubić istotne cechy przepływu (np. lokalne zawirowania wywołane krzywiznami brzegów), zważywszy, że charakterystyczną cechą zagadnień teorii pola jest wrażliwość ich rozwiązań na nawet nieznaczne zmiany kształtu brzegu obszaru. Pogłębiona analiza zjawisk transportu masy, pędu i energii w rzeczywistych układach wypełnionych roztworem dwuskładnikowym lub substancją jednoskładnikową wymaga więc wykorzystania współczesnych zaawansowanych technik symulacji numerycznej. Zastosowanie tu komercyjnych, powszechnie dziś dostępnych, kodów komputerowych jest ograniczone i nieefektywne, ze względu na ich ogólność, czasochłonność i często brak możliwości poszerzenia użytych w nich modeli. Dlatego w symulacji komputerowej złożonych, wciąż nie do końca poznanych, procesów transportu w układach binarnych ze zmianą fazy zasadne jest tworzenie oprogramowania zorientowanego tematycznie, elastycznego w którym implementacja nowych modeli nie stanowi problemu, a wyniki uzyskuje się w rozsądnym czasie. Jest to szczególnie istotne, gdy narzędzie obliczeniowe służyć ma poznaniu zjawisk przez uzupełnienie, często kosztownych i żmudnych, badań doświadczalnych.

Dlatego jednym z podstawowych zadań badań teoretycznych było stworzenie efektywnych modeli numerycznych oraz biblioteki programów do komputerowej symulacji nieustalonych zjawisk krzepnięcia i topnienia z konwekcją w fazie ciekłej dla układów jednoskładnikowych i binarnych w złożonych dwuwymiarowych obszarach geometrycznych.

W ramach jego realizacji opracowano dwa programy metody elementów skończonych (MES) oparte na modelu pojedynczego kontinuum, teorii roztworów, entalpowym opisie procesu przemiany fazowej na stałej siatce dyskretyzacji oraz modelowaniu obszaru dwufazowego jako anizotropowego medium porowatego (rozdział 4.2).

Obliczeniowo-efektywne algorytmy tych programów uzyskano przez zastosowanie procedur sekwencyjnego i iteracyjnego rozwiązania sprzężonych układów równań zachowania masy, pędu i energii oraz różnych technik rozdziału w czasie (rozdział 4.2). W pierwszym programie wykorzystano metodę rzutu (*projection method*) Chorina i Gresho, tj. technikę rozdziału obliczeń pól prędkości i ciśnienia wraz z jawnym trójpoziomowym schematem Adamsa-Basfortha kroczenia w czasie. W algorytmie obliczeniowym drugiego programu użyto metodę

rozdziału operatorów transportu konwekcyjnego i dyfuzyjnego w dwóch następujących po sobie etapach całkowania w czasie niejawnym schematem Eulera. Metody te nie były dotychczas stosowane w analizie procesów zmiany fazy z konwekcją.

Poszukiwanie obliczeniowo-efektywnych technik rozwiązywania układów sprzężonych nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych (lub ich dyskretnych odpowiedników w postaci równań algebraicznych) jest przedmiotem zainteresowań matematyków i numeryków w wielu ośrodkach naukowych na świecie. Powszechnie akceptuje się zastępowanie teoretycznie dokładnych metod jednoczesnego rozwiązywania przez przybliżone techniki sekwencyjnego i iteracyjnego dochodzenia do rozwiązania. Te dokładne bowiem mają trudne do zaakceptowania koszty obliczeń (zwłaszcza w realnych zadaniach trójwymiarowych), przybliżone zaś są wielokrotnie szybsze, nie wymagają dużych pamięci operacyjnych czy zewnętrznych.

Jednakże, zastosowanie takich modeli symulacji numerycznej w realnych zagadnieniach inżynierskich wymaga ich uwiarygodnienia. Proces ten składa się z dwóch etapów. W pierwszym dokonuje się weryfikacji dokładności rozwiązania numerycznego przez analizę wpływu gęstości siatek podziału i/lub porównanie tego rozwiązania z innymi dostępnymi w literaturze rozwiązaniami analitycznymi, albo uzyskanymi innymi technikami dyskretyzacji (*benchmarks*). Przedmiotem takiej analizy jest odpowiedź na pytanie: jak dobrze model numeryczny przybliża dyskretyzowane równania modelu ciągłego. Drugi etap to jednoczesne uwiarygodnienie obu modeli: matematycznego (ciągłego) i jego odpowiednika dyskretnego (proces określa się w literaturze angielskiej mianem „*code validation procedure*") przez szczegółowe porównania rozwiązań numerycznych z precyzyjnymi pomiarami dla pewnych wybranych, wzorcowych geometrii i zjawisk. Tutaj poszukuje się odpowiedzi na pytanie jak symulacja numeryczna oddaje rzeczywistość. W ostatnich latach coraz powszechniejsza staje się świadomość, że weryfikacja dokładności nie jest wystarczająca, bo nawet dokładne rozwiązanie równań nie gwarantuje jeszcze dobrej symulacji komputerowej analizowanych zjawisk. Musimy mieć jeszcze pewność, że te „dokładnie" rozwiązane równania dobrze opisują fizykę analizowanych zjawisk i procesów. Rozwija się więc „*benchmarki*" eksperymentalne, jako wzorce do porównań.

Opracowane modele obliczeniowe MES poddano więc najpierw wszechstronnej weryfikacji, przez porównanie ich rozwiązań z dostępnymi w literaturze wynikami innych analiz numerycznych wybranych problemów wzorcowych (*benchmarks*), takich jak laminarny przepływ płynu lepkiego w kanale, konwekcja swobodna Boussinesqa, solidyfikacja stopu Al-5%Cu przy braku konwekcji. We wszystkich tych przypadkach uzyskane wyniki były bardzo bliskie rezultatom publikowanym przez innych badaczy (rozdział 4.3).

W kolejnym więc kroku procedury oceny proponowanych modeli MES przeprowadzono obliczenia rozkładów pól temperatury i prędkości oraz chwilowych położeń frontu fazowego dla przypadku czystej wody ochładzanej i krzepnącej, w zakresie temperatur obejmujących punkt anomalii gęstości wody. W celu odpowiedzi na pytanie czy uzyskane tą drogą wyniki poprawnie modelują rzeczywistość wykorzystano, proponowany w rozdziale 2, wzorzec eksperymentalny. Porównano więc obliczenia z wynikami wizualizacji przepływu i pola temperatury (przy wykorzystaniu posiewu ciekłych kryształów oraz technik DPIV i DPIT). Potwierdziły one wiarygodność proponowanego modelu symulacji komputerowej. Nieznaczne rozbieżności, zwłaszcza w chwilowych polach prędkości oraz kształtach frontu fazowego, wywołane były brakiem dokładnych informacji o termicznych warunkach brzegowych na wewnętrzych ścianach kuwety pomiarowej. Założenie adiabatyczności nieizotermicznych ścianek pleksiglasowych, powszechnie przyjmowane na termicznie izolowanych powierzchniach, okazało się niezbyt precyzyjne w analizowanym przypadku, gdzie, jak potwierdził eksperyment (rozdział 2.2), przebieg zachodzących procesów silnie zależy od niewielkich nawet zmian warunków wymiany ciepła przez ścianki kuwety.

Stosunkowo łatwo i dokładnie można natomiast zdefiniować warunki brzegowe na zewnętrznych powierzchniach tych ścianek (współczynnik przejmowania ciepła i temperatura płynu omywającego powierzchnie). Rozbudowano więc model symulacji komputerowej w kierunku jednoczesnej analizy sprzężonej wymiany ciepła, obejmującej konwekcję swobodną wywołaną siłami wyporu i zmianę fazy w płynie wypełniającym przestrzeń pomiarową oraz przewodzenie ciepła w ściankach ograniczających kuwetę. Uzyskane w ten sposób wyniki obliczeń są bardzo bliskie wartościom prędkości i temperatury rejestrowanym technikami DPIV/DPIT (rozdział 4.4).

Przeprowadzono także implementację nowych, teoretycznych modeli obszaru dwufazowego, opartych na metodzie „*ensemble averaging*", w rozwijanych kodach obliczeniowych MES. Wykorzystano je następnie do analizy wpływu anizotropii przepuszczalności i przewodności cieplnej oraz dyspersji ciepła w obszarze dendrytycznym, modelowanym jako porowaty ośrodek Darcy'ego (rozdział 4.5). Obliczenia przeprowadzono dla dwóch rozcieńczonych roztworów chlorku amonu, dwuskładnikowego czynnika, który krzepnie podobnie jak binarny stop metalu. Wykazano znaczny wpływ anizotropowego charakteru przepuszczalności materiału i pomijalne oddziaływanie dwóch pozostałych efektów na kształtujące się pola prędkości oraz chwilowe kształty i położenie obszaru dendrytycznego.

Ze względu na niewielki udział substancji rozpuszczonej pominięto w tej analizie konwekcję wywołaną gradientem stężeń (siły wyporu wywołane były tylko gradientem temperatury) i zależność parametrów termofizycznych obszaru dwufazowego (w tym entalpii) od koncentracji tego składnika. W rzeczywistych układach binarnych, zwłaszcza w stopach metali, uproszczenia takie nie są możliwe. Nie tylko gradienty temperatury, ale przede wszystkim gradienty koncentracji wywołują ruchy konwekcyjne, które zmieniają rozkłady substancji rozpuszczonej w obszarze odlewu – występuje makro- i mikrosegregacja.

Dlatego, kod symulacji numerycznej, rozbudowano dalej na przypadki, gdzie występują silne sprzężenia pól temperatury, koncentracji i entalpii całkowitej (rozdział 4.6). Opracowano iteracyjny model analizy MES dla sprzężonych równań ciągłości i ruchu płynu nieściśliwego oraz transportu entalpii i koncentracji składnika dla dwuwymiarowej laminarnej konwekcji swobodnej wywołanej, gradientami stężeń i temperatury, występujących w procesie krzepnięcia układu dwuskładnikowego. Każde ze wspomnianych równań rozwiązano techniką, w której człony dyfuzyjne całkowano w czasie niejawnym schematem Eulera, zaś człony konwekcyjne jawnym schematem Adamsa-Basfortha. Potrzebne związki między koncentracją substancji rozpuszczonej i temperaturą roztworu uzyskano z wykresu fazowego, przy założeniu lokalnej równowagi termodynamicznej na granicy fazowej. W obliczeniach entalpii roztworu zastosowano proponowany w rozdziale 3 algorytm, w którym w wyznaczaniu entalpii fazy stałej i fazy ciekłej wykorzystuje się znany fakt niezależności przyrostu parametru termodynamicznego od drogi przemiany. W celu uwzględnienia skończonej dyfuzji składnika w fazie stałej (mikrosegregacja) wprowadzono do modelu numerycznego uśrednioną lokalną koncentrację substancji rozpuszczonej w tej fazie.

Zasadniczym problemem jest zbieżność procesu iteracyjnego dopasowania pól koncentracji, temperatury i udziału objętościowego lub masowego fazy ciekłej w obszarze dwufazowym. Choć analityczne związki (wynikające z zależności udziału składnika od koncentracji i temperatury oraz z równania linii *likwidusa* na wykresie fazowym) są jednoznaczne, to ich bezpośrednie użycie prowadzi do rozbieżności (zwłaszcza przy dużych cieple przemiany fazowej, typowych dla ciekłych metali). Zaproponowano tu algorytm oparty na rozwinięciu kolejnej iteracji udziału fazy ciekłej w szereg Taylora względem poprzedniego przybliżenia. Potrzebne pochodne cząstkowe oblicza się ze wspomnianych wyżej związków analitycznych.

Algorytm ten, choć obiecujący, nie został jeszcze do końca przebadany, w szczególności nie uzyskano jeszcze zadawalających wyników dla rzeczywistych stopów metali.

Szczegółowy opis stanowiska pomiarowego do wizualizacji pól temperatury i prędkości, metodyki badań i ich zakresu oraz uzyskanych wyników przedstawiono w rozdziale 2 opracowania. W następnej jego części omówiono proponowany model teoretyczny obszaru dendrytcznego, oparty na statystycznych uśrednieniach wielkości polowych po zbiorze dopuszczalnych konfiguracji. Kolejny rozdział poświęcono szczegółowemu opisowi modelu numerycznego i jego efektywnych algorytmów obliczeniowych, weryfikacji jego dokładności i zgodności z fizyką analizowanych zjawisk oraz rozszerzeniu modelu na problemy solidyfikacji układów binarnych, gdzie występuje anizotropia własności obszaru dwufazowego i segregacja składników roztworu. Opracowanie zakończono krótkim podsumowaniem i rozważaniami nad kierunkami dalszych prac.

