Tabela 1. Tabela zbiorcza pokazująca zakres wykonanych badań doświadczalnych.

Temp. T_h [°C]	Rodzaj startu	Rodzaj badania							
		kształt lodu		PIV		PIT		tory cząstek	
		geometria + TWB	przekrój	geometria +TWB	przekrój	geometria +TWB	przekrój	geometria +TWB	przekrój
5	$T_c = T_h$	S	V1	S	V2,H1			S	V1
	T_c= 0°C					W2	V3	S	V1,H2
10	$T_c = T_h$			W2,F S	V1 V2,H1			W2,F W2,G S	V1 V1 V1,H3
	T_c= 0°C	W1 P	V V1	W2 S P	V1,H3 V2,H1 V2,H1	W2 S	V1 V2,H1	W2 S S P.	H3, V1 V1 V8 V1
15	$T_c = T_h$			W2,F W2,G	V1 V1			W2,F W2,G	V1 V1
	T_c= 0°C			W2	V4,H3	W2	V4,H7	W2	V1,H3
20	$T_c = T_h$	W1,F W1,R	V1 V1	W2,F W2,G S	V1 V1 V2,H1			W2,G W1,R W2,F S	V1 V2 V1 V1,H1
	T_c= 0°C	P	V1	W2 S P	V1,H3 V2,H1 V2,H1	S P	V2,H1 V2,H1	W2 S S P	V1,H3 V1 V8 V2,H1
25	$T_c = T_h$	W2	V1	W2,F	V2	W2	V1	W2 W1,R	V1 V1
	T_c= 0°C	W1	V1	P	V2,H1	P	V2,H1		

Oznaczenia w tabeli:
W1 - walec, ścianka szkło grubość 2,4 mm
W2 - walec, ścianka szkło grubość 1,3 mm
P - sześcian, ścianka pleksi grubość 8 mm
S - sześcian, ścianka szkło grubość 2 mm
G - podgrzewanie grzałką górnej części kuwety
R - podgrzewanie grzałką rurkową średnicy ok. 1 mm w osi przepływu
F - dodatkowa folia izolacyjna w górnej części kuwety
V# - przekrój pionowy, # oznacza liczbę rejestrowanych przekrojów
H# - przekrój poziomy, # oznacza liczbę rejestrowanych przekrojów
PIV - pomiar pól prędkości metodą korelacji obrazów
PIT - pomiar pól temperatur metodą ciekłokrystaliczną

Ten sam typ przepływu obserwowano zarówno dla kanałów sześciennych jak i dla walca. Różnice można zaobserwować analizując szczegóły struktur przepływu. Te różnice wywołane są głównie zmianami termicznych warunków brzegowych na ściankach bocznych (grubość ścianek, przewodnictwo cieplne). Dla kanału walcowego dodatkowo modyfikowano termiczne warunki brzegowe wprowadzając lokalne źródło ciepła (spirala elektryczna umieszczona w górnej części kanału) lub zmieniając lokalnie strumień ciepła z zewnątrz (nałożona folia izolacyjna) - Rys. 15a. Dodatkowym elementem sterującym tworzeniem się struktury przepływu było zastosowania cienkiej (1mm) grzałki umieszczanej na osi walca w połowie jego wysokości (Rys. 15b).

Początkowy rozwój przepływu w kanale chłodzonym od góry ma charakter niestabilny. Wskazały na to przeprowadzone doświadczenia jak i symulacje numeryczne. W związku z tym wykonano testy dwóch różnych warunków początkowych dla rozwijającego się przepływu. W pierwszym przypadku, tzw. start ciepły, zarówno ciecz zewnętrzna jak i ciecz w kanale i górna ścianka mają w chwili początkowej tę samą temperaturę, równą temperaturze zewnętrznej T_h. Otwarcie zaworów z cieczą chłodzącą powoduje gwałtowny spadek temperatury górnej ścianki do temperatury T_c, inicjalizując proces konwekcji naturalnej. Schłodzona ciecz tworzy przy górnej ściance warstwę termiczną, której grubość szybko narasta. W pewnym momencie warstwa ta staje się niestabilna i przechłodzona ciecz „spada" na dół kuwety. Ten proces ma charakter mniej lub bardziej stochastyczny. Na ogół przepływ „preferuje" początkowy kierunek przepływu wzdłuż ścianek bocznych a powrót wzdłuż osi kanału. Odwrócenie się przepływu do stabilnej orientacji, z głównym strumieniem zimnej cieczy wzdłuż osi kanału ustala się po stosunkowo długim okresie czasu (10-15min). Jak zaznaczono, proces ten jest niestabilny i niewielkie zaburzenia, zawsze obecne w eksperymencie, powodują zachwianie symetrii przepływu (i tworzącej się fazy stałej).

Uzyskanie stabilnego, symetrycznego wzrostu fazy stałej jest możliwe przez modyfikacje warunków początkowych, realizując tzw. „start zimny". Dla tego typu warunków początkowych początkowa temperatura górnej ścianki wynosi 0^oC. W kanale utrzymuje się wtedy rozwinięty, stacjonarny przepływ konwekcyjny. W chwili zero temperatura górnej ścianki zostaje gwałtownie obniżona do temperatury docelowej T_c=-10^oC. Przechłodzona ciecz tworząca się w pobliżu górnej ścianki zostaje porwana przez główny przepływ i utrzymująca się jedynie bardzo cienka warstwa przyścienna daje początek pierwszej warstwie lodu. Symetria przepływu i jego globalne struktury zostają zachowane.

Zestawienie głównych charakterystyk przeprowadzonych pomiarów przedstawia
Tabela 1. Zaznaczono tam zakresy temperatur, rodzaje geometrii kanałów pomiarowych, rodzaj prowadzonych pomiarów oraz liczbę jednocześnie rejestrowanych płaszczyzn przekroju badanego obszaru.

Podstawowe informacje zbierane były dla centralnej płaszczyzny pionowej (Z=0.5) oraz płaszczyzny poziomej znajdującej się bezpośrednio pod górną powierzchnią. Dla początkowych chwil, przy braku lodu, odpowiadało to płaszczyźnie (Y=0.9), później w miarę narastania warstwy lodu, górna płaszczyzna przekroju poziomego odpowiadała najniższej wypukłości powierzchni frontu. Pozostałe położenia mierzonych przekrojów to powierzchnia pionowa w pobliżu przedniej ścianki (Z=0.9) i między osią symetrii a powierzchnią ścianki przedniej (Z=0.75). Dla przekrojów poziomych wybierano dodatkowe płaszczyzny dla położenia środkowego (Y=0.5) i w pobliżu dna naczynia (Y=0.1).

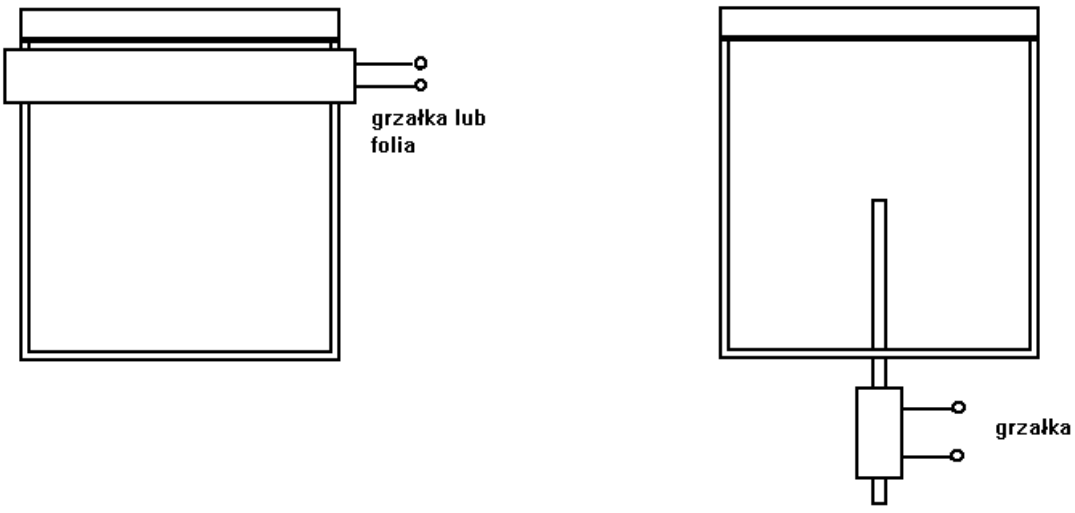
praktycznie we wszystkich pomiarach z lodem. Początkowo wydawało się, że są to być może nie zamarzające zanieczyszczenia, czy też przechłodzona woda [12]. Badania mikroskopowe wykonane w dodatkowym kanale o odwrotnej konfiguracji (chłodzenie od dołu), wyraźnie wykazały, że jest to powietrze uwalniające się z wody podczas procesu zamarzania (Rys. 14).

Specjalne przygotowywanie wody destylowanej stosowanej do doświadczeń, polegające na jej długotrwałym gotowaniu, a później odgazowywaniu w aparaturze próżniowej pozwoliło na zredukowanie liczby tych „dendrytów". Nie udało się ich jednak całkowicie uniknąć. Fakt istnienia tego typu wtrąceń może mieć istotne znaczenie dla bilansu cieplnego, gdyż uśrednione przewodnictwo cieplne lodu ulega wtedy zmniejszeniu.

