

JÓZEF GOŚCIK¹, JAN ŁACH¹

Analiza procesów przenoszenia w prostopadłościennych magazynach energii z przemianą fazy typu faza ciekła ↔ faza stała

Część I. Opis cyklu rozładowania²

W niniejszej pracy zaprezentowano analizę aktualnego stanu wiedzy w zakresie ilościowego opisu cyklu rozładowania przepływowych magazynów energii wykorzystujących efekty cieplne przemian fazowych typu faza ciekła ↔ faza stała. Skupiono przy tym uwagę na wyseparowaniu najbardziej istotnych faktów z obszaru dostępnej wiedzy pozyskanej w wyniku badań eksperymentalnych oraz na tworzonych na tej podstawie prostych opisach ilościowych. Przyjęto, że ustalającą egzemplifikacją realnych magazynów jest jednostka idealizowana do postaci zasobnika prostopadłościennego. Wydzielona geometria jednostki magazynującej, przy braku opracowań o charakterze przeglądowym, dostarczyła także pretekstu dla podjęcia próby klasyfikacji spotykanych konfiguracji ciepło-przepływowych. W niniejszej pracy abstrahuje się zaś od analizy sformalizowanych matematycznie opisów wielowymiarowych przestrzennie procesów zestalania i metod konstrukcji ich rozwiązań.

Oznaczenia

<p>a – dyfuzyjność cieplna medium magazynującego, m^2/s,</p> <p>A – $= (l_2/l_1)$, stosunek wymiarów liniowych przekroju poprzecznego zasobnika,</p> <p>c – ciepło właściwe medium akumulującego, $J/(kg \cdot K)$,</p> <p>g – przyspieszenie ziemskie, m^2/s,</p>	<p>\bar{g} – wektor przyspieszenia ziemskiego,</p> <p>l_h – charakterystyczny wymiar liniowy,</p> <p>l_i – wymiar przekroju poprzecznego zasobnika w kierunku osi $x_i (i = 1, 2)$, m,</p> <p>S_H – parametr określający przegrzanie fazy ciekłej medium magazynującego,</p> <p>t – czas, s.</p>
--	--

Symbole greckie

<p>α – współczynnik przejmowania (wnikania) ciepła, $W/(m^2 \cdot K)$,</p> <p>α^* – współczynnik α określony na granicy rozdziału faz,</p> <p>β – współczynnik rozszerzalności termicznej, $1/K$,</p>	<p>λ – przewodność cieplna medium magazynującego, $W/(m \cdot K)$,</p> <p>ν – lepkość kinematyczna medium magazynującego, m^2/s,</p> <p>ρ – gęstość medium magazynującego, kg/m^3,</p>
--	---

¹Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45 C

²Praca wykonana w ramach grantu KBN nr 3 P402 024 05

Δh^* - efekt cieplny przemiany fazowej, J/kg ,
 Θ - temperatura, K ,
 Θ^* - teoretyczna temperatura przemiany fazowej, K .

τ - czas w ujęciu bezwymiarowym,
 χ - udział objętościowy nowej fazy,
 ψ - funkcja opisująca położenie granicy rozdziału faz.

Zasadnicze wielkości bezwymiarowe

Fo - $(= a \cdot t/l_h)$, liczba Fouriera,
 Nu - $(= \alpha \cdot l_h/\lambda)$, liczba Nusselta,
 Pr - $(= \nu/a)$, liczba Prandtla,
 Ra - $(= g \cdot \beta \cdot \Delta \Theta \cdot l_h^3/(\nu \cdot a))$, liczba Rayleigha, przy czym dolny indeks przy Ra precyzuje charakterystyczny wymiar liniowy.

Ste - $(= c \cdot \Delta \Theta/\Delta h^*)$, liczba Stefana,
 S_H - parametr określający przegrzanie fazy ciekłej medium magazynującego, definiowany analogicznie jak liczba Stefana Ste_2 , czyli $S_H = Ste_{(2)}$.

Indeksy dolne

- (1) - dotyczy fazy stałej medium magazynującego,
 (2) - dotyczy fazy ciekłej medium magazynującego.

1. Wstęp

Pościowy opis procesów z przemianą fazy typu faza ciekła \leftrightarrow faza stała odgrywa zasadniczą rolę w pracach nad magazynowaniem energii cieplnej na drodze przemian fazowych. Z tego też względu problematyka ta jest dyskutowana w ścisłym powiązaniu z magazynami energii ze zmianą fazy, które w istocie rzeczy należą do wielkiej rodziny wymienników ciepła. Ich realne rozwiązania konstrukcyjne powstają na gruncie wieloaspektowych uwarunkowań charakterystycznych dla tej klasy urządzeń. Rozległość istniejących problemów oraz specyfika tych magazynów, do szczegółowego badania których przystąpiono stosunkowo niedawno, wydają się być głównymi przyczynami braku opracowań o charakterze przeglądowym. Trudno też jeszcze mówić o jakiejś, powszechnie akceptowanej, klasyfikacji metodyk opisu procesów transportowych zachodzących w tej klasie wymienników ciepła.

Istotnym faktem rzutującym na modelowanie przeponowych magazynów energii cieplnej z przemianą fazy jest istnienie niejako nadrzędnego ograniczenia w ich konstrukcji, którym jest brak możliwości bezpośredniego transportowania medium magazynującego znajdującego się w fazie stałej. Każdy wariant przeponowego magazynu wykorzystującego przemiany fazowe może być przy tym traktowany - w ujęciu abstrakcyjnym - jako przykład urządzenia, które powinno odznaczać się efektywnym, ze względu na wymianę energii, zespoleniem przestrzeni wypełnionej medium akumulującym z oddzielnym od niej - za pomocą przepony - układem dostarczającym (przekazującym) ciepło ze (do) źródła (odbiornika) zewnętrznego.

Istnienie przepony, z założenia nieprzenikliwej dla transportu masy, pozwala na wydzielenie określonego typu magazynu spośród licznych, potencjalnie możliwych kategorii rozwiązań konstrukcyjnych układów magazynujących. Jeśli ponadto wziąć pod uwagę fakt, że stosowane są takie media magazynujące, jak czyste chemicznie i jednoskładnikowe substancje, to możliwe staje się zredukowanie

analizy zjawisk przenoszenia do badania jedynie transportu energii. O przebiegu cykli roboczych w takich magazynach będą więc decydowały warunki wymiany energii w obrębie obszarów wypełnionych medium akumulującym oraz charakter oddziaływania otoczenia (ujmowany matematycznie w postaci adekwatnego warunku brzegowego). Fakt ten umożliwia więc zawężenie problematyki modelowania procesów transportowych w magazynach z przemianą fazy typu faza ciekła \leftrightarrow faza stała do analizy zagadnień wymiany energii w takiej klasie wymienników ciepła, która – w ramach klasyfikacji zaproponowanej przez Brodowicza [1] – charakteryzuje się zmienną w czasie wartością strumienia wymienianej energii.

Intensywność procesu, mierzona udziałem nowej fazy lub – w ujęciu polowym – położeniem ruchomej granicy rozdziału fazy ciekłej i stałej bądź przestrzennie rozległego obszaru współistnienia faz, jest zaś limitowana osiągalną szybkością transportu ciepła – generowanego (absorbowanego) w trakcie przemiany fazowej – przez stopioną (zestaloną) objętość i dostarczanego (odbieranego) z (na) zewnątrz układu.

