

5. Przebieg eksperymentów

Głównym celem przeprowadzonych prac eksperymentalnych było zebranie ilościowych informacji o polach prędkości, temperatury oraz położeniu granicy przemiany fazowej dla wybranych materiałów i naczyń, przy różnych warunkach przeprowadzania badań symulujących zjawiska charakterystyczne dla procesów odlewniczych. Na tej podstawie starano się określić wzorce służące do weryfikacji modeli numerycznych procesów przepływowych z przemianą fazową. Najważniejsze przypadki przedstawiono w Tabeli 5 zawierającej dane charakterystyczne dla każdej konfiguracji. Przy znacznej ilości wyników niezbędne było skondensowanie formy zestawienia i wprowadzenie szeregu oznaczeń wyjaśnionych w legendzie pod tabelą.

By uniknąć potrzeby wielokrotnego definiowania konfiguracji i warunków eksperymentu, zarówno eksperymenty fizyczne, jak i numeryczne, są ponumerowane według numerów wierszy Tabeli 5. Numer wiersza tabeli definiuje komplet danych używanych do wykonania obliczeń prezentowanych w następnym rozdziale. W miarę potrzeb w opisie powtarzana jest tylko niezbędna część informacji z tabeli.

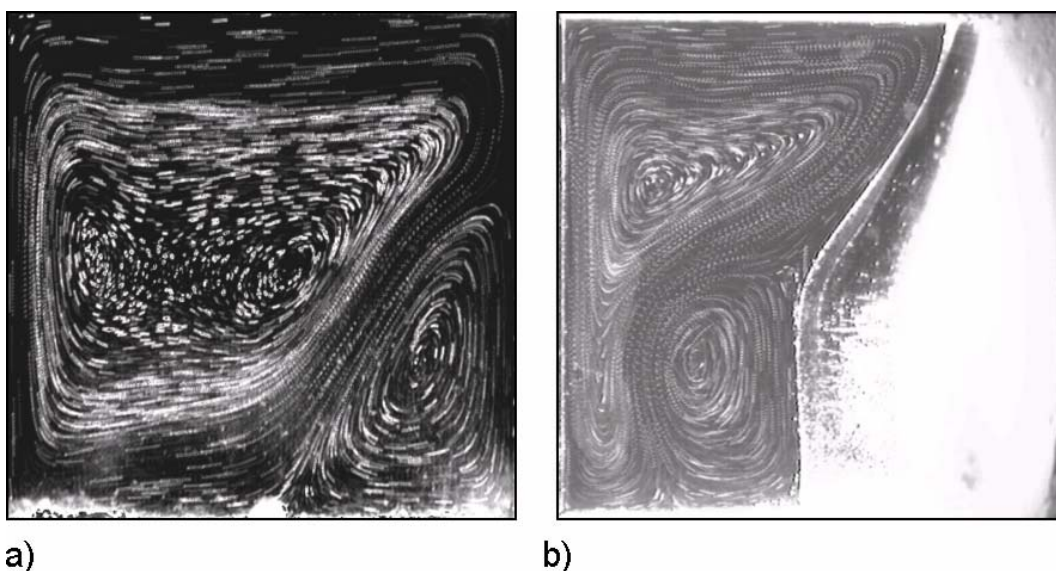
5.1. Sześcian grzany różnicowo (SRG)

Z szerokiego zakresu przeprowadzonych wcześniej badań eksperymentalnych [5] jako wzorzec do porównań z obliczeniami numerycznymi wybrano eksperymenty w sześcianie grzany różnicowo, oznaczonym skrótem SRG (rys. 3). W eksperymencie tym badano zjawisko przepływu termicznego i krzepnięcia wody destylowanej. Przepływ wymuszano różnicą temperatur między przeciwległymi, pionowymi ściankami wykonanymi z aluminium i podłączonymi do termostatów. Sześcian otoczony był powietrzem atmosferycznym o temperaturze $298K$. Eksperyment w wypełnionym naczyniu rozpoczęto od stanu rozwiniętej konwekcji naturalnej, wymuszonej przez temperatury ścianek: ciepłej $T_h = 283K$ i zimnej $T_c = 273K$. Wartość temperatury ścianki ciepłej nie zmieniała się w ciągu całego doświadczenia. Po ustabilizowaniu się ruchu konwekcyjnego wody, temperaturę ścianki zimnej zmieniano do poziomu $T_c = 263K$ i rozpoczynano rejestrację obrazów dla dalszego procesu. Ustalony w ten sposób warunek początkowy dla procesu krzepnięcia nazwano „*startem ciepłym*”, w przeciwieństwie do tzw. „*startu zimnego*” oznaczającego warunek początkowy z zerowym polem prędkości i jednorodną temperaturą płynu.

Zgromadzone podczas wcześniejszych badań ([5, 30, 33]) wzorcowe pola prędkości i temperatury oraz położenia frontu przemiany fazowej wykorzystano do przeprowadzenia testów wiarygodności komercyjnych i własnych kodów numerycznych. Dla porównań zdefiniowano dwa wzorce eksperymentalne:

- Stacjonarny przepływ konwekcyjny wody dla temperatur ścianek izotermicznych $T_h = 283K$ oraz $T_c = 273K$,
- Niestacjonarny proces krzepnięcia dla temperatur ścianek izotermicznych $T_h = 283K$ oraz $T_c = 263K$.

Obraz konwekcji naturalnej wody w zakresie temperatur powodujących występowanie anomalii gęstości zasadniczo różni się od obrazu konwekcji naturalnej standardowych płynów (por. rys. 14). Ciecz w otoczeniu ciepłej ścianki (lewa strona naczynia) zachowuje się „normalnie”, tzn. jej gęstość maleje z temperaturą. Ogrzane warstwy wody przemieszczają się w związku z tym wzdłuż ciepłej ścianki w kierunku ścianki górnej. Dalszy kierunek przepływu nadaje geometria naczynia i ciepłe masy płynu docierają do górnej krawędzi ścianki zimnej. Anomalia zmian gęstości w temperaturach poniżej $277K$ powoduje powstanie drugiej, odwrotnej cyrkulacji w pobliżu zimnej ścianki, przemieszczającej ciecz w przeciwnym kierunku. Oddziaływanie obu wirowych struktur przepływu stanowi interesujący i zarazem trudny do symulacji numerycznych wzorzec eksperymentalny. Nasze wcześniejsze badania wskazały dużą czułość tworzącej się struktury przepływu na termiczne warunki brzegowe. Z tego względu eksperyment z nietypowym zachowaniem cieczy stanowi idealny wzorzec służący do wykrywania wad symulacji numerycznych.



Rys. 14. Tory cząstek dla wody zamarzającej w geometrii SIG : (a) stacjonarna konwekcja naturalna; (b) proces krzepnięcia zarejestrowany po 6000s

W pracach [5] i [52] zebrano szczegółowe informacje dotyczące położenia granicy faz, pól temperatur i prędkości oraz profili prędkości dla tej geometrii. W niniejszej pracy dane te zostały wykorzystane do zdefiniowania wzorców eksperymentalnych i uwiarygodnienia testowanych modeli i programów numerycznych.

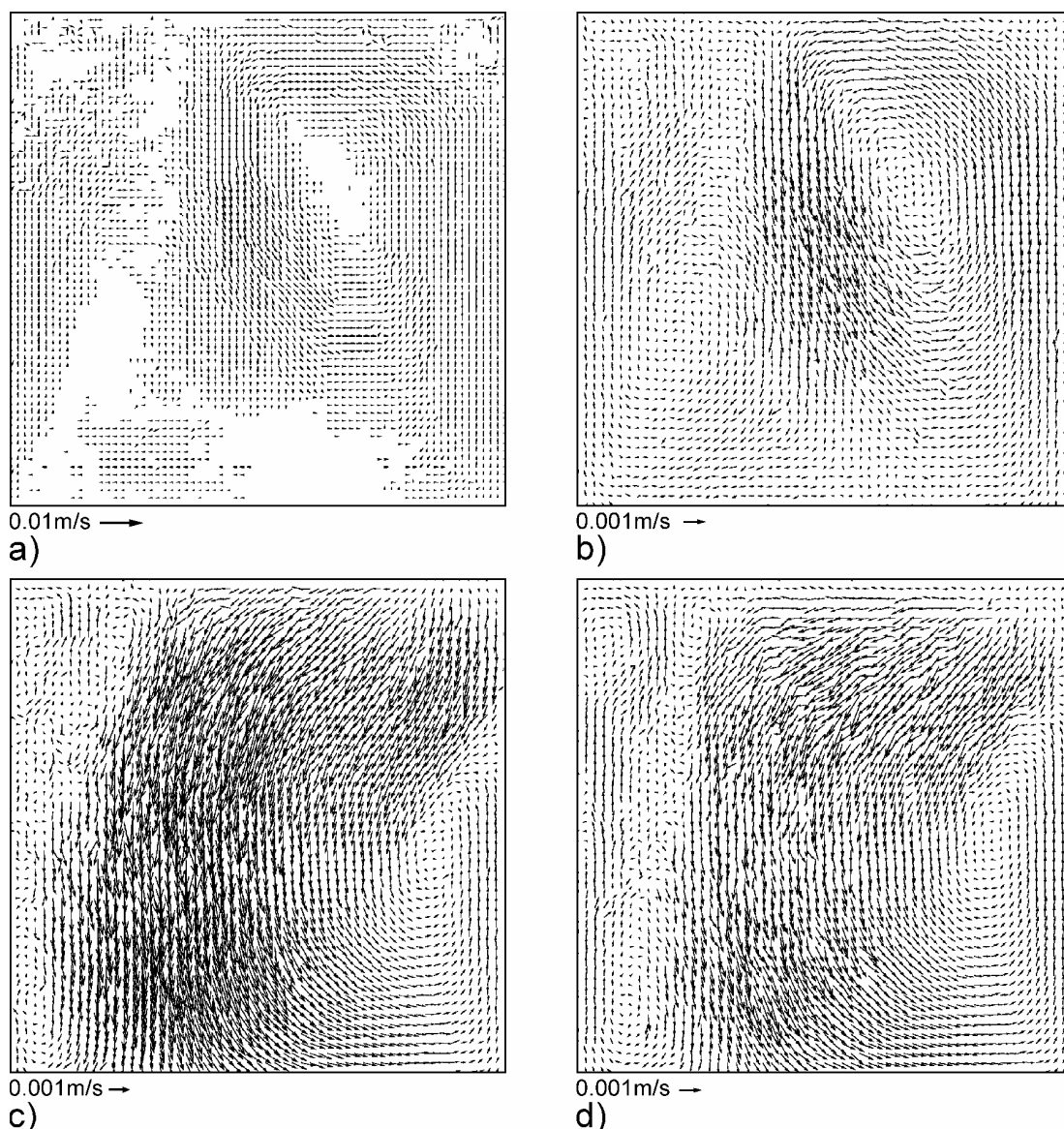
5.2. Sześciian z izotermiczną ścianką górną (SIG)

Naczynie typu SIG wypełnione polyglikolem PEG900

Proces krzepnięcia materiału oznaczonego w skrócie PEG-900 badano eksperymentalnie w sześciennym naczyniu z chłodzoną ścianką górną (SIG). Obrazy przepływu rejestrowano wysokorozdzielczą kamerą f-my Basler, a rozkład temperatur w cieczy mierzono układem termopar. Spośród wszystkich wyników badawczych do omówienia wyselekcjonowano jedynie takie, które pozwalają na jednoznaczną ocenę czynników wpływających na postać pola przepływu i kształt krzepnącego materiału. Pod tym względem na uwagę zasługują eksperymenty oznaczone w Tabeli 5 numerami 3, 4, 5, 6, 11, 13, 16 i 18.

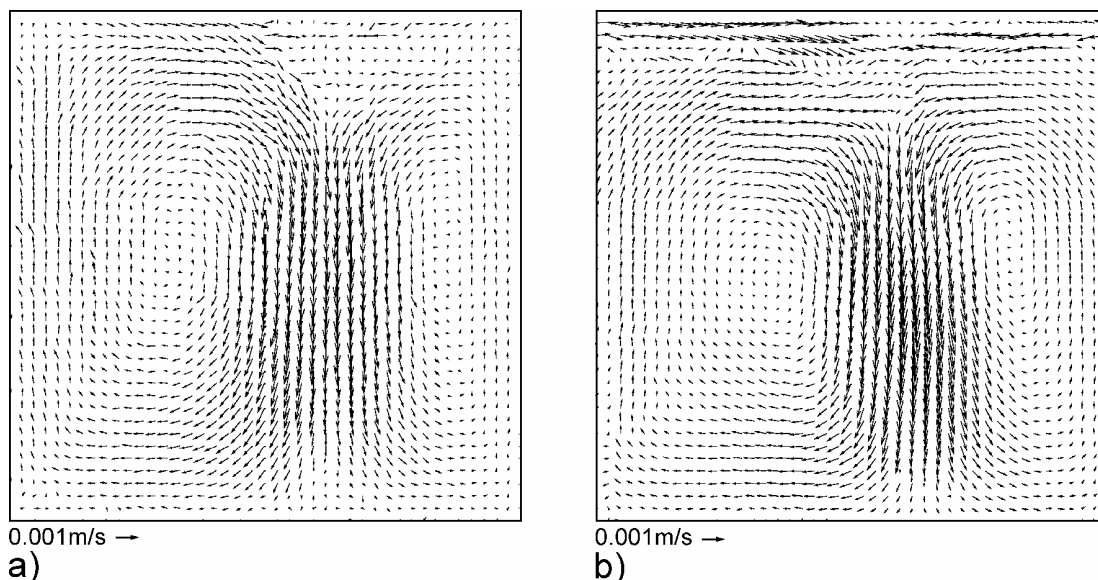
Celem eksperymentu numer 3 było wywołanie ustalonego ruchu konwekcyjnego cieczy modelowej pod wpływem różnicy temperatur ścianki górnej i ścianek bocznych naczynia i przygotowanie warunków dla właściwych rejestracji oznaczonych odpowiednio numerami 4, 5 oraz 6. W trakcie tej fazy badań zwrócono szczególną uwagę na zapewnienie powtarzalności przebiegu procesu. Typowe parametry przepływu stanowiące warunek początkowy dla eksperymentu numer 4 to temperatura zimnej ścianki górnej $309K$ i temperatura zewnętrznej kąpieli wodnej $313K$. Po ustaleniu się przepływu trzy termopary (TP1-3) zanurzone w PEG-900 wskazywały tą samą temperaturę $312.5K$, natomiast temperatura cieczy mierzona termoparą TP-4 w odległości 1 mm od ścianki górnej była równa $310.1K$.

Właściwe eksperymenty 4 i 5 rozpoczęły się od zmiany temperatury cieczy termostatu ścianki górnej na $283K$. Po schłodzeniu cieczy termostatu obserwowane zmiany przepływu są bardzo powolne. Z uwagi na dużą bezwładność cieplną układu temperatura górnej ścianki zmieniała się stopniowo, osiągając $305K$ po około $300s$. W tym samym czasie termopara TP-4 znajdująca się w przepływie tuż pod powierzchnią ścianki wskazywała temperaturę $308K$. Zmiany procesu konwekcyjnego zachodzące w przepływie widocznym w warstwie świetlnej ustawionej w płaszczyźnie centralnej naczynia, rejestrowano w odstępach $85ms$, w seriach po pięć obrazów. Obliczenia pól prędkości metodą PIV wykonywano wybierając pary do korelacji z serii pięciu obrazów. Obserwacje torów cząstek, zmian temperatury i analiza pól prędkości otrzymanych w wyniku korelacji obrazów z różnymi odstępami czasu, potwierdziły dużą wrażliwość struktury przepływu na dokładność wypoziomowania naczynia.