2.7 Zakres wykonanych badań doświadczalnych

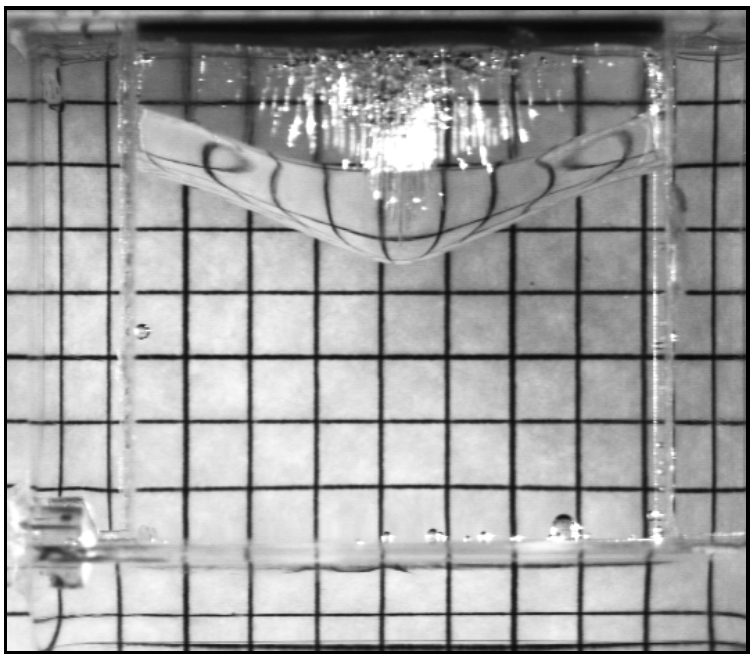
Jak już wspomniano powyżej badania wykonano dla czterech typów kanałów, kanał sześcienny szklany i z pleksiglasu oraz kanał walcowy szklany o dwu rodzajach ścianki. Pomiary wykonywano zawsze dla górnej ścianki w temperaturze T_c=-10^{o}C. Wartość ta jest wystarczająca by w stosowanej wodzie destylowanej uzyskać pierwsze zarodniki przemiany fazowej [12]. Temperatura T_h kąpieli wodnej otaczającej kanał z pięciu stron wyznacza warunki generacji przepływu. Pomiary zostały przeprowadzone dla zakresu temperatur T_h =5-25^{o}C. W dolnym zakresie tego przedziału anomalia gęstości wody powoduje, że przepływ w dużej części kanału jest odwrócony. Powoduje to, że schłodzona na granicy faz woda tylko w niewielkim stopniu miesza się z przepływem generowanym przez ciepłe ścianki boczne.

W miarę wzrostu temperatury zewnętrznej T_h maleje obszar, w którym ma miejsce inwersja funkcji gęstości wody. Przepływ ustalony charakteryzuje szybki strumień zimnej cieczy spływający symetrycznie z powierzchni lodu w dół wzdłuż osi kanału. Tam stopniowo ogrzewana ciecz penetruje wzdłuż ścianek bocznych z powrotem do górnej ścianki.



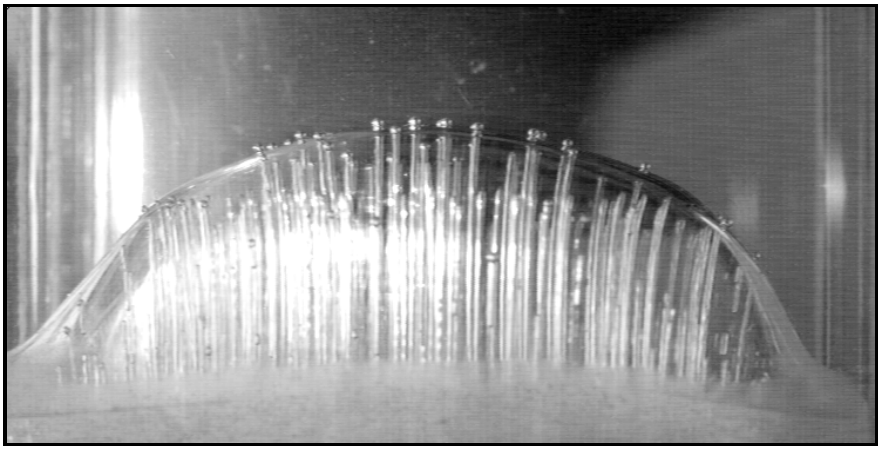
Rys. 15 Schemat położenia dodatkowych elementów modyfikujących termiczne warunki brzegowe w kanale walcowym. (a) - grzałka lub folia o szerokości 5mm umieszczona pod górną krawędzią boczną, (b) - cienki pręt grzejny umieszczony na osi kanału.

specjalnie dobranym światłem rozproszonym lub kontrastowym. Przykład takiego obrazu ilustruje Rys. 13.



Rys. 13. Struktura lodu tworzącego się w kanale z pleksiglasu na tle 5mm kraty; T_h=20°C, T_c=-10°C.

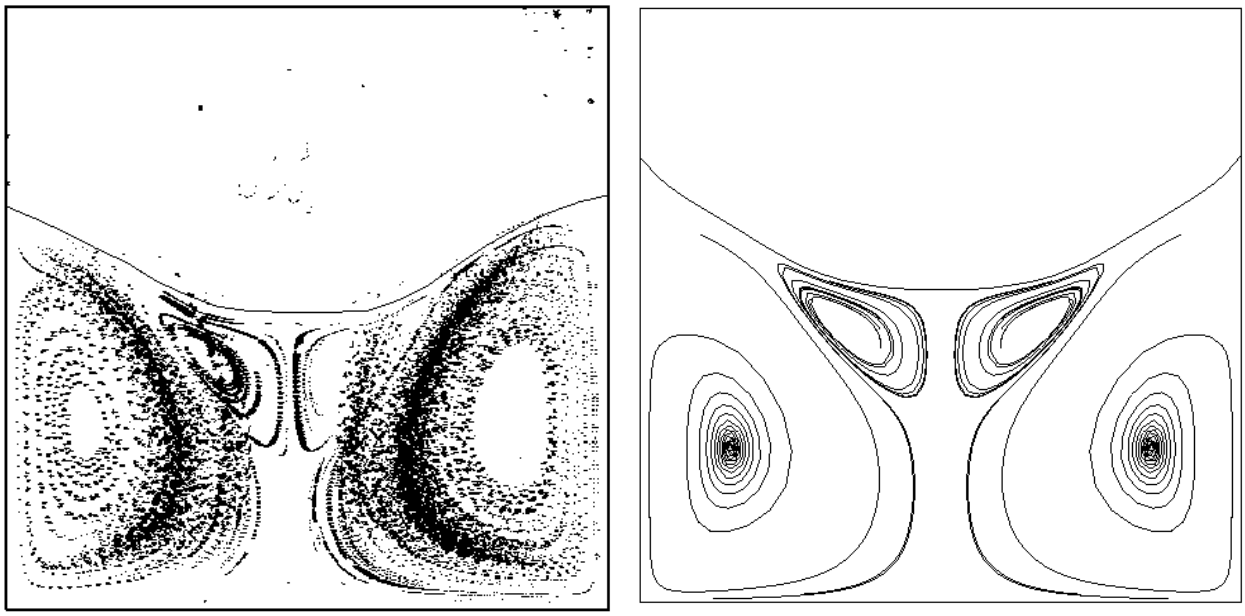
Na rysunku widoczne są zewnętrzne ścianki sześciokątnej kuwety pomiarowej o grubości 8mm. W dolnej lewej części kuwety widoczny jest kanalik o średnicy 1mm umożliwiający doprowadzenie do kanału termopary. Paraboloidalna powierzchnia lodu posiada charakterystyczne wyżłobienia, widoczne dzięki zniekształceniom struktury znajdującej się w tle siatki.



Rys. 14. Struktura wtrąceń tworzących się w lodzie. Widoczne z zdjęciu liczne kanaliki powietrzne o średnicy ok. 0.2mm.

Widoczne na ilustracji jasne plamy wewnątrz lodu świadczą o wtrąceniach (widoczne są one również na Rys. 7). Tego typu wtrącenia, mające charakterystyczną budowę dendrytów, były obserwowane

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 pola 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 wcześniejszego przygotowania, tak by zminimalizować niekorzystne narastanie jasności tła obrazu. Sam proces sumowania przeprowadzano *off-line* dla serii uprzednio zarejestrowanych i utrwalonych plików pojedynczych obrazów, 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 jednak jest wtedy zablokowanie wielu megabajtów pamięci masowej dla obrazów cząstkowych.