2. Badania eksperymentalne, metodyka, zakres pomiarów, wyniki

2.1. Metodyka badań eksperymentalnych i zakres pomiarów

Celem badań eksperymentalnych było wyznaczenie istotnych charakterystyk przepływu konwekcyjnego z przemianą fazową ciało stałe ciecz (topnienie lub zestalanie). Podstawowa część badań dotyczy badań przemiany fazowej dla układu jednoskładnikowego (woda). Przemianę fazowa takiego układu charakteryzuje dobrze zdefiniowana powierzchnia fazowa o stałej, dobrze znanej temperaturze. Przy zastosowaniu substancji o dobrze zbadanych własnościach fizycznych i termodynamicznych, fizyczne warunki eksperymentalne mogą być precyzyjnie określone. Ma to szczególne znaczenie dla późniejszych porównań z obliczeniami numerycznymi.

W omawianych badaniach skoncentrowano się na wyznaczeniu pól prędkości, temperatury oraz torów cząstek dla wybranych przekrojów oraz położenia frontu przemiany fazowej (lodu). Do wizualizacji pól temperatury i prędkości wykorzystano zawiesinę ciekłych kryształów unoszoną przez przepływ. Zastosowane metody analizy obrazów przepływu pozwalają na jednoczesny pomiar pól prędkości i temperatury w całym wybranym przekroju naczynia. Stanowisko badawcze pozwala na zmianę tego przekroju w ciągu kilku-kilkunastu sekund. Ponieważ badane przypływy charakteryzuje stosunkowo długa skala czasowa, poprzez szereg takich pomiarów wykonanych w krótkim czasie sekwencyjnie dla kilkunastu przekrojów przepływu, możliwe było również wykonanie quasi-trójwymiarowych badań charakterystyk przepływu. Zebrane wyniki badań dzięki dużej „gęstości" informacji stanowią cenny materiał porównawczy do weryfikacji i walidacji kodów numerycznych symulujących zjawiska przemiany fazowej w układach jednoskładnikowych [1-3, 7,8, 12-20].

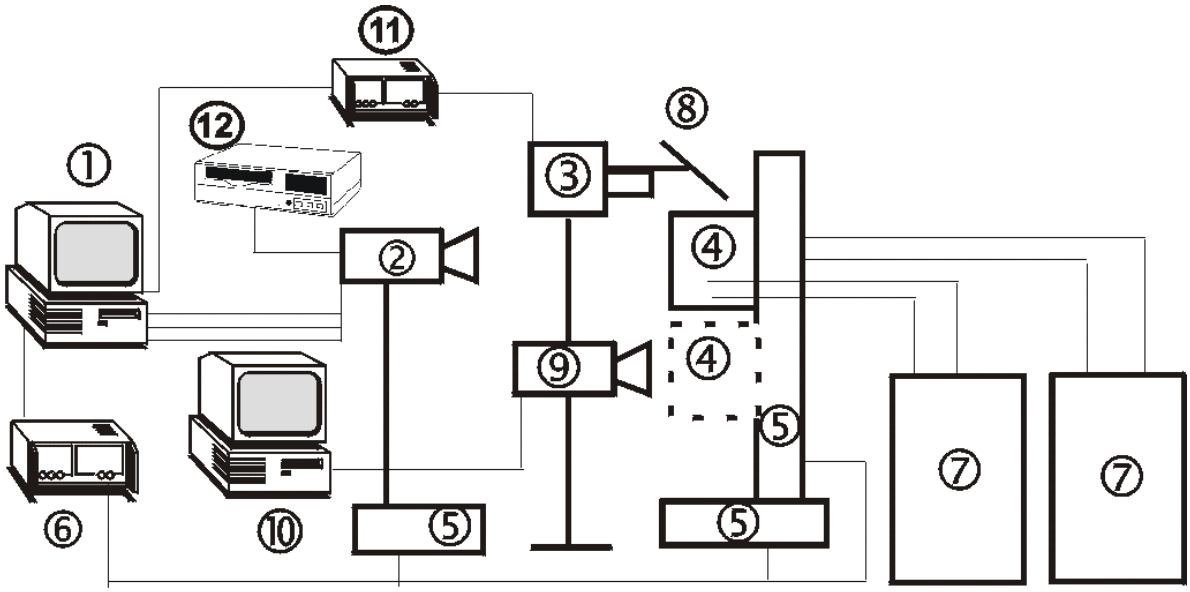
W większości procesów fizycznych rzadko mamy jednak do czynienia z czystymi substancjami. Zarówno w procesach zamarzania zbiorników wodnych jak i krzepnięcia metali czy tworzenia kryształów materiałów półprzewodnikowych obok konwekcji termicznej duże znaczenie odgrywa również konwekcja wywołana gradientami koncentracji (solutal convection). Jej wpływ powoduje zarówno modyfikacje struktur przepływu jak i modyfikacje składu czynnika płynnego i powstającej fazy stałej. Przemianę fazową dla takich substancji charakteryzuje szeroki zakres temperatur w którym następuje zarówno zmiana fazy jak i składu czynników. W związku z tym powierzchnia granicy faz jest na ogól rozmyta. Cechuje ją obszar pośredni (tzw. „mushy region"), który jest mieszaniną fazy ciekłej i stałej. Procesy wieloskładnikowe wskutek dużej złożoności są trudne do analizy matematycznej jak i eksperymentalnej. Często jednak zjawiska tam zachodzące można z dużą dokładnością uznać za binarne, ograniczając się do analizy zachowania jej dwu podstawowych składników. Takim modelowym układem są roztwory, w których jednym ze składników jest sól a drugim woda. Przemiana fazowa ciecz - ciało stałe (krystalizacja lub topnienie) takiego układu jest w tej pracy modelem procesów zachodzących dla układów binarnych. Przeprowadzone tutaj badania doświadczalne dotyczyły pomiaru pól prędkości, temperatury, koncentracji oraz kształtu frontu fazowego. Zastosowane metody pomiaru koncentracji soli pozwoliły na obecnym etapie określić jakościowo zmiany koncentracji w badanym przepływie (metoda Schlierena). Przeprowadzone również punktowe pomiary przewodnictwa elektrycznego ułatwiają ilościową interpretację tych obrazów. Obecne rezultaty pomiarów, głównie pola prędkości i koncentracji wskazują na wyraźną stratyfikację przepływu. Informacje te mogą być wykorzystane dla przyszłej weryfikacje kodów numerycznych modelujących zjawiska transportu ciepła i masy w układach binarnych, przed ich zastosowaniem do „trudnych eksperymentalnie" substancji stosowanych w technice, takich jak ciekłe metale czy kryształy krzemu.

2.1.1. *Stanowisko badawcze*

Metodyka prowadzonych badań wymaga rejestracji barwnych obrazów przepływu wywołanego precyzyjnie kontrolowanym gradientem temperatury. Rejestracje te umożliwia kamera barwna 3xCCD sprzężona z 24-bitowym przetwornikiem obrazu typu IC-PCI. Pomiary torów cząstek wykonywano na ogół korzystając z kamery monochromatycznej i specjalnie oprogramowanego w tym celu przetwornika obrazu typu VFG [17]. Do przemieszczania wiązki światła i zmiany położenia kamery względem naczynia wykorzystano silniki krokowe. Dodatkowe punktowe pomiary temperatury jak i pomiar przewodnictwa elektrycznego umożliwiał przetwornik analogowo-cyfrowy. Poniżej zebrano podstawowe charakterystyki elementów stanowiska wykorzystywanych do badań eksperymentalnych:

- Cyfrowe kamery wideo:
  a) Kamera barwna typu 3xCCD wyposażona w 3 sensory o rozmiarze 1/3", typ XC003/P firmy SONY o rozdzielczości 3x756x582 pikseli. Kamera pozwala na rejestracje obrazów brawnych „true colour", tzn. w formacie RGB 3x8-bit.
  b) Kamera monochromatyczna CCD typ JAI M10BX o rozdzielczości 1x782x582 pikseli. Dzięki technologii Progresiv Scan, kamera pozwala uzyskać pełną rozdzielczość obrazów (non-interlace), konieczną do rejestracji torów cząstek.
- Kuwety pomiarowe, wypełniane wodą, materiałem ulegającym przemianie fazowej lub roztworem soli. Ścianki boczne naczyń wykonane z pleksiglasu lub szkła, ścianki izotermiczne wykonane z poczernionego aluminium.
- Karty komputerowe akwizycji obrazu:
  a) 24-bitowa karta IC-PCI firmy Imaging Technology Inc. z modułem AM-STD stosowana do akwizycji obrazów barwnych.
  c) 12-bitowa karta VFG100 firmy Imaging Technology Inc., pamięć video formatu 1024x1024 piksele, 4 wejścia video sterowane multiplexerem, stosowana do rejestracji obrazów torów cząstek.
- System trzech prowadnic i sterowanych programowo silników krokowych firmy ISEL, system pozwala na swobodną zmianę konfiguracji źródło światła – kamera - komora pomiarowa w czasie kilku sekund.
- Zestaw dwóch termostatów firmy PolyScience pozwalających na stabilizację temperatury ścianek izotermicznych w zakresie $-30^{o}C$ - $+100^{o}C$.
- Karta przetwornika analogowo cyfrowego ADDA firmy Advantech Co., Ltd. PCL717B (8 kanałów) wraz z multiplexerem i wzmacniaczem PCLD-779 firmy Advantech Co., Ltd. do punktowych pomiaru temperatury m. in. ścianek kuwet pomiarowych, wykorzystywana również do pomiaru przewodnictwa soli.
- Specjalnie skonstruowane i stosowane wymiennie źródła światła: system wyposażony w rurową lampę halogenową z układem optycznym pozwalającym na formowanie płaszczyzny świetlnej o średniej grubości ok. 1,5mm i szerokości 10cm oraz układ rurowej lampy błyskowej. Systemy oświetlenia wyposażono w sterowniki elektroniczne, umożliwiające programowe sterowanie procesu włączania. Pozwala to na pełną automatyzację procesów rejestracji i uniknięcie wpływu ewentualnych efektów cieplnych wywołanych zbyt długim naświetlaniem obszaru pomiarowego światem halogenowym (typowy czas naświetlania wynosi 0.8s).
- Magnetowid S-VHS, stosowany do dodatkowej rejestracji obrazów przepływu i archiwizacji przebiegu eksperymentu.
- Zestaw zwierciadeł nakierowujących płaszczyznę świetlną.
- Kamera na promieniowanie podczerwone AGEMA Thermovision 900 LW z detektorem MCD (Mercury Cadium Telluride) chłodzona ciekłym azotem, stosowana dla zbadania wpływu zewnętrznych warunków termicznych na nie-izotermicznych ściankach naczynia.

Podstawowe elementy stanowiska pomiarowego pokazano schematycznie na rys. 2.1. Badany przepływ obserwowano w wybranym pionowym przekroju, wykorzystując technikę warstwy świetlnej (tzw. light sheet). Warstwa świetlna wytwarzana lampą halogenową miała szerokość 100 mm i grubość ok. 1-2 mm . Obserwacje prowadzono za pomocą kamery CCD umieszczonej prostopadle do oświetlanej płaszczyzny. Dzięki umieszczeniu kamery i kuwety pomiarowej na prowadnicach silników krokowych istniała możliwość szybkiej rejestracji obrazów dla wielu płaszczyzn pionowych, co przy długich czasach relaksacji przepływu pozwala zarejestrować informacje o przestrzennej strukturze pól prędkości i temperatury.