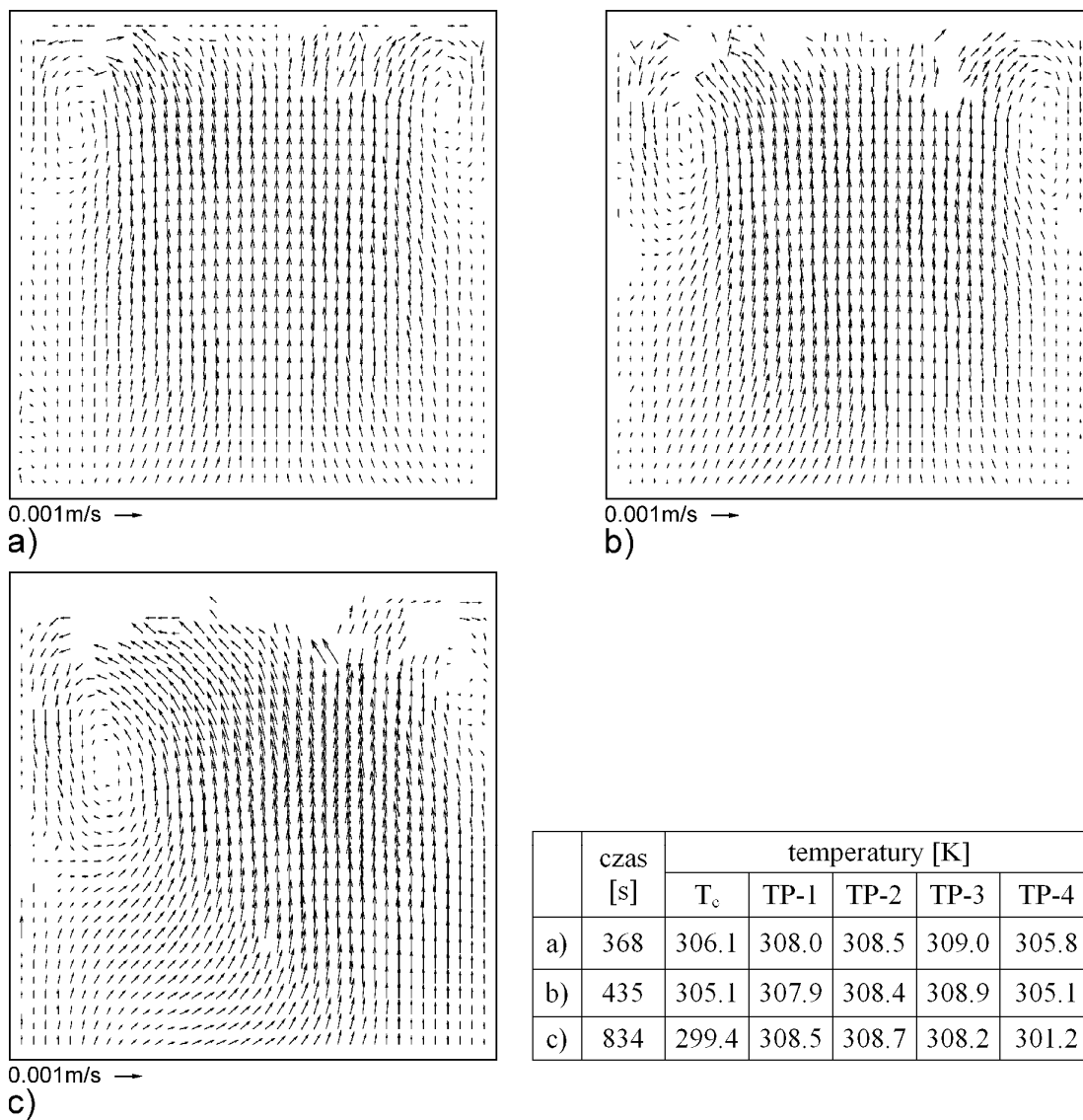


Rys. 15. Asymetria pola prędkości zarejestrowana w naczyniu typu SIG metodą PIV: (a) i (b) faza początkowa pola prędkości wyznaczona dla dwóch odstępów czasowych między korelowanymi obrazami, (c) $t = 595s$, (d) $t = 780s$. (Tabela 5, #4)

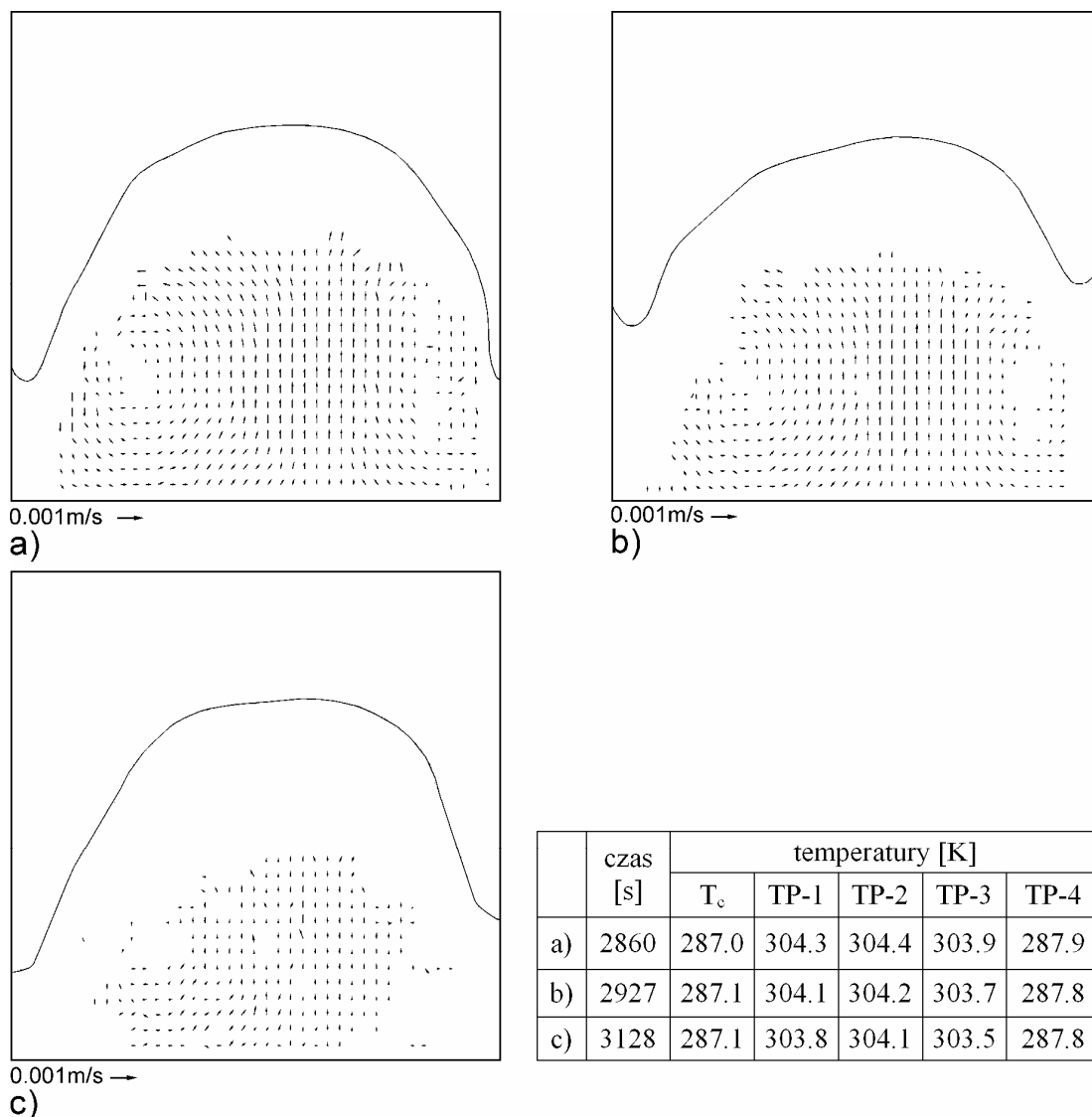
Początkowy rozwój przepływu w eksperymencie #4 przedstawia rys. 15. Obserwowane dwie niesymetryczne cyrkulacje, widoczne na rys. 15b, charakteryzuje dodatkowo silne odchylenie od pionu centralnej osi przepływu. Początkowa asymetria przepływu utrzymuje się w trakcie dalszego rozwoju procesu, ilustrują to pola prędkości rejestrowane po 595s i 780s (rys. 15c-d). Warto zauważyć, że konfiguracja z pionowym gradientem temperatury z zasady charakteryzuje się niestabilnością typu Rayleigh'a - Benarda. W rozpatrywanym przykładzie objawia się to dużą wrażliwością początkowych struktur przepływu na niewielkie zaburzenia symetrii warunków brzegowych i początkowych. W omawianym przypadku zaburzeniem tym okazała się niewielka niedokładność poziomowania naczynia. Obrazy pół prędkości otrzymane dla skorygowanej konfiguracji (por. rys. 16a) potwierdziły, że struktura przepływu w sześcianie jest metastabilna i jej badanie wymaga dużej precyzji eksperymentalnej. Korekta konfiguracji pozwoliła zmniejszyć pochylenie osi głównej strugi, jednak widoczna początkowa asymetria przepływu jest charakterystyczna dla rozwoju konwekcji naturalnej w takiej geometrii. Asymetria przepływu pozostaje nadal widoczna po 1188s (rys. 16b), kiedy temperatura górnej ścianki obniżyła się już do poziomu 294K i rozpoczął się proces krzepnięcia cieczonej.



Rys. 16. Pole prędkości zmierzone po korekcie poziomowania chwil czasowych:
(a) 186s, (b) 1188s. (Tabela 5, #5)



Rys. 17. Pola prędkości w naczyniu typu SIG podczas krzepnięcia PEG-900 (Tabela 5, #6)



Rys. 18. Pola prędkości i granica przemiany fazowej dla PEG-900 w naczyniu typu SIG przy „swobodnych” warunkach termicznych w kąpieli zewnętrznej (Tabela 5, #6)

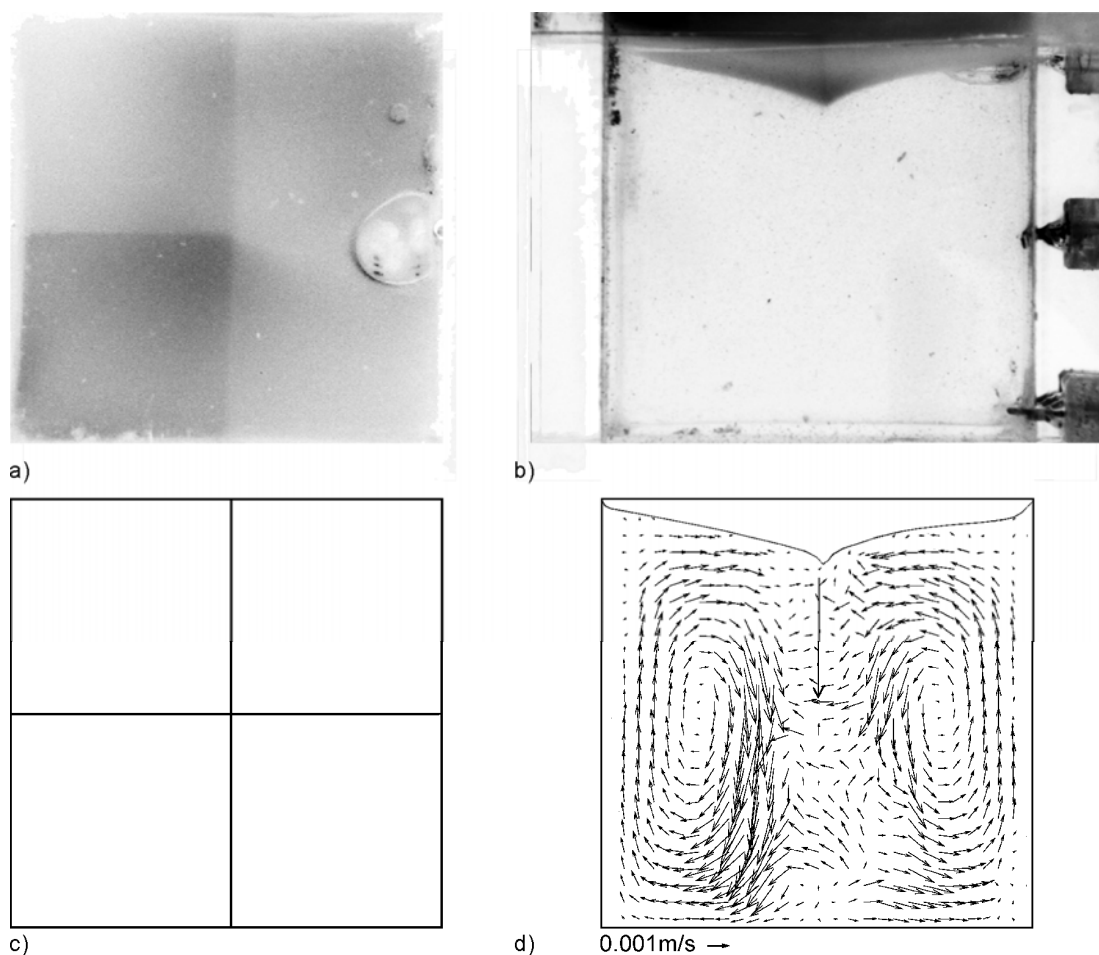
Powtórzenie eksperymentu #5, oznaczone jako #6 w Tabeli 5 potwierdziło uzyskane wcześniej obserwacje. Przeprowadzono też dodatkowy test wpływu „swobodnych” termicznych warunków brzegowych dla bocznych ścianek. Po wstępnym ustaleniu się struktury przepływu (czas 1800s), odcięto zewnętrzny termostat stabilizujący temperaturę zewnętrznej kąpieli. Stopniowy spadek temperatury w całym układzie symuluje schładzanie odlewu w formie. Wybrane pola prędkości zmierzone w płaszczyźnie pokazano w zestawieniu na rys. 17. Istotną cechą obserwowanego procesu jest odwrócenie kierunku cyrkulacji cieczy w stosunku do eksperymentów 4 i 5. Tym razem ciecz poruszała się do góry wzdłuż osi symetrii naczynia. Wywołane jest to postępującym od górnej powierzchni i wzdłuż bocznych ścianek krzepnięciem materiału. Powierzchnia rozdziału faz staje się wklęsła, a ciecz oddzielona od ścianki górnej i części ścianek bocznych warstwą zakrzepłego materiału (por. rys. 18) jest głównie ogrzewana zanikającym strumieniem ciepła od ścianki dolnej.