(a) (b)

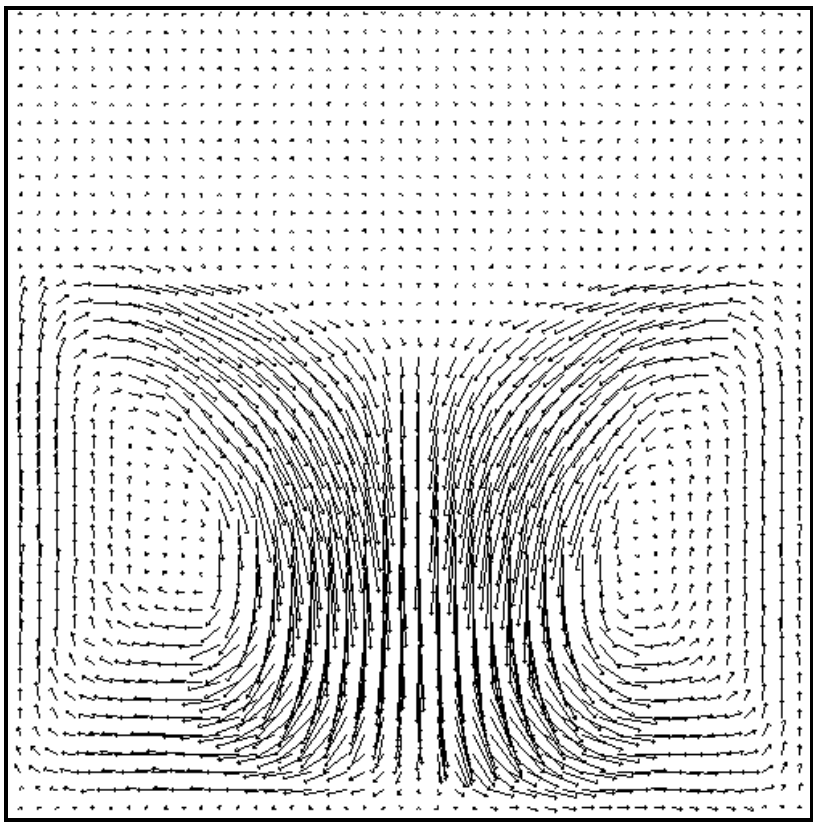
Rys. 12. Konwekcja naturalna w wodzie z tworzącym się lodem po 4 godzinach (por. Rys. 7). (a) - tory cząstek w przepływie stworzone przez zsumowanie 20 obrazów wykonanych co 800ms; (b) - symulacja komputerowa torów cząstek.

Rys. 12 ilustruje strukturę przepływu dla wcześniej omawianego przypadku (Rys. 7). Warto zauważyć drobne struktury tworzące się w górnych partiach kanału, trudne do wykrycia na podstawie samych pól prędkości. Wskutek anomalii gęstości wody, obserwujemy w tym rejonie bardzo powolny przepływ w kierunku odwrotnym do przepływu głównego. Symulacja numeryczna torów cząstek (*particle tracking*) wskazuje na analogiczny przebieg linii prądu.

2.6 Kształt i struktura fazy stałej

Badane przypadki konwekcji naturalnej charakteryzuje tworzenie się fazy stałej (lodu) na górnej, izotermicznej ściance kanału. Szybkość narastania i kształt tworzącej się fazy stałej jest jednym z ważnych parametrów opisu zjawiska. Wskutek oddziaływania przepływu powierzchnia lodu wykazuje często charakterystyczne wgłębienia czy wyżłobienia. Rejestracja kształtu lodu, a zwłaszcza struktury jego powierzchni, wymaga odmiennych niż dotychczas omówione technik oświetleniowych. W związku z tym równolegle do eksperymentów, których celem była rejestracja dwuwymiarowych przekrojów, wykonywano rejestracje obrazów powstałych przy oświetleniu

nych. 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. Rys. 11 przedstawia przykład pola wektorowego, uzyskanego tą nową metodą, nazwaną przez nas ODP-PIV, dla powyżej omawianej serii czterech obrazów przepływu.



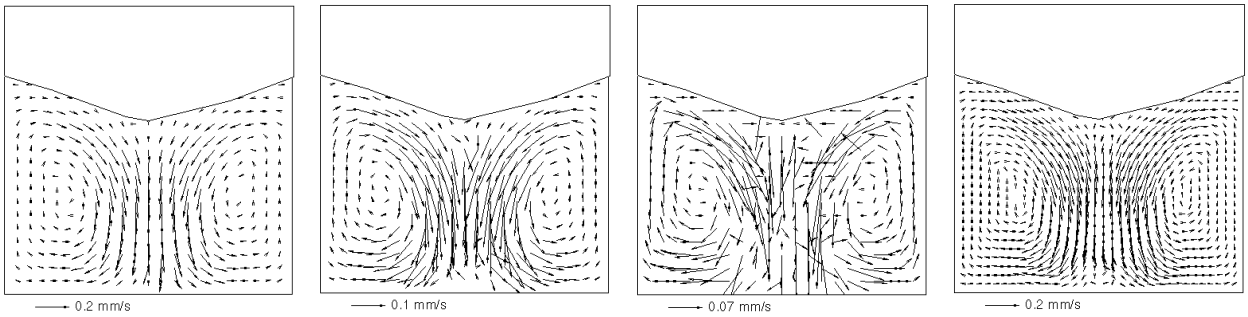
Rys. 11. Pole prędkości obliczone metodą ODP-PIV dla serii czterech obrazów przepływu z Rys. 7. Spośród obliczonych prawie 250000 wektorów pokazano tylko co 12 wektor dla każdej z osi.

Obliczenia ODP-PIV są jednak bardzo czasochłonne. Dla serii czterech obrazów czas obliczeń na komputerze Pentium 133Mhz przekracza 6 godzin. Dalsza optymalizacja kodu obliczeniowego wydaje się niezbędna. Dlatego w obecnych badaniach stosowanie tej metody ograniczono jedynie do wybranych przypadków, porównując rezultaty pomiarów z symulacją numeryczną.

2.5 Tory cząstek

Jednym z istotnych elementów analizy struktury przepływu jest wizualizacja torów cząstek wskaźnikowych umieszczonych w przepływie. Pełna trójwymiarowa analiza torów pozwala na precyzyjne porównanie struktur wybranych rejonów z obliczeniami [9,17]. Komplikacje analizy trójwymiarowej i wymaganie bardzo małej koncentracji cząstek powoduje, że często trudno jest otrzymać informację tam gdzie jest to akurat istotne. W związku z tym w niniejszej pracy ograniczono się do wizualizacji dwuwymiarowej, pozwalającej na analizę torów cząstek widocznych w płaszczyźnie oświetlającej.

Analiza torów stanowi cenne uzupełnienie obrazu pola prędkości, pozwalające zidentyfikować drobne zmiany kierunku przepływu, obszary martwe i rejony o bardzo małych prędkościach.

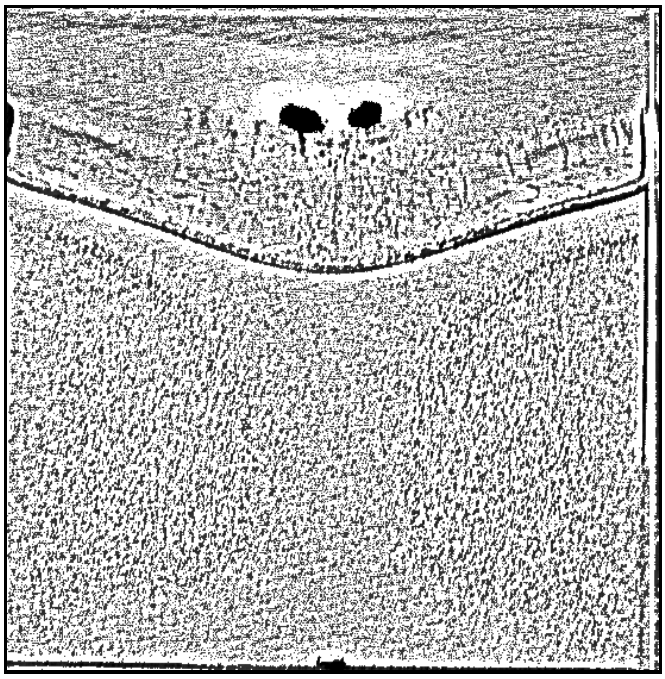


Rys. 10. Pole wektorowe obliczone na podstawie serii czterech barwnych obrazów przepływu (Rys. 7) wykonanych w odstępach 400*ms*. (a) - korelacja sąsiednich obrazów (Δt=0.4s), okno 48 pixli; (b) - korelacja obrazu 1 i 3 (Δt=0.8s), okno 48 pixli; (c) - korelacja obrazu 1 i 4 (Δt=1.2s), okno 48 pixli; (d) - korelacja obrazów 1 i 2 (Δt=0.4s) z oknem 32 pixli.

generacje błędnych wektorów w tych miejscach. Poprawę rozdzielczości przestrzennej można uzyskać zmniejszając wielkość okna. Można zauważyć na Rys. 10d, że pozwoliło to na lepsze uwidocznienie dodatkowych struktur przepływu bezpośrednio pod powierzchnią lodu, ale z drugiej strony ograniczyło dokładność rejestracji wektorów prędkości dla „szybkich" rejonów wzdłuż osi przepływu. Połączenie informacji z tych czterech obrazów pozwala na podwyższenie dynamiki rejestracji i zachowanie zbliżonej dokładności względnej w różnych rejonach przepływu. Oczywiście jeśli charakterystyka czasowa przepływu na to pozwala, możliwe jest dalsze przedłużanie serii obrazów nawet do kilkunastu. Jednak związane z tym dodatkowe zapotrzebowanie na pamięć masową dysku, jak i nadmiernie wydłużająca się i komplikująca procedura ewaluacji rezultatów powoduje, że za praktyczną granicę wykonywanych serii przyjęto cztery obrazy.