Rys. 2.1. Schemat stanowiska do badań konwekcji naturalnej z przemianą fazową: 1) komputer z kartą akwizycji obrazu, 2) kamera 3CCD, 3) lampa halogenowa, 4) kuweta pomiarowa, 5) prowadnice z silnikami krokowymi, 6) sterownik silników krokowych, 7) termostaty, 8) lustro, 9) kamera na podczerwień, 10) sterownik kamery na podczerwień, 11) sterownik lampy halogenowej lub błyskowej, 12) magnetowid

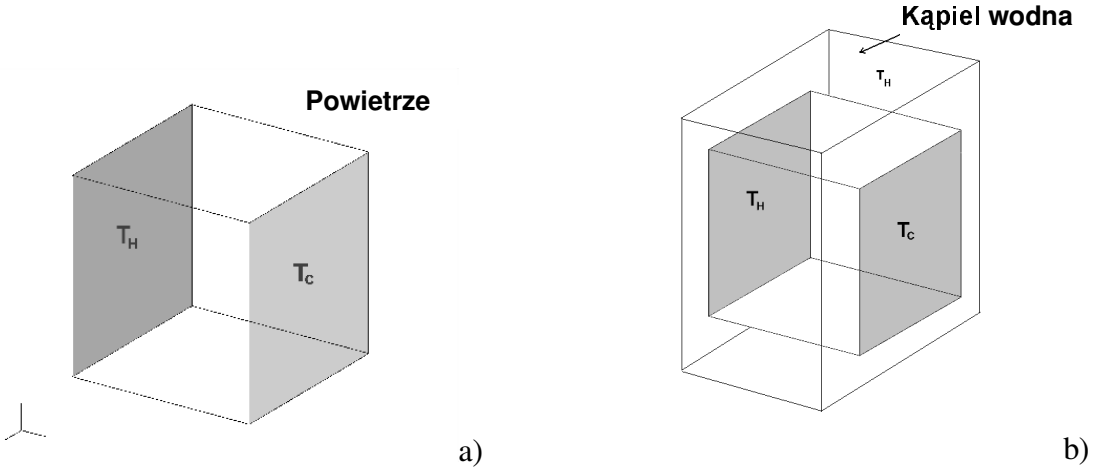
System akwizycji obrazów bazujący na komputerze klasy Pentium II 233 MHz z 64MB pamięci RAM, został sprzężony z komputerowo sterowanym systemem przesuwu, oświetlenia i ewentualnie rejestracji temperatur i przewodnictwa roztworu. Zadanie to umożliwiają opracowane programy komputerowe PCISTD (akwizycja obrazów, sterowanie kartą IC-PCI AM-STD) oraz VFGLAB (akwizycja obrazów i sterowanie kartą VFG100). Dzięki specjalnym protokołom komputer współpracujący z kartą (procesorem) akwizycji obrazu zapewniał obok rejestracji obrazów również pełną kontrolę czasową przebiegu eksperymentu. Jest to szczególnie ważne w badaniach rozwoju czasowego zjawiska, umożliwiając precyzyjne ustalenia poszczególnych kroków czasowych obserwacji. Program VFGLAB, wykorzystywany głównie do akwizycji obrazów czarno-białych, wyposażono w możliwość sumowania obrazów „on-line" w pamięci karty procesora. Procedura ta, we współpracy z odpowiednio dobranymi procedurami filtracyjnymi i dyskryminującymi umożliwia w pełni zautomatyzowaną rejestrację torów cząstek, będących cennym uzupełnieniem obrazów wykorzystywanych do pomiaru pól prędkości i temperatury [13,17,20]. Wykorzystanie programowych możliwości w pełni automatycznego sterowania całym eksperymentem, synchronizację włączenia oświetlenia, sterowanie silnikami krokowymi położenia komory i kamery cyfrowej, jak również punktową rejestrację temperatury i przewodnictwa ułatwia specjalnie opracowany system komend podawanych w formie danych wejściowych wewnętrznego inetrpretera programu.

Obrazy czarno-białe i kolorowe z kamery RGB są zapisywane jako pliki binarne z nagłówkami. Obrazy kolorowe rejestrowane są jako trzy oddzielne pliki z rozbiciem na kolory podstawowe zapisu RGB (czerwony, zielony i niebieski). Maksymalna rozdzielczość rejestrowanych w czasie rzeczywistym 24-bitowych obrazów komputerowych wynosiła 768x524 pikseli. Jeden taki obraz RGB zajmuje ok. 1,2 MB pamięci. Do pełnej rejestracji zmian w czasie dla jednego eksperymentu (ok. 200-300 par obrazów) potrzeba do 1 GB pamięci masowej (dysk twardy komputera). Po zakończeniu danej serii eksperymentów wyniki w postaci obrazów były archiwizowane na płytach kompaktowych CD-R. Równoległym sposobem rejestracji obrazów był zapis na taśmie video za pomocą magnetowidu połączonego z kamerą CCD. Istnieje możliwość przesłania zapisanych na taśmie obrazów z magnetowidu do procesora obrazu i poddanie ich obróbce cyfrowej, a następnie zapisanie na dysku komputera, powoduje to jednak znaczne obniżenie jakości obrazów.

2.1.2. *Opis geometrii kanału pomiarowego*

Do badań wybrano kuwetę (kanał) pomiarową (rys. 2.2), w której poziomy gradient temperatury między przeciwległymi ściankami wymuszał przepływ konwekcyjny. Wykonano ją w formie prostopadłościanu z czterema bocznymi ściankami z pleksiglasu o grubości 6 mm lub 9 mm (dwa typy ścianek o różnej grubości). Przewodność cieplna λ tego materiału została wyznaczona eksperymentalnie za pomocą aparatu płytowego jako 0,19 W/(mK).
Wysokość H tego kanału wynosiła 38 mm, stosunek wysokości do szerokości H/W mógł być zmieniany, tak by wynosił 1 lub 0,69. Dwie pozostałe przeciwległe, pionowe ścianki zostały wykonane z metalu (aluminium) i podłączone do termostatów (woda lub glikol), które utrzymywały je w stałej temperaturze T_H i T_c. Ustalając różne wartości tych temperatur można było zrealizować w kanale różne procesy wymiany ciepła: konwekcję, zestalanie i topnienie. W celu zbadania wpływu warunków brzegowych na przepływ cieczy w kuwecie rozpatrzono dwa przypadki:

- kuweta ze ściankami bocznymi o grubości 6 mm otoczona powietrzem atmosferycznym o temperaturze 25°C (rys. 2.2.a)
- kuweta ze ściankami bocznymi o grubości 9 mm otoczona płaszczem wodnym (pojemnik z przezroczystymi ściankami, przez który przepływa wody o stałej temperaturze - rys. 2.2.b).



a) b)

Rys. 2.2. Geometria kuwety pomiarowej: a) kuweta prostopadłościenna o grubości ścianek bocznych równej 6 mm, b) kuweta prostopadłościenna o grubości ścianek bocznych równej 9 mm

2.1.3. *Metoda wyznaczania pola temperatury*

Jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących przepływy konwekcyjne jest pole temperatury. Klasyczne metody pomiaru temperatury opierają się na zbieraniu punktowych informacji z możliwie dużej liczby czujników rozmieszczonych w przepływie. Metoda ta jest prosta w zastosowaniu i zapewnia stosunkowo dużą dokładność. Jednak niewielka liczba punktów kontrolnych utrudnia interpretacje zebranych danych, szczególnie w przypadku istotnie zmieniających się w czasie rozkładów temperatury. Wprowadzania czujników temperatury dodatkowo zakłóca przepływ, a w wypadku przejść fazowych czujniki takie mogą lokalnie modyfikować warunki przemiany fazowej. W związku z tym w niniejszej pracy do wyznaczenia zarówno pól prędkości jak i temperatury została wykorzystana zawiesina ciekłokrystalicznej (TLC □ Thermochromic Liquid Crystal), pozwalająca w sposób praktycznie nieinwazyjny monitorować temperaturę płynu [12-20]. Niewielka ilość tej substancji (koncentracja ok. 0,05%) w postaci zawiesiny cząstek o rozmiarach ok. 50μm dodana do badanej cieczy w charakterze posiewu nie powoduje zmiany charakteru przepływu i nie zmienia własności stosowanych cieczy. Po oświetleniu takiego przepływu płaszczyzną świetlną, możemy zarejestrować kolorowy obraz powstały w wyniku selektywnego rozpraszania światła przez materiał ciekłokrystaliczny. Przemieszczając się w przepływie zawiesina dostarcza informacji o polu prędkości, podobnie jak klasyczny posiew.

Zmiana barwy światła rozproszonego na ciekłych kryształach jest źródłem informacji o lokalnej temperaturze otaczającej go cieczy. Kolor rozpraszanego światła zmienia się ze wzrostem temperatury od niskoenergetycznych barw długofalowych (czerwonej) do barw górnego zakresu widma światła widzialnego (kolor niebieski). Poza zakresem aktywnym (poniżej i powyżej temperatury granicznej) zawiesina jest optycznie niemal przezroczysta. Zakres zmian koloru (tzw. *colour play range*) zależy od stosowanego materiału ciekło-krystalicznego i musi być dopasowany do warunków eksperymentu. Zależność koloru od temperatury jest silnie nieliniowa i jej ustalenie wymaga zastosowania procedury kalibracyjnej. Rejestrowane obrazy przepływu przedstawiają zbiór barwnych plamek nieregularnie rozmieszczonych w przepływie. Analiza obrazów barwnych polega w pierwszej kolejności na ustaleniu koloru dominującego tych plamek.

Rejestrowany obraz kolorowy jest reprezentowany przez trzy barwy podstawowe: *czerwoną, zieloną i niebieską* (*RGB*) i zapisywany w trakcie eksperymentu w postaci trzech plików odpowiadających wyciągom z każdego kanału barwnego kamery. Celem przeanalizowania koloru jako wartości fizycznej, należy przekształcić zawartą w obrazie informację barwną *RGB* na jej składowe *HSI*: *kolor dominujący (Hue), nasycenie (Saturation)* i *jasność (Intensity)*. Interesującą nas wielkością jest wartość *hue,* będąca odpowiednikiem długości fali świetlnej w spektrometrii. Wyznaczenie tej wartości jest możliwe na wiele sposobów. Ponieważ stosowana metoda wymaga kalibracji zmian koloru (*hue*) w funkcji temperatury, istotne jest konsekwentne stosowanie tej samej transformacji przestrzeni barwnej *RGB* do *HSI*.

W początkowej fazie pomiarów zastosowano następujące przekształcenie przestrzeni *RGB* do *HSI:*

$$S = 255\cdot(1 - \min(R,G,B)/I)$$

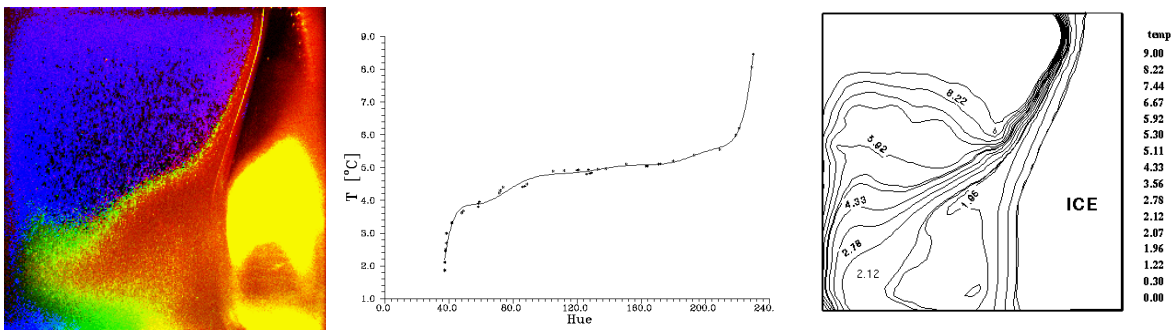
$$I = \sqrt{(R^2 + G^2 + B^2)}\Big/\sqrt{3}$$

$$H = \begin{cases} 63+\left((G' - R')\cdot 63\right)/\left(G' + R'\right) & \text{dla } B' = 0 \\ 189+\left((B' - G')\cdot 63\right)/\left(B' + G'\right) & \text{dla } R' = 0 \end{cases}$$

gdzie: R’ = R - min(R,G,B), G’ = G - min(R,G,B), B’ = B - min(R,G,B)

Zaletą powyższego algorytmu jest projekcja zmiennej H do 8-bitowego zakresu (dokładnie 0-252) liczb całkowitych, ograniczająca się jedynie do barw spektralnych (tzn. do zakresu R-B). Czystej barwie czerwonej odpowiada więc H=0, zielonej H=126 a barwie niebieskiej H=252. Pozwala to na zwiększenie rozdzielczości metody i prostą eliminację “fałszywych” barw, nie mieszczących się w założonym zakresie. Praktyka pokazała jednak, że w warunkach pomiarowych wskutek nieliniowości charakterystyk kamery, odbić i rozproszenia światła, czy niedoskonałości materiału ciekłokrystalicznego, rejestrowane przez kamerę barwy często zawierają składowe poza-spektralne, tzn. z zakresu *B-R*. Tego typu barwy są oczywiście powszechne w przyrodzie jako wynik nakładania się barwy czerwonej i niebieskiej. W rezultacie do analizy części obrazów zastosowano rozszerzoną wersję powyższego algorytmu, w której wartości *H* wyznaczane są dla całego “koła barw” *R-G-B-R*.