Zupełnie odmienna struktura przepływu i kształt powierzchni międzyfazowej charakteryzują eksperymenty z termostatowanym przepływem cieczy w kąpieli zewnętrznej. Kształt zakrzepłego materiału PEG-900, zarejestrowany dla takiej konfiguracji w eksperymencie numer 16 (Tabela 5), ma postać ostrosłupa o czterech krawędziach wychodzących ze środków boków podstawy (rys. 19a-b). Ruch zimnej cieczy na osi naczynia generuje symetryczną cyrkulację, podobną do tej, jaką

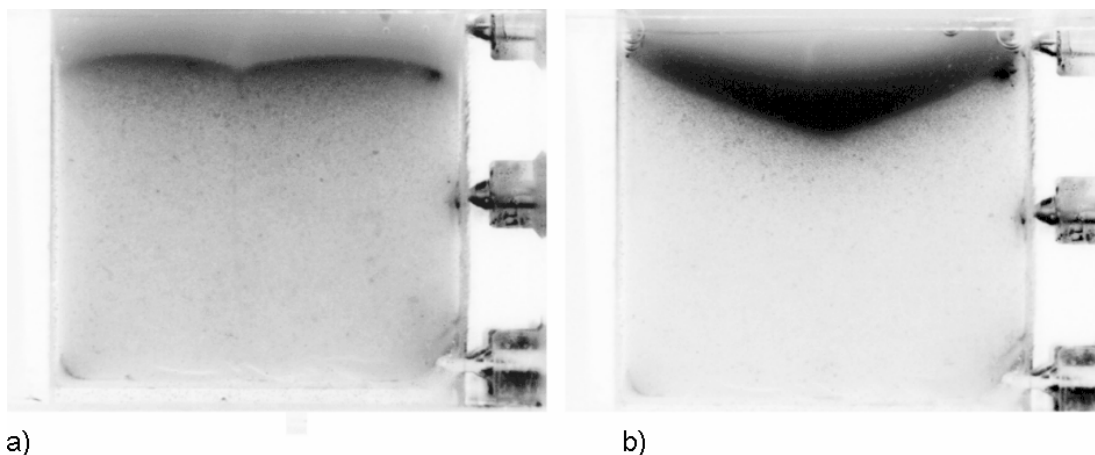
obserwowano również dla zamarzającej wody [30]. Pole prędkości wyznaczone metodą PIV w płaszczyźnie centralnej pokazano na rys. 19d. Widoczne na rysunku błędne wektory na osi symetrii są rezultatem przekroczenia maksimum prędkości dla wybranych parametrów metody PIV. Wobec tego dla środkowej części naczynia wyznaczono na podstawie analizy torów cząstek jeden, reprezentatywny wektor prędkości, o wartości $0.58 \times 10^{-3} \text{ m/s}$. Maksymalna zmierzona tą metodą prędkość na osi przepływu wynosiła $1.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$.

Inny przykład ukazujący związek kształtu powierzchni rozdziału faz z ruchem konwekcyjnym PEG-900 pokazany jest na rys. 20. W obu przypadkach zachowano tą samą temperaturę ścianki górnej, zmieniając jedynie temperaturę cieczy w kąpieli zewnętrznej. Porównując obrazy frontów fazowych obserwowanych w eksperymentach numer 11 i 13 widać, że zmiana temperatury zewnętrznej cieczy o 4K wydatnie zmieniła kształt powierzchni krzepnącej cieczy.

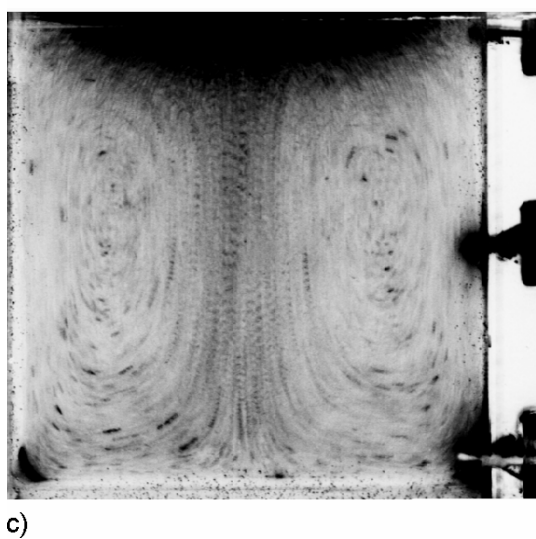
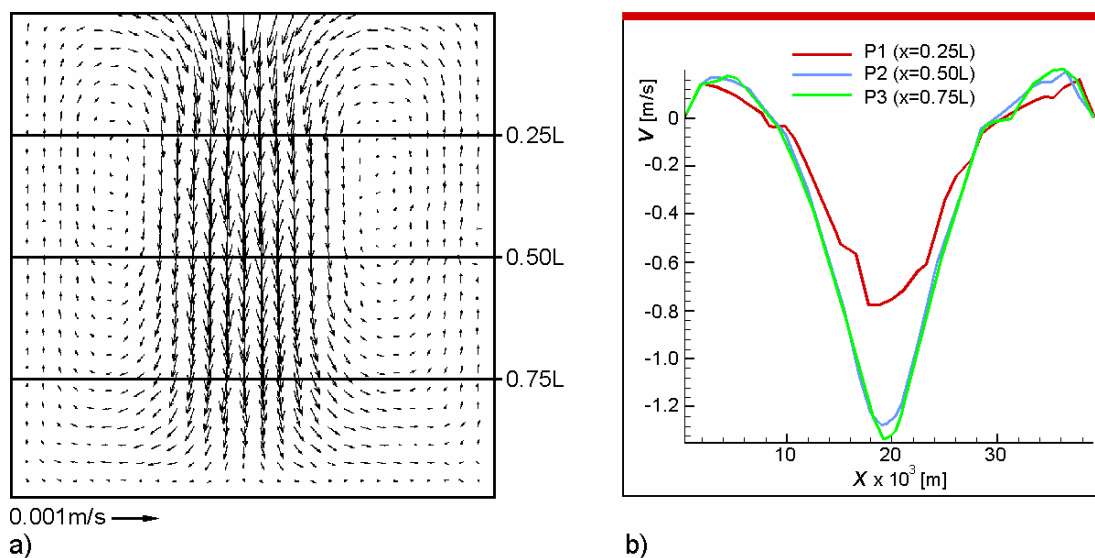
W wyniku wielu doświadczeń ostatecznie zdefiniowano metodykę prowadzenia pomiarów i dzięki temu w dobrze wypoziomowanym naczyniu uzyskano wzorcowy, symetryczny przepływ konwekcyjny. Zmierzone w stanie ustalonym pole prędkości, wybrane profile prędkości, temperatury w punktach kontrolnych oraz tory cząstek ilustruje rys. 21. Ten przypadek porównywano następnie z symulacjami numerycznymi.



Rys. 19. Widok od dołu (a) i z boku (b) oraz linie konturowe (c) i (d) profili zakrzepłego PEG-900 w naczyniu typu SIG (Tabela 5, #16)



Rys. 20. Wpływ temperatury T_{ext} na kształt profilu zakrzepłego PEG-900 w naczyniu typu SIG:
 (a) $T_{ext}=304K$ (Tabela 5, #11), (b) $T_{ext}=308K$ (Tabela 5, #13)



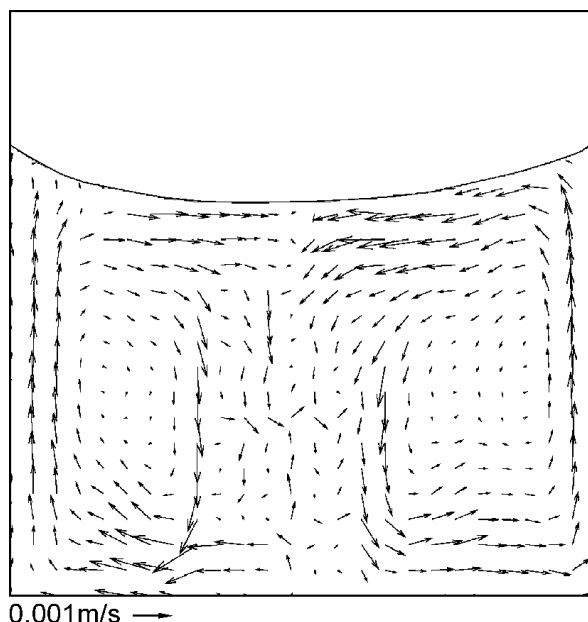
temperatury [K]				
T_c	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4
302.0	309.0	308.7	308.6	308.5

Rys. 21. Pole prędkości (a), profile prędkości (b) i tory cząstek (c) dla stanu ustalonego konwekcji naturalnej PEG-900 w naczyniu typu SIG (Tabela 5, #18)

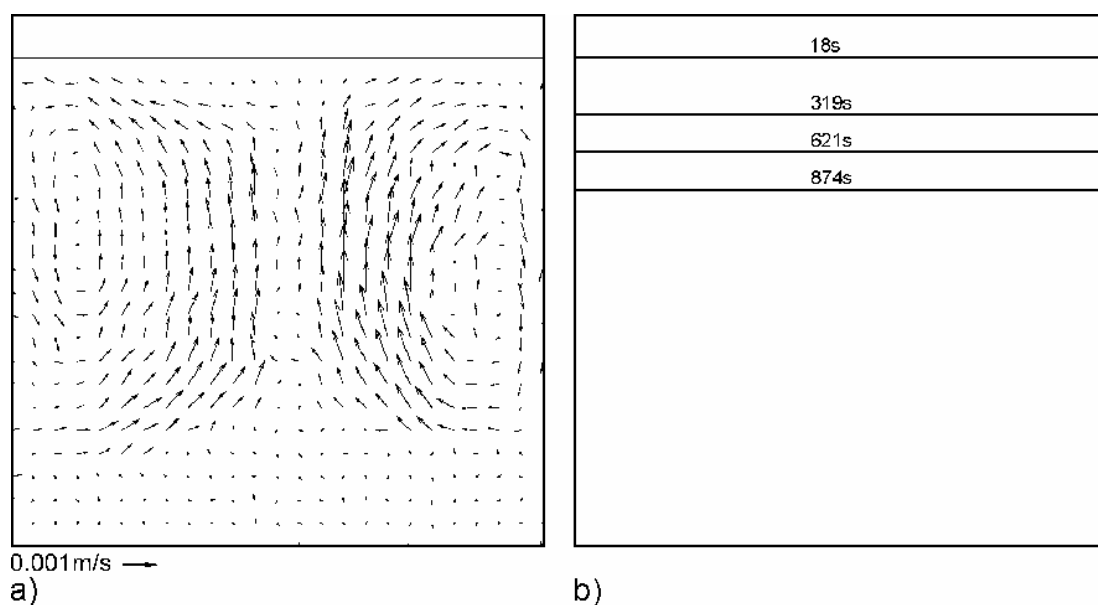
Naczynie typu SIG wypełnione succinonitrylem (SCN)

Kolejną serię eksperymentów przeprowadzono dla przepływu w naczyniu typu SIG badając proces krzepnięcia succinonitrylu. Podobnie jak PEG-900, materiał ten należy do grupy substancji charakteryzujących się nieizotermicznym przejściem fazowym i dendryczną strukturą frontu fazowego, stanowiąc pewien odpowiednik procesu krzepnięcia metali. W eksperymencie starano się zrealizować krystalizację kierunkową z płaskim frontem przemiany fazowej. Ten typ krystalizacji ma duże znaczenie technologiczne i jest szczególnie pożądanym w przemysłowym hodowaniu kryształów, zwłaszcza dla potrzeb elektroniki. Stwierdzono, że uzyskanie regularnego frontu krzepnięcia dla tego materiału wiąże się z szeregiem komplikacji. Krzepnięcie succinonitrylu wymaga znacznego przechłodzenia cieczy. Jest to w dużej mierze spowodowane niskim przewodnictwem cieplnym zestalonego materiału, co skutecznie hamuje przyrost fazy stałej na zimnej ścianie. W rezultacie kształt zakrzepłego succinonitrylu zależy bardzo od warunków termicznych na ściankach naczynia.

Celem eksperymentu oznaczonego w Tabeli 5 numerem 25 było zbadanie wpływu termicznych warunków brzegowych na procesy przepływowe w stanie ustalonej konwekcji towarzyszącej krzepnięciu SCN. Stabilna warstwa zakrzepłego pod górną ścianką materiału została wytworzona przy temperaturze ścianki górnej $298K$ i temperaturze kąpieli $333K$. W osiągniętym stanie ustalonym obserwowano konwekcyjny ruch ciekłego succinonitrylu. Zakrzepły materiał był opłukiwany przez ciepłą ciecz w pobliżu ścianek bocznych i w efekcie jego powierzchnia przypominała wypukłą czaszę. Faza stała dobrze izolowała przepływ od chłodzonej ścianki górnej powodując, że temperatura wewnątrz fazy ciekłej w niewielkim stopniu różniła się od temperatury pięciu ścianek bocznych. Termopary wskazywały na powierzchni wewnętrznej ścianki sześcianu temperatury: $TP1 = 332.4K$, $TP2 = 330.2K$, $TP3 = 332.2K$, $TP4 = 333.4K$. Prędkość przepływu w stanie ustalonym była mała i wynosiła maksymalnie $1.5 \times 10^{-3} m/s$. Mierzone pole prędkości i położenie frontu przemiany fazowej dla tego przypadku ilustruje rys. 22. Jak widać w płaszczyźnie przekroju zimna ciecz w pobliżu osi symetrii naczynia opada w dół, a następnie zmieniając kierunek i ogrzewając się w okolicy dna oraz ścianek bocznych wznosi się ponownie w górę.



Rys. 22. Krzepnięcie SCN w naczyniu typu SIG (Tabela 5, #25), zmierzone pole prędkości i granica fazowa dla stanu ustalonego



Rys. 23. Krzepnięcie SCN w naczyniu typu SIG (Tabela 5, #22),
 (a) pole prędkości po 18s, (b) ewolucja profilu fazy stałej

W eksperymencie oznaczonym w Tabeli 5 numerem 22 dążono do uzyskania możliwie regularnej, płaskiej powierzchni przemiany fazowej. Właściwy eksperyment poprzedzała faza wstępna (Tabela 5, #21), w której zadano dla całego wypełnianego układu jednakową temperaturę początkową równą $309K$. Po napełnieniu naczynia cieczą o podwyższonej temperaturze ($333K$), zainicjowano chłodzenie górnej ścianki przez zmianę ustawienia termostatu na $273K$. Biorąc pod uwagę, że temperatura krzepnięcia materiału SCN wynosi $327K$, po pewnym czasie rozpoczęło się krzepnięcie materiału na górnej ściance. W trakcie tego procesu temperatura ścianki górnej ulegała stopniowemu obniżaniu, zmieniając się od $299K$ w fazie wstępnej (18s) do $287K$ (po 874s). Stopniowa zmiana temperatury górnej ścianki wymuszała stosunkowo powolny, stabilny ruch konwekcyjny (rys. 23a). Pozwoliło to na uzyskanie w całym okresie prowadzonych obserwacji niemal równoległego frontu zakrzepłego materiału (rys. 23b). Warto zwrócić uwagę na odwrotny kierunek cyrkulacji w naczyniu (por. rys. 23a), wyraźnie wskazujący, że to odmienny niż poprzednio charakter przepływu stabilizuje proces krzepnięcia. Odmienny przebieg ruchu konwekcyjnego wiązał się z faktem, że temperatura początkowa cieczy w naczyniu była wyższa niż w otaczającej ją kąpieli wodnej. Powoduje to w pobliżu ścianek ruch cieczy w kierunku zakrzepu, kompensując nierównomierność przyrostu fazy stałej obserwowaną dla poprzednich konfiguracji.

5.3. Pochylony prostopadłościan (PBP i PZP)

W prostopadłościennym naczyniu wypełnianym cieczą przez otwór w dolnej ściance (naczynia typu PBP lub PZP) badano przebieg procesu krzepnięcia, symulując proces zalewania formy odlewniczej. Wstępne pomiary przeprowadzono dla gliceryny, symulując eksperymentalnie sam proces wypełniania formy. Wpływ grawitacji na procesy przepływowe obserwowano zmieniając kąt nachylenia wypełnianego cieczą naczynia. W badaniach związanych z krzepnięciem materiału wykonano kilkanaście eksperymentów z wodą i jeden z succinonitrylem. Ograniczenie liczby eksperymentów z SCN wynikało z faktu, że natychmiast po zalaniu naczynia cieczą o temperaturze $343K$ ścianki pokrywały się warstwą zakrzepu. Uniemożliwiło to wykorzystanie metod optycznych do pomiaru pól prędkości i temperatury (PIV&T). Trudności eksperymentalne wynikały z istniejących warunków laboratoryjnych, które nie pozwalały na utrzymywanie temperatury ścianek z pleksiglasu powyżej temperatury krzepnięcia succinonitrylu. Problem ten nie istnieje w eksperymentach z wodą.