Ponieważ obliczenie pola prędkości dla jednej pary obrazów wymaga około 15min czasu CPU dla szybkiego procesora (Pentium 133Mhz), tego typu analiza wykonywana była dla całych serii pomiarów (200-300 obrazów przepływu) automatycznie przy zastosowaniu specjalnie przygotowanych skryptów dla systemu operacyjnego Unix.

Jak wspomniano powyżej metoda PIV wykorzystując technikę FFT pozwala na stosunkowo prostą realizację funkcji korelacji obrazów. Stosowanie techniki FFT powoduje jednocześnie nałożenie szeregu ograniczeń, wśród których jednym z istotniejszych jest ograniczona rozdzielczość przestrzenna. Statystyczny charakter metody wymaga wykonywania operacji na możliwie dużej próbce pixli a więc możliwie dużym oknie, dla którego wyznaczana jest średnia wartość przemieszczenia. Powoduje to spłaszczenie charakterystyk przepływu w obszarach o dużych gradientach prędkości. Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu 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 [20] dla obrazów przepływów we współpracy z francuskim ośrodkiem komputerowym LIMSI (CNRS). W rezultacie tej nowej procedury obliczeniowej, przemieszczenie jest określone dla każdego pixla 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 określeniu wartości wektora prędkości wynosi 0.2 pixla, co dla typowych przemieszczeń wielkości 20 pixli oznacza błąd rzędu 1%. Wysoka dokładność, możliwość odtworzenia pola prędkości dla rejonów o dużych gradientach oraz duża rozdzielczość przestrzenna metody są szczególnie przydatne przy eksperymentalnej weryfikacji rezultatów obliczeń numerycz-

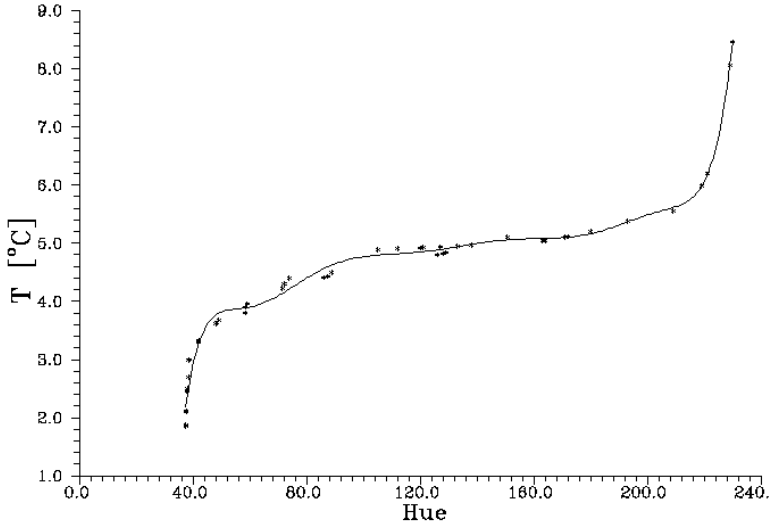


Rys. 9. Operacja przygotowująca obrazy do procesu korelacji PIV. Obraz zawiesiny ciekłokrystalicznej (Rys. 7) po filtracji pozwalającej na jednorodne uwypuklenie struktury posiewu.

Dokładność pomiaru prędkości przepływu metodą PIV zależy głównie od takich parametrów jak:

- wielkość analizowanego okna (sekcji obrazu) - większe okno zwiększa obszar przepływu gdzie prędkość ulega uśrednieniu. Zmniejszenie tego okna ogranicza dynamikę rejestracji i dokładność obliczeń FFT. W praktyce minimalne stosowane okno wynosiło 32x32 pixli obrazowych.
- względna prędkość przepływu - maksymalna wielkość rejestrowanego przemieszczenia nie powinna przekraczać 1/2 wielkości okna.
- wartość „trzeciej" składowej pola prędkości, prostopadłej do płaszczyzny świetlnej. Pojawianie się i znikanie cząstek przecinających płaszczyznę świetlną w czasie pomiaru pogarsza statystykę korelacji, a więc i dokładność wyznaczenia średniego przemieszczenia.

Dolna granicę pomiaru wyznacza minimalna wartość przemieszczenia jaka można zarejestrować i następnie wyznaczyć. Zastosowana w tej pracy metoda „over-sampling", polegająca na podwojeniu macierzy rejestrowanych pixli pozwala na uzyskanie rozdzielczości ok. 0.5 pixla. Dla typowej wielkości analizowanego okna 64x64 pixli pozwala to osiągnąć dokładność pomiaru maksymalnych prędkości rzędu 3%. Zachowanie podobnej dokładności dla szerszego zakresu zmian prędkości jest możliwe przez zmianę odstępu czasowego między kolejnymi obrazami. Pozwala to uzyskać duże przemieszczenia zarówno dla wolnych jak i szybkich obszarów przepływu. W praktyce taka technika stosowana była przez rejestrowanie serii kilku (4-5) obrazów. Korelacja obrazów skrajnych takiej serii pozwala na dokładny pomiar małych przemieszczeń, a więc identyfikację obszarów o małej prędkości przepływu. Obrazy kolejne czasowo stosowano dla analizy obszarów o dużych prędkościach. Ilustruje to Rys. 10. Dla małych odstępów czasowych między obrazami wielkość przemieszczenia w obszarach powolnych wynosi tylko kilka pixli, jest więc określana z małą dokładnością. Poprawa dokładności przez zwiększenia odstępu czasowego (Rys. 10b i c) powoduje, że przemieszczenia w rejonach szybkich (głównie na osi przepływu) stają się zbyt duże. Powoduje to



Rys. 8. Typowa krzywa kalibracji temperatury dla zawiesiny ciekłokrystalicznej. Obserwacja pod kątem prostym do płaszczyzny oświetlającej.

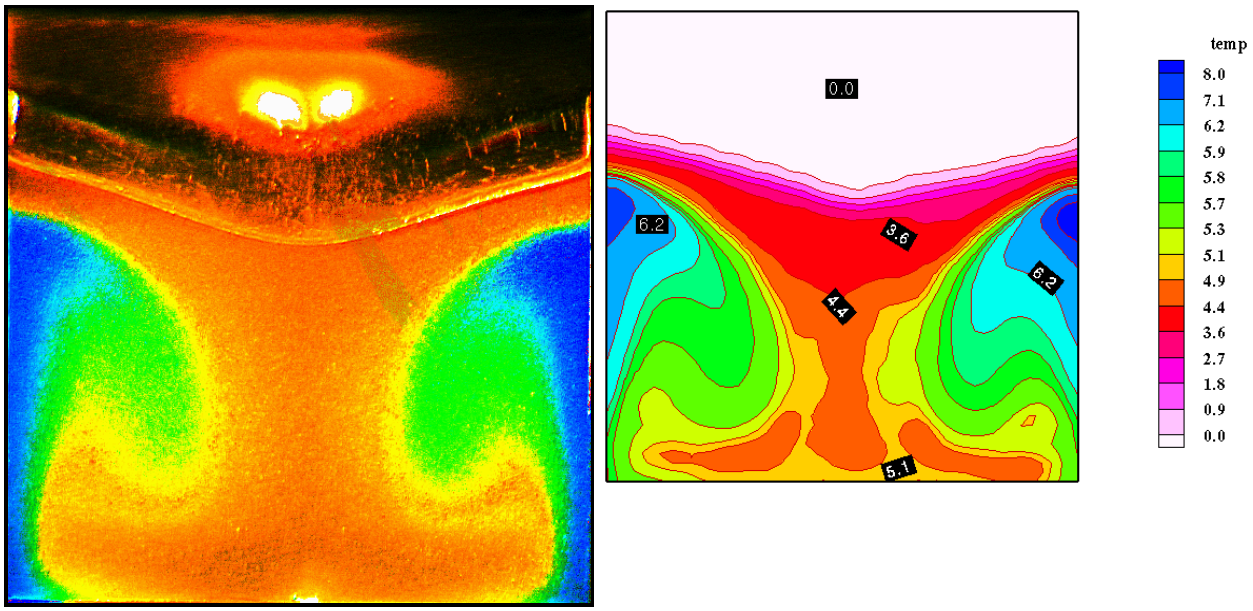
2.4 Pola prędkości

Zarejestrowane obrazy przepływu z unoszoną niewielką ilością drobnej zawiesiny (posiewu) wykorzystywano do znalezienia pól prędkości metodą korelacji obrazów [1,10,24]. Jak wspomniano, obrazy przepływu rejestrowano dla dwu-wymiarowych przekrojów płaszczyznami powstałymi dzięki zastosowaniu oświetlenia równoległą płaszczyzną świetlną. Poruszające się w przepływie cząstki widoczne są z kierunku prostopadłego do tej płaszczyzny w postaci zbioru jasnych punktów. Dla zawiesiny ciekłokrystalicznej barwa tych punktów pozwala znaleźć lokalną temperaturę. Natomiast ich przemieszczanie się w czasie pozwala wyznaczyć drugi istotny parametr przepływu, pole prędkości.