Dokładność pomiaru temperatury omawianą metoda zależy od szeregu czynników. W pierwszej kolejności jest ona uwarunkowana dokładnością procesu kalibracji, który należy przeprowadzić w warunkach identycznych lub bardzo zbliżonych do właściwego pomiaru. W praktyce polega to na utrzymywaniu stałej temperatury w kanale pomiarowym, rejestracji obrazów *RGB* i wyznaczaniu barwy dominującej *(hue)*. Ponieważ w warunkach kalibracji małe gradienty temperatury powodują bardzo powolne ustalanie się temperatury, dla zapewnienia jej równomierności w badanej objętości konieczne było dodatkowe wymuszanie konwekcji cieczy (mieszadło elektryczne). Poprzez skokowe zmiany temperatury (co 0,2^{o}C □ 0,5^{o}C) wyznaczano krzywą kalibracji *temperatura - hue*. Dla obliczeń temperatury krzywa ta jest przybliżana wielomianem wyższego rzędu. Łatwo zauważyć na podstawie rys. 2.3b, że wskutek silnej nieliniowości dokładność wyznaczenia temperatury zależy od analizowanego zakresu. I tak dla skrajnych zakresów, tzn. barw na granicy czerwieni i dla barwy niebieskiej, dokładność pomiaru jest najniższa i wynosi ±10 %. W zakresie przejścia barwy czerwonej w zieloną do początku barwy niebieskiej czułość metody jest bardzo wysoka i pozwala wyznaczyć temperaturę z dokładnością ok. 2%. Dodatkowe czynniki, takie jak nierównomierność barwy światła padającego, pochłanianie i rozpraszanie się światła wewnątrz kanału, stałe zniekształcenia barw spowodowane przez optykę kamery i cechy przetwornika CCD, powodują obniżenie precyzji pomiaru. Należy jednak podkreślić, że omawiana metoda mimo mniejszej dokładności określenia wartości temperatury w porównaniu z metodami klasycznymi, ma bardzo istotną zaletę, jaką jest możliwość jednoczesnego pomiaru w całym badanym przekroju. Rysunek 2.3a przedstawia przykład obrazu barwnego dla przepływu w badanej kuwecie z chłodzoną powierzchnią boczną (zamarzanie wody) i analizę wartości *hue* tego obrazu, która pozwala znaleźć rozkład temperatur w oświetlonym przekroju w postaci izoterm (rys. 2.3c).

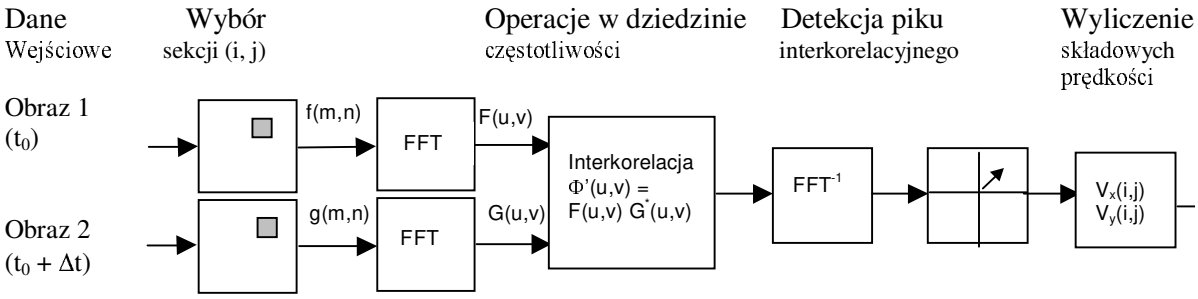


a) b) c)

Rys. 2.3. Konwekcja naturalna z przemianą fazową w kuwecie sześciokątnej. Metoda wyznaczania pola temperatury: a) obraz RGB przepływu, b) typowa krzywa kalibracji temperatury dla zawiesiny ciekłokrystalicznej, c) pole temperatury (obliczone izotermy)

2.1.4. *Metoda wyznaczania pola prędkości*

Dwuwymiarowe pola prędkości przepływu zostały wyznaczone przy użyciu cyfrowej anemometrii obrazowej (Digital Particle Image Velocimetry - DPIV). Technika ta polega na znalezieniu przemieszczenia poruszających się razem z cieczą cząstek znacznikowych (TLC lub pyłki roślin) metodą korelacji dwóch fragmentów obrazów dla dwu kolejnych rejestracji dokonanych w znanym odstępie czasu. Do obliczania funkcji korelacji pomiędzy fragmentami analizowanych obrazów wykorzystuje się szybkie transformaty Fouriera (FFT). Typowy algorytm takiego programu przedstawiono na rys. 2.4.
Aby uwidocznić na obrazie cząstki znacznikowe (posiew) w postaci zbioru jasnych punktów, trzeba badany przepływ oświetlić wąską warstwą świetlną, podobnie jak to miało miejsce przy wyznaczaniu pola temperatury za pomocą DPIT. Analizując zmiany położenia cząstek dla uprzednio zdefiniowanych sekcji obrazu, metoda daje możliwość wyznaczenia średniego przemieszczenia dla wybranego fragmentu (okna), a więc i średniej prędkości przepływu. Rozdzielczość metody jest limitowana wielkością tak zdefiniowanego okna. Dolną granicę ogranicza minimalna ilość cząstek w zarejestrowanym fragmencie obrazu, konieczna dla wyznaczana funkcja korelacji. Statystyczny charakter analizy wymaga odpowiednio dużej próbki pikseli.



Rys. 2.4. Schemat algorytmu do wyznaczania pól prędkości za pomocą FFT

Praktycznie minimalny rozmiar okna wynosi 16x16 pikseli obrazowych. Z drugiej strony maksymalne zarejestrowane przemieszczenie, a więc maksymalna prędkość jest proporcjonalna do wielkości okna obrazowego i nie przekracza połowy wielkości tego okna. Konieczny jest wiec kompromis zapewniający wymaganą dynamikę metody rejestracji pól prędkości. Inne ograniczenia, które należy uwzględnić to:

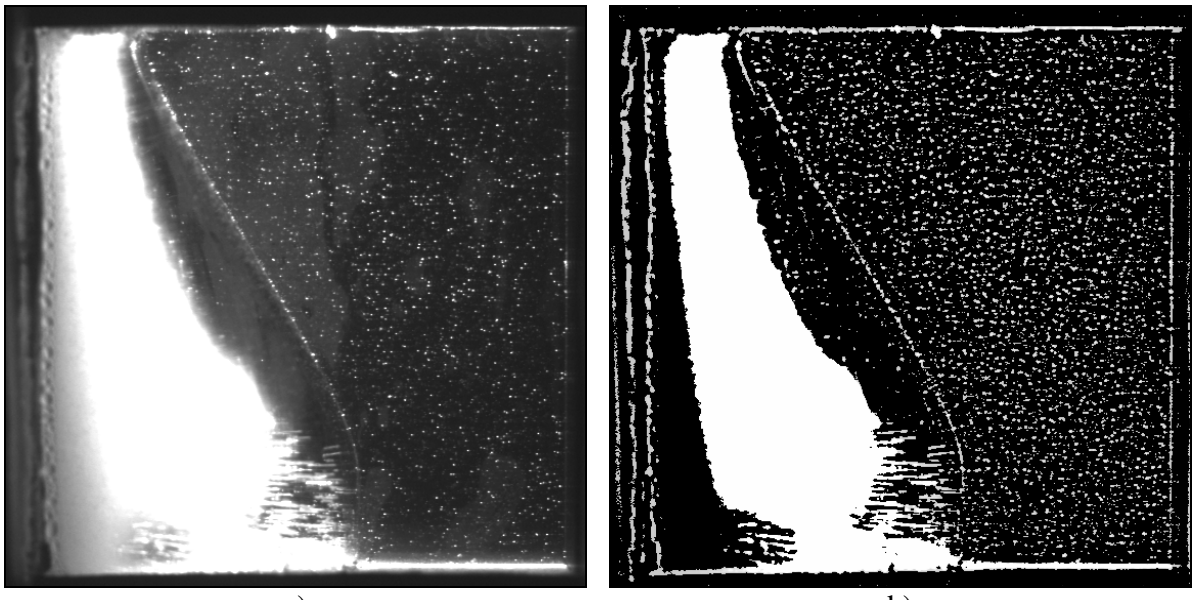
- ograniczona rozdzielczość kamery: minimalne rejestrowane przemieszczenie względne wynosi ok. 1/2 wymiaru piksela obrazowego.
- trójwymiarowy charakter przepływu: maksymalne przemieszczenie cząstek prostopadłe do analizowanej płaszczyzny musi być mniejsze od grubości płaszczyzny świetlnej – tak by większość cząstek pozostawała w trakcie rejestracji w danej płaszczyźnie świetlnej.

W niniejszej pracy zostały dokonane próby ulepszenia klasycznej metody PIV pomiaru prędkości, przede wszystkim poprzez zwiększenie jej dokładności i rozdzielczości. Celem minimalizacji wpływu zmian intensywności oświetlenia, przed wykonaniem operacji korelacji analizowane obrazy przepływu były poddawane tzw. „lokalnej binaryzacji" (specjalnie opracowany program komputerowy), dzięki której można było wyraźnie wydobyć strukturę posiewu. Polega to na przemieszczeniu przez cały obraz małego „okna" o wymiarach 5x5 pikseli i na przeanalizowaniu intensywności punktów. Punkty, które są jaśniejsze od średniego poziomu są zapisywane do nowego obrazu. Przykład zastosowania proponowanej metody „lokalnej

binaryzacji" dla obrazu zawiesiny pyłków sosny w przepływie konwekcyjnym w zamarzającej wodzie pokazano na rys. 2.5.

Innym sposobem zwiększenia rozdzielczości wyznaczania przemieszczeń cząstek wskaźnikowych jest zastosowana metoda „over-sampling". Polega ona na podwojeniu macierzy rejestrowanych pikseli i interpolacji intensywności pomiędzy wartościami pikseli obrazu wyjściowego. Dzięki temu można uzyskać rozdzielczości ok. 0,5 piksela, a dokładność pomiaru maksymalnych prędkości rzędu 3%. Niestety dzieje się to kosztem czasu obliczeń, który wydłuża się czterokrotnie.

Poprawę rozdzielczości dla małych przemieszczeń można uzyskać rejestrując nie dwa, ale kilka obrazów (praktycznie seria 4-5 obrazów) w znanych odstępach czasowych. Korelując ze sobą dwa skrajne obrazy w serii można dokładnie wyznaczyć małe przemieszczenia, a więc zidentyfikować obszary o małej prędkości przepływu. Dla obszarów o dużej prędkości przepływu analizuje się obrazy sąsiednie. Zilustrujmy to przykładem ze stanowiska badawczego. Dla typowej szerokości kuwety pomiarowej równej 38 mm odpowiadająca jej maksymalna liczba pikseli obrazu wynosiła 576. Maksymalna rozdzielczość (najmniejsze przemieszczenie odpowiadające 1 pikselowi) wynosiła 0,0659 mm/piksel. Przyjmując, że typowy stały odstęp czasowy pomiędzy dwoma kolejnymi rejestracjami obrazów wynosił 1 s, to minimalna prędkość możliwa do wyznaczenia na tym stanowisku badawczym równała się 0,0659 mm/s. Aby wyznaczyć mniejsze prędkości należałoby, albo zwiększyć rozdzielczość metody poprzez wykorzystanie kamery cyfrowej o większej rozdzielczości sensora CCD albo zmniejszyć obszar obserwacji przy zachowanej maksymalnej liczbie pikseli obrazu. Inny sposób to korelacja np. pierwszego obrazu z czwartym w danej serii, pomiędzy którymi odstęp wynosił 3 s. Wtedy minimalna, możliwa do zarejestrowania prędkość równała się 0,0220 mm/s. Niestety wadą takiego sposobu korelacji obrazów jest generacja błędnych wektorów w miejscach o dużych przemieszczeniach, ponieważ cząstki wskaźnikowe opuszczają obszary poddawane korelacji. Wymaga to więc „składania" wyników uzyskanych w obszarach o wolnych przepływach z tymi które uzyskano dla innej kombinacji par w serii analizując obszary o dużych prędkościach przepływu.



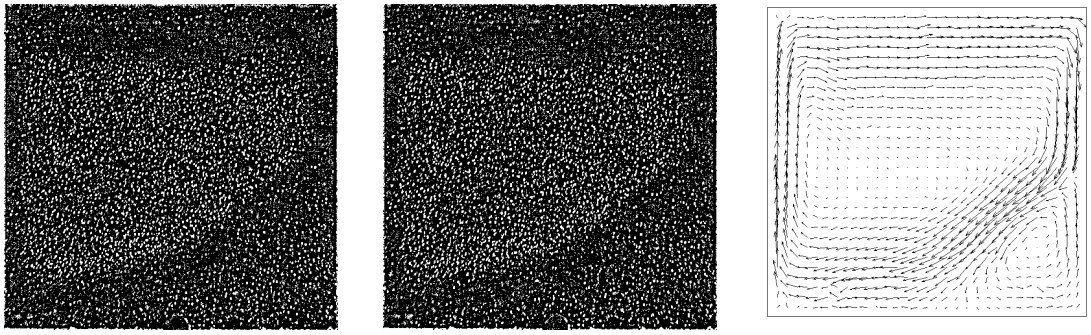
a) b)

Rys. 2.5. Przykład zastosowania proponowanej metody „lokalnej binaryzacji" dla obrazu zawiesiny w przepływie konwekcyjnym w zamarzającej wodzie; a) obraz przed binaryzacją, b) obraz po binaryzacji

Jak wspomniano, poprawę rozdzielczości przestrzennej klasycznej metody PIV można uzyskać zmniejszając rozmiar analizowanego okna. Pozwala to na lepsze uwidocznienie małych struktur przepływu, ale pogarsza dokładność rejestracji wektorów prędkości dla obszarów o szybkich zmianach przepływu. Dla typowych metod korelacyjnych dobór okna, a także kolejności analizowania obrazów z serii (odstęp czasu) zawsze zależy od charakteru przepływu (szybki lub wolny) i jest szczególnie utrudniony, gdy występują obszary o niejednorodnym rozkładzie prędkości. Optymalnym rozwiązaniem jest lokalne dostosowywanie wielkości okna oraz kroku analizy w zależności od wstępnie wyznaczonych wielkości przemieszczeń (okno dynamiczne).