5.3.1 Proces wypełniania bez krzepnięcia

Lepkość ciekłych metali gwałtownie wzrasta w miarę stygnięcia poprzedzającego proces krzepnięcia. Podobnie dużą zmianą lepkości w funkcji temperatury charakteryzuje się gliceryna, którą stosowano w badaniach procesu zalewania (Sobiecki [58], Kowalewski oraz inni [32]). Celem badań, podczas których lepkość zmieniała się w zakresie temperatur od 283K do 318K niemal 20-krotnie, była ocena wpływu tego zjawiska na przebieg procesu zalewania naczynia. Ten modelowy eksperyment może służyć jako analog krzepnięcia polimerów we wtryskarkach do produkcji elementów z tworzyw sztucznych.

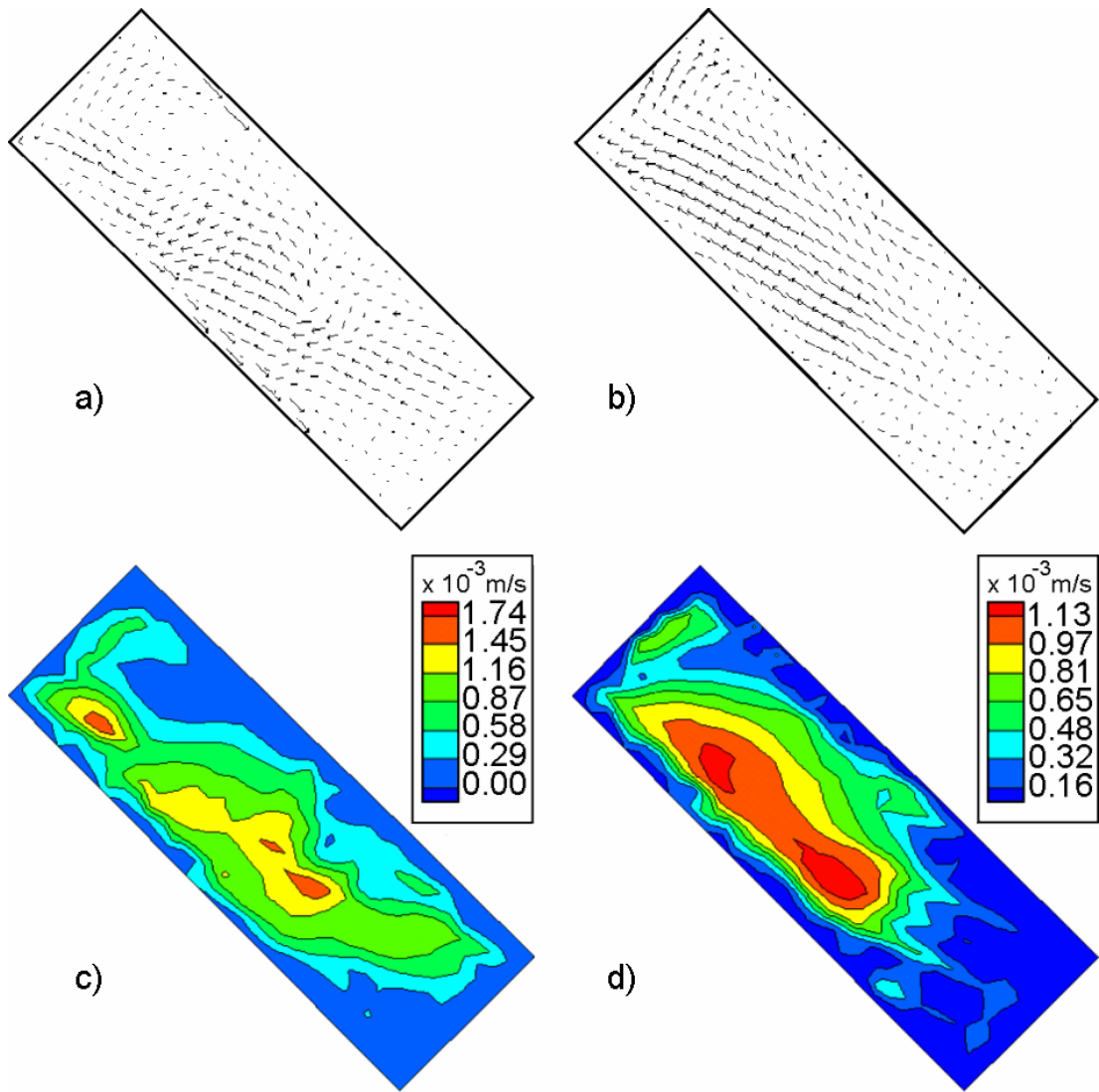
Badany kanał prostopadłościenny był wyposażony w dwie przegrody prostopadłe do ścianek bocznych, wykonane z przezroczystego materiału (naczynie typu PZP). Przegrody te nie zamykają całkowicie światła kanału, stanowią przeszkodę dla przepływu w istotny sposób modyfikując warunki przepływowe i termiczne pojawiające się w kanale. Dwie metalowe ścianki naczynia utrzymywano w niskiej temperaturze (283K) przy pomocy termostatu. Glicerynę o początkowej temperaturze 323K wprowadzano do kanału pod ciśnieniem przez dolny otwór wlewowy. Typowe wydatki objętościowe cieczy wynosiły $0.6 \times 10^{-6} - 5.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Występujące w eksperymencie pola temperatury i prędkości przepływu analizowano z wykorzystaniem ciekłych kryształów, uzyskując ilościowe informacje o przepływie dla szeregu kątów nachyleń naczynia (45°, 64°, 76,5°). Zmiana kąta pochylenia zmienia w istotny sposób nie tylko sam proces wypełniania kanału, lecz również modyfikuje wpływ konwekcji naturalnej, szczególnie podczas procesu stygnięcia płynu. Przepływ w trzech utworzonych w ten sposób komorach charakteryzował się silną recyrkulacją cieczy. Stygnięciu gliceryny towarzyszyło tworzenie się obszarów martwych i częściowe blokowanie przepływu. Obszary zastoju i recyrkulacji, gdzie ciecz ulega opóźnionemu, bardzo powolnemu schłodzeniu, mają swoje odpowiedniki w postaci obszarów „skurczu” w rzeczywistym odlewie. Rezultaty opisanych tu pomiarów wykorzystano do walidacji symulacji numerycznych procesów ze swobodną powierzchnią (por. rozdz. 6).

Naczynie typu PBP z wodą

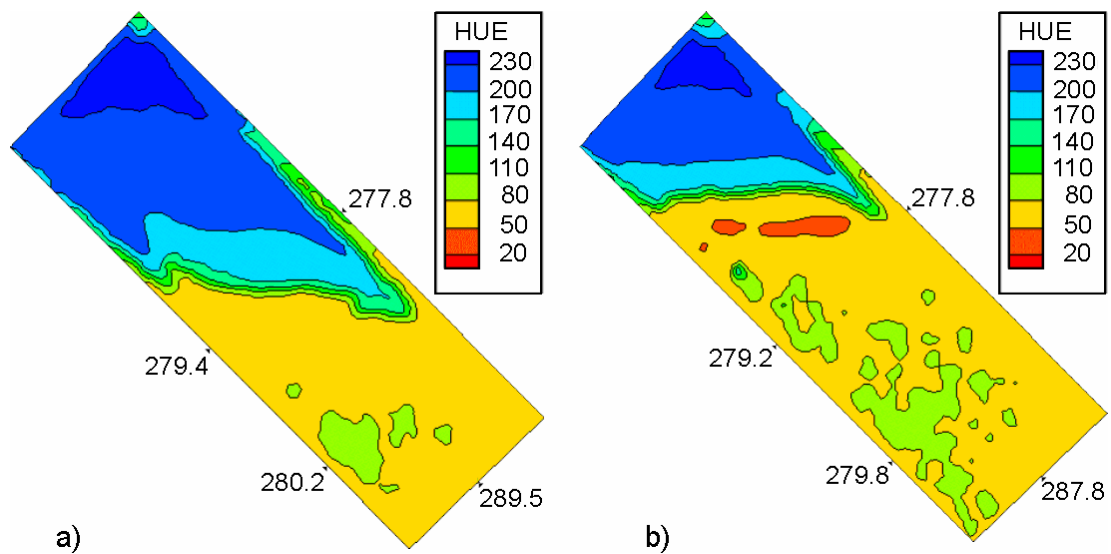
W eksperymencie oznaczonym w Tabeli 5 numerem 39 badano wypełnianie naczynia w kształcie prostopadłościanu bez przegród i konwekcję naturalną stygnącej wody. Uzyskane wyniki miały służyć do porównań z dalszymi obserwacjami przepływu z krzepnięciem, gdy przemiana fazowa i ruch konwekcyjny oddziałują na siebie. Prostopadłościan ustawiono pod kątem 45° do poziomu i przeprowadzono eksperyment dla temperatur $T_h=276K$ (ścianki metalowe) i $T_c=294K$ (woda). Do pomiaru pól temperatury i prędkości przepływu wykorzystano zawieszinę ciekłych kryształów. Obok metody PIV & PIT, dodatkowe informacje o lokalnej temperaturze dostarczały cztery termopary umieszczone na ściankach i w osi strumienia wpływającego do prostopadłościanu.

Przykładowe rozkłady wektorowego pola prędkości przepływu w przekroju centralnym po czasie 1901s i 1929s od wypełnienia naczynia pokazano na rys. 24. Przepływ w cienkiej warstwie przyściennej charakteryzuje prędkość kilkakrotnie większą od średniej prędkości w pozostałym obszarze naczynia. W tym rejonie technika pomiaru pola prędkości oparta na korelacji obrazów zawodziła z uwagi na duże gradienty prędkości cząstek w sąsiedztwie nieruchomego otoczenia. Dla określenia prędkości w takich rejonach konieczne było zastosowanie dodatkowej techniki śledzenia torów indywidualnych cząstek.

Rozkład temperatury pokazany na rys. 25 odpowiada rozkładowi barwy światła rozpraszanego na posiewie ciekłokrystalicznym. Zmianie temperatury cieczy odpowiada zmiana barwy (*hue*) światła rozproszonego. Granice pól o stałej barwie ilustrują przebieg izoterm. Po ustaniu napływu cieczy, chłodzenie wody w naczyniu rozpoczęło się od dolnego narożnika prostopadłościanu. W miarę stygnięcia wody izotermi niskiej temperatury przesuwały się równoległe od dołu do góry naczynia i obszar ciepły, oznaczony na rysunku kolorem niebieskim, stopniowo zanikał. Na rysunku można zauważyć charakterystyczne lokalne zagęszczenia i zmiany kierunku izoterm w pobliżu zimnych ścianek. Miejsca te odpowiadają lokalnym perturbacjom warstwy termicznej, obserwowanym jako separacje pola prędkości (por. rys 26) i tworzenie się tzw. termików.



Rys. 24. Pole prędkości: (a) po 1901s i (b) po 1929s, oraz kontury prędkości: (c) po 1901s i (d) po 1929s dla wody w naczyniu PBP (Tabela 5, #39)



Rys. 25. Rozkład temperatury w wodzie w naczyniu PBP, reprezentowany jako zmiana koloru (hue) posiewu ciekłych kryształów: (a) po 1901s, (b) po 1929s od startu zalewania (Tabela 5, #39)

5.3.2. Proces wypełniania z krzepnięciem

Naczynie typu PBP z wodą

W eksperymencie oznaczonym w Tabeli 5 numerem 42 badano przebieg procesu krzepnięcia w prostopadłościanie bez przegród wypełnianym wodą o temperaturze $276K$. Naczynie ustawiono pod kątem 11.4° do poziomu. Przed startem eksperymentu powietrze w naczyniu miało temperaturę $279K$. Przed eksperymentem i następnie w ciągu całego jego trwania termostat chłodzący metalowe ścianki był nastawiony na temperaturę $258K$, jednak w trakcie wypełniania wodą temperatura naczynia rosła. Zmiany temperatury w naczyniu rejestrowano termoparami rozmieszczonymi w trzech punktach na ściankach chłodzonych i na wlocie do naczynia. Zalewanie grawitacyjne naczynia typu PZP przy wydatku $4.57 \times 10^{-6} m^3/s$ trwało $36s$. Rejestrowano serie po 50 obrazów w odstępach co $1s$ w trzech etapach. W pierwszym etapie, do $50s$ od startu, obserwowano proces zalewania i przepływ w wypełnionym naczyniu, w drugim, po $250s$ od startu, proces stygnięcia ze wstępnym krzepnięciem wody, w trzecim, po $557s$ od startu, proces rozwiniętego krzepnięcia.

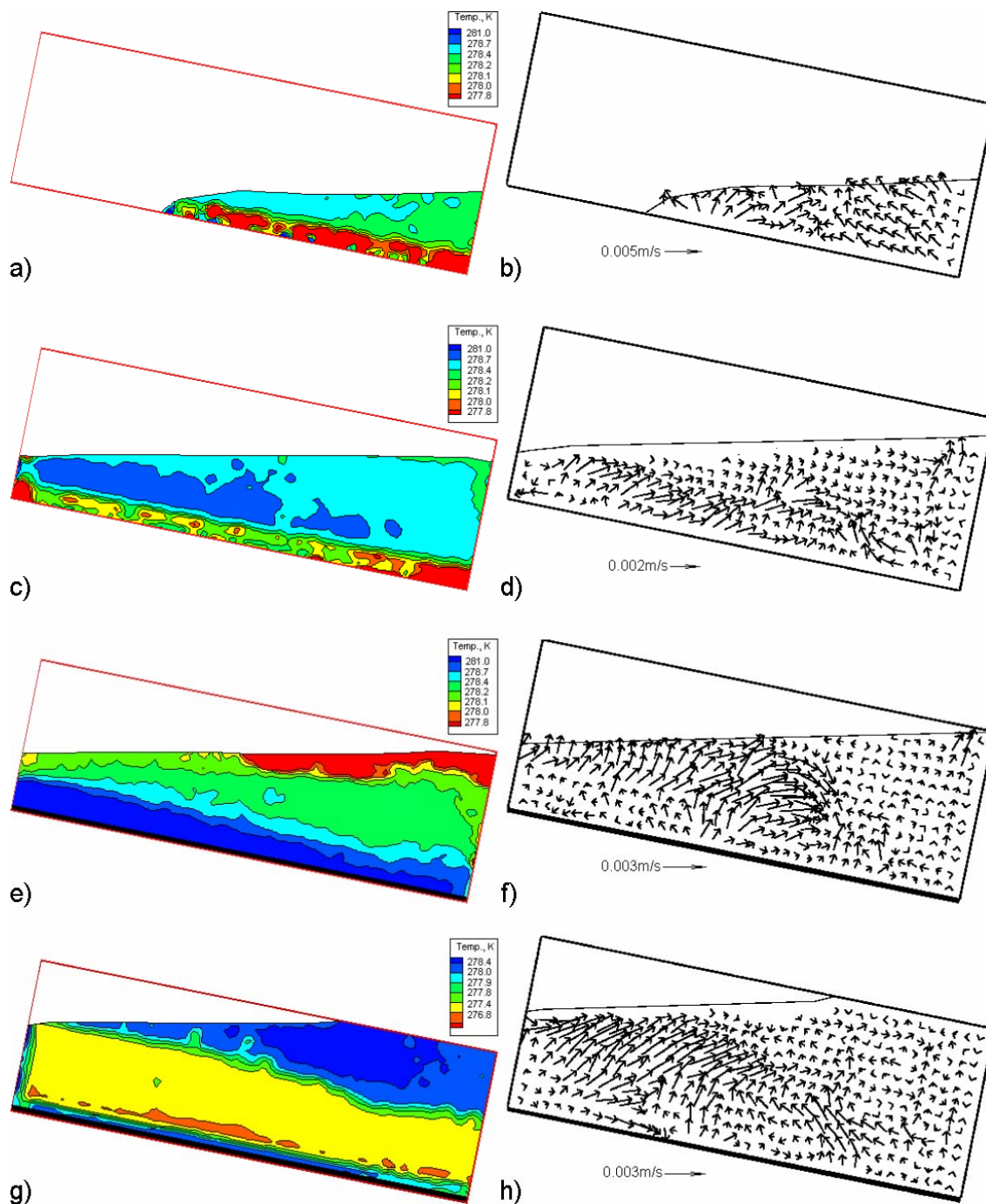
Rozkłady temperatur w cieczy w przekroju centralnym widoczne na rys. 26a, c, e, g odpowiadają obrazom pola prędkości przepływu pokazanym na rys. 26b, d, f, h. Przebieg izoterm został uzyskany przez analizę barwy światła odbijanego przez ciekłe kryształy. Pole prędkości zostało wyznaczone metodą PIV dla par obrazów.