Dla znalezienia przemieszczenia cząstek posiewu (będącego funkcją prędkości cieczy) poszukiwana jest funkcja korelacji (splotu) obrazów położeń cząstek dla dwu kolejnych rejestracji. Podstawową zastosowaną techniką jest tzw. Digital Particle Image Velocimetry (DPIV), czyli cyfrowa anemometria obrazowa bazująca na wykorzystaniu szybkich transformat Fouriera (FFT) przy obliczaniu funkcji korelacji dla fragmentów analizowanych obrazów. Cały analizowany obraz zostaje podzielony na kilkadziesiąt regularnych fragmentów (sekcji) i obliczana korelacja fragmentów dwóch obrazów wykonanych w znanym odstępie czasu pozwala na wyznaczenie średniego przemieszczenia elementów obrazu, a więc wyznaczenie pola prędkości.

Przed wykonaniem operacji korelacji analizowane obrazy przepływu wymagają przygotowania, tak by możliwie wyraźnie wydobyć strukturę posiewu. Zwykłe techniki podnoszenia kontrastu obrazu na ogół zawodzą, ze względu na nierównomierności koncentracji cząstek jak i zmiany oświetlenia. W związku z tym opracowano nową technikę, polegającą na lokalnej analizie średniej intensywności obrazu i wyznaczaniu na jej podstawie lokalnie kryterium zmiany kontrastu obrazu. Opracowany program komputerowy realizuje to zamierzenie przemieszczając przez cały obraz małe *„okno”* (5x5 pixli) i wykonując analizę intensywności zapisuje punkty określane jako jaśniejsze od średniego poziomu do nowego obrazu. Obrazy powstałe dzięki tej „lokalnej binaryzacji” są dopiero poddawane procesowi korelacji. Przykład rezultatu operacji lokalnej binaryzacji dla obrazu barwnego pokazanego powyższej przedstawia Rys. 9.

nagrzewanym przez ścianki boczne ma miejsce w obszarze „mieszania". Jest on dobrze widoczny w postaci głębokiego wcięcia barwnego utworzonego przez zawracający w kierunku osi kanału strumień cieczy nagrzewany przez ścianki boczne. Analiza wartości *hue* dla tego obrazu barwnego pozwala nam na znalezienie rozkładów temperatur w tym przekroju przepływu w postaci izoterm (Rys. 7b).



(a) (b)

Rys. 7. Konwekcja naturalna z przemianą fazową w kanale sześciokątnym o ściankach bocznych z pleksiglasu. Temperatura górnej ścianki T_c=-10°C, temperatura otaczającej cieczy T_h=20°C. Tworzenie się lodu przy ściance górnej po 3600s od rozpoczęcia procesu chłodzenia. (a) - wizualizacja temperatury przy pomocy zawiesiny ciekłych kryształów; (b) - obliczone izotermy.

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°C - 0.5°C) wyznaczano krzywą kalibracji *temperatura - hue*. Dla obliczeń temperatury krzywa ta jest przybliżana wielomianem wyższego rzędu (Rys. 8). Łatwo zauważyć na podstawie tego rysunku, że wskutek silnej nieliniowości dokładność wyznaczenia temperatury zleży 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 i początek 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.

Rejestrowany obraz kolorowy jest reprezentowany przez trzy barwy podstawowe: *czerwoną, zieloną i niebieską* (*RGB*) i zapisywany w postaci trzech plików odpowiadających wyciągom z każdego kanału barwnego kamery. Celem przeanalizowania koloru jako fizycznej wartości, 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:*

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

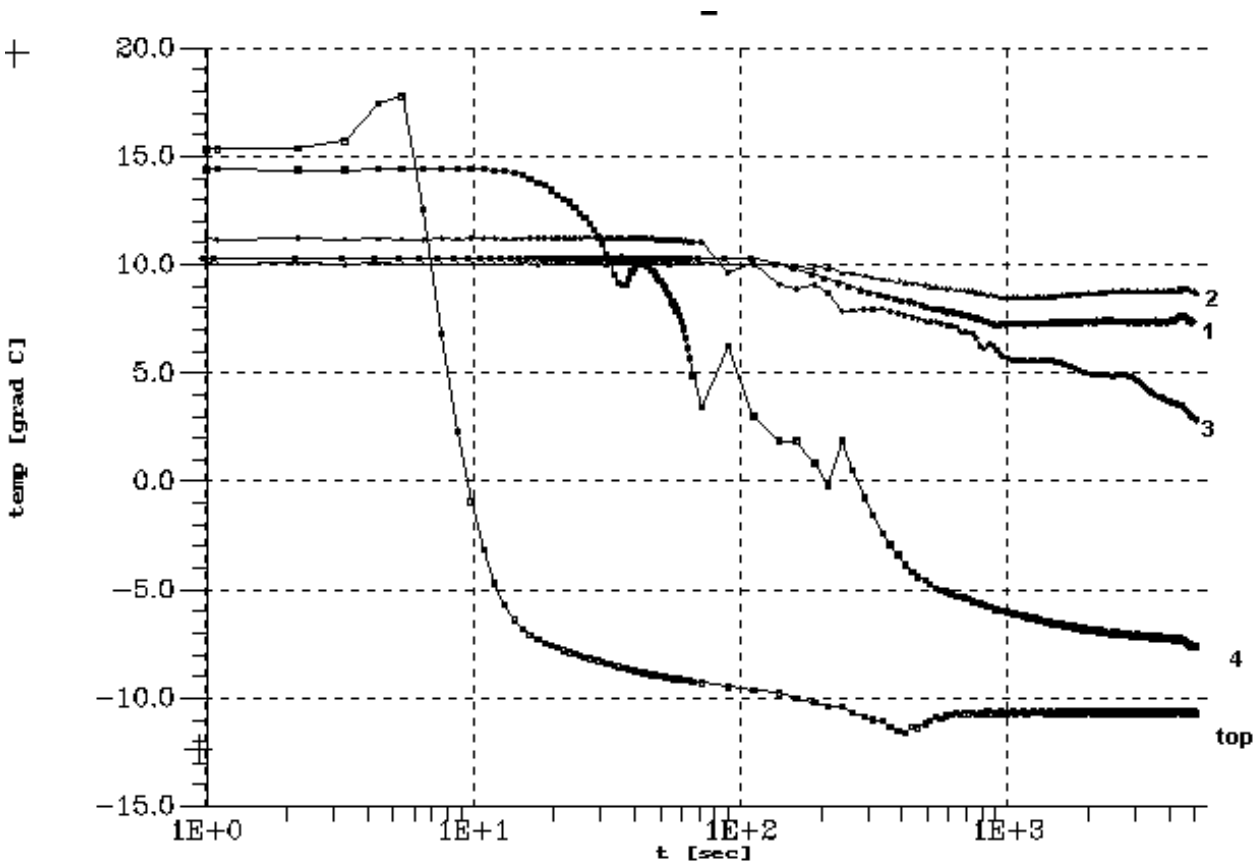
$$S = 255 \cdot (1 - \min(R,G,B) / I)$$

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

gdzie: $R' = R - \min(R,G,B)$, $G' = G - \min(R,G,B)$ i $B' = B - \min(R,G,B)$.

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 na siebie 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*.

Rys. 7a przedstawia przykład obrazu barwnego zarejestrowanego dla przepływu w badanym kanale z chłodzoną powierzchnią górną. Strumień chłodnej cieczy, widoczny w postaci czerwonego „wachlarza" spływa od powierzchni lodu do dna. Łatwo zauważyć, że chłodna cięższa woda niemal nie zmienia swojej temperatury płynąc w środku kanału. Przy dnie wpływ płaszcza zewnętrznego na temperaturę wewnątrz kuwety jest stosunkowo mały. Powolna zmiana barwy, widoczna w miarę przemieszczania się cieczy w kierunku ścianek bocznych świadczy o stopniowym nagrzewaniu się cieczy. W miarę nagrzewania się gęstość cieczy maleje. Powoduje to odwrócenie się kierunku przepływu i powrót cieczy w górę kanału wzdłuż ścianek bocznych. Temperatura nagrzewanej przez ścianki boczne cieczy silnie wzrasta, uzyskując maksymalne wartości w pobliżu górnego rogu kanału. W tym czasie zabarwienie unoszonej zawiesiny ciekłokrystalicznej zmienia się poprzez barwy żółtą, zieloną i błękitną do ciemnoniebieskiej. Jednak, jak to widać wyraźnie na obrazie barwnym (por. Rys. A 1), głębokość penetracji „gorącego" strumienia cieczy jest ograniczona. Bezpośrednio w pobliżu granicy faz utrzymuje się warstwa cieczy o niskiej temperaturze, widoczna na rysunku w postacie rozległego obszaru czerwonego. Wymiana ciepła między tą warstwą, a strumieniem cieczy



Rys. 6. Przebieg zmian temperatury dla wybranych punktów kanału podczas pomiaru, tzw. „start ciepły". 1 - termopara w dolnym, przednim narożniku kanału (x=0, y=0, z=0.95); 2 - termopara w płaszczyźnie symetrii przy dnie (x=0, y=0, z=0.5); 3 - termopara w płaszczyźnie symetrii w połowie wysokości (x=0, y=0.5, z=0.5); 4 - termopara w płaszczyźnie symetrii przy górnej ściance (x=0, y=0.95, z=0.5); top - temperatura wewnątrz górnej ścianki.