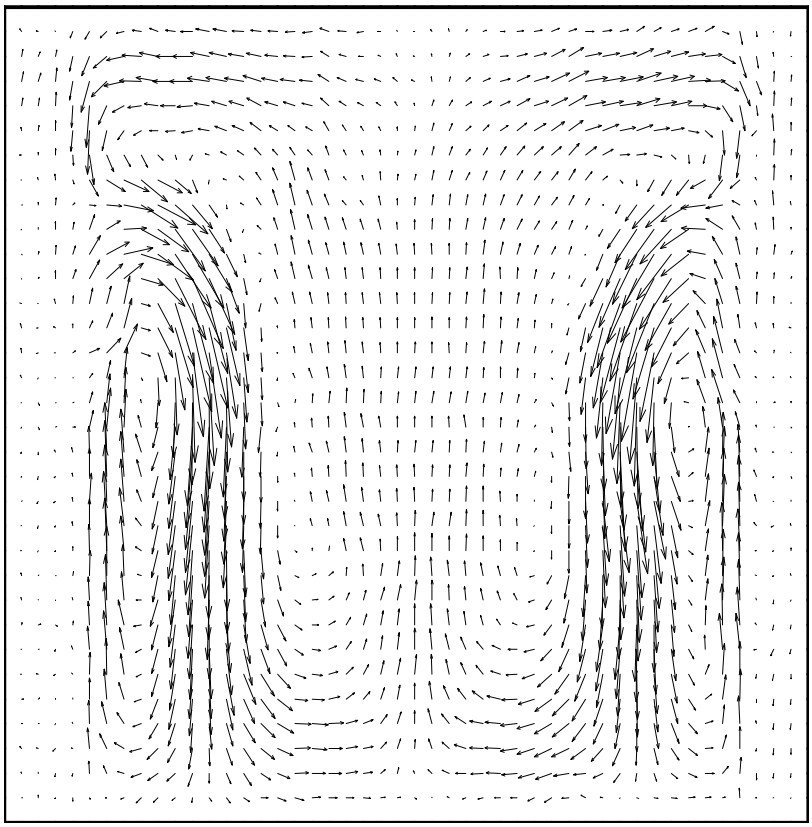
Rysunek 2.6 przedstawia przykład pary obrazów wejściowych (po binaryzacji lokalnej) i rezultat obliczeń pola prędkości otrzymany dla tej pary opisaną metodą PIV.

Jednym z możliwych rozwiązań problemu rozdzielczości przestrzennej metody korelacji obrazów jest analiza przemieszczeń fragmentów obrazów oparta na tzw. programowaniu dynamicznym. Metoda taka stosowana przy analizie ruchu obiektów dla tzw. potoków optycznych ("optical flow") została odpowiednio zaadaptowana dla obrazów przepływów [27]. W rezultacie tej nowej procedury obliczeniowej przemieszczenie jest określane dla każdego piksela obrazu. Powstaje więc "gęste" pole wektorowe, pozwalające na znalezienie subtelnych struktur przepływu i precyzyjną analizę obszarów o dużych gradientach prędkości. Przeprowadzone testy wskazują, że dokładność metody w określaniu wartości wektora prędkości wynosi 0,2 piksela, co dla typowych przemieszczeń wielkości 20 pikseli oznacza błąd rzędu 1%. Wysoka dokładność, możliwość odtwarzania pola prędkości dla rejonów o dużych gradientach oraz duża rozdzielczość przestrzenna metody są szczególnie przydatne przy eksperymentalnej weryfikacji rezultatów obliczeń numerycznych. Dodatkową zaletą opracowanej metody jest możliwość analizy sekwencji wielu obrazów jednocześnie. Pozwala to w automatyczny sposób rozwiązać problem zachowania podobnej dokładności pomiaru dla rejonów o dużych i małych prędkościach. Przykład pola wektorowego uzyskanego tą nową metodą (ODP-PIV) pokazano na rys. 2.7.



dwa czarno-białe obrazy ⇒ korelacja ⇒ pole prędkości

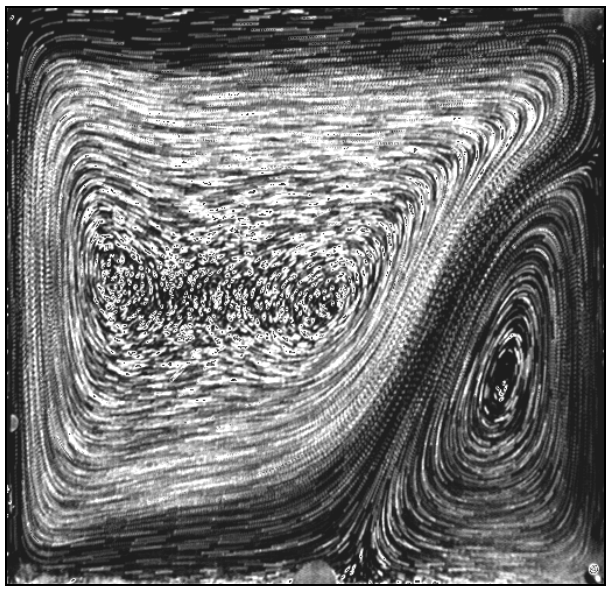
Rys. 2.6. Metoda DPIV. Przykład wyznaczenia wektorów prędkości dla przepływu konwekcyjnego w kuwecie sześciennej



Rys. 2.7. Metoda ODP-PIV. Przykład wyznaczenia wektorów prędkości dla przepływu konwekcyjnego w kuwecie prostopadłościennej z podwójnym frontem fazowym w zamarzającej wodzie.

2.1.5. *Tory cząstek*

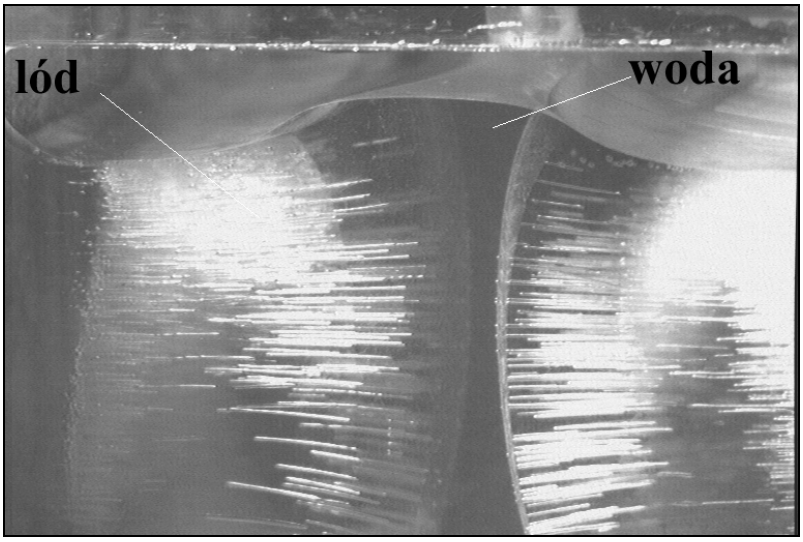
Jednym z istotnych elementów analizy struktury przepływu jest wizualizacja torów cząstek wskaźnikowych umieszczonych w przepływie. Analiza torów stanowi cenne uzupełnienie obrazu pola prędkości, pozwalając zidentyfikować drobne zmiany kierunku przepływu, obszary martwe i rejony o bardzo małych prędkościach. Realizacja komputerowej rejestracji torów odbywa się przez zsumowanie kilkunastu obrazów przepływu wykonanych w znanych odstępach czasu. Przy małej koncentracji posiewu dają się wyróżnić fragmenty pojedynczych torów, przy większych koncentracjach i przemieszczeniach widoczna jest ogólna struktura przepływu. Zmiana odstępu czasowego między poszczególnymi obrazami pozwala, podobnie jak przy pomiarach pól prędkości, bardziej uwypuklić rejony o dużych lub małych prędkościach. Sumowane obrazy wymagają wcześniej przygotowania, tak by zminimalizować niekorzystne narastanie jasności tła obrazu. Sam proces sumowania przeprowadzono off-line dla serii uprzednio zarejestrowanych pojedynczych obrazów zgromadzonych w pamięci masowej, jak i on-line dodając poszczególne obrazy podczas akwizycji w pamięci komputera i rejestrując jedynie wypadkową sumę. Pierwsza z metod pozwala na dodatkowe zabiegi filtracyjne, poprawiające kontrast rezultatu, konieczne jest jednak wtedy zablokowanie wielu megabajtów pamięci masowej dla obrazów cząstkowych. Na rys. 2.8 pokazano strukturę przepływu dla przepływu konwekcyjnego w kuwecie sześciennej. W prawym dolnym rogu widoczny jest wir spowodowany anomalią gęstości wody.



Rys. 2.8. Struktura przepływu konwekcyjnego w kuwecie sześciennej z dwoma izotermicznymi ściankami bocznymi

2.1.6. *Wyznaczanie położenia i kształtu fazy stałej*

Innymi ważnymi parametrami przepływu z przemianą fazową, które można wyznaczyć z zarejestrowanych obrazów są: kształt frontu fazowego i wielkość fazy stałej, jak również prędkość jej narastania. Rejestracja kształtu fazy stałej (lodu), a zwłaszcza struktury jej powierzchni wymaga zastosowania innych technik oświetleniowych. Przykład takiej rejestracji pokazano na rys. 2.9. Widoczne na tym rysunku jasne palmy to powietrze uwalniające się z wody podczas procesu zamarzania. Obecność tych wtrąceń starano się wyeliminować poprzez specjalne przygotowanie wody destylowanej polegające na jej odgazowaniu w instalacji próżniowej.

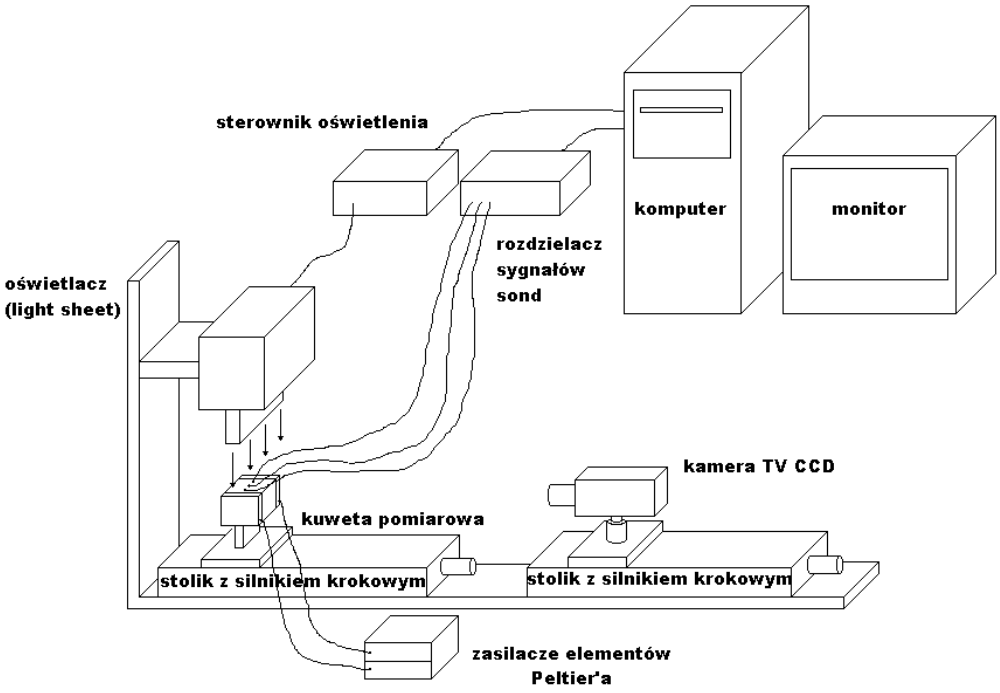


Rys. 2.9. Kształt lodu (podwójny front fazowy w zamarzającej wodzie z powierzchnią swobodną) w kuwecie prostopadłościennej

2.1.7. *Pomiar koncentracji chlorku sodu*

Badania konwekcji naturalnej i konwekcji z przemianą fazową dla układu binarnego przeprowadzono dla wodnych roztworów chlorku soli. Badania przeprowadzono dla przypływu w naczyniu sześciennym o dwóch pionowych izotermicznych ściankach przeciwległych. Pozostałe cztery ścianki wykonane są z pleksiglasu o niskim przewodnictwie cieplnym. Do pomiaru koncentracji soli wykorzystano dwie uzupełniające się metody: metodę punktową polegającą na pomiarze rezystancji elektrycznej roztworu i metodę obrazową (Schlierena) pozwalającą na pomiar rozkładu pól koncentracji w przekroju kanału. Metoda punktowa służyła jednocześnie do kalibracji istotnej z punktu widzenia weryfikacji kodów numerycznych informacji obrazowej.