Procesowi laminarnego zalewania prostopadłościanu towarzyszy kilka charakterystycznych etapów zmiany temperatury na ściankach metalowych. Początkowo obserwowano stratyfikację termiczną w intensywnie chłodzonej wodzie. W efekcie powstała w naczyniu zimna warstwa płynu, prawie równoległa do dolnej ścianki, w której (po $5s$ i po $15s$) widoczne są niewielkie strefy cieplejsze, widoczne na rys. 26a-b i 26c-d. W miarę napełniania naczynia, najcieplejsze miejsca obserwowano w przedniej i górnej części uformowanego klina cieczy, a najzimniejsze (po $15s$) w narożnikach przy dolnej ścianie. Cienka warstwa lodu (około $1mm$), widoczna na rys. 26e jako czarny pasek, pojawia się po $20s$ od chwili rozpoczęcia eksperymentu. W tej fazie przepływu najzimniejsze obszary znajdowały się przy prawej stronie powierzchni swobodnej klina, natomiast bezpośrednio przy lodzie obserwowano warstwę nieco cieplejszą. Wydaje się, że ten lokalny wzrost temperatury w warstwie przyściennej jest wywołany ciepłem utajonym uwolnionym w trakcie krzepnięcia wody. Warstwę cieplejszej cieczy dodatkowo stabilizuje efekt inwersji gęstości występujący dla zamarzającej wody. W miarę upływu czasu (rys. 28g-h) grubość lodu zwiększa się tylko nieznacznie, a równocześnie niemal czterokrotnie maleje grubość cieplejszej warstwy termicznej nad lodem. W tym czasie większość płynu wypełniającego naczynie ma jednorodną temperaturę, bliską temperaturze inwersji gęstości ($277K$) wody.

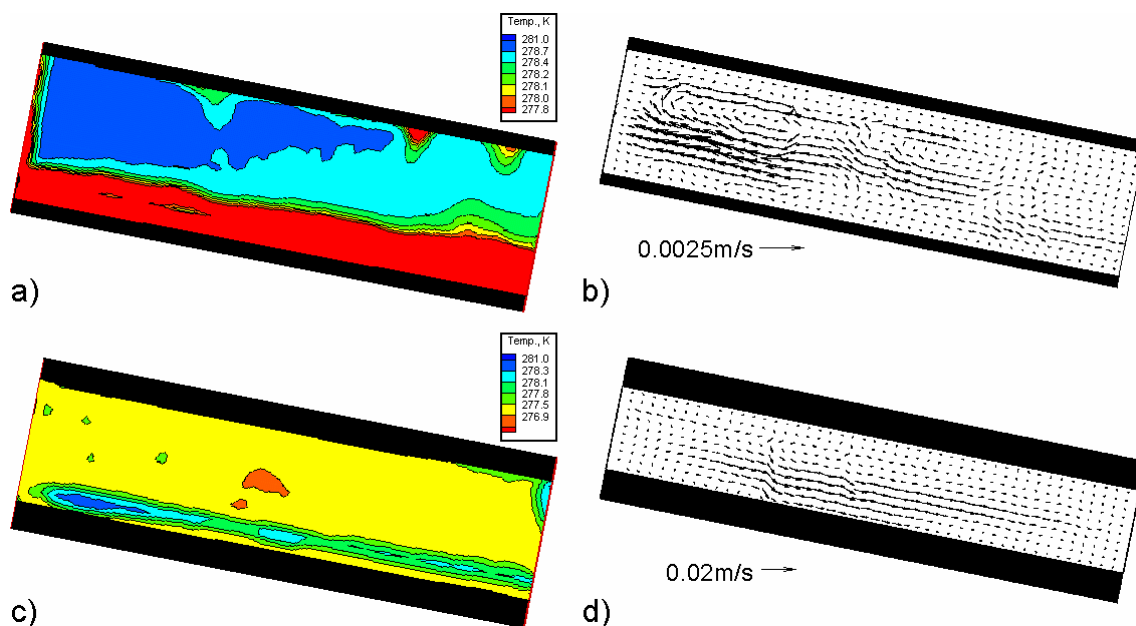
Pola temperatury i pola prędkości obserwowane w naczyniu po ustaniu procesu wypełniania i ustabilizowaniu się procesu krzepnięcia pokazano na rys. 27. Warto zwrócić uwagę na minimalne prędkości konwekcji naturalnej (rys. 27b), która wkrótce niemal całkowicie zamiera (rys. 27d). Porównując pola prędkości i temperatur można zauważyć, że obszary o większych prędkościach pojawiają się w miejscach cieplejszych, o większych gradientach temperatury. W pozostałych rejonach naczynia ma miejsce stagnacja płynu i jego powolne chłodzenie dyfuzyjnym strumieniem ciepła. Ilustruje to niemal równoległy przebieg izoterm w pobliżu dolnej ścianki. Po upływie $557s$ niemal 50% objętości naczynia wypełniają już warstwy lodu przy ściankach.

Eksperyment określony numerem 40 w Tabeli 5 był modyfikacją omówionego powyżej eksperymentu numer 42 i służył do rejestracji obrazów niezbędnych do porównań i oceny wpływu warunków brzegowych i warunków początkowych na przebieg całego procesu przepływu i krzepnięcia. Dodatkowym celem tego pomiaru było zwiększenie precyzji wyznaczania pól prędkości. Bardzo małe prędkości przepływu obserwowane w końcowym etapie zamarzania wody wymagały zwiększenia rozdzielczości rejestrowanych obrazów przez wykonanie zbliżenia wybranego fragmentu naczynia. Spowodowało to jednak ograniczenia obszaru rejestracji do około 70% długości prostopadłościanu. Dzięki zwiększonej rozdzielczości obrazów uzyskano wyraźną

poprawę dokładności pomiaru pól prędkości metodą PIV. Złożenie wyników zebranych z obu eksperymentów pozwala więc na dokładniejszą ocenę weryfikowanych programów numerycznych. W stosunku do eksperymentu numer 42 zmodyfikowano temperaturę wlewanej wody na 297K, temperaturę ścianek metalowych na 263K oraz wydatek wody na $0.91 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Pomiarzy prowadzono przez 974s (licząc od chwili początku procesu zalewania).



Rys. 26. Pola temperatur i prędkości zmierzone podczas procesu wypełniania naczynia PBP wodą: (a) i (b) po 5s, (c) i (d) po 15s, (e) i (f) po 20s, (g) i (h) po 25s, od startu zalewania (Tabela 5, #42)



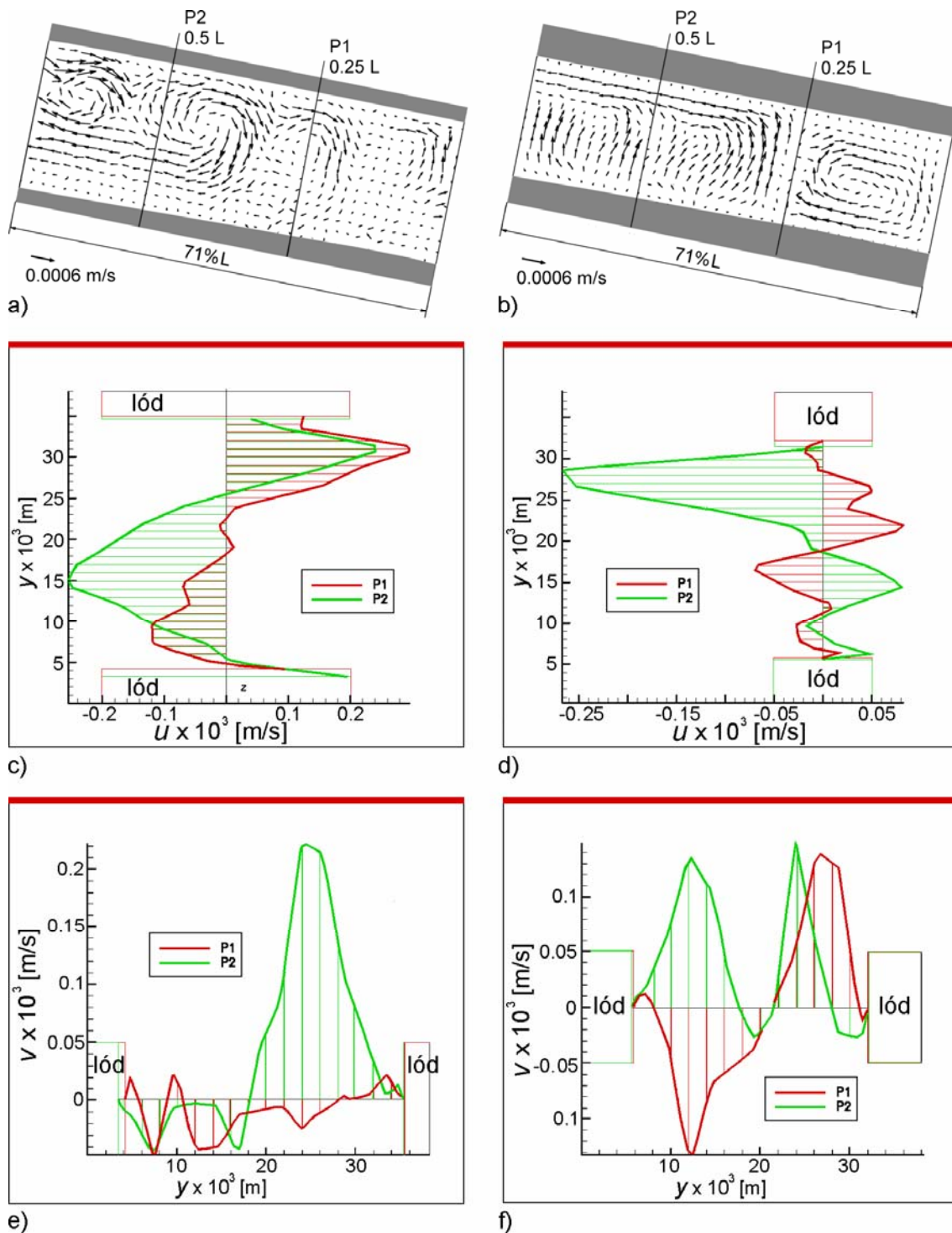
Rys. 27. Pola temperatur i prędkości zmierzone podczas krzepnięcia wody w naczyniu PBP: (a) i (b) po 250s, (c) i (d) po 557s, od startu zalewania (Tabela 5, #42)

Z uwagi na różnice temperatur wody wlewanej i temperatur naczynia przebieg procesu w czasie w obu eksperymentach znacznie się różnił. Jak łatwo można przewidzieć, czas wymagany dla utworzenia podobnej objętości lodu był w drugim przypadku dłuższy. Z tego powodu jako kryterium doboru obrazów do porównań obu eksperymentów i wyciągnięcia wniosków dla analizy obliczeń numerycznych przyjęto warunek podobieństwa procesu krzepnięcia, określony przez zbliżoną objętość lodu (np. 1/4 objętości naczynia). Przykładowe pary tworzą obrazy pól prędkości pokazane na rys. 27b i rys. 28a, oraz rys. 27d i rys. 28b. Przy takim doborze widać, jak zmiana warunków termicznych wpłynęła na zmiany w przepływie i rozkładzie temperatury wody w naczyniu. W przeciwieństwie do eksperymentu numer 42, stygnięciu wody w eksperymencie 40 towarzyszyła bardziej intensywna konwekcja naturalna. Charakterystyczną cechą przepływu jest powstanie struktury wirowej, widocznej na (rys. 28 a), tworzącej się w okolicy punktu wlewowego. Z upływem czasu struktura ta przemieszczała się wzdłuż naczynia od niżej położonej części do części wyżej położonej (rys. 28 b).

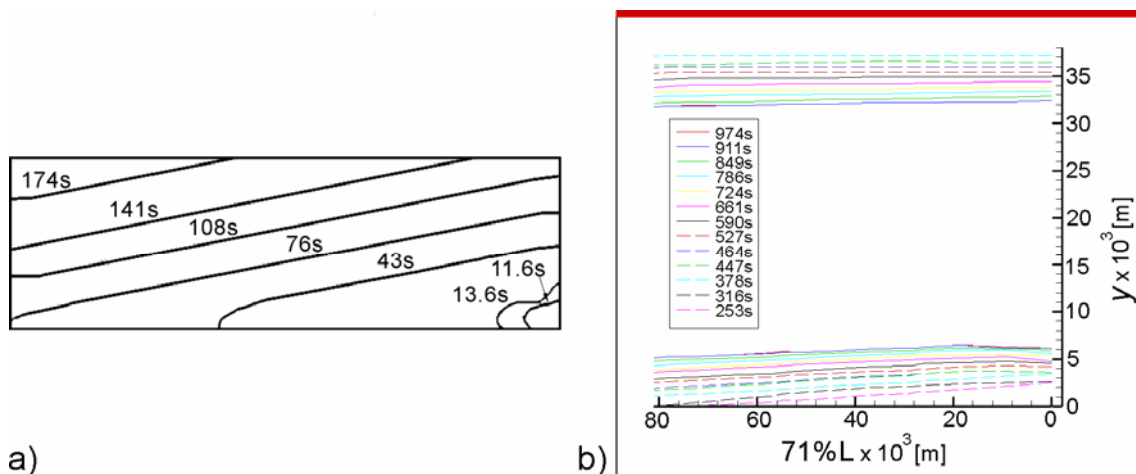
Zwiększona rozdzielczość rejestracji w eksperymencie 40 pozwala na sporządzenie profili prędkości wzdłuż prostych poprowadzonych przez wybrane miejsca w płaszczyźnie obrazu. Profile z rys. 28c i e oraz z rys. 28d i f pokazują przykładowe rozkłady składowych prędkości u i v , odpowiadające obrazom przepływu z rys. 28a oraz z rys. 28b. Zaznaczone na rysunkach proste P1 i P2, dla których sporządzono wykresy, poprowadzono odpowiednio w odległościach $0.25L$ i $0.5L$, mierzonych wzdłuż osi naczynia od ścianki z otworem wlewowym i odniesionych do długości L całego prostopadłościanu. Istotną trudność przy porównaniach rezultatów pomiarów z obliczeniami numerycznymi stanowi niejednoznaczność chwili czasowej porównywanych zjawisk. Wspomniane wcześniej dopasowanie początku skali czasowej przez porównanie objętości utworzonego lodu jest za mało precyzyjne. Jak można zaobserwować na rys. 30, struktura przepływu ulega ciągłej zmianie mimo niewielkiego przyrostu lodu. Z tego względu oparcie porównywania na analizie profili prędkości może stanowić cenny materiał do weryfikacji symulacji komputerowych. Jednak uzyskanie tą drogą dobrej zgodności jest trudnym zadaniem.