Skok skręcenia płaszczyzny polaryzacji wynika z molekularnej struktury substancji i ulega zmianie z temperaturą. W ten sposób barwa światła rozproszonego w danym kierunku pozwala na określenie lokalnej temperatury substancji ciekłokrystalicznej. W rezultacie unoszona przepływem zawiesina ciekłokrystaliczna w postaci cząstek o średnicy rzędu 50μm i bardzo małej koncentracji (< 0.05%) spełnia rolę miniaturowych termometrów rejestrujących lokalną temperaturę, nie zakłócając przy tym w istotny sposób przepływu. Selektywne rozpraszanie światła ma miejsce jedynie w ograniczonym zakresie temperatur. Zakres ten zależy od typu substancji i może wynosić od kilku do kilkunastu stopni Celsiusa. Szybkość reakcji struktury molekularnej ciekłego kryształu na zmiany temperatury jest rzędu 1ms, co dla badanych przepływów jest wartością zupełnie wystarczającą.

Jak wspomniano barwa rozproszonego światła zleży zarówno od temperatury jak i kąta rozproszenia. Dlatego do analizy temperatury przepływu konieczne jest dokładne zdefiniowanie geometrii źródło światła - obserwator (kamera). Zrealizowano to oświetlając przepływ cienką (ok. 2mm) płaszczyzną światła i obserwując światło rozproszone pod kątem prostym do tej płaszczyzny przy pomocy kamery z obiektywem o wąskim kącie widzenia. Obrazy przepływu rejestrowane są dla dwuwymiarowych przekrojów płaszczyznami wyznaczonymi oświetlającą równoległą wiązkę światła uformowaną w „warstwę świetlną" (tzw. technika „*light sheet*"). Poruszające się w przepływie cząstki widoczne są z kierunku prostopadłego do tej płaszczyzny w postaci zbioru kolorowych punktów na ciemnym tle.

Podobną konstrukcję stosowano dla kanałów walcowych. Pomiary przeprowadzono dla dwu modeli kanałów walcowych wykonanych ze szkła: o cienkiej 1.3mm ściance bocznej i denku oraz o ściance bocznej i denku o grubości 2.4mm. W pierwszym przypadku średnica wewnętrzna kanału wynosiła 35.5mm a wysokość wewnętrzna 41.5mm. Dla grubszego szkła średnica wewnętrzna kanału wynosiła 37mm a jego wewnętrzna wysokość 41.1mm.

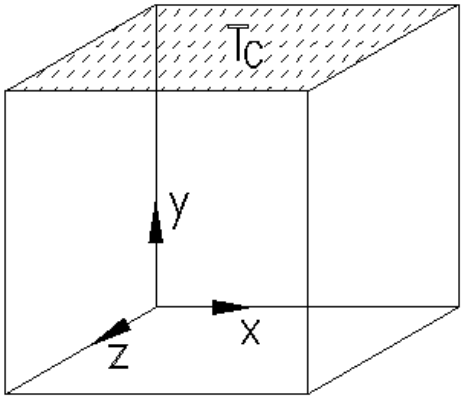
2.3 Pomiar temperatury

Pomiar temperatury jest jednym z istotniejszych elementów analizowanych przepływów. Tradycyjnie pomiar taki jest wykonywany przy pomocy cienkich (ok. 0.5-1mm) termopar umieszczanych wewnątrz badanego przepływu. Umożliwia to stosunkowo dokładny ($\cong 0.1^{o}C$) pomiar w jednym punkcie. Na ogół jest to informacja niewystarczająca dla pełnego zrozumienia struktur przepływu, zwłaszcza zmieniającego się w czasie. Umieszczenie dużej liczby termopar jest nie tylko trudne technicznie ale również powoduje zakłócenie samego przepływu. W niniejszej pracy pomiar temperatury przy pomocy termopar i elementów Pt100 dokonywano głównie w celach kontrolnych w kilku wybranych punktach.

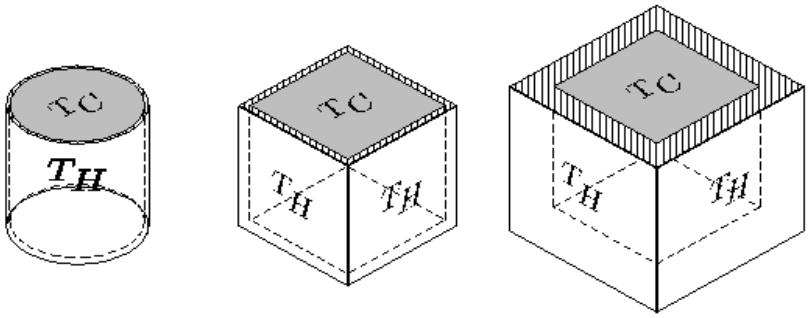
Rys. 6 przedstawia typowy przebieg temperatury rejestrowany przy pomocy czterech termopar umieszczonych na bocznej ściance kanału sześciennego. Trzy termopary znajdują się na linii symetrii, przy górnej ściance, na środku i przy dnie kanału, a jedna z nich w dolnym narożniku kanału. Temperatura górnej, izotermicznej ścianki mierzona jest przy pomocy elementu Pt100. Przebieg temperatur odpowiada tzw. „startowi ciepłemu". W chwili początkowej zarówno ciecz zewnętrzna jak i ciecz wewnątrz kanału mają tę samą temperaturę, w ilustrowanym przypadku $+10^{o}C$. Na wykresie górna powierzchnia kanału (top) wykazuje nieco wyższą temperaturę wskutek kontaktu z otoczeniem (temperatura powietrza w laboratorium wynosiła $+25^{o}C$). W chwili otwarcia zaworów z cieczą chłodzącą, utrzymywaną w termostacie w temperaturze $-10^{o}C$, następuje gwałtowny spadek temperatury górnej powierzchni, rejestrowany również od strony cieczy przez sąsiadującą z górną ścianką termoparę nr 4. Widoczny na wykresie chwilowy skok temperatury górnej powierzchni jest wywołany opróżnieniem węży zasilających, w których ciecz ma początkowo temperaturę pokojową.

W ciągu niespełna 50s od chwili uruchomienia chłodzenia ustala się temperatura górnej powierzchni. Warto zwrócić natomiast uwagę na pojawiające się w kanale fluktuacje temperatury. Są one najsilniejsze w pobliżu górnej powierzchni, gdzie pojawia się początkowo przechłodzenie cieczy a następnie jej zamarzanie. Po około 100s górna termopara (nr 4) wskazuje już ujemne temperatury wewnątrz narastającej warstwy lodu. Oscylacje temperatury rejestrowane przez pozostałe termopary (zwłaszcza nr 3 i 4), wskazują na zmiany struktury przepływu. Ich interpretacja staje się możliwa dopiero dzięki informacjom uzyskanym dla całego pola przekroju przepływu przy zastosowaniu drugiej techniki rejestracji temperatury.

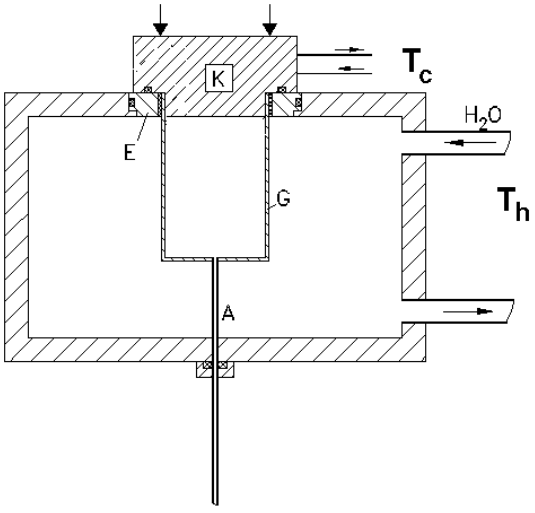
Pomiar pola temperatury w przekroju przepływu umożliwiło zastosowanie nowej, niestandardowej techniki Particle Image Thermometry (PIT), opartej na analizie barwy zawiesiny ciekłokrystalicznej, stosowanej jako posiew w przepływie [7-10,14,15]. Idea pomiaru oparta jest na zjawisku selektywnego rozpraszania światła przez niektóre substancje cholesterolowe. Białe światło przechodząc przez taką substancję ciekło-krystaliczną zostaje spolaryzowane „śrubowo" [6]. Periodyczny układ płaszczyzn molekuł tych substancji powoduje selektywną refrakcję światła, podobnie jak ma to miejsce dla siatki interferencyjnej. W efekcie dla wybranego kierunku obserwacji rozproszona zostaje fala elektromagnetyczna o jednej długości, widoczna w postaci charakterystycznego zabarwienia rejestrowanego po tym kątem światła. Barwa rozproszonego światła zależy od wymiaru charakterystycznego (skoku) tak powstałej siatki interferencyjnej.