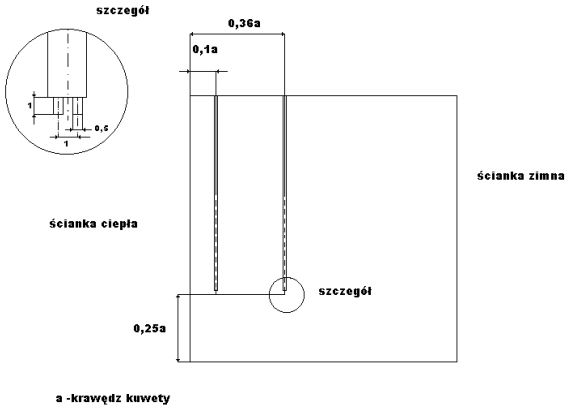
Rezystancyjna metoda pomiaru koncentracji



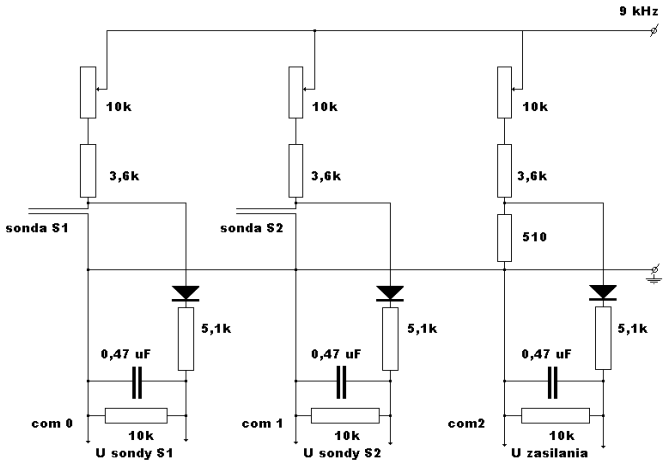
Rys.2.10. Stanowisko pomiarowe do jednoczesnego pomiaru rozkładu prędkości i względnego pomiaru stężenia

Podstawowy układu pomiarowy, składający się z zestawu termostatów, silników krokowych, kamery i przetwornika obrazu (rys. 2.1) uzupełniono układem do punktowego pomiaru koncentracji soli (rys. 2.10). Pomiar przewodnictwa roztworu wykonywano przy pomocy specjalnie skonstruowanych elektrod. Elektrody umieszczono w pionowej płaszczyźnie symetrii kanału w czterech punktach leżących w odległości jednej czwartej wysokości od dna naczynia. Rozmieszczenie elektrod w komorze wybrano w taki sposób, aby można było obserwować względną zmianę stężenia w miarę zbliżania się do kolejnej elektrody frontu przemiany fazowej. Jednoczesne obserwacje przepływu pozwalały na interpretację i korelację sygnałów elektrycznych pochodzących z elektrod z odpowiednimi obrazami przepływu, frontu fazowego i zmierzonymi metodą PIV&T rozkładami pól prędkości i temperatury. Elektrody do pomiaru przewodnictwa elektrycznego (rys. 2.11) zostały wykonane w dwóch wariantach z drutu srebrzonego o średnicy 0.35 mm oraz z prętów grafitowych o średnicy 0,5 mm. Dla kompensacji wpływu temperatury, równolegle do elektrod wprowadzono termopary rejestrujące lokalną temperaturę roztworu. Celem wyeliminowania wpływu elektrolizy i polaryzacji elektrod do ich zasilania wykorzystano stabilizowany prądowo (12.7mA) generator napięcia o częstotliwości

9kHz. Układ elektroniczny do pomiaru przewodnictwa składa się z układu prostowników i dzielników oporowych dostarczających napięcie proporcjonalne do rezystancji roztworu między elektrodami (rys. 2.12). Napięcia te były zbierane periodycznie przez analogowo-cyfrową (AD) kartę akwizycyjną PCL717B (8 kanałów) wraz z multiplexerem i wzmacniaczem PCLD-779 firmy Advantech Co.. Ta ośmiokanałowa karta służyła jednocześnie do rejestracji napięcia dostarczanego przez cztery termopary umieszczone w pobliżu elektrod.



Rys. 2.11. Widok sondy z elektrodami grafitowymi i rozmieszczenie sond w komorze pomiarowej



Rys. 2.12. Układ elektroniczny podłączenia sond do karty akwizycyjnej

Jednoczesną akwizycję obrazów, kontrolę ruchu silników krokowych i rejestracje napięć z elektrod i termopar ułatwiał specjalnie przygotowany program komputerowy VFGLab. Program ten współpracuje z kartą akwizycji obrazów VFG100 f-my Imaging Inc. Technology obsługując jednocześnie karty AD PCLD. Specjalnie przygotowany plik sterujący (skrypt) pozwala na sekwencyjną realizację kolejnych podprogramów, rejestrację i zapisywanie obrazów i wyników pomiarów napięcia oraz przesuwanie kamery i komory silnikami krokowymi.

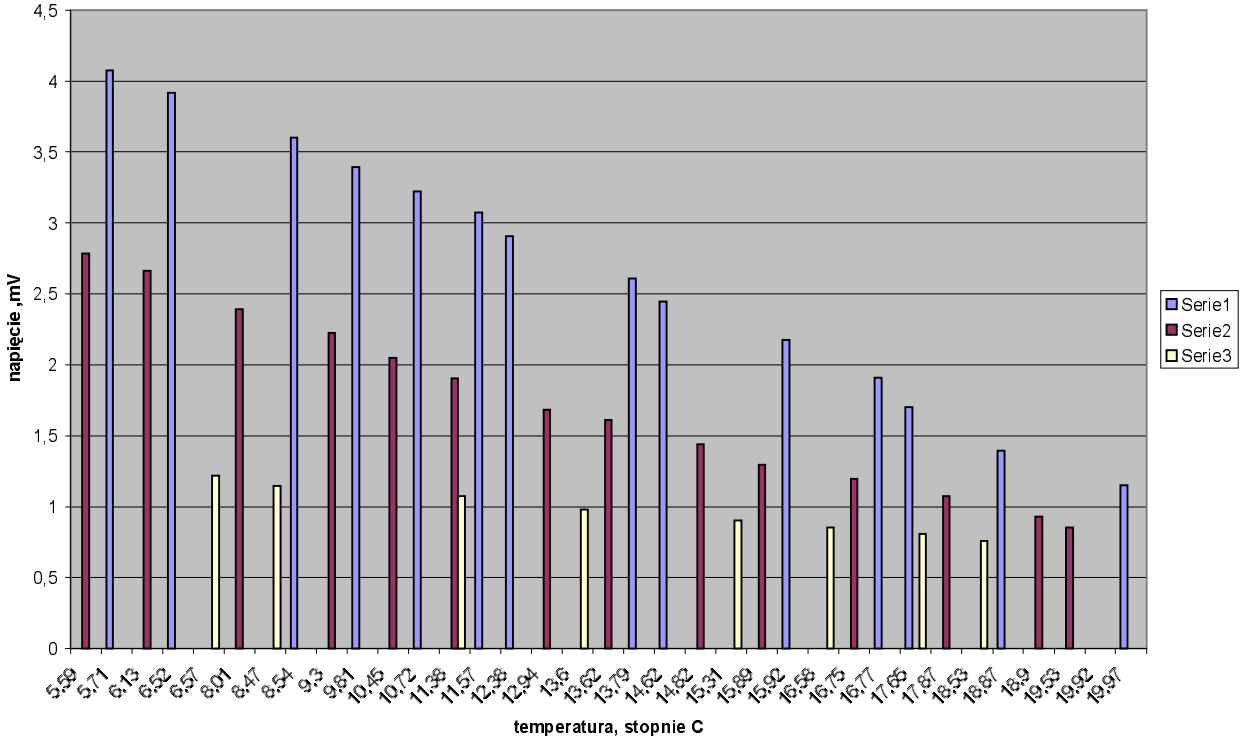
Kalibrację układ pomiarowego koncentracji soli wykonano dla zestawu siedmiu przygotowanych roztworów NaCl o znanych stężeniach. Pomiar wykonano w stałej temperaturze 20°C. W tabeli 2.1 zebrano wartości przewodności właściwej roztworów wyznaczone jako średnie z wielu pomiarów.

Tabela 2.1

Stężenie wagowe %	stężenie w mol/kg	przewodność właściwa σ S/m
1	0,172	1,430
2	0,345	2,570
3	0,517	3,720
4	0,690	4,685
5	0,862	5,700
6	1,034	6,360
7	1,027	7,045

Pomiary te są zbieżne z wynikami podanymi przez Martona [26] dla 0.1 molowego roztworu soli. Wskazuje to na generalną poprawność procedury kalibracyjnej. Dla porównania przewodnictwo czystej wody w temperaturze 26°C jest niemal sześć rzędów wielkości mniejsze i wynosi $6{,}70 \cdot 10^{-6}$ S/m [11].

Wartość spadku napięcia na sondach pomiarowych zależy zarówno od koncentracji soli jak i od temperatury roztworu. Przy jednoczesnej znajomości temperatury w punktach umieszczenia sond i wcześniejszym przeskalowaniu możliwe było uwzględnianie wpływu temperatury na wyznaczane stężenia roztworu. Kalibracje temperaturową dla kilku wybranych koncentracji przeprowadzoną dla stosowanych w eksperymentach sond przedstawia wykres na rys. 2.13. Jak można zauważyć, zależność ta ma w przybliżeniu charakter liniowy. Jednak nachylenie charakterystyki zmian jest wyraźnie zależne od koncentracji roztworu. Wymaga to iteracyjnego korygowania rezultatów w obszarach o dużych zmianach zarówno koncentracji i temperatury.



Rys. 2.13. Wpływ temperatury na spadek napięcia wskazywany przez sondy (wyniki uśrednione z kilku pomiarów); seria 1 - stężenie 1% , 2 - stężenie 3%, 3 - stężenie 4%.

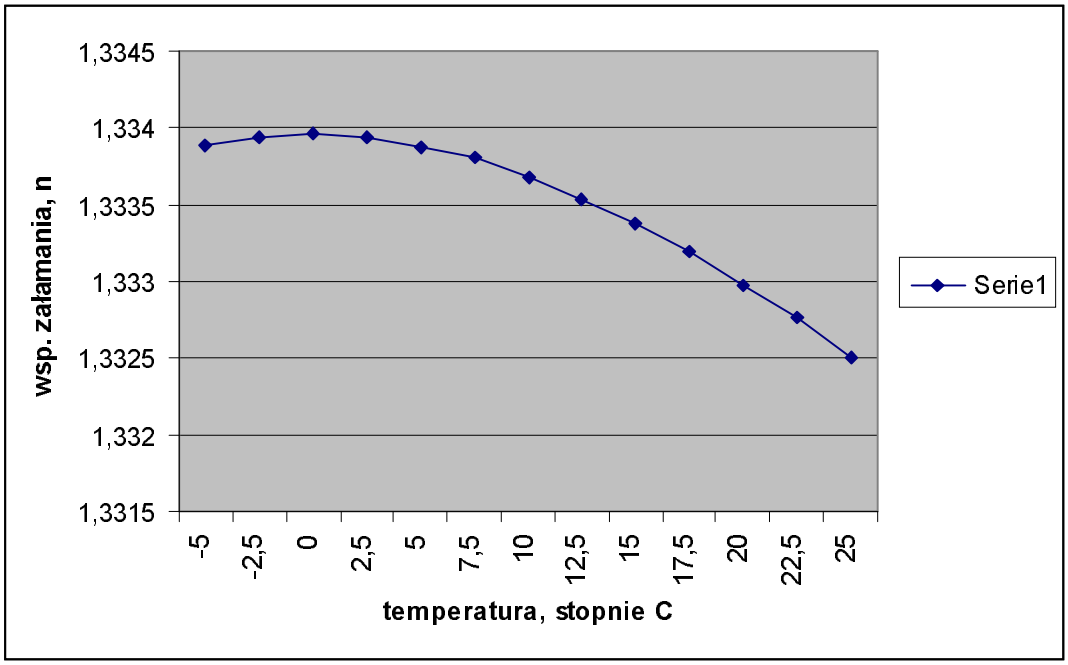
Optyczna metoda pomiaru koncentracji

Opisana wyżej metoda rezystancyjna pozwala jedynie na pomiar koncentracji soli w kilku wybranych punktach przepływu. Zwiększenie ilości elektrod nie jest wskazane, gdyż powoduje zakłócenie samego przepływu i zwiększa błędy pomiaru spowodowane wzajemnym oddziaływanie elektrod. W związku z tym dla zobrazowania rozkładów koncentracji wykorzystano optyczną metodę Schlierena. Metoda ta bazuje na zmianie współczynnika załamania światła w badanym ośrodku. Zmiana taka może mieć miejsce wskutek zmiany temperatury, gęstości czy też koncentracji roztworu. W naszym przypadku, dla płynu nieściśliwego zmiany współczynnika załamania badanego ośrodku są wywołane zmianami koncentracji i temperatury. Badane przepływy charakteryzują zarówno gradienty temperatury jak i koncentracji. Rozdzielenie obu tych efektów jest jednak możliwe, gdyż w badanym zakresie zmian temperatury jej wpływ na współczynnik załamania światła jest stosunkowo niewielki i w badanym zakresie temperatur zmiana wynosi około $2 \cdot 10^{-5}/^{o}C$ (patrz rys. 2.14). Według naszych pomiarów współczynnik załamania światła n przy oczekiwanych w eksperymencie zmianach stężenia roztworów NaCl wynosi odpowiednio:

dla 1% roztworu NaCl 1,3342

dla 3% roztworu NaCl 1,3375

Zatem jeśli lokalne stężenie roztworu NaCl zmieni się z 1% na 3%, współczynnik załamania wzrośnie o $3.3 \cdot 10^{-3}/^{o}C$, czyli o niemal dwa rzędy wielkości przekroczy zmianę wywołaną polem temperatury w cieczy. Efekt temperaturowy może być jeszcze dodatkowo skompensowany na podstawie danych z pomiaru pola temperatury w przepływie uzyskanych metodą DPIT.



Rys. 2.14. Współczynnik załamania światła w wodzie dla $\lambda = 0{,}5893$ μm w funkcji temperatury [9].

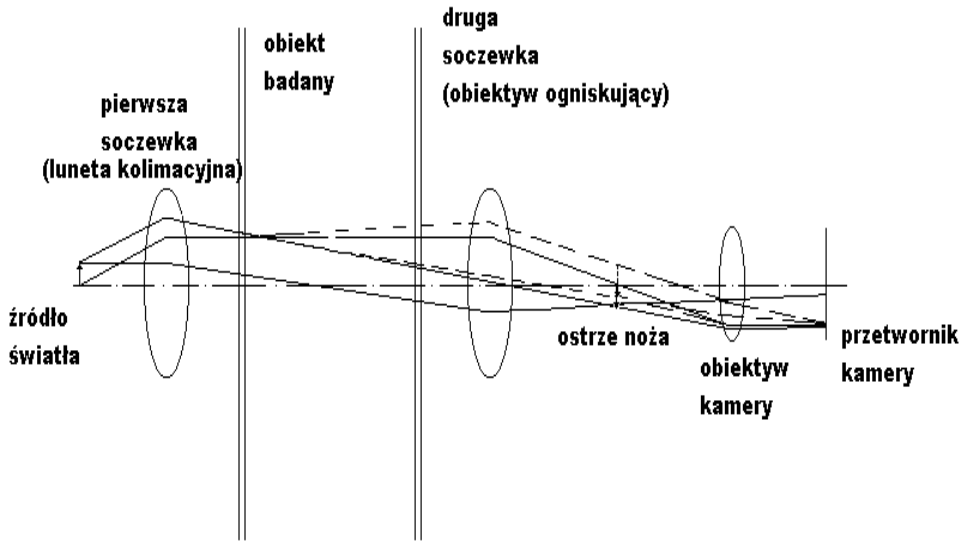
Typowy schemat układ optycznego Schlierena pokazano na rys. 2.15. Równoległa wiązka światła przechodzi przez badany obiekt a następnie jest ogniskowana przez obiektyw. Obraz źródła światła jest tworzony w ognisku obiektywu. Ostrze noża (prostopadłe do płaszczyzny rysunku) jest umieszczone w płaszczyźnie obrazu źródła światła dla wycinania części

przepuszczonego światła. Obiektyw kamery TV ogniskuje badany obiekt na przetworniku kamery, gdzie padające światło ma już zredukowaną intensywność proporcjonalnie do tego, ile światła odcina nóż. Optyczne zaburzenia (zmiany gęstości) w badanym obiekcie będą wytwarzały zmiany intensywności światła, które doznaje ugięcia.

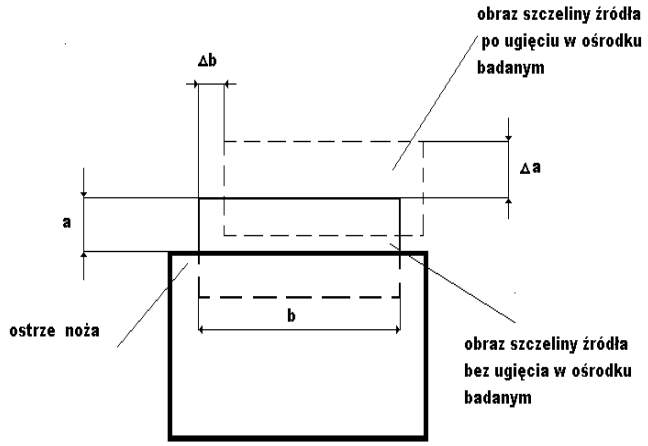
Rolę noża w układzie ilustruje rys. 2.16 [26] . Wysokość tej części obrazu źródła światła, która nie jest zaciemniana przez ostrze noża oznaczamy a; b - określa szerokość obrazu źródła w kierunku brzegu noża. W jednorodnym badanym obiekcie (bez gradientów gęstości) intensywność światła w punkcie (x, y) płaszczyzny rejestracji opisuje zależność:

$$I(x, y) = \text{const}\ (ab/f_c^2),$$

gdzie f_c jest długością ogniskowej obiektywu kamery. Stały współczynnik w równaniu zależy od początkowej luminancji źródła światła i późniejszego pochłaniania w badanym obiekcie. W powyższym zakładamy, że aberacje geometryczne układu optycznego są pomijalnie małe. Kiedy pewna ilość promieni świetlnych ugina się w zaburzonym polu pomiarowym pod kątem ε obraz źródła światła tworzony przez te promienie w płaszczyźnie ostrza noża będzie przesunięty na odległość Δa i Δb prostopadle i równolegle do ostrza.



Rys. 2.15. Układ optyczny układu Schlierena



Rys. 2.16. Ostrze noża w układzie Schlierena

Konieczne jest jedynie rozważenie pionowego przesunięcia Δa wytwarzanego przez pionową składową ε_y kąta ugięcia. Przy małym kącie ugięcia mamy:

$$\Delta a = f_2 \tan \varepsilon_y \cong \varepsilon_y f_2 ,$$

gdzie f_2 długość ogniskowej obiektywu ogniskującego układu Schlierena. Intensywność światła w odpowiednich punktach obrazu (x,y) płaszczyzny rejestracji opisujemy:

$$\Delta I = \text{const}\ (b\Delta a/f_c^2),$$

ze stałym współczynnikiem jak poprzednio. W obserwowanym obrazie Schlierena oko (kamera) wyróżnia raczej zmiany względnej intensywności, a nie jej wielkość absolutną. Zmiana względnej intensywności $\Delta I/I$ wytwarzana przez zaburzający obiekt badany w punkcie (x,y) płaszczyzny rejestracji jest dana przez :

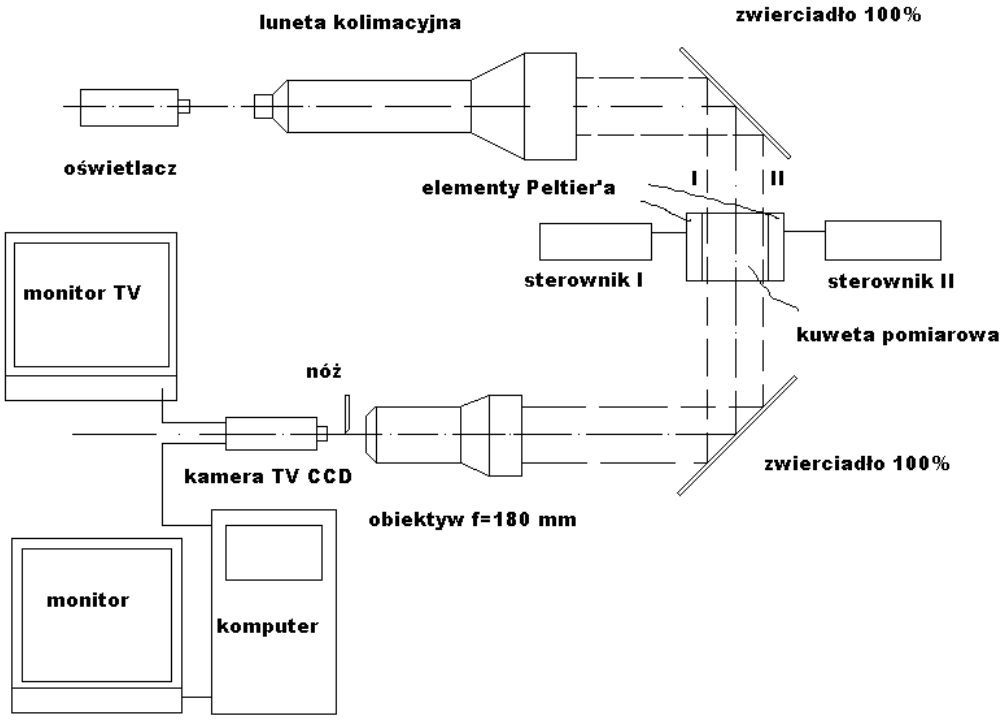
$$\Delta I/I = (\Delta a/a) = \varepsilon_y\ (f_2/a),$$

Jeśli ostrze noża jest równoległe do kierunku x, to na podstawie rysunku staje się jasne, że przesunięcie Δb nie działa na oświetlenie w płaszczyźnie zapisu. Przez odpowiednie podstawienia uzyskujemy:

$$\Delta I/I = (f_2/a) \int_{\xi_1}^{\xi_2} \left(\frac{1}{n}\right) (\delta n/\delta y)\, dz,$$

gdzie: ξ_1, ξ_2 są współrzędnymi "z" punktów gdzie promień wchodzi i wychodzi z badanego obiektu n - współczynnik załamania światła w badanym obiekcie.

Analiza intensywności światła obrazu Schlierena może zatem być wykorzystana do wyznaczenia zmian współczynnika załamania w badanym obiekcie. Kierunek prostopadły do krawędzi noża systemu definiuje oś wizualizowanych gradientów współczynnika załamania światła. Obracając nóż możemy wybrać interesujący nas kierunek. Układ Schlierena reaguje na pierwszą pochodną funkcji rozkładu współczynnika załamania, zatem wykazuje stosunkowo dużą czułość w rejonach silnych zmian koncentracji soli.



Rys. 2.17. Schemat stanowiska do wizualizacji gradientu gęstości w roztworze metodą Schlierena

Czułość układu zależy od możliwości rejestracji względnej zmiana intensywności światła w płaszczyźnie rejestracji $\Delta I/I$. Zakładając, że względna zmiana intensywności rzędu 10% jest jeszcze wykrywalna, to najmniejszy kąt ugięcia, który może być wykrywany w takim układzie Schlierena, jest $\varepsilon_{min} = 0{,}1(a/f_2)$. Często brak możliwości dopasowania długości ogniskowej f_2 obiektywu ogniskującego w układzie, wtedy dla regulacji czułości pozostaje tylko zmiana apertury (im mniejsza apertura tym większa czułość). Istnieje jednak kilka ograniczeń dla minimalnej apertury. Czułość przetwornika kamery jest jednym z nich. Drugie ograniczenie wynika z żądania, aby system był zdolny mierzyć ugięcie światła dla dodatniej i ujemnej wartości ε. W pokazanym układzie dodatni ε powoduje wzrost intensywności światła, ujemny ε spadek intensywności. Największą możliwą zmianą intensywności dla ujemnego ε jest jej całkowity zanik. Jeśli ε_{max} jest w danym polu gęstości największym możliwym kątem ugięcia, to mamy: $\Delta I = - I$ dla $\varepsilon = - \varepsilon_{max}$, i najmniejszą możliwą wartość a: $a_{min} = \geq f_2 \varepsilon_{max}$.

Opierając się na powyższych założeniach skonstruowano stanowisko badawcze wyposażone w system optyczny typu Schlierena, pozwalające na rejestrację zmian współczynnika załamania wody rzędu 10^{-4}. Równoległa wiązka światła załamywana w przepływie pada na ostrze noża przesłaniającego częściowo ognisko w układzie projekcyjnym. W płaszczyźnie projekcji na przetworniku kamery CCD stan przepływu jest wizualizowany przez jasne i ciemne struktury. Metoda jest czuła na pierwszą pochodną przestrzenną gęstości cieczy. Schemat układu zastosowanego w eksperymentach jest pokazany na rys. 2.17.

Układ optyczny składa się z halogenowego źródła światła, systemu kolimacyjnego, zwierciadeł kierujących wiązkę światła i kamery CCD rejestrującej obraz ograniczany nożem. Obrazy schlierenowski przepływu rejestrowano za pomocą przetwornika obrazu i komputera, podobnie jak obrazy stosowane do pomiaru pól prędkości i temperatury. Ze względu na ograniczenia techniczne pomiary schlierenowskie wykonano niezależnie od pozostałych badań obrazowych. Jednoczesny pomiar jest jednak możliwy, po zastosowaniu zwierciadeł półprzepuszczalnych i dobudowaniu drugiego toru optycznego dla kamery rejestrującej obraz cząstek wskaźnikowych.

Pomiary przeprowadzono dla komory sześciennej, o czterech ściankach wykonanych z plexiglasu, i dwu przeciwległych ściankach metalowych. Stałą temperaturę metalowych ścianek zapewniały dwa elementy Peltier'a.

2.1.8. *Zastosowanie termografii do pomiaru temperatury ścianek kuwety*

Jedną z przyczyn niezgodności pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych procesów konwekcji naturalnej a wynikami modelowania numerycznego tych zjawisk jest niedokładność zamodelowania warunków brzegowych na „biernych", tj. nieizotermicznych ścianach ograniczających badaną przestrzeń. Jak wykazały wyniki wcześniejszych badań [20,25], nawet niewielkie zmiany powyższych warunków brzegowych powodują znaczące zmiany struktury i kierunku ruchu płynu w przestrzeni eksperymentalnej. Ruch płynu może być zatem poprawnie zamodelowany numerycznie pod warunkiem zaimplementowania zmierzonych w warunkach eksperymentu pól temperatury na nieizotermicznych ścianach.

Do tego celu zastosowano termografię w podczerwieni, pozwalającą na rejestrację pola temperatury na powierzchni wspomnianych ścian, bezstykowo, w czasie rzeczywistym, przy bardzo wysokiej czułości i dokładności [5,32]. Ponieważ pomiar pola temperatury dokonywany był na zewnętrznej powierzchni ścian kuwety eksperymentalnej, to ściany ograniczające płyn zostały włączone do obszaru, w którym dokonywano obliczeń numerycznych pól temperatury.

Podczas badań eksperymentalnych wykorzystano układ pomiarowy opisany wcześniej (Rys. 2.1). Skaner kamery termowizyjnej został umieszczony poniżej kamery RGB, w odległości 110 mm od ścianki kuwety. Rejestracji pola temperatury dokonywano w dwóch krokach - dla górnej i dolnej części kuwety - po opuszczeniu kuwety za pomocą silników krokowych na odpowiedni poziom.

Zastosowano system termowizyjny AGEMA Thermovision 900 LW. Obrazuje on pole temperatury praktycznie w czasie rzeczywistym, odświeżając obraz 20 razy na sekundę. Skaner 900 LW (zasadnicza część zestawu) posiada detektor wykonany z tellurku kadmowo-rtęciowego, chłodzony ciekłym azotem. Pracuje on w zakresie spektralnym od 8 do 12 μm. W rezultacie uzyskuje się niski poziom szumów przy pomiarze temperatur zbliżonych do temp. pokojowej a także wysoką czułość; 0.08°C przy temperaturze 30°C. Odpowiednia, staranna procedura korekcyjna - pozwalająca dokładnie określić emisyjność badanej powierzchni - pozwoliła na uzyskanie dokładności lepszej niż 0.3°C. Termogramy badanej powierzchni rejestrowane są w postaci barwnych obrazów o rozdzielczości 272x136 pikseli. Wybranemu aktualnie zakresowi temperatury odpowiada pełna paleta barw (możliwe są do wyboru palety kolorów tęczy, odwróconej tęczy, gorącego żelaza itp.). Możliwe jest zaznaczenie - przy wykorzystaniu oprogramowania zestawu termowizyjnego - dwóch kolorowych izoterm o dowolnej wartości.

Zastosowanie obiektywu 20° x 10° wraz z nasadką makroskopową (close-up) pozwoliło uzyskać rozdzielczość 0.23 mrad. Aby polepszyć rozdzielczość uzyskiwanych pól temperatury dokonywano - jak wspomniano powyżej - rejestracji termogramów w dwóch krokach; dla górnej i dolnej części ścianki kuwety. Sterowany komputerowo system silników krokowych pozwalał na precyzyjne przesuwanie kuwety i wykonanie zdjęć w odstępie 2 s., a zatem w czasie, w którym pole temperatury zmieniało się nieznacznie. Następnie dokonywano „zszycia" dwóch termogramów, uzyskując pole temperatury ścianki bocznej kuwety o rozdzielczości 272 x 272 pikseli.

2.2. Wyniki badań eksperymentalnych

Zebrana podczas badań olbrzymia ilość wyników eksperymentalnych w postaci cyfrowych obrazów, a przetworzona za pomocą wyżej opisanych technik (DPIV, DPIT, sond do pomiaru stężeń, układu Schlierena) do postaci pól temperatury, prędkości, położeń frontu przemiany fazowej oraz fronty zmiany gęstości związane ze zmianą stężenia NaCl, jest bardzo trudna do całościowego zaprezentowania. W niniejszym rozdziale podsumowano rezultaty przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Ze względu na dużą liczbę przebadanych przypadków, różnorodność warunków początkowych, brzegowych i materiałowych przedstawienie rezultatów ograniczono tylko dla wybranych charakterystycznych przypadków. Ominięto też część rezultatów, które są szerzej przedstawione w załączonych publikacjach.

Badania wykonano dla kuwety pomiarowej, której schematy pokazano na rys. 2.2. Rozważono dwie różne grubości ścianek bocznych wykonanych z pleksiglasu (6 mm i 9 mm) i dwie różne wartości stosunku H/W (H - wysokość, W - szerokość). Dla kuwety prostopadłościennej zrealizowano dwa różne warunki brzegowe poprzez otoczenie jej powietrzem atmosferycznym (z i bez wymuszonego opływu) oraz płaszczem wodnym (wymuszony, turbulentny opływ). Zestawienie głównych charakterystyk przeprowadzonych pomiarów zawiera tabela 2.2. Wymieniono w niej najważniejsze parametry każdego eksperymentu:

- rodzaj badanej substancji: woda, n-oktadekan, roztwór NaCl w wodzie
- temperatura dwóch przeciwległych pionowych ścianek: ciepłej T_h i zimnej T_c
- rodzaj ścianek bocznych dla naczyń prostopadłościennych: plexiglas 6mm, 9mm
- rodzaj zewnętrznego ośrodka opływającego ścianki kuwety z badanym przepływem: powietrze lub woda
- warunki początkowe: tzw. start - „zimny" tzn. początkowy bezruch cieczy o temperaturze bliskiej 0^oC z nagłą zmianą temperatur obu ścianek izotermicznych; start „ciepły" tzn. zamarzanie od stanu konwekcji ustalonej dla temperatury zimnej ścianki 0^oC przez nagłe obniżenie tej temperatury.
- stosowana metoda pomiarowa: PIV – pomiar pól prędkości, PIT –pomiar pól temperatury przy pomocy zawiesiny ciekłych kryształów, wyznaczenie torów cząstek, pomiar kształtu frontu fazowego, pomiar stężenie soli dla roztworu – punktowy (elektrody) i w całym obszarze (Schlieren), IR – pomiar temperatury ścianek zewnętrznych kamerą termowizyjną
- rodzaj cząstek wskaźnikowych: typ ciekłych kryształów, pyłki roślin
- wartość stosunku wysokości do szerokości kanałów prostopadłościennych H/W

Wyjaśnienia wymagają tu wprowadzone terminy „ciepły i zimny start", użyte do definicji startu eksperymentu, czyli warunku początkowego. W trakcie wstępnych badań stwierdzono, że ustalanie się przepływu przy nagłej zmianie temperatury obu ścianek izotermicznych (tzw. „zimny start"), powoduje powstawanie trudnych do zdefiniowania stanów pośrednich, utrudniając ich porównanie z obliczeniami numerycznymi. Jest to związane z jednej strony, ze skończonym czasem narastania (i spadku) temperatury ścianek izotermicznych, z drugiej strony ze stanami nierównowagowymi w komorze pomiarowej przed rozpoczęciem eksperymentu. Celem poprawienia kontroli warunków eksperymentalnych zaproponowano wprowadzenie tzw. „startu ciepłego", tzn. zamarzanie w badanym ośrodku od stanu stacjonarnej, rozwiniętej konwekcji naturalnej przy temperaturze ścianki zimnej równej temperaturze przejścia fazowego. W takich warunkach obniżenie temperatury tylko ścianki zimnej, powoduje jedynie powstanie pierwszej warstwy lodu, nie

zmieniając zasadniczo warunków termicznych w kanale (temperatura frontu fazowego zastępuje temperaturę zimnej ścianki).

Trzeba tu podkreślić, że nie jest to wykaz wszystkich eksperymentów przeprowadzonych w trakcie projektu badawczego, ale tylko te najważniejsze, wnoszące najwięcej informacji o wpływie konwekcji naturalnej na przebieg procesu przemiany fazowej (zestalania lub topnienia).

Większość otrzymanych wyników dotyczących zamarzania wody w kuwecie prostopadłościennej można podzielić na dwa rodzaje:

- dla jednej ścianki pionowej utrzymywanej w temperaturze T_c poniżej temperatury przejścia fazowego równej 0°C, a drugiej, przeciwległej w temperaturze T_h powyżej $T_f = 0°C$, przeważnie T_c była równa -10°C a T_h +10°C. Temperatury te tak dobrano, aby najlepiej uwidocznić wpływ inwersji gęstości wody na pole przepływu,
- dla dwóch przeciwległych ścianek pionowych utrzymywanych w temperaturze poniżej temperatury przejścia fazowego lub powyżej, w tym przypadku realizowano zamarzanie lub topienie z podwójnym frontem fazowym (lód poruszający się symetrycznie z obu stron do środka kuwety lub symetryczne topienie lodu z obu stron), kuwetę wypełniono wodą całkowicie lub w 3/4 objętości (zamarzanie z powierzchnią swobodną)

Badano również samo zjawisko konwekcji bez przemiany fazowej w kuwecie prostopadłościennej. Celem tych eksperymentów było ustalenie wpływu warunków brzegowych (temperatury T_h, rodzaju wymiany ciepła na ściankach bocznych) na strukturę przepływu konwekcyjnego. Termografia w podczerwieni (IR) została zastosowana w badaniach eksperymentalnych konwekcji naturalnej i zamarzania w wodzie do rejestracji pola temperatury na powierzchni bocznych ścianek, w sposób bezstykowy, w czasie rzeczywistym, przy bardzo wysokiej czułości i dokładności. Do badań wybrano również inny materiał (n-oktadekan). W przeciwieństwie do wody, materiał ten charakteryzuje się liniową zmianą gęstości z temperaturą. Stwarza to dodatkową możliwość porównania wpływów efektu anomalii gęstości na geometrię frontu fazowego. Wybór n-oktadekanu związany jest z jego powszechnym stosowaniem do badań procesów przemiany fazowej ciecz - ciało stałe, ze względu na bardzo dobrze poznane jego właściwości termofizyczne, jak i temperaturę przejścia fazowego zbliżoną do temperatury otoczenia.

Oddzielny zakres zainteresowań dotyczył badania procesu zamarzania substancji binarnych, a właściwie wodnego roztworu soli NaCl. W badaniach tych skoncentrowano się na wyznaczeniu pól prędkości i temperatury, struktur przepływu i stężenia soli. Te ostatnie pomiary wykonano za pomocą punktowych sond lub układu smugowego Schlierena.