Ilustracją przebiegu całego procesu wypełniania naczynia i krzepnięcia wody są kolejne trzy rysunki. Zestawienie położenia powierzchni swobodnej w poszczególnych fazach zalewania naczynia pokazano na rys. 29a. Analogicznie zestawienie, prezentujące proces narastania warstwy lodu na obydwu ściankach naczynia od początku zalewania aż do końca eksperymentu, zawiera rys. 29b. W fazie początkowej wzrost lodu można było zaobserwować tylko przy dolnej ściance, co wynika z wcześniejszego jej przykrycia wodą. Lód na górnej ściance zaczął się osadzać po około 350s od

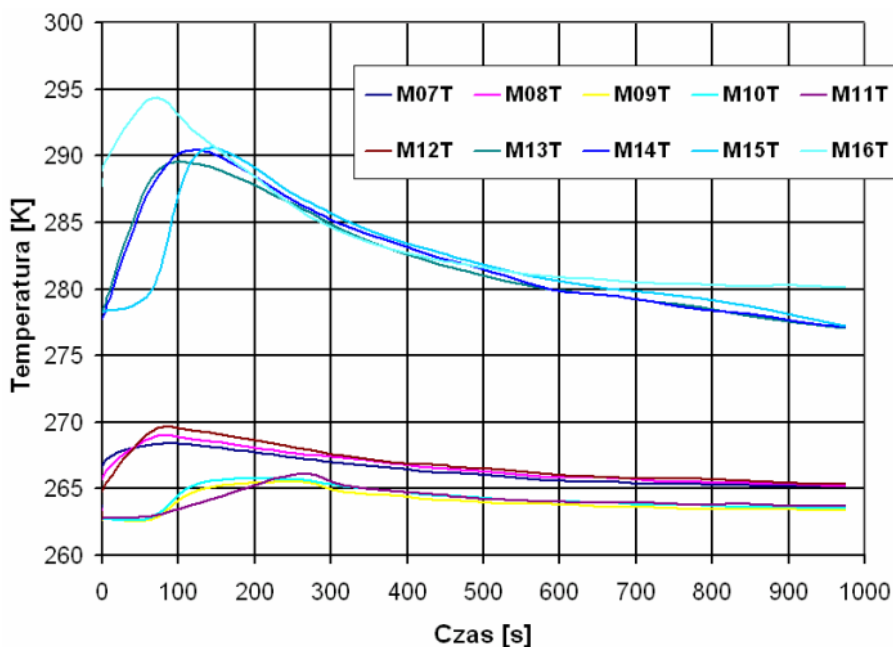
startu procesu zalewania. Jednak pod koniec eksperymentu obie warstwy lodu miały niemal jednakową grubość. W rezultacie po całkowitym wypełnieniu naczynia wodą prędkość narastania górnej warstwy lodu była większa niż na dolnej ścianie. Wydaje się, że wytłumaczenia tej różnicy należy poszukiwać w anomalii gęstości wody w wyniku czego zimniejsze warstwy płynu przemieszczają się w kierunku górnej ścianki. Lokalne zmiany temperatury, rejestrowane przy pomocy termopar w 10 punktach na ściankach prostopadłościanu, pokazano rys. 30. Oznaczenia termopar oraz ich rozmieszczenie wyjaśnione są w rozdziale 2 na rys. 8 i w Tabeli 2.



Rys. 28. Pola i profile prędkości zmierzone podczas krzepnięcia wody w naczyniu PBP: (a), (c) i (e) po 590 s. oraz (b), (d), (f) po 974s. (Tabela 5, #40)



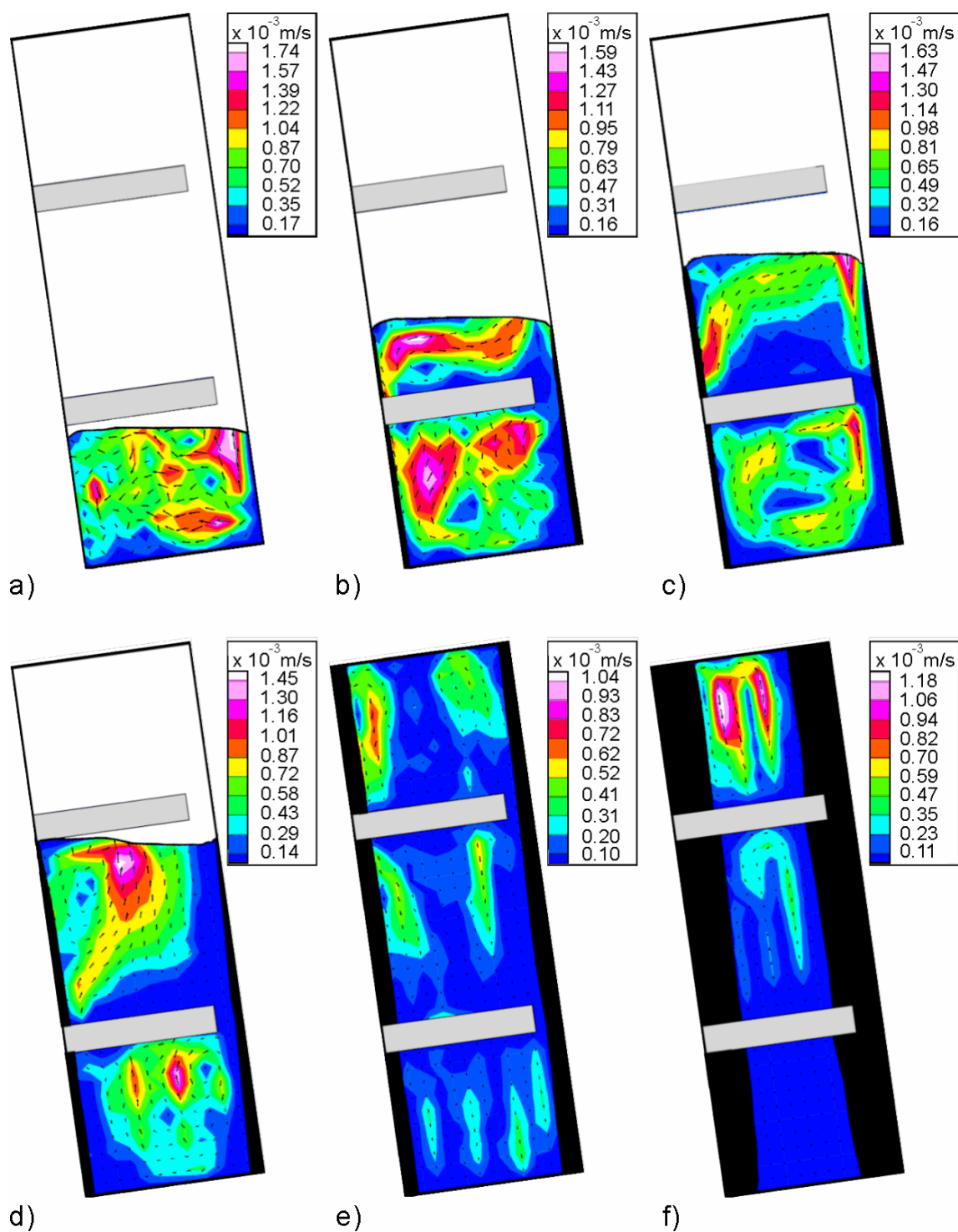
Rys. 29. (a) Zmiana położenia powierzchni swobodnej oraz (b) narastanie grubości lodu w naczyniu PBP wypełnianym wodą (Tabela 5, #40)



Rys. 30. Ewolucja temperatury rejestrowana przez termopary w naczyniu PBP wypełnionym wodą (Tabela 5, #40)

Naczynie typu PZP z wodą

Zasadnicza modyfikacja naczynia PZP w stosunku do omówionego wyżej przypadku polega na umieszczeniu dwóch wewnętrznych przegród. W eksperymencie oznaczonym w Tabeli 5 numerem 47 obserwowano zjawisko przepływu oraz krzepnięcia wody wypełniającej takie naczynie. Wprowadzenie przegród pogorszyło jakość rejestrowanych obrazów wskutek refleksów światła i trudności z uzyskaniem równomiernego oświetlenia w całym przekroju naczynia. Duża różnica współczynników załamania światła między materiałem przegród (pleksiglas) a płynem oraz tworzenie się warstw lodu zmieniły warunki oświetleniowe w stosunku do wcześniej omawianego przypadku naczynia PZP z gliceryną. W rezultacie wielu prób z oświetleniem, wybrano optymalne nachylenie naczynia w stosunku do poziomu pod kątem równym 82° . Rejestrację obrazów rozpoczęto od chwili startu procesu wypełniania. Ścianki metalowe utrzymywano przez cały czas w temperaturze $259.4K$, a naczynie wypełniano wodą o temperaturze początkowej $274K$ przy stałym wydatku objętościowym $1.33 \times 10^{-6} m^3/s$.



Rys. 31. Ewolucja konturów prędkości i wzrostu objętości lodu w wodzie w naczyniu PZP: (a) po 17s, (b) po 31s, (c) po 45s, (d) po 59s, (e) po 267s, (f) po 1163s od startu zalewania (Tabela 5, #47)

Wskutek oddziaływania przepływu z przegrodami, przelewania się cieczy i wypełniania nią kolejnych komór naczynia, struktury przepływu w naczyniu z przegrodami są bardziej złożone od opisanych powyżej dla naczynia PBP. W związku z tym możemy wyróżnić przynajmniej trzy fazy procesu wypełniania. W chwili początkowej zostaje wypełniona pierwsza komora, następnie ciecz pokonując pierwszą przegrodę sływa w dość gwałtowny sposób po jej powierzchni do drugiej komory. W tej fazie postać przepływu przypomina zjawiska typowe dla problemu przelewania przez zapórę (ang. *dam breaking problem*). Analogiczne procesy zachodzą podczas pokonywania drugiej przegrody. Przepływ komplikuje się, gdy narastający lód na chłodzonych ściankach zwęża

szczeliny nad przegrodami, by w końcu całkowicie je zamknąć. Do tego dochodzą złożone cyrkulacje przepływu tworzące i zmieniające się we wszystkich fazach procesu zalewania i krzepnięcia wody. Przykłady zarejestrowanych obrazów pól prędkości przepływu oraz narastania lodu pokazano na rys. 31. Procesy przepływowe rejestrowane w naczyniu prostopadłościennym z przegrodami mają podobne cechy do tych jakie obserwowano dla gliceryny. Najważniejsze z nich omówiono poniżej.

W każdym analizowanym przypadku istotnym parametrem był wydatek cieczy wpływającej do naczynia. Poprzez sprzężenie zwrotne procesu przepływowego i procesu chłodzenia wydatek cieczy decydował o szybkości procesu chłodzenia i kierunkach jej recyrkulacji w naczyniu. Przy dużych wydatkach obserwowano bardziej intensywne recyrkulacje, rozwijające się natychmiast po wypełnieniu kolejnych sektorów naczynia.

Na początku procesu wypełniania naczynia ciecz opadając wzdłuż ścianki z otworem wlewowym wypełnia dolną część naczynia. Jej temperatura obniża się w kontakcie z chłodzoną ścianką. Wytwarza to cyrkulację, która stopniowo ogarnia prawie całą pierwszą komorę naczynia PZP. Podczas wypełniania drugiego sektora sytuacja jest podobna, ale kierunek głównej cyrkulacji płynu jest przeciwny. Wydaje się, że jest to spowodowane większą inercją przelewającego się przez przeszkodę płynu. Stosunkowo duża prędkość spływającej przez pierwszą przeszkodę cieczy powoduje, że po spotkaniu z dolną (lewą) ścianką przepływ zmienia gwałtownie kierunek i generuje przeciwnie skierowaną recyrkulację koło drugiej przeszkody. Podczas pokonywania szczelin przez przepływ dobrze widoczne są fale powierzchniowe propagujące się odwrotnie do kierunku przepływu, bardzo podobne do tych obserwowanych w eksperymencie z gliceryną (rys. 56 i 57). Ze względu na bezwładność cieczy, czas relaksacji potrzebny, aby powierzchnia wygładziła się i powstała regularnie propagująca płaska granica faz, jest rzędu kilku sekund. Po całkowitym wypełnieniu drugiego sektora recyrkulacja staje się dużo wolniejsza, ruch płynu odbywa się głównie w okolicach górnej (prawej) ścianki.

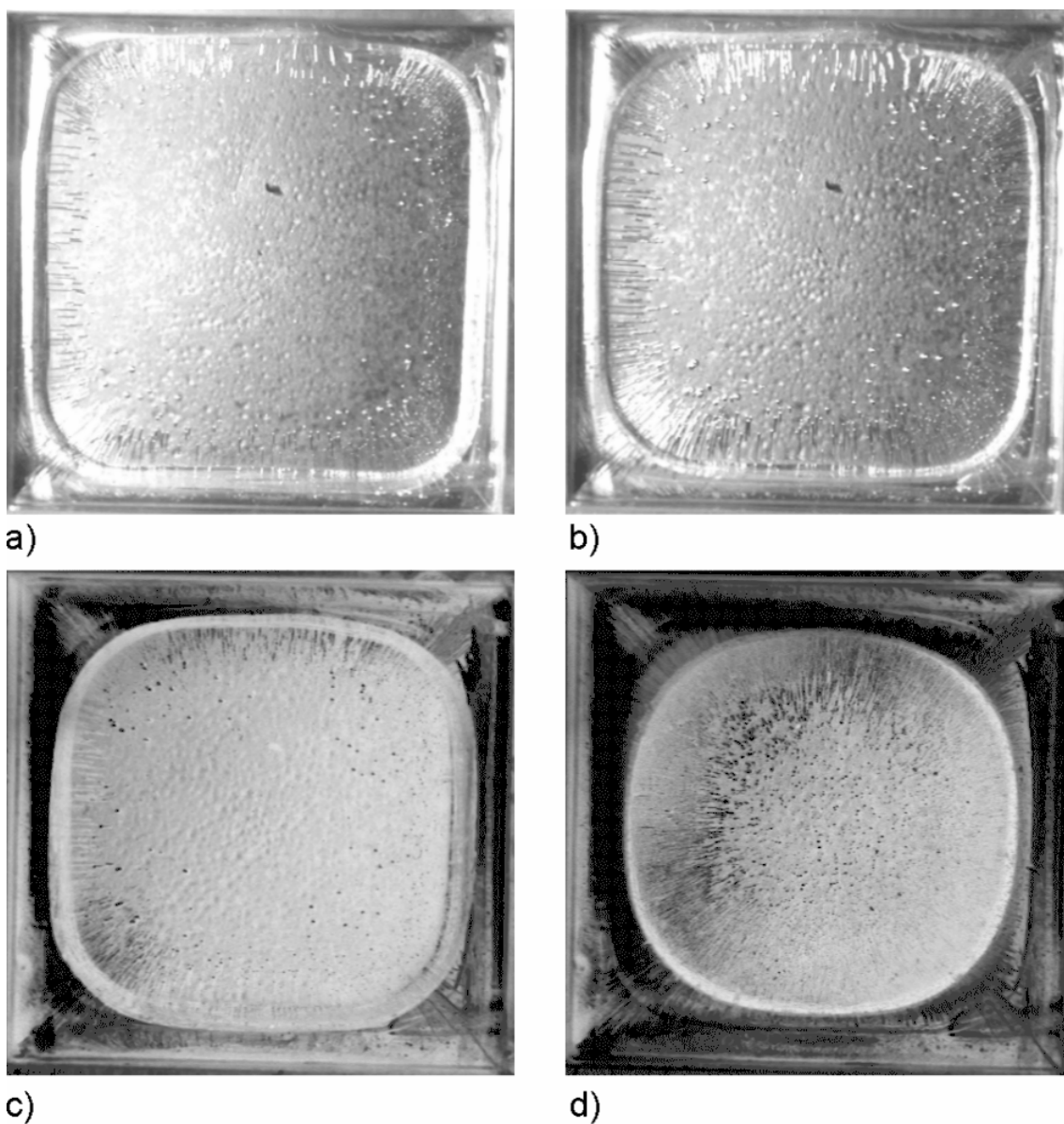
Przepływ wymuszony ustaje, gdy całe naczynie jest wypełnione. Wkrótce potem obszerne recyrkulacyjne strefy wypełniają wszystkie sektory naczynia. Na skutek gradientów temperatury w cieczy rozwija się konwekcja naturalna. Mieszanie konwekcyjne wygląda na bardzo skuteczne dla niskich liczb Prandtla, szczególnie dla wody. Kiedy przepływ zatrzymuje się, konwekcja naturalna staje się mechanizmem napędzającym, regulującym dalsze chłodzenie i przejścia fazowe. Charakterystyczne podwójne wiry w przepływie z recyrkulacją rozwijają się w każdej strefie wnęki z przepływem w dół wzdłuż ścianek (rys. 31) i przepływem powrotnym w środku wnęki. Brak jest przepływu (lub przepływ jest minimalny) w szczelinach nad przegrodami.

5.4. Sześcian z górną powierzchnią swobodną (SP)

5.4.1. Wypełnianie i proces krzepnięcia wody

Krzepnięcie materiału we wnęce w obecności swobodnej powierzchni jest typowe dla wielu procesów odlewniczych. Proces symulowano w laboratorium (eksperyment #49 w Tabeli 5) analizując przepływ i krzepnięcie wody wypełniającej naczynie sześciennie ze swobodną górną powierzchnią (SP). Sześcian wypełniono od góry wodą o temperaturze 276K a temperaturę pięciu ścianek wykonanych z pleksiglasu stabilizowano kąpielą w zewnętrznym płaszczu, w której przepływał glikol etylenowy o temperaturze 258K. Po wypełnieniu naczynia rejestrowano zmiany kształtu lodu tworzącego się na wszystkich ściankach. Obserwacje prowadzono w świetle rozproszonym przez przezroczyste ścianki sześcianu i z góry od strony powierzchni swobodnej.

Podczas wypełniania naczynia miało miejsce szybkie wstępne zalodzenie ścianek. Po tym etapie dalsze narastanie lodu było znacznie wolniejsze. Lód przybierał postać walca z przekrojem kołowym, pozostawiając w środku swego rodzaju „wanne”, w której ciecz porusza się ruchem toroidalnym. Najszybciej chłodzone były narożniki naczynia z uwagi na przyleganie do siebie dwóch zimnych ścianek. Powierzchnię lodu widzianą od góry po czasie 1800s, 2280s, 3180s i 4260s pokazano na rys. 32. W lodzie widoczne były liczne kanaliki wypełnione wodą. Z obserwacji wody zabarwianej niewielką ilością atramentu wynika, że tworzenie się kanalików jest związane z uwalnianiem rozpuszczonego w wodzie powietrza.



Rys. 32. Ewolucja profilu lodu w naczyniu typu SP – widok z góry: (a) po 1800s, (b) po 2280s, (c) po 3180s oraz (d) 4260s (Tabela 5, #49)

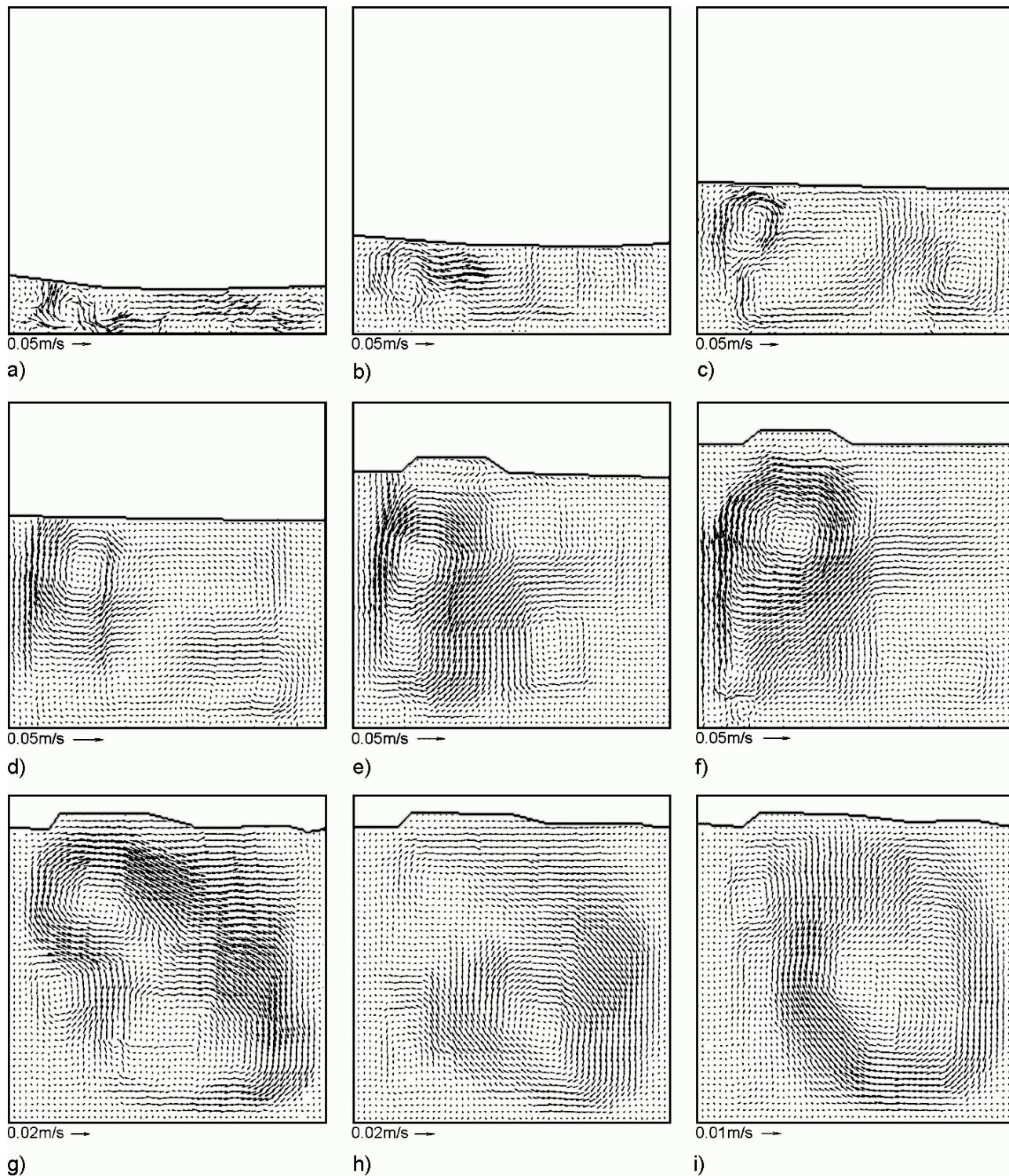
5.4.2. Proces wypełniania turbulentnego bez krzepnięcia

Przemysłowe procesy odlewnicze, z uwagi na wymiar stosowanych naczyń jak i prędkości wlewu, charakteryzują się na ogół przepływami o rozwiniętej turbulencji. W eksperymentach laboratoryjnych prowadzonych w małej skali tego typu przepływ ze stosunkowo dużą prędkością symulowano wypełniając wodą opisywane wyżej naczynie sześciennie (Tabela 5, #50).

Woda zawierająca jako posiew pyłki sosny była wlewana przez otwór przy dnie naczynia z prędkością na wlocie 0.85 m/s . W czasie wypełniania nie obserwowano krzepnięcia, mimo że przed zalaniem ścianki naczynia miały temperaturę 262.5K , a wlewana woda temperaturę 277.6K . Odmierzanie czasu oraz rejestrację obrazów przepływu w przekroju centralnym rozpoczęto od startu procesu zalewania. Z uwagi na duże prędkości przepływu, obrazy rejestrowano przy użyciu szybkiej kamery FASTCAM–ultima 40 K PHOTRON z prędkością 250 kadrów/s.

W chwili rozpoczęcia wypełniania naczynia, ciecz rozpyłała się na dnie tworząc w widoku z góry kołowe wiry z centrum w środku naczynia i niemal martwe strefy w narożach. Po lewej stronie pionowego przekroju centralnego można było obserwować wir, który deformował powierzchnię swobodną przepływu. Seria podobnych eksperymentów (numer 51 i 52) pokazała, że proces jest

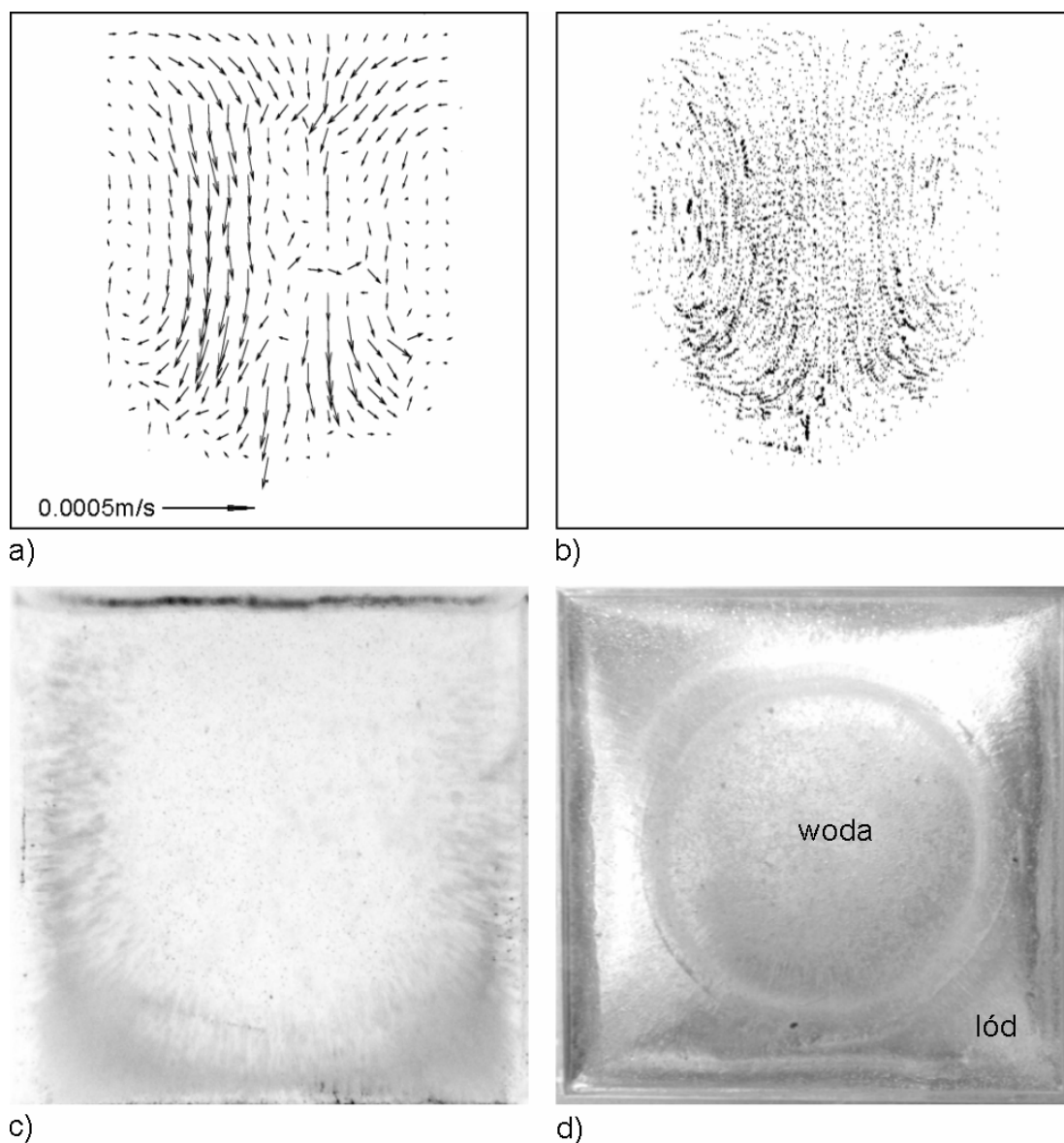
powtarzalny. Kolejne fazy zalewania naczynia pokazano na rys. 33 w formie obrazów pól wektorowych prędkości otrzymanych przy zastosowaniu metody PIV – potoków optycznych (ang. *optical flow*). Istotną cechą przepływu jest zmiana struktury przepływu z początkowego płaskiego wiru w płaszczyźnie poziomej do złożonego trójwymiarowego ruchu, w którym na koniec dominuje wyraźnie wykształcona cyrkulacja wody wokół środka naczynia, otoczona mniejszymi zmiennymi cyrkulacjami.



Rys. 33. Fazy zalewania wodą naczynia SP po: (a) 2.2 s, (b) 5.0 s, (c) 8.6 s, (d) 13.0 s, (e) 20.2 s, (f) 22.2 s, (g) 24.2 s, (h) 26.2 s, (i) 28.2 s (Tabela 5, #50)

5.4.3. Proces wypełniania laminarnego z krzepnięciem

Celem eksperymentu oznaczonego w Tabeli 5 numerem 48 było badanie procesu wypełniania i krzepnięcia wody w naczyniu typu SP. Naczynie utrzymywano w temperaturze $257K$, a woda z domieszką pyłków sosny miała w czasie zalewania temperaturę $295K$. Obserwacje z boku sześcianu oraz z góry, od strony powierzchni swobodnej, prowadzono przez $6720s$, przy tym rejestrowano w wybranych etapach, określonych czasem mierzonym od startu procesu zalewania, serie po sześć obrazów przepływu wody i narastania objętości lodu. Używano do tego żarowej lampy fotograficznej i kamery 3CCD XC-003P Sony. Do opracowania wyników rejestracji wykorzystano korelację PIV techniką potoków optycznych.



Rys. 34. Woda krzepnąca w naczyniu typu SP: (a) pole prędkości po 3840s, (b) tory cząstek po 3840s, (c) widok lodu z boku po 3840s, (d) widok lodu z góry po 6720s (Tabela 5, #48)

Niska temperatura naczynia oraz warunki w laboratorium sprawiały, że przy każdej próbie uruchomienia eksperymentu na zewnętrznej stronie ścianek naczynia osadzała się para wodna. Po usunięciu pary wodnej, dalszą obserwację utrudniała nierównomierna, pokryta „dendrytami” warstwa lodu. Dodatkowym utrudnieniem obserwacji było uwalnianie pęcherzy powietrza przez „rurki dendrytów” w warstwie lodu na ściankach naczynia. Pęcherze zakłócały przepływ

wyptywając na powierzchnię. W efekcie obrazu procesu wypełniania nie pozwalały na dokładniejszą analizę ilościową i wyznaczenie pól prędkości metodą PIV. Natomiast już po napełnieniu naczynia, była możliwa częściowo niezakłócona optycznie obserwacja procesu krzepnięcia i przepływu wewnątrz utworzonego w centrum naczynia „jeziorka wodnego”. Wybrane obrazy, zarejestrowane po 1440s, 2640s, 3840s, 4680s i 6120s, posłużyły do jakościowej analizy pola przepływu, wyznaczenia torów cząstek oraz pomiaru szybkości narastania lodu celem wykonania porównań z odpowiednimi wynikami numerycznymi.

Wynik eksperymentu pokazuje, że w przepływie dominuje konwekcja naturalna. Lżejsza woda o temperaturze zbliżonej do 273K płynie wzdłuż lodu do góry, a cięższa o temperaturze około 277K opada w dół wzdłuż centralnej części cyrkulacji toroidalnej. Przy powierzchni swobodnej i przy dnie obserwujemy radialny przepływ z punktami spiętrzenia w środku. W toroidalnej strukturze przepływu, przy powierzchni swobodnej woda promieniście napływa od ścianek do środka naczynia, potem opada do dna i tam zawraca wzdłuż ścianek (dokładniej mówiąc, wzdłuż powierzchni lodu na ściankach bocznych). Taka struktura przepływu jest analogiczna do opisanej wcześniej w naczyniu z zimną górną ścianką (SGI). Mechanizm generujący przepływ jest też podobny, gdyż mimo odwrócenia temperatur (zewnątrzne ścianki obecnie chłodzą płyn), wskutek anomalii gęstości wody ciecz przemieszcza się w tym samym kierunku, tzn. do powierzchni górnej.

W widoku od góry obserwowano przyrost lodu na ściankach bocznych. Grubość zamrożonej warstwy początkowo wzrastała równomiernie. W fazie przejściowej proces lodu najszybciej przyrastał w narożach naczynia, by pod koniec utworzyć kształt o wewnętrznej powierzchni zbliżonej do walca. Przykłady opisywanych obserwacji ilustruje rys. 34. Zamieszczone obrazy pokazują pole prędkości przepływu i tory cząstek po 3840s od startu zalewania sześcianu, a także widoki kształtu lodu z boku i z góry, odpowiednio po 3840s i po 6720s.

5.5. Wybór wzorców eksperymentalnych

W eksperymentach laboratoryjnych rezultaty pomiarów pola temperatury, prędkości i obserwowana ewolucja położenia granicy faz były oceniane niezależnie. Każda z wielkości rejestrowanych eksperymentalnie może stanowić odrębny wzorzec dla programów numerycznych, w których symulowane są procesy przepływowe z przemianą fazową. Przy takim traktowaniu, do pozytywnej oceny eksperymentu wystarczy, by choć jeden zestaw wyników był zakwalifikowany jako wzorcowy. Tabela 5 pozwala wstępnie zorientować się w ocenie jakości danych eksperymentalnych. Umożliwia to informacja zawarta w ostatniej kolumnie, w której podano symboliczne oznaczenia dwóch ogólnych przypadków – pozytywnej lub negatywnej oceny przydatności wyników do ilościowych porównań z symulacją numeryczną.

Z pozytywną oceną mamy do czynienia, gdy przebieg eksperymentu i rejestracja jego parametrów były niezakłócone, a otrzymane rezultaty pomiarów pozwalają na ich porównanie z wynikami z programów numerycznych. Wówczas w uwagach Tabeli 5 umieszczono symbole t, v lub s, co oznacza, że materiał może być wzorcem dla porównań odpowiednio pola temperatury, pola prędkości lub kształtu frontu przemiany fazowej. Bardziej zróżnicowane są symbole wskazujące na negatywne przypadki eksperymentów, w których uzyskane wyniki mają jedynie charakter jakościowy i nie pozwalają na porównania z wynikami symulacji numerycznych. Mamy z nimi do czynienia, gdy wiersz tabeli w ostatniej kolumnie zawiera kody od 0 do 10. Kod równy 0 wskazuje tylko wstępny etap badań, natomiast wyższe kody oznaczają rodzaje przyczyn negatywnej oceny wyników.

Wstępna faza eksperymentów służyła dla przygotowania układu do stanu ustalonego, od którego prowadzono właściwe pomiary. W czasie niektórych eksperymentów stwierdzano, że pewne warunki prowadzenia pomiarów wymagają korekty (np. niezbędne było poprawienie wypoziomowania, usunięcie pęcherzy z cieczy, itd.). Takie przypadki oznaczono w uwagach w tabeli kodem 1, uznając, że wyniki mogą być przydatne do badań wrażliwości rozwiązań na tego

typu zakłócenia. Kodem 2 oznaczono jeden eksperyment, w którym omyłkowo nie został włączony układ rejestracji temperatury za pomocą termopar. Mimo tego tabela zawiera opis tego przypadku, ponieważ zarejestrowane obrazy przepływu stanowią poprawny materiał badawczy do porównań z innymi, podobnymi eksperymentami. Kolejną przyczyną, oznaczoną kodem 3, uniemożliwiającą zaliczenie wyników eksperymentu do kategorii wzorców, był przypadek, gdy w cieczy, szczególnie dla succinonitrylu i poliglikolu, pojawiały się drobne struktury zakrzepłych cząstek, powodujące mętnienie obrazu i brak możliwości pomiaru pól prędkości. Kodem 4 oznaczono trudności, które wiązały się z brakiem rozkładu barw w świetle odbitym od znaczników z ciekłego kryształu. Objawy źle „pracującego” posiewu z ciekłych kryształów pojawiały się dla cieczy modelowych PEG i SCN, mimo że rodzaj kryształów był dopasowany do rejestrowanego w eksperymencie zakresu temperatur. Nie udało się wyjaśnić przyczyn tego zjawiska. Inne trudności pomiarowe wiążą się z rejestracją obrazów. Odpowiednio kodem 5, 6 i 7 oznaczono słabo zróżnicowaną jasność obrazu, zbyt małe powiększenie obrazu lub zbyt niską rozdzielczość użytej kamery, bądź zbyt małe koncentracje cząstek posiewu. Problem jasności, uniemożliwiający dalszą obróbkę obrazów metodą PIV, występował zwłaszcza przy krótkich czasach rejestracji, kiedy dostępne oświetlenie było niewystarczające. Drobny posiew powodował, że na obrazach poszczególne cząstki nie były rozróżnialne, a więc podstawowy warunek dla powodzenia stosowanej metody pomiarowej nie był spełniony. W niektórych przypadkach eksperyment był powtarzany w identycznych warunkach, dla potwierdzenia rezultatów. Wzorcem uznawano ten pomiar, który dawał w ocenie dokładniejsze rezultaty, natomiast pozostałe eksperymenty oznaczono w Tabeli 5 kodem 8. Stosunkowo często zdarzało się w eksperymentach, że temperatury ustalające się na ściankach obserwowanego naczynia były niższe od temperatur krzepnięcia cieczy modelowej i ścianki pokrywały się zakrzepłym materiałem utrudniającym obserwacje. Takie przypadki, oznaczone kodem 9, występowały głównie dla PEG, rzadziej dla SCN. W Tabeli 5 umieszczono także informacje o eksperymentach, w których występowały trudności pomiarowe nie wymienione wcześniej (np. awarie w czasie eksperymentu). Takie przypadki oznaczono kodem 10. Mimo że materiał pomiarowy nie może służyć jako wzorzec dla obliczeń numerycznych, jego analiza może dostarczyć dodatkowej wiedzy o samym procesie.

Tabela 5 Specyfikacja problemów analizowanych eksperymentów i obliczeń numerycznych

Lp. #	Geo-metria	Ciecz modelowa	Badanie	Kąt	PIV	PIT	Posiew	Warunki brzegowe			Warunki początkowe		Uwagi
				α [°]				T_h [K]	T_c [K]	T_{ext} [K]	T_0 [K]	$q \times 10^6$ [m ³ s ⁻¹]	
1	SRG	Woda	T	0.0				283.0	273.0		278.0	0.0	FFFSS
2	SRG	Woda	T+K	0.0				283.0	263.0		Lp. 1	Lp. 1	FLUENT
3	SIG	PEG-900	T	0.0	●	○	Proszek Szklany		309.0	313.0	313.0	Z. start	0
4	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	○	Proszek Szklany		283.0	313.0	Lp. 3	Lp. 3	3
5	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	○	Proszek Szklany		283.0	313.0	Lp. 3	Lp. 3	10
6	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	○	Proszek Szklany		283.0		Lp. 3	Lp. 3	v
7	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/R90F2W		296.0	316.0	316.0	Z. start	4,9
8	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/R29C4W		296.0	316.0	316.0	Z. start	4,9
9	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/R29C4W		296.0	306.0	306.0	Z. start	4,9
10	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/R29C4W		296.0	306.0	306.0	Z. start	4,9
11	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/R29C4W		296.0	304.0	304.0	Z. start	4,6,9
12	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/R29C4W		296.0	308.0	308.0	Z. start	4,9
13	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/B29C4W		296.0	308.0	308.0	Z. start	4,6,9
14	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/R29C4W		296.0	306.0	306.0	Z. start	4,9
15	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/R29C4W		298.0	309.0	309.0	Z. start	v,s
16	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/R90F2W		300.0	311.0	311.0	Z. start	v,s
17	SIG	PEG-900	K	0.0	●	●	BM100/R90F2W		300.0	311.0	Z. start	Z. start	4,9
18	SIG	PEG-900	T+K	0.0	●	●	BM100/R29C4W		302.0	311.0	313.0	Z. start	v,s
19	SIG	PEG-900	T	0.0					299.0	309.0	304.0	0.0	FLUENT
20	SIG	PEG-900	T+K	0.0					299.0	309.0	Lp. 19	Lp. 19	FLUENT
21	SIG	SCN	T	0.0	●	○	Proszek Szklany		309.0	309.0	333.0	Z. start	0
22	SIG	SCN	T+K	0.0	●	○	Proszek Szklany		273.0	309.0	Lp. 21	Lp. 21	v,s
23	SIG	SCN	T+K	0.0	●	●	BM100/R29C4W		292.0	333.0	333.0	Z. start	4,9
24	SIG	SCN	T+K	0.0	●	●	BM100/R29C4W		293.0	335.0	335.0	Z. start	4,9
25	SIG	SCN	T+K	0.0	●	●	BM100/R90F10W		298.0	333.0	333.0	Z. start	v,s
26	SIG	SCN	T+K	0.0	●	●	BM100/R90F10W		298.0	333.0	333.0	Z. start	4,9
27	SIG	Woda	T	0.0					273.0	283.0	278.0		FRECON
28	SIG	Woda	T+K	0.0					263.0	283.0	Lp. 29	Lp. 29	ICE3D

Tabela 5 cd. Specyfikacja problemów analizowanych eksperymentów i obliczeń numerycznych

Lp. #	Geo-metria	Ciecz modelowa	Badanie	Kąt	PIV	PIT	Posiew	Warunki brzegowe			Warunki początkowe		Uwagi
				α [°]				T_h [K]	T_c [K]	T_{ext} [K]	T_0 [K]	$q \times 10^6$ [m ³ s ⁻¹]	
29	PBP	SCN	W+T+K	45.0	●	○	Proszek Szklany	343.0	313.0		303.0	4.64	9
30	PBP	Woda	W+T+K	11.4	●	●	LC BM 250	276.0	263.0		280.0	4.64	4,6
31	PBP	Woda	W+T+K	11.4	●	●	LC BM 250	276.0	258.0 268.5		283.0	4.64	4,6
32	PBP	Woda	W+T+K	82.0	●	○	Lycopodium	278.0	258.0		276.0	4.64	7
33	PBP	Woda	W+T+K	11.4	●	○	Pyłki sosny	284.0	263.0		280.0	180.00	7,8
34	PBP	Woda	W+K	11.4	●	○	Pyłki sosny	284.0	263.0		280.0	180.00	8
35	PBP	Woda	W+K	11.4	●	○	Pyłki sosny	285.0	263.0		280.0	180.00	5
36	PBP	Woda	W+K	11.4	●	○	Pyłki sosny	285.4	263.0		280.0	180.00	6
37	PBP	Woda	W+K	11.4	●	○	Pyłki sosny	286.0	263.0		280.0	180.00	v
38	PBP	Woda	W+T+K	11.4	●	●	Mix C	286.0	263.0		280.0	4.64	6
39	PBP	Woda	W+T	45.0	●	●	TM 445	294.0	276.0		287.0	4.64	t,v
40	PBP	Woda	W+T+K	11.4	●	●	Mix C	297.0	263.0		280.0	0.91	t,v,s
41	PBP	Woda	W+T+K	11.4	●	●	LC BM 250	298.0	263.0		280.0	4.64	4
42	PBP	Woda	W+T+K	11.4	●	●	Mix C	276.0	258.0		276.0	4.57	t,v,s
43	PBP	Woda	W+T+K	11.4				293.0	263.0		298.0	83.60	FLUENT
44	PBP	Woda	W+T+K	11.4				298.0	265.0		298.0	354.00	FLUENT
45	PZP	Gliceryna	W+K	45.0				323.0	283.0		303.0	71.20	FLUENT
46	PZP	Woda	W+T+K	82.0	●	○	Pyłki sosny	274.0	263.0		280.0	1.33	2,6
47	PZP	Woda	W+T+K	82.0	●	○	Pyłki sosny	274.0	259.4		276.0	1.33	v,s
48	SP	Woda	W+T+K	0.0	●	○	Pyłki sosny	295.0		257.0	277.0	266.90	v,s
49	SP	Woda	K	0.0		○	Atrament	276.0		258.0	277.0		s
50	SP	Woda	W+T+K	0.0	●	○	Pyłki sosny	277.6		262.5	280.0	266.90	v
51	SP	Woda	W+T+K	0.0	●	○	Pyłki sosny	274.2		262.6	280.0	266.90	1
52	SP	Woda	W+T+K	0.0	●	○	Pyłki sosny	276.4		263.0	280.0	266.90	1
53	SP	Woda	T+K	0.0						258.0	276.0		FLUENT

Legenda do Tabeli 5

Geometria

- PBP – prostopadłościan bez przegród;
- PZP – prostopadłościan z przegrodami;
- SRG – sześcián grzany różnicowo;
- SIG – sześcián z izotermiczną ścianką górną;
- SP – sześcián ze swobodną powierzchnią.

Badanie

- W – wypełnianie;
- T – konwekcja;
- K – krzepnięcie.

PIV oraz PIT

- – badanie przeprowadzone;
- – brak badań.

Warunki początkowe – wartości oznaczone przez „Lp. XX” należy interpretować jako wartości określone dla stanu końcowego problemu opisanego przez wiersz „XX” tabeli. Symbol Z. start (*zimny start*) oznacza warunki początkowe o zerowym polu prędkości i jednorodnej temperaturze. W fizycznym eksperymencie jest to tylko przybliżenie, gdyż resztkowe gradienty temperatury zawsze wywołują niekontrolowany ruch płynu.

Problemy analizowane doświadczalnie – kolumna **Uwagi** zawiera ocenę:

Wyniki uznane za wzorcowe w części dotyczącej:

- t – pola temperatury;
- v – pola prędkości;
- s – kształtu granicy faz.

Wyniki nie uznane za wzorcowe z powodu:

- 0 – przygotowania eksperymentu;
- 1 – zmiennych warunków w czasie eksperymentu;
- 2 – braku rejestracji temperatury termoparami;
- 3 – niestabilności w polu przepływu;
- 4 – braku rozkładu barw w świetle odbitym od znaczników;
- 5 – ciemnych obrazów;
- 6 – niskiej rozdzielczości;
- 7 – niewłaściwego posiewu;
- 8 – badania powtarzalności;
- 9 – krzepnięcia na ściankach;
- 10 – inne.

Problemy analizowane numerycznie – kolumna **Uwagi** zawiera nazwę programu użytego dla uzyskania rozwiązania (FRECON, FLUENT lub ICE3D).

Komentarz szczegółowy:

W wierszu 1, w kolumnie Uwagi, symbol „FFFSS” oznacza, że problem rozwiązany był programami: FRECON, FLUENT, FIDAP, SOLVSTR, SOLVMEF.

W wierszu 31 podano dwie wartości temperatur T_c , gdyż różne były temperatury okładek naczynia – górna wartość mierzona była na górnej, odpowiednio dolna na dolnej okładce.

W wierszu 53 ze względu na przeprowadzoną symulację z wyłączeniem modelowania wypełniania naczynia typu SP, podano jedynie temperaturę T_0 przyjętą jako temperaturę początkową w naczyniu.