Rys. 3. Układ współrzędnych przyjęty w badaniach. Izotermiczna ścianka górna (Y=1) i pięć nie-adiabatycznych ścianek bocznych.

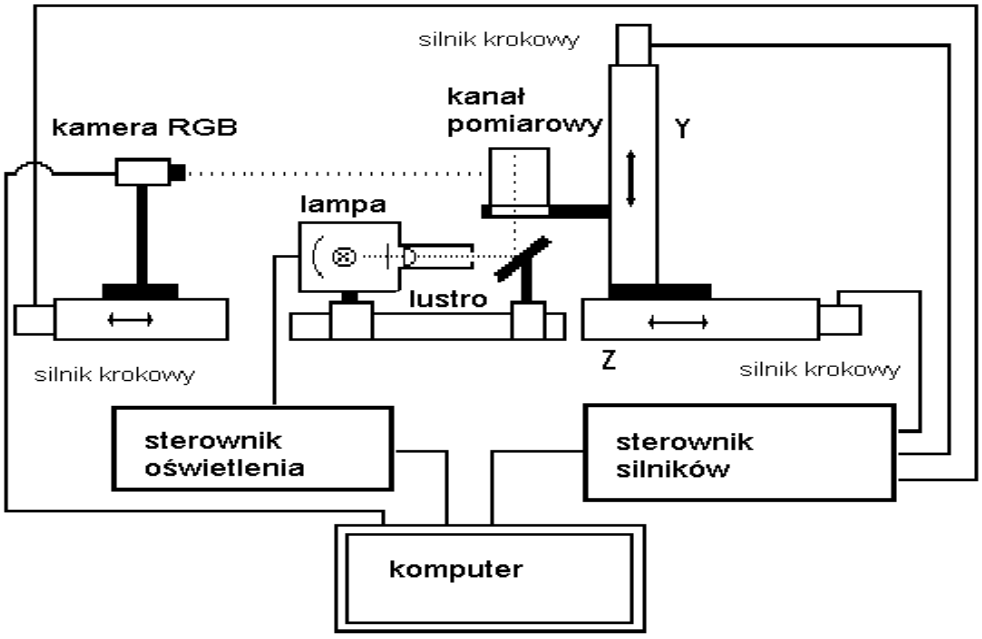


Rys. 4. Geometria stosowanych kanałów pomiarowych: szklany kanał walcowy, kanał sześcienny o ściankach z 2mm szkła i z 8mm pleksiglasu.



Rys. 5. Schemat układu zasilania kanałów pomiarowych. K - izotermiczna ścianka górna, G - ścianki boczne wykonane ze szkła lub pleksiglasu, A - wyrównanie ciśnienia wewnętrznego (rurka 0.5mm), E - ścianki z pleksiglasu dla kanału kąpieli zewnętrznej.

archiwizowane w systemach pamięci masowej (dyski magneto-optyczne, taśmy magnetyczne i zapisywalne dyski optyczne CD-R).



Rys. 2. Podstawowe elementy układu pomiarowego do badań konwekcji naturalnej. Schemat przedstawia elementy układu ustawione w pozycji do rejestracji pionowych przekrojów przepływu.

Problem archiwizacji danych w systemie pomiarowym nabiera poważnego znaczenia, jeśli zauważymy, że jeden obraz *RGB* wymaga około 1.2MB pamięci, a rejestracja 200 ujęć po 4 obrazy każde (dla korelacji obrazów metodą PIV), tworzy zbiór wymagający prawie 1GB pamięci. Pomiar taki przeprowadzony dla czterech przekrojów kanału odpowiada rejestracji zmian przepływu w 50 punktach czasowych. Efektywna obsługa systemu pomiarowego i transfer tak dużych zbiorów stały się możliwe dzięki sprzężeniu komputera pomiarowego poprzez sieć ethernet z dodatkowymi komputerami w laboratorium i komputerami sieci Instytutu.

2.2 Geometria kanałów pomiarowych

Przyjęty układ współrzędnych dla kanału sześciennego z górną ścianką izotermiczną ilustruje Rys. 3. Pomiary przeprowadzono dla kanałów sześciennych i dla walca (Rys. 4). Kanały sześcienne wykonano z dwóch rodzajów materiału ścianek bocznych: pleksiglas o grubości 8mm jako materiał o niskim przewodnictwie cieplnym (k_w=*0.19W/mK*) oraz szkło o grubości 2mm (k_w=*1.07W/mK)*. Wewnętrzny wymiar kanału w obu wypadkach wynosił 38mm.

Stosowano dwa typy kanałów z pleksiglasu. Pierwszy z bocznymi kanalikami (od 2 do 5) dla wprowadzenia kilku termopar kontrolnych i dla zrównoważenia ciśnienia wewnętrznego w kuwecie. Stosowanie termopar pozwalało na dokładną kontrolę procesów termicznych zachodzących w kanale, wskazując na charakter zmian transportu ciepła od chłodzonej ścianki górnej. Zauważono jednak, że nawet te niewielkie (ok. 1mm średnicy) zaburzenia powierzchni bocznej mogą być czynnikiem stymulującym asymetryczny rozwój przepływu. W związku z tym większość badań w kuwecie z pleksiglasu została powtórzona dla modelu o jednym centralnym otworze w dolnej ściance. Otwór ten o średnicy 0.5mm służył wyrównaniu ciśnienia wywołanego wzrostem objętości zamarzającej wody (Rys. 5).

2. Metodyka i zakres pomiarów

Badania eksperymentalne miały na celu znalezienie istotnych charakterystyk przepływu w funkcji czasu. W szczególności polegały one na wyznaczeniu pól prędkości, pól temperatur oraz torów cząstek dla wybranych przekrojów pionowych i poziomych. Wyznaczano również kształt i wielkość frontu przemiany fazowej (lodu).

2.1 Stanowisko pomiarowe

Zasadniczym narzędziem pomiarowym jest procesor obrazowy, pozwalający na cyfrową rejestrację obrazów przepływu. Komputerowa analiza tych obrazów ma na celu zebranie poszukiwanych informacji.

Podstawowy schemat stanowiska pomiarowego stosowanego w doświadczeniach nad zachowaniem się przepływu konwekcyjnego ilustruje Rys. 2. Właściwa rejestracja obrazu przepływu odbywa się dla wybranych przekrojów zdefiniowanych płaszczyzną oświetlającą. Obserwacja odbywa się z kierunku prostopadłego do płaszczyzny światła. Podstawowe elementy układu pomiarowego to badany kanał wypełniony cieczą, kamera kolorowa 3CCD, komputer, karta akwizycji obrazów, system termostatów utrzymujących zadane temperatury, specjalnie skonstruowane liniowe źródła światła - wytwarzające płaszczyznę świetlną o szerokości 100mm i grubości 1-2mm i układ zwierciadeł. Temperaturę ścianki górnej oraz kąpieli otaczającej ustalano przy pomocy dwu termostatów. Dokładność stabilizacji temperatury wynosiła 0.1^{o}C. System zaworów elektromagnetycznych pozwalał na szybkie przełączanie obiegu czynnika chłodzącego, tak by możliwa była realizacja niemal natychmiastowego (ok. 30s) obniżenia temperatury górnej ścianki.

Kanał pomiarowy i kamera zostały umieszczone na prowadnicach silników krokowych, umożliwiających przemieszczanie tych elementów wzdłuż trzech niezależnych osi. Pozwala to na szybką rejestrację obrazów przepływu dla szeregu płaszczyzn. Dzięki systemowi zwierciadeł, dwóm niezależnym źródłom światła i dodatkowym silnikom krokowym, możliwa była również rejestracja przepływu dla przekrojów poziomych. W takim przypadku pozycje kamery i źródła światła zamieszczone na schemacie ulegały zamianie i obraz obserwowany był przez dolną ściankę kanału.

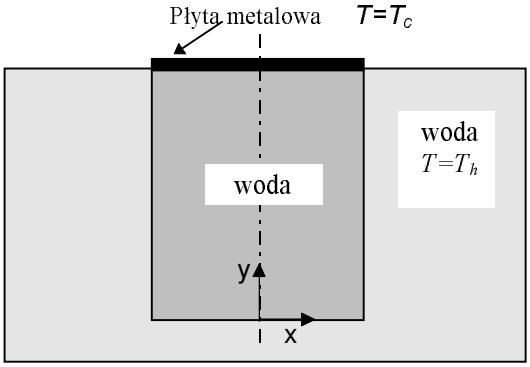
System kontroli silników krokowych, program do rejestracji obrazów, uruchamiania oświetlenia jak i dodatkowy program rejestrujący w wybranych punktach temperatury mierzone przy pomocy termopar i elementów Pt100 zostały połączone w jeden system komputerowy sterujący eksperymentem. Uruchamiany przez komputer system akwizycji pozwala na automatyczne zbieranie danych i obrazów, ich zapis na dysku, oraz jednoczesną kontrolę położenia obiektów przy pomocy silników krokowych. Stosunkowo długie czasy relaksacji przepływu umożliwiają wykonanie dla każdego punktu czasowego pomiaru pól przepływu w kilku płaszczyznach pionowych i poziomych. W ten sposób realizowano quasi-trójwymiarową obserwację przepływu w badanym kanale.