Stąd zaś wynika, że najistotniejsze czynniki stanowiące o poprawności opisu matematycznego rozważanego magazynu, to:

- ustalenie dominujących mechanizmów transportu energii,
- sposób opisu zachodzących przemian fazowych.

W roboczych cyklach przeponowych magazynów energii wykorzystujących efekty cieplne przemian fazowych typu faza ciekła \leftrightarrow faza stała zachodzą na ogół złożone procesy transportowe. Na powierzchniach aktywnych ze względu na wymianę energii, czyli po stronie obszaru wypełnionego medium akumulującym, formuje się bowiem – w sposób nieustalony w czasie – nowa faza, a to oznacza, że procesy transportowe przebiegają w obszarach o zmiennej w czasie i nieznaney *a priori* zajętości, przy czym:

- jeśli ma miejsce ładowanie magazynu, to jego powierzchnia grzejna kontaktuje się z fazą ciekłą, w której w sposób naturalny może inicjować się konwekcyjny transport energii,
- jeśli zaś ma miejsce rozładowywanie magazynu, to schładzana powierzchnia wymiany pokrywa się warstwą zestalonej substancji, w której zachodzi niekonwekcyjne przenoszenie energii.

Ponieważ konwekcja jest bardziej intensywnym mechanizmem transportu niż przewodzenie, zwłaszcza w materiałach charakteryzujących się małymi wartościami współczynnika przewodzenia ciepła, to dostarczanie energii w cyklach ładowania zachodzi szybciej aniżeli jej pozyskiwanie w cyklach rozładowywania. Fakt ten znajduje potwierdzenie w wynikach licznych badań, które zostały obszernie skomentowane przez Viskantę [2].

W sytuacji, w której siły wyporu w fazie ciekłej generują procesy przenoszenia na drodze konwekcji, transport ciepła jest determinowany przez ruch płynu, przy czym przenoszenie ciepła silnie oddziałuje na rozkłady temperatury w pobliżu

granicy rozdziału faz. Oddziaływania te są zazwyczaj na tyle intensywne, że wywierają istotny wpływ na warunki ewolucji tej granicy. Intensywność konwekcyjnego transportu energii wprowadza zarazem – w licznych przypadkach o znaczeniu praktycznym – efekty o charakterze sprzężonym, które eliminują możliwość poprawnego wyznaczenia prędkości, kształtu i położenia granicy rozdziału faz oraz wymiany ciepła w jej otoczeniu bez znajomości przebiegu procesów przenoszenia w całej objętości medium magazynującego. Główna trudność w konstrukcji rozwiązania takich zagadnień z przemianą fazy, w których istnieje oddziaływanie pochodzące od konwekcji naturalnej, sprowadza się zatem do znalezienia zależności między położeniem granicy rozdziału faz i strukturą przepływu czynnika w fazie ciekłej (rozkładem prądów termicznych). Wskazane sprzężenie wyklucza jednocześnie możliwość wykorzystania znanego opisu transportu energii w takich układach, w których nie występuje przemiana fazy.

Metody analizy ilościowej procesów przenoszenia w układach z przemianą fazy typu faza ciekła \leftrightarrow faza stała, w których istotną rolę odgrywa konwekcja naturalna, bazują na dwóch podejściach [2]. O ich zróżnicowaniu decyduje znajomość bądź nieznanostwo współczynnika konwekcyjnej wymiany ciepła na granicy rozdziału faz. Zagadnienia są więc formułowane dwójako, tzn.:

- należy określić położenie i ruch granicy rozdziału fazy ciekłej i stałej dla danych warunków wymiany ciepła oraz współczynników wymiany konwekcyjnej,
- należy określić: rozkłady temperatury w obrębie fazy ciekłej i stałej, położenie i prędkość granicy rozdziału faz oraz wartości lokalnych współczynników wymiany energii na granicy rozdziału i powierzchni wymiany przy założeniu, że dana jest geometria układu oraz warunki początkowo-brzegowe.

Takiemu właśnie spojrzeniu na opis procesów z przemianą fazy typu faza ciekła \leftrightarrow faza stała podporządkowano zamieszczony poniżej przegląd aktualnego stanu wiedzy, który ograniczono do analizy procesów zestalania. W pierwszej kolejności przedstawia się dostępne wyniki pozyskane głównie na gruncie badań eksperymentalnych, w których współczynnik konwekcyjnej wymiany na granicy rozdziału faz był wielkością znaną. Natomiast w drugiej kolejności omawia się rezultaty siłą rzeczy bardziej skomplikowane, otrzymane w oparciu o podejścia lokalne.

2. Analiza wyników badań eksperymentalnych oraz proste formuły obliczeniowe

Aczkolwiek faktem jest znaczące zaawansowanie badań poświęconych analizie procesów przenoszenia w układach z przemianą fazy typu faza ciekła \leftrightarrow faza stała, to jednak nie zdołano – jak dotychczas – opracować jednolitego podejścia formalnego do modelowania silnego sprzężenia pomiędzy transportem konwekcyjnym a ruchem granicy rozdziału faz. Powyższe zamieszczone komentarze wskazują

na istotny wpływ mechanizmów przenoszenia stanowiących o kształtowaniu się wymiany ciepła na drodze konwekcji naturalnej. Przebieg tego procesu jest przy tym zdeterminowany uwarunkowaniami geometrycznymi układów. Ta złożona zależność powoduje, że aktualny stan wiedzy w zakresie ilościowego opisu zjawisk transportowych w magazynach z przemianą fazy typu faza ciekła \leftrightarrow faza stała opiera się – w zdecydowanej większości przypadków – na właściwej interpretacji wyników badań eksperymentalnych.

Należy stwierdzić, że badaniom poddano nieomal wszystkie, dające się wyizolować, procesy jednostkowe zachodzące w najbardziej interesujących – z punktu widzenia zastosowań – wariantach magazynów z przemianą fazy, przy czym dotyczy to tak wariantów określanych umownie mianem konfiguracji zewnętrznych jak i konfiguracji wewnętrznych.

Układy o konfiguracji zewnętrznej charakteryzują się tym, że materiał akumulujący wypełnia przestrzeń magazynu nie objętą kanałami przepływowymi z czynnikiem roboczym. W rozwiązaniu tym jest zarazem uzasadnione, a to z uwagi na skale geometryczne, przyjęcie założenia o istnieniu dostarczających (odbierających) ciepło elementów w postaci:

- dowolnie zorientowanej płyty, przy czym w szczególnych przypadkach ma się do czynienia z płytą pionową [3, 4] lub poziomą [5, 6],
- poziomo [7] lub pionowo [8, 9] usytuowanego cylindra bądź też – bliższego rozwiązaniom praktycznym – zbioru cylindrów [10].

Układy o konfiguracji wewnętrznej charakteryzują się zaś tym, że medium akumulujące wypełnia zasobniki:

- o przekroju prostokątnym z różnorodnie rozwiązaną powierzchnią wymiany [11, 12, 13],
- w postaci dowolnie zorientowanego cylindra, który – w szczególnych przypadkach – może być usytuowany poziomo [14] lub pionowo [15, 16],
- w kształcie sfery [17].

Należy nadmienić, że użyte tu takie terminy, jak "położenie poziome" i "położenie pionowe", determinują intuicyjnie oczywiste usytuowanie aktywnych powierzchni wymiany ciepła. Położenie poziome odpowiada bowiem usytuowaniu tych powierzchni prostopadle do kierunku działania sił grawitacyjnych, a położenie pionowe oznacza, że aktywne powierzchnie wymiany ciepła usytuowane są zgodnie z kierunkiem działania tych sił. Zakłada się przy tym, że pole grawitacyjne jest polem jednorodnym.

Warto zaznaczyć, że w powyższym zestawieniu – poza próbą generalnej klasyfikacji – odwołano się jedynie do tych publikacji, które uznano za najbardziej reprezentatywne. Opis zjawisk transportowych w układach, w których dominującą rolę odgrywa konwekcyjne przenoszenie mechanizmem konwekcji naturalnej,

jest bowiem przedmiotem ogromnej liczby opracowań, co – praktycznie rzecz biorąc – wyklucza możliwość prezentacji szerokiego i zarazem usystematyzowanego spojrzenia na problematykę modelowania matematycznego. Wymowny jest przy tym brak opracowań o charakterze podsumowującym, i to nawet dla przypadku określonej geometrii układów.

W dalszej części niniejszej pracy skupiono uwagę na analizie dostępnych danych odnośnie procesów przenoszenia w obszarach o geometrii prostokątnej. Tym samym wprowadza się rygorystycznie przestrzeganą "geometryczną" zasadę eliminacji dyskutowanych tu publikacji. W prezentowanym poniżej przeglądzie uwzględnia się więc tylko takie prace, których przedmiotem jest analiza zjawisk transportowych zachodzących w przepływowych magazynach energii, dla których wspólnym elementem jest geometria aktywnych – ze względu na wymianę energii – ścianek ograniczających przestrzeń wypełnioną medium akumulującym (w konfiguracjach wewnętrznych – ścianki prostopadłościennego zasobnika, a w konfiguracjach zewnętrznych – płyta).

Nie mniej istotnym uzasadnieniem dla dokonywanej dalej selekcji publikacji jest także dążenie do zawężenia zakresu niniejszych rozważań do analizy takich układów magazynowania, w których zachodzą procesy przenoszenia sprowadzające się wyłącznie do transportu energii na drodze przewodnictwa i konwekcji naturalnej. Stąd zaś wynika, że świadomie pominięto kwestie związane z:

- równoczesnym transportem masy [18],
- przenoszeniem energii na drodze konwekcji wymuszonej, np. w trakcie mieszania objętościowego generowanego poprzez oddziaływanie pola elektromagnetycznego [19],
- wpływem napięcia powierzchniowego [20],
- inwersją gęstości medium, odgrywającą szczególną rolę w układach woda/lód, co zostało uwypuklone w aktualnym i dość obszernym przeglądzie tej klasy zagadnień zaprezentowanym w [21].

Niezależnie od analizy publikacji poświęconych głównie niskotemperaturowym układom magazynowania rozpatruje się zarazem, a to z uwagi na możliwość dość daleko posuniętej analogii, i takie opracowania, w których podnosi się problemy przemian fazowych w metalach. Aczkolwiek problematykę tę charakteryzuje zasadniczo odmienny obszar odniesień aplikacyjnych, to jednak elementem analogii jest fakt, że gęstość mediów podlegających przemianom fazowym daje się jednoznacznie opisać malejącą funkcją temperatury, albowiem w grupie mediów najbardziej interesujących ze względu na perspektywę ich wykorzystania w urządzeniach do magazynowania energii drogą przemian fazowych nie stwierdzono naruszenia tej tendencji.

Poniższe rozważania ogranicza się do analizy opisu procesów transportowych podczas zestalania, które jest właściwe cykлом roboczym rozładowania jednostek

magazynujących. Drogą efektywnego pozyskiwania efektu cieplnego wywiązującego się w trakcie przemiany fazowej typu faza ciekła \rightarrow faza stała następuje przekazywanie zgromadzonej energii do układu zewnętrznego odbiornika. Istotne jest przy tym to, że zestalanie – w zamierzeniach konstrukcyjnych – całkowicie rządzi pracą magazynu. W związku z tym uzasadnione jest marginesowe traktowanie możliwości ewentualnego pozyskiwania energii zgromadzonej przy wykorzystaniu ciepła właściwego medium, a to wskutek znacznego spadku temperatury medium akumulującego poniżej temperatury przemiany fazowej. Siłą napędową procesów zestalania jest spadek temperatury aktywnych cieplnie elementów magazynu poniżej temperatury przemiany fazowej. W efekcie następuje pokrywanie się tych elementów zestaloną substancją akumulującą o zmiennej w czasie zajętości, i to niezależnie od charakteru zmian siły wymuszającej. Istotne dla opisu tych zagadnień jest zatem ilościowe ujęcie niekonwekcyjnego transportu w kształtującej się fazie stałej, uwzględniające sprzężone z nim procesy transportowe zachodzące w sąsiadującej fazie ciekłej (odseparowanej myślowo poprzez ewoluującą granicę rozdziału).

W niniejszej analizie przedstawia się aktualny stan wiedzy w zakresie opisu ilościowego, opartego na prostych formułach algebraicznych pozyskiwanych drogą wielowariantowych eksperymentów bądź też obliczeń numerycznych. Wiele miejsca poświęca się także ocenie dostępnej wiedzy o charakterze jakościowym, jako że wciąż istnieją poważne luki w rozeznaniu rozważanego problemu.

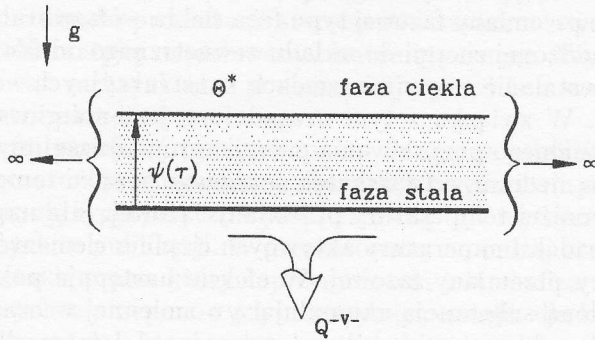
W pierwszej kolejności analizuje się jednostkowe procesy zestalania w magazynach o konfiguracji zewnętrznej, a następnie w magazynach o konfiguracji wewnętrznej.

2.1. Płyta pozioma (powierzchnia schładzająca skierowana do dołu)

Najprostszym wariantem jednostkowego procesu rozładowania magazynu jest zestalanie na usytuowanej poziomo płycie nieograniczonej. Dla uściślenia analizy zagadnienia przyjmuje się, że płyta, na której odbywa się odbiór energii, stanowi – zgodnie ze schematycznym rys. 1 – dolną powierzchnię nieograniczonego obszaru wypełnionego medium akumulującym.

Brak ścianek ograniczających umożliwia zredukowanie problemu do analizy transportu między dwiema równoległymi płytami usytuowanymi poziomo, z których jedna propaguje w głąb medium zmieniającego fazę. Górna powierzchnia (granica rozdziału faz ψ) jest w tym procesie zestalania cieplejsza od dolnej. W rozważanej konfiguracji zewnętrznej, której przyporządkowuje się symboliczne oznaczenie $F_{H(1)}$, warstwy płynu o mniejszej gęstości znajdują się więc ponad warstwami o większej gęstości. Można zatem przyjąć, że układ jest stabilny ze względu na przenoszenie konwekcyjne.

Tak długo jak długo układ pozostaje stabilny konwekcyjnie, słuszne jest założenie o przewodzeniu jako o jedynym mechanizmie transportu. Opis ilościowy zjawiska sprowadza się zatem do jednowymiarowego przestrzennie zagadnienia niestacjonarnego przewodzenia w niejednorodnym, ze względu na parametry termofizyczne, ośrodku z propagującą granicą rozdziału faz. Równania bilansu ener-

Rys. 1. Zestalenie w konfiguracji zewnętrznej $F_{H(1)}$

gii, formułowane odpowiednio dla fazy stałej i fazy ciekłej, mają postać:

$$\partial_t \Theta_1 = a_{(1)} \cdot \partial_{xx}^2 \Theta_1, \quad 0 < x < \psi(t), \quad (1)$$

$$\partial_t \Theta_2 = a_{(2)} \cdot \partial_{xx}^2 \Theta_2, \quad x > \psi(t). \quad (2)$$

Przyjęto tu, i konsekwentnie w dalszej części pracy, następujący sposób indeksacji:

- dolny indeks cyfrowy 1 wskazuje – w przypadku wielkości polowych (np. temperatury Θ) – na obszar wypełniony fazą stałą a indeks 2 na obszar wypełniony fazą ciekłą,
- dolny indeks cyfrowy ujęty w nawias odnosi się do parametrów termofizycznych, przy czym odpowiednio: (1) – fazy stałej, (2) – fazy ciekłej.

Równaniom (1) i (2) przyporządkowuje się adekwatne warunki początkowo-brzegowe oraz – właściwy zagadnieniom z przemianą fazy – uzupełniający warunek sprzęgający [2]

$$\lambda_{(1)} \cdot \partial_x \Theta_1 |_{x=\psi} - \lambda_{(2)} \cdot \partial_x \Theta_2 |_{x=\psi} = \rho_{(1)} \cdot \Delta h^* \cdot d_t \psi. \quad (3)$$

Poprawność założenia o "czystym przewodzeniu" w konfiguracji zewnętrznej $F_{H(1)}$ została potwierdzona przez Hale'a i Viskantę [6]. Wniosek taki sformułowali oni w oparciu o liczne analizy o charakterze porównawczym, które obejmowały konfrontację rezultatów badań eksperymentalnych przeprowadzonych z medium w postaci n-oktadekanu (o czystości 99%) z wynikami obliczeniowymi uzyskanymi w oparciu o rozwiązania tzw. modelu Neumanna procesu zestalania. Przypomnijmy, że mianem tym określa się zagadnienie początkowo-brzegowe (1) ÷ (3), w którym temperatura ścianki Θ_W pozostaje ustalona. Model ten należy do tych nielicznych opisów ilościowych, które są rozwiązywalne analitycznie [23]. Rozkład temperatury w fazie stałej i ciekłej oraz zmienność w czasie położenia granicy rozdziału

faz $\psi(t)$ opisują zatem stosunkowo proste formuły algebraiczne.

Hale i Viskanta – formułując pozytywną ocenę założenia o "czystym przewodzeniu" – oparli się na kryterium, w którym brano pod uwagę wyznaczone numerycznie oraz pomierzone: położenia granicy rozdziału faz i temperatury w różnych punktach badanego obszaru (w szerokim zakresie zmienności tzw. liczby Stefana – Ste). Liczba ta jest definiowana jako miara stosunku zdolności układu do akumulacji energii przy wykorzystaniu ciepła właściwego do zdolności układu do akumulacji energii przy wykorzystaniu efektu cieplnego przemiany fazowej. Definicja liczby Stefana w konfiguracji zewnętrznej $F_{H(1)}$ przyjmuje następującą postać:

$$Ste_{(1)} = c_{(1)} \cdot (\Theta^* - \Theta_W) \cdot (\Delta h^*)^{-1}, \quad (4)$$

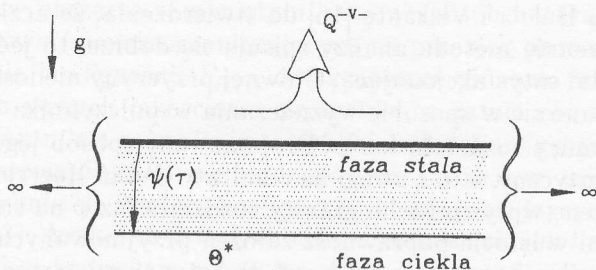
przy czym dolny indeks (1) podkreśla odniesienie jej do fazy stałej.

W wyniku badań obejmujących rozległy zakres zmienności Ste stwierdzono, że :

- opis ilościowy procesu zestalania formułowany na gruncie równań (1) ÷ (3) dostarcza – dla bardzo wczesnych stadiów zjawiska – wyników leżących powyżej danych eksperymentalnych, co generalnie tłumaczone jest wpływem zróżnicowania gęstości w poszczególnych stanach skupienia,
- zgodność wyników eksperymentalnych i obliczeniowych jest idealna dla późniejszych stadiów procesu zestalania.

2.2. Płyta pozioma (powierzchnia schładzająca skierowana do góry)

Doskonała zgodność prostego opisu ilościowego procesu zestalania w konfiguracji zewnętrznej $F_{H(1)}$ zainspirowała – w naturalny sposób – szereg podobnych badań i takich układów, w których, choćby na mocy intuicyjnie formułowanych argumentów, istnieje możliwość wystąpienia innych niż przewodzenie mechanizmów przenoszenia w obszarze wypełnionym medium akumulującym. Rys. 2 przedstawia zestalanie w konfiguracji zewnętrznej $F_{H(2)}$, które stanowi oczywiste odwrócenie zestalania w konfiguracji $F_{H(1)}$, a to ze względu na kierunek oddziaływania jednorodnego pola grawitacyjnego g .



Rys. 2. Zestalanie w konfiguracji zewnętrznej $F_{H(2)}$

Elementy płynu w fazie ciekłej bezpośrednio przyległe do granicy rozdziału faz ψ są w tym układzie "zimniejsze" od elementów płynu w objętości poniżej tej granicy. Różnice gęstości tych elementów mogą prowadzić do zainicjowania konwekcji naturalnej. Ten intuicyjnie oczywisty fakt sprowokował prace o charakterze porównawczym. W [6] skonfrontowano dane eksperymentalne dla n-oktadekanu z wynikami symulacji numerycznej bazującej na modelu Neumanna (1)÷(3). Porównanie tak obliczonych i pozyskanych eksperymentalnie czasowych zmian położenia granicy rozdziału faz ψ wykazało, że:

- zgodność wyników jest stosunkowo dobra dla małych liczb Stefana $Ste = 0.0354$), przy czym dane eksperymentalne lokują się nieco poniżej (o ok. 2%) danych obliczeniowych,
- dane eksperymentalne lokują się już jednak znacznie poniżej (o $\sim 30\%$) wyników obliczeniowych dla większej liczby Stefana $Ste (= 0.0734)$.

Jedynym uzasadnieniem tych rozbieżności jest oddziaływanie w postaci konwekcji naturalnej, którego wpływ zanika dla $Ste \rightarrow 0$.

Poczynione w [6] obserwacje doprowadziły jednak do stwierdzenia, że rozkład temperatury w fazie stałej może być – w rozważanej konfiguracji $F_{H(2)}$ – opisany równaniem (1) w całym rozważanym przedziale czasowym. Zgoła odmienny charakter zachowań przejawiany jest przez fazę ciekłą. Otóż okazało się, że w płynie – po przekroczeniu tzw. krytycznej liczby Rayleigha – będzie obowiązywała stała temperatura Θ , właściwa przenoszeniu konwekcyjnemu w warunkach w pełni rozwiniętej warstwy przyściennej. Jednak skutecznym rozwiązaniem problemu, któremu właściwe jest wyraźne i jednoznaczne zorientowanie siły napędowej, okazała się modyfikacja równania bilansu energii (3) na granicy rozdziału faz ψ do postaci

$$\lambda_{(1)} \cdot \partial_x \Theta_1 |_{x=\psi} + \alpha^* \cdot (\Theta^* - \Theta_0) = \rho_{(1)} \cdot \Delta h^* \cdot d_t \psi, \quad (5)$$

przy czym α^* jest współczynnikiem wymiany konwekcyjnej, który może być pozyskany, np. w oparciu o korelację dla konwekcyjnego przenoszenia między dwiema równoległymi płytami.

Konfrontacja wyników obliczeń symulacyjnych z rezultatami badań eksperymentalnych skłoniła Hale'a i Viskantę [16] do stwierdzenia, że aczkolwiek jednowymiarowa przestrzennie metoda analizy spisuje się dobrze, to jednak nie może być uznana za w pełni satysfakcjonującą. Główną przyczyną niedoskonałości tego podejścia dopatrywano się w sposobie wyznaczania współczynnika wymiany konwekcyjnej α^* na granicy rozdziału faz ψ . Proponowany sposób jego wyznaczania wydaje się problematyczny, a to z uwagi na rezultaty badań Heertjesa i in. [24] zorientowanych na ocenę wpływu ruchu granicy rozdziału faz ψ na transport ciepła. Zakwestionowali oni w istocie poprawność założeń przyjmowanych przy precyzowaniu sposobu określania współczynnika α^* . Substancjami testowymi były przy tym cycloheksan i paraksylen, a zatem substancje z kręgu potencjalnych mediów magazynujących. Dane eksperymentalne ilustrujące przebieg procesów zestalania

zaprezentowano w formie wykresów, na których pokazano stosunek liczby Nusselta przy istnieniu ruchomej granicy rozdziału faz ψ do liczby Nusselta przy nieruchomej granicy. Jeśli wyeliminuje się wpływ takich czynników, jak:

- efektu przechłodzenia substancji (spalniającego proces),
- błędów wynikających z niedokładności oszacowania wartości parametrów termofizycznych,
- założenia o liniowym rozkładzie temperatury,

to możliwa jest identyfikacja wyraźnego oddziaływania przemieszczania się ruchomej granicy w porównaniu do przypadku, w którym granica ta jest nieruchoma.

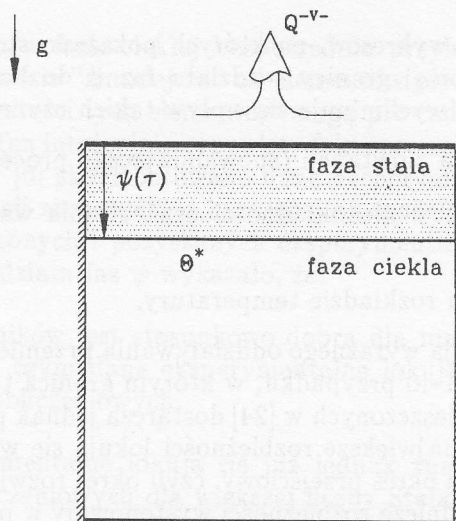
Analiza wykresów zamieszczonych w [24] dostarcza jednak przesłanek dla sformułowania postulatu, że największe rozbieżności lokują się w tych przedziałach czasowych, które obejmują okres przejściowy, czyli okres rozwijania się konwekcji naturalnej. Ponieważ zasadnicze rozbieżności występowały w pierwszych stadiach ewolucji zestalania, to być może, że Heertjes i in. rejestrowali skutki następującej skokowo zmiany gęstości fazy ciekłej i stałej. Wydaje się, że problem ten wymaga jednak odrębnych badań.

Zagadnienia początkowo-brzegowe z warunkiem zszycia sformułowanym w postaci (5) należą już – niestety – do klasy zagadnień nierozwiązywalnych analitycznie. W przypadku sformułowań ograniczonych do 1D mogą być one stosunkowo łatwo rozwiązane za pomocą znanych i dobrze opracowanych metod rachunku przybliżonego. Obszerny przegląd stosownej literatury można znaleźć np. w [25] i [26].

2.3. Zasobnik z aktywnymi ściankami poziomymi (odbiorem ciepła na ścianie górnej) i idealnie zaizolowanymi cieplnie ściankami pionowymi

Powyżej skomentowane konfiguracje zewnętrzne zestalania $F_{H(1)}$ i $F_{H(2)}$ stanowią pewien rodzaj idealizacji rzeczywistych procesów zestalania, albowiem te ostatnie, czy też eksperymentalnie realizowane badania, muszą siłą rzeczy przebiegać w obszarze "wyciętym" z otoczenia. Wyniki badań przedstawione w [6] dotyczą – w istocie – przebiegu procesu z przemianą fazy w testowej celce o kształcie prostopadłościanu. W związku z tym ma się do czynienia ze zjawiskami zachodzącymi w obszarze zamkniętym, co – w sposób naturalny – rodzi pytanie dotyczące wpływu ścianek ograniczających na przebieg procesów przenoszenia.

Uzupełnienie konfiguracji $F_{H(1)}$ o usytuowane pionowo ścianki ograniczające nie wprowadza nowych jakościowo elementów, a zatem nie wymaga odrębnego komentarza. Natomiast zaistnienie takich ścianek w konfiguracji $F_{H(2)}$ może prowadzić do generowania całkowicie odmiennych jakościowo procesów. Z tego też względu wyodrębnia się tę nową konfigurację i nada jej symboliczne oznaczenie $F_{H(3)}$ (rys. 3). Aczkolwiek wpływ oddziaływania ścianek bocznych, zwłaszcza w zagadnieniach z konwekcją naturalną, był – jak dotąd – przedmiotem jedynie nielicznych publikacji, to jednak na ich podstawie można sformułować wiarygodny opis o charakterze jakościowym.

Rys. 3. Zestalenie w konfiguracji wewnętrznej $F_{H(3)}$

Gau i Viskanta [5] zrealizowali np. odpowiednie badania dla substancji o liczbie Prandtla $Pr > 1$. Ich eksperymenty obejmowały przy tym wizualizację zestalania n-oktadekanu. Dostarczyły one jakościowych informacji odnośnie przepływu płynu generowanego przez konwekcję naturalną oraz jego oddziaływania na kształt oraz ruch granicy rozdziału fazy ciekłej i stałej.

Nieco później Gau i Viskanta [27] przeprowadzili analogiczne badania dla substancji o liczbie Prandtla $Pr < 1$. Wpływ konwekcji naturalnej na ruch granicy rozdziału fazy ciekłej i stałej w procesach przemian fazowych analizowano bowiem na przykładzie czystego metalu (galu). Zarejestrowanym rozkładom temperatury oraz ich fluktuacjom przyporządkowano przy tym rolę jakościowego wskaźnika reżimów naturalnej konwekcji oraz struktur przejścia fazowego. Fotografie morfologii granicy rozdziału fazy ciekłej i stałej, wykonane po usunięciu wytopionej warstwy z testowej celki, wykazują skomplikowaną, zależną od czasu, strukturę przepływu w fazie ciekłej.

W oparciu o wizualizację przepływu stwierdzono, że konwekcja naturalna w fazie ciekłej jest obecna już od pierwszych chwil po zainicjowaniu procesu zestalania. W początkowej już fazie tego zjawiska ma się bowiem do czynienia z indywidualnym opadaniem od schładzanej płyty górnej wielu schłodzonych elementów płynu i ich przemieszczaniem się w kierunku każdej z pionowych ścian ograniczających. Następnie wiele ogrzanych elementów płynu przemiesza się od dolnej ścianki zasobnika w kierunku centralnego rejonu obszaru wypełnionego fazą ciekłą. Po dłuższym okresie trwania tego procesu uwalniania obserwuje się ostatecznie wolne oscylacje (od prawej do lewej strony i przypominające dym/pióropusz) ogrzanych elementów płynu w centralnym obszarze komórki, którym towarzyszy opadanie schłodzonych elementów płynu wzdłuż ścianek zasobnika. Finałnym

efektem tego stadium "rozruchu" procesu jest generowanie się dobrze ukształtowanej pary dwuwymiarowych przestrzennie komórek cyrkulacyjnych z osiami obrotu prostopadłymi do płaszczyzny rysunku (w eksperymencie – prostopadłymi do dłuższego wymiaru testowego zasobnika). Komórki te były symetryczne i występowały podczas całego przebiegu procesu zestalania. Ta trwałość komórek konwekcyjnych, niezależnie od permanentnie zmienianego stosunku wymiarów geometrycznych zasobnika, może być przypisywana stabilizującemu oddziaływaniu frontu zestalania. W [5] i [27] uznano więc, że granica rozdziału faz ψ przemieszcza się – w procesie zestalania – w kierunku obszaru wypełnionego fazą ciekłą z efektem podobnym do zasysania przepływu ku granicy. Efekt ten stabilizuje charakter przepływu.

Cyrkulacja elementów płynu powoduje jednak w ogólności to, że podczas kolejnych stadiów zestalania ma się do czynienia z granicą rozdziału faz ψ , która staje się wklęsła ku fazie stałej. Konwekcja naturalna w fazie ciekłej nie tylko znacząco zmniejsza intensywność przebiegu zestalania lecz ostatecznie powstrzymuje ewolucję procesu.

Jednocześnie w wyniku komentowanych badań stwierdzono, że zmierzone (uśrednione) oraz obliczone (w oparciu o powyżej omówione sformułowanie "konwekcyjne" w ramach 1D) położenia granicy rozdziału faz ψ wykazują dobrą zgodność.

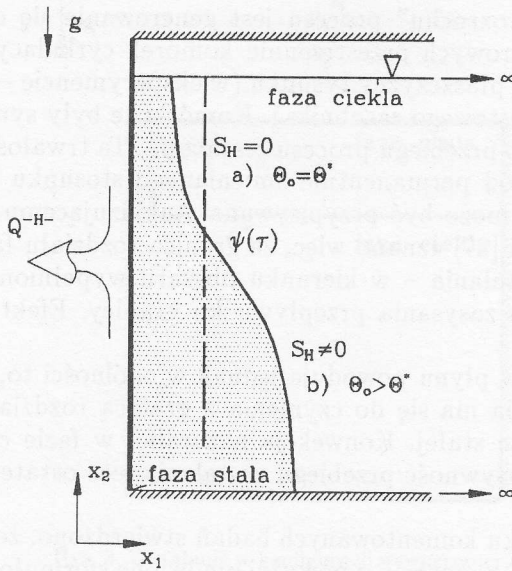
2.4. Półograniczona płyta pionowa

W sytuacji, w której schładzana powierzchnia idealizowana do postaci płyty nieskończonej, jak to ma miejsce np. w konfiguracji $F_{H(1)}$, zostanie usytuowana pionowo, to wówczas intuicyjnie formułowane kryteria o ruchu elementów płynu w fazie ciekłej przestają już być tak oczywiste.

Analiza jednostkowego procesu zestalania na nieograniczonej płycie pionowej stanowiła – jak się wydaje – pierwszą próbę oceny wzajemnego oddziaływania konwekcji naturalnej i narastającej w czasie warstwy zestalanej substancji. Badanie procesu zestalania w takiej właśnie konfiguracji zewnętrznej (indeksowanej dalej – zgodnie z rys. 4 – jako $F_{V(1)}$) było przedmiotem rozważań Lapaduli i Muellera [28].

Na drodze analitycznej wyznaczyli oni czaso-przestrzenne rozkłady zestalanej fazy dla przypadku, w którym procesy przenoszenia są opisywane w ujęciu, uwzględniającym wzajemnie sprzężone oddziaływania fazy stałej i ciekłej oraz przenoszenie mechanizmem konwekcji naturalnej. Lapadula i Mueller wykazali, że problem ten – pod pewnymi warunkami [28] – może być rozpatrywany jako złożenie jednowymiarowego przestrzennie procesu nieustalonego przewodzenia oraz dwuwymiarowego przestrzennie quasi-ustalonego zjawiska konwekcji naturalnej. Z [28] nie wynikają jednak ogólne przesłanki dla sformułowania zależności przydatnych w praktyce inżynierskiej.

Potwierdzeniem sprzężonego charakteru procesów przenoszenia w konfiguracji $F_{V(1)}$ były wyniki badań interferometrycznych przeprowadzonych przez Van Burena i Viskantę [3]. Badania te miały jednak dość ograniczony zakres i dlatego nie stały się źródłem ogólnego przepisu o charakterze ilościowym.

Rys. 4. Zestalenie w konfiguracji zewnętrznej $F_{V(1)}$

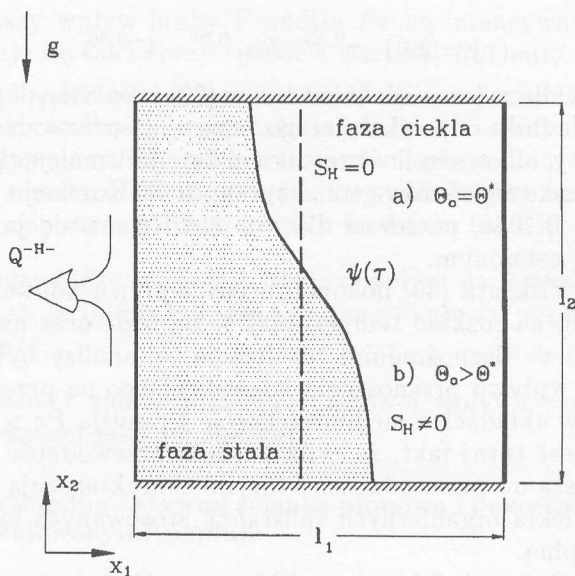
2.5. Półograniczone płyty pionowe

Komplementarnie w stosunku do badań Lapaduli i Muellera [28] należy usytuować problematykę podniesioną przez Ramachandrana i in. [29]. Badali oni bowiem transport ciepła w fazie ciekłej i stałej oraz w ścianie formy, przy czym w zasadzie ograniczyli się do analizy procesów zestalania zachodzących pomiędzy nieskończonymi płytami pionowymi. Wyniki uzyskane przez Ramachandrana i in., a zwłaszcza ocena wpływu gradientów temperatury na formowanie się profilu prędkości w fazie ciekłej medium zmieniającego fazę (przy stałej temperaturze oraz konwekcyjnej wymianie na zewnętrznej powierzchni formy), należy jednak traktować jako interesujące w kategorii przybliżenia zerowego.

2.6. Zasobnik o aktywnych ściankach pionowych i idealnie zaizolowanych cieplnie ściankach poziomych

Układ o takiej konfiguracji wewnętrznej jest reprezentowany przez zasobnik o przekroju prostokątnym, którego górna i dolna ścianka jest doskonale zaizolowana cieplnie. Natomiast jego boczne (pionowe) ścianki są utrzymywane w stałych, ale różnych temperaturach. Sytuację taką pokazano na schematycznym rys. 5, przy czym rozważanej konfiguracji przyporządkowano oznaczenie $F_{V(2)}$.

Jest rzeczą oczywistą, że jeśli stała temperatura ścianki "gorącej" $\Theta_{W(R)}$ jest równa teoretycznej temperaturze przemiany fazowej (również w chwili początkowej procesu), to wówczas analiza zjawiska może być zredukowana do badania jedynie "czystego przewodzenia".



Rys. 5. Zestalenie w konfiguracji wewnętrznej $F_{V(2)}$

Wpływ konwekcji naturalnej na przebieg procesu zestalania w konfiguracji $F_{V(2)}$ ujawnia się wtedy, gdy $\Theta_{W(R)} > \Theta^*$. Proces zestalania w warunkach wstępnego przegrzania fazy ciekłej był przedmiotem eksperymentalnych i numerycznych badań Wolffa i Viskanty [30]. Jako testowe medium przyjęto cynę (o czystości 99.99%), dla której liczba Prandtla $Pr = 0.011$. Zakres badań obejmował $A = [0.75, 1.0]$ i $Ste_{(1)} = [0.0132, 0.0269]$, przy czym $A = l_2/l_1$ jest stosunkiem wymiarów geometrycznych zasobnika. Miarą przegrzania fazy ciekłej, ujmowanego dalej konsekwentnie poprzez parametr S_H , była liczba Rayleigha, którą zdefiniowano następująco:

$$S_H \rightarrow Ra_1 = \frac{g \cdot \beta \cdot (\Theta_{W(L)} - \Theta^*) \cdot l_1^3}{a \cdot \nu} \in (1.5 \cdot 10^5 \div 3.2 \cdot 10^5), \quad (6)$$

przy czym w jej oznaczeniu wprowadzono dolny indeks cyfrowy stosownie do indeksacji osi układu współrzędnych (1 – szerokość przekroju poprzecznego zasobnika, 2 – wysokość), a to dla wyraźnej identyfikacji charakterystycznego wymiaru liniowego.

Rezultaty badań eksperymentalnych, które zaprezentowano w [30], umożliwiły przede wszystkim opracowanie zależności opisującej intensywność przebiegu procesu zestalania w konfiguracji $F_{V(2)}$. Wolff i Viskanta przyjęli bowiem całkową miarę zmian w czasie udziału fazy stałej określoną jako

$$\chi_{1(0)}(\tau) = v_1(\tau)/v_{(0)}, \quad (7)$$

gdzie: v_1 – objętość fazy stałej, $v_{(0)}$ – objętość wypełniona medium w chwili początkowej, i określili – posługując się nieliniową regresją – bardzo użyteczną

formułę

$$\chi_{1(0)}(\tau) = 2.91 \cdot \tau^{0.53} \cdot Ra_1^{-0.05} \cdot A^{-0.36}. \quad (8)$$

Widać, że wykładnik dla τ (czas zdefiniowano w [30] jako $Ste_{(1)} \cdot Fo_{(1)}$) jest bardzo zbliżony do wykładnika odpowiadającego "czystemu przewodzeniu", a wpływ Ra_1 i A jest oczywisty, albowiem ilość zestalonej fazy jest malejącą funkcją liczby Rayleigha Ra i stosunku wymiarów geometrycznych A . Korelacja (8) jest jednak ograniczona do $\tau \leq 0.1076$, ponieważ dla $\tau > 0.1076$ ma się już do czynienia wyłącznie ze stanem ustalonym.

Ponadto Wolff i Viskanta [30] dokonali oceny wpływu konwekcji naturalnej w fazie ciekłej metalu na rozkład temperatury w tej fazie oraz na kształt i ruch granicy rozdziału faz ψ . Bezpośrednim rezultatem tej analizy było stwierdzenie znacznie mniejszego wpływu przenoszenia konwekcyjnego na przebieg zestalania niż to obserwowano w układach z medium o liczbie Prandtla $Pr > 1$. Decydujący – jak się wydaje – jest tutaj fakt, że cyna posiada przewodność cieplną o dwa rzędy wielkości większą od przewodności, którymi charakteryzują się np. typowe ciecze czy też faza ciekła organicznych substancji stosowanych jako media akumulujące energię cieplną.

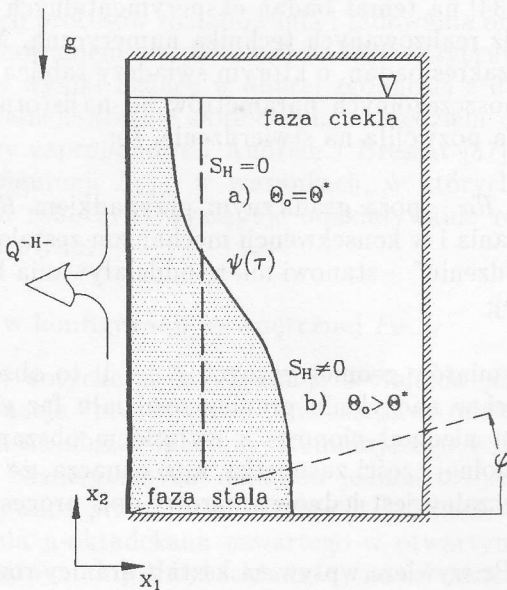
Zestalanie w konfiguracji $F_{V(2)}$, przy $\Theta_{W(R)} > \Theta^{(*)}$, prowadzi zatem nieuchronnie do powstania stanu ustalonego. Kwestia opisu zagadnień transportowych w warunkach stacjonarnych została szczegółowo przebadana przez Shyy'ego i Chena [31,32]. Przedmiotem ich analizy był zasobnik o przekroju kwadratowym ($A = 1$), dla którego zrealizowano szereg obliczeń numerycznych. Zmieniając w szerokim zakresie liczby: Rayleigha ($Ra = 10^3 \div 10^7$), Prandtla ($Pr = 10^{-1} \div 10^3$) i Stefana ($Ste = 0.2 \div 2.0$) stwierdzono, że w rozważanej konfiguracji $F_{V(2)}$:

- liczba Rayleigha Ra znacząco oddziałuje na procesy przenoszenia, przy czym wraz z jej wzrostem:
 - wzrasta rozmiar komórek konwekcyjnych powodując zarazem relatywnie większe zakłócenia kształtu granicy rozdziału faz, a położenie maksymalnej wartości funkcji prądu przesuwa się w kierunku fazy stałej, przy czym pojawia się potencjalna możliwość wystąpienia dwóch stref cyrkulacji (dla większych liczb Ra i $Pr > 1$),
 - oraz ze wzrostem liczby Stefana Ste zwiększa się wrażliwość maksymalnej wartości funkcji prądu oraz liczby Nusselta na zmianę liczby Prandtla;
- liczba Prandtla Pr oddziałuje na przebieg procesów przenoszenia w sposób nadzwyczaj złożony, przy czym:
 - mniejsze wartości Pr powodują – przy stałej wartości Ra – wzrost intensywności konwekcji (z jednoczesnym "wygładzeniem" pola temperatury)
 - charakterystyka transportu jest mało wrażliwa na liczbę Prandtla Pr , ale wtedy, gdy jest ona duża ($Pr > 1$), albowiem wrażliwość ta zaczyna być znacząca w przypadku $Pr < 1$,

- większy wpływ liczby Prandtla Pr na intensywność konwekcji odnotowuje się także przy wzroście wartości Ra ,
- w ogólności interesujące jest to, że zmiana liczby Prandtla nawet o pięć rzędów wielkości – przy założeniu: $Pr > 1$ – jedynie umiarkowanie oddziałuje na natężenie transportu ciepła oraz intensywność konwekcji (ale z zastrzeżeniem, że oddziaływanie to jest bardziej istotne w odniesieniu do morfologii granicy rozdziału faz ψ);
- liczba Stefana Ste wykazuje istotny wpływ na kształt granicy rozdziału faz ψ z tym, że oddziaływanie to intensyfikuje się w przypadku mniejszych wartości Ste ;
- temperaturowy zakres przemiany fazowej wpływa zaś tak na lokalizację strefy mieszanej jak i jej zajętość.

2.7. Zasobnik z jedną aktywną ścianką pionową i pozostałymi ściankami idealnie zaizolowanymi cieplnie

Odizolowanie cieplne od otoczenia jednej ze ścianek pionowych w konfiguracji $F_{V(2)}$ formuje najbardziej reprezentatywny wariant modelowego ujęcia jednostkowych procesów rozładowania magazynu o geometrii prostokątnej. Na rys. 6 pokazano schematycznie zasobnik, którego jedna ze ścianek pionowych jest aktywna ze względu na wymianę, a wszystkie pozostałe ścianki są doskonale zaizolowane cieplnie (bądź też stanowią płaszczyznę symetrii).



Rys. 6. Zestawienie w konfiguracji wewnętrznej $F_{V(3)}$

Tablica 1.

Zestawienie zakresu badań w konfiguracji wewnętrznej $F_{V(3)}$.

Rodzaj warunków brzegowych	Zakres zmienności parametrów w badaniach rozładowania magazynu w konfigur. $F_{V(3)}$					Pozycja bibliograf.
	A	Ra	Pr	$Ste_{(1)}$	S_H	
I	1.1 ÷ 5.5	$5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^5$	$10^{-1} \div 10^2$	0.123 ÷ 0.98	$0.67 \div 2.23^{1)}$	[33] ²⁾
	2.5 ÷ 3.5		> 50		0.32 ÷ 0.83	[34]
	11.0	$\sim 1 \cdot 10^9$	67	~ 0.3	~ 0.3	[35], [36]
III	40.0	-	-	0.13 ÷ 0.21	0.07 ÷ 0.22	[37]

¹⁾ zgodnie z definicją (9); ²⁾ definicja liczby Ra wydaje się wątpliwa, ponieważ przyjęto, że $\Delta\Theta = \Theta_0 - \Theta_{W(L)}$, tzn. siłę napędową występującą w całym zasobniku (z uwzględnieniem fazy stałej)

Tej konfiguracji wewnętrznej przyporządkowano symboliczne oznaczenie $F_{V(3)}$. Potwierdzeniem dużego zainteresowania poprawnym opisem zestalania w konfiguracji $F_{V(3)}$ jest realizacja szeregu badań, których zakres przedstawia tablica 1. W [33] rozpatrzono niustalone procesy zestalania, którym towarzyszy konwekcja naturalna w fazie ciekłej. W pracy tej – mimo oczywistych skojarzeń ze skrótowym komunikatem [34] na temat badań eksperymentalnych – zawarto jednak wyłącznie wyniki analiz realizowanych techniką numeryczną. Niewątpliwym walem [33] jest szeroki zakres badań, o którym świadczy tablica 1. Systematyczna analiza [33] wpływu poszczególnych parametrów na najistotniejsze charakterystyki procesu zestalania pozwoliła na stwierdzenie, że:

- liczba Rayleigha Ra – poza granicznym przypadkiem $Ra = 0$, w którym brak jest przegrzania i w konsekwencji mechanizm zestalania oparty jest na "czystym przewodzeniu" – stanowi miarę oddziaływania konwekcji naturalnej w fazie ciekłej;
- jeśli stosunek wymiarów geometrycznych $A \rightarrow 1$, to obserwowane są duże nierównomierności w nachyleniu granicy rozdziału faz ψ , a jeśli $A \rightarrow \infty$, to granica ta jest nieomal pionowa z wyjątkiem obszarów położonych w pobliżu górnej i dolnej części zasobnika, a to oznacza, że w przypadku tym ($A \rightarrow \infty$) dopuszczalny jest jednowymiarowy opis procesu zestalania;
- liczba Prandtla Pr wywiera wpływ na kształt granicy rozdziału faz ψ , przy czym wraz z jej wzrostem następuje zwiększanie się nierównomierności w przemieszczaniu się granicy ψ względem ścianki pionowej z tym, że wpływ ten zanika po przekroczeniu $Pr = 10.0$;

- liczba Stefana Ste determinuje w dużym stopniu tempo przebiegu zestalania, tzn. proces przebiega tym szybciej, im wartość Ste jest mniejsza;
- intensywność procesu zestalania jest zaś, ogólnie rzecz biorąc, malejącą funkcją parametru S_H określonego wzorem