Rozdzielczość obrazów komputerowych wynosi od 512x512 pixli do 768x542 pixli. Rejestrowane obrazy przekrojów przepływu wykorzystywane były do określenia dla danej płaszczyzny rozkładu temperatury, pola prędkości, torów cząstek oraz kształtu frontu przemiany fazowej. Zastosowanie komputera Pentium 133/64MB wyposażonego w nowoczesną kartę akwizycji IC-PCI z modułem AM-CLR (Img. Tech. Inc.) umożliwiło rejestrowanie ok. 40 obrazów RGB w pamięci komputera w czasie rzeczywistym. Zarejestrowane obrazy przepływu zapisywane były na dyskach komputera i

1. Wprowadzenie

Zasadniczym celem przeprowadzonych badań było znalezienie wpływu warunków brzegowych istotnych dla selekcji struktur przepływu konwekcyjnego z przemianą faz. Ze względu na nieliniowość równań Naviera-Stokesa rządzących przepływem lepkim, wpływ równania energii w przepływach wywołanych różnicą temperatur, anomalię funkcji gęstości wody w niskich temperaturach, a dodatkowo wskutek tworzenia się fazy stałej w przepływie konwekcyjnym i związaną z tym zmianę geometrii brzegu, badane przepływy charakteryzuje szczególna "wrażliwość" a nawet niejednoznaczność (bifurkacje) realizowanej formy czy też struktury pola przepływu w funkcji warunków brzegowych.

Obiektem badań jest przepływ wody w prostopadłościennym lub cylindrycznym kanale o chłodzonej izotermicznie górnej ściance, a pozostałych ściankach o zadanych termicznych warunkach pozwalających na regulację przepływu ciepła do kanału od otaczającej go cieczy o stałej temperaturze (Rys. 1). Obniżenie temperatury górnej ścianki poniżej punktu zamarzania powoduje tworzenie się fazy stałej (lodu). Tego typu geometria do pewnego stopnia symuluje konfigurację spotykaną przy kierunkowej hodowli kryształów metodą Bridgmana [18].



Rys. 1. Schemat ideowy badanych kanałów z izotermiczną ścianką górną o temperaturze T_c i pozostałych ściankach nie-adiabatycznych, opływanych cieczą o stałej temperaturze T_h.

Sterowanie termicznymi warunkami na ściankach bocznych i ściance dolnej zarówno poprzez ich konstrukcję (grubość, materiał, itp.), przez zmianę temperatury zewnętrznej, lokalne zmiany temperatury powierzchni przy pomocy folii grzejnej lub izolacji termicznej ma za zadanie znalezienie wpływu termicznych warunków brzegowych (TWB) na tworzenie się danej struktury przepływu, jej stabilność oraz wpływ tych czynników na tworzącą się fazę stałą.

Obok badań eksperymentalnych przeprowadzono liczne symulacje numeryczne zarówno dla prostopadłościennej geometrii kanału jak i dla geometrii cylindrycznej, dla przepływu zarówno z przemianą fazową jak i dla czystej konwekcji naturalnej. Badania numeryczne i ich porównanie z eksperymentem pozwoliły na znalezienie szeregu rozbieżności. Stwierdzono konieczność weryfikacji przyjmowanych powszechnie założeń dotyczących formułowania termicznych warunków brzegowych jak i modelowania procesu przemiany fazowej.

T.A. Kowalewski
A. Cybulski
IPPT PAN
Center of Mechanics

Natural convection with phase change

Abstract

Natural convection with phase change in lid cooled enclosures has been extensively studied experimentally and numerically for water. Low aspect ratio small enclosures of both cubical and cylindrical symmetry with isothermal top wall were used. The other walls were neither adiabatic nor ideal heat conductors, allowing heat entry from the surrounding water bath. The external temperature varied from 5°C to 25°C, whereas the top wall was kept at -10°C. The flow and ice structures, their dependence on the flow parameters, geometry, initial conditions and the thermal boundary conditions were investigated. Digital Particle Image Velocimetry and Thermometry - full field experimental technique based on the digital image analysis was used to obtain quantitative *2-D* temperature and velocity fields information. The paths of the individual tracers obtained using digital particle tracking helped to understand and verify the flow structure.
It was found that the Thermal Boundary Conditions of non-isothermal walls have triggering effect on the flow configuration. Experimental and numerical investigations indicated that simplifications or idealisations of the TBC usually applied in numerical models may lead to substantial differences of the flow pattern. Solving the coupled solid-fluid heat conduction problem for the side walls together with 3-D Navier-Stokes equations improved modelling.
The onset of convection was studied for two different initial conditions: zero flow field with initially warm fluid or developed natural convection without phase change. The instabilities of the flow observed for the first case could be effectively damped by the second method. It was found that the growing conical ice front has a stabilising effect on the flow. Similarly, modifications of the thermal boundary conditions at the side walls stabilised onset of convection.
Complicated flow structures in the cavity are reflected on the ice surface created underneath the lid. The eight-fold flow symmetry was observed for the cube cavity. In the axis-symmetric cylindrical cavity the 16-fold flow symmetry was observed, both for the temperature field and the ice structure.

T.A. Kowalewski
A. Cybulski
IPPT PAN
Ośrodek Mechaniki

Konwekcja naturalna z przemianą fazową

Streszczenie

Praca przedstawia rezultaty badań eksperymentalnych i numerycznych dotyczących konwekcji naturalnej z przemianą fazową w kanałach o chłodzonej, izotermicznej ściance górnej. Badania przeprowadzono dla wody, w naczyniach sześciennych i walcowych o różnym przewodnictwie cieplnym pozostałych ścianek, przewodzących ciepło od zewnętrznego płaszcza wodnego. Temperaturę wody w płaszczu wodnym zmieniano w zakresie od 5°C do 25°C, podczas gdy górna ścianka była utrzymywana w temperaturze - 10°C. Została przebadana zależność formy przepływu i struktury lodu od parametrów charakteryzujących przepływ, warunków początkowych, geometrii naczynia oraz termicznych warunków brzegowych. Celem uzyskania ilościowych informacji o pełnych 2-D polach temperatury i prędkości zastosowano nowe techniki eksperymentalne, cyfrowej anemometrii i termometrii obrazowej (Digital Particle Image Velocimetry and Thermometry), bazujące na analizie numerycznej obrazu przepływu. Celem lepszego zrozumienia i zweryfikowania struktury przepływu rejestrowano tory poszczególnych cząstek posiewu używanego do wizualizacji przepływu z wykorzystaniem techniki cyfrowej (particle tracking).
Stwierdzono, że termiczne warunki brzegowe na nieizotermicznych ściankach mają decydujący wpływ na strukturę przepływu. Badania eksperymentalne i numeryczne wykazały, że uproszczenia lub idealizacje stosowane zwykle w modelach numerycznych przy modelowaniu termicznych warunków brzegowych mogą prowadzić do różniących się zasadniczo form przepływu. Rozwiązując problem sprzężony, pełnego trójwymiarowego przewodnictwa cieplnego dla bocznych ścianek wraz z pozostałymi równaniami przepływu i transportu energii uzyskano rezultaty odpowiadające obserwowanym strukturom przepływu.
Rozwój konwekcji naturalnej w kanałach badano dla dwóch różnych warunków początkowych: zerowego pola przepływu przy temperaturze początkowej całego układu równej temperaturze kąpieli zewnętrznej, oraz dla przypadku rozwiniętej konwekcji naturalnej w kanale o ściance izotermicznej będącej w temperaturze przemiany fazowej. Zaobserwowano, że niestabilności przepływu występujące zarówno w eksperymencie jak i w obliczeniach numerycznych dla pierwszego z warunków początkowych, mogły być skutecznie stłumione w drugim przypadku. Stwierdzono również, że narastanie stożkowego frontu lodu ma stabilizujący wpływ na przepływ. Podobnie dodatkowa modyfikacja termicznych warunków brzegowych na bocznych ściankach pozwala na stabilizacje początkowych faz rozwoju konwekcji w badanych kanałach.
Złożona struktura przepływu w naczyniu znajduje odbicie w kształcie powierzchni lodu, powstającego pod ścianką chłodzoną. W sześciennym naczyniu obserwowano symetryczny przepływ z podziałem na osiem elementów (komórek). W osiowosymetrycznym cylindrycznym naczyniu obserwowano symetryczny przepływ z podziałem na szesnaście komórek. Obserwowane dla pól temperatur linie podziału przepływu uwidaczniały się również w strukturze powierzchni lodu.

6.2.3 - przepływ lepki

Tomasz A. Kowalewski
Andrzej Cybulski

Konwekcja naturalna z przemianą fazową

Warszawa 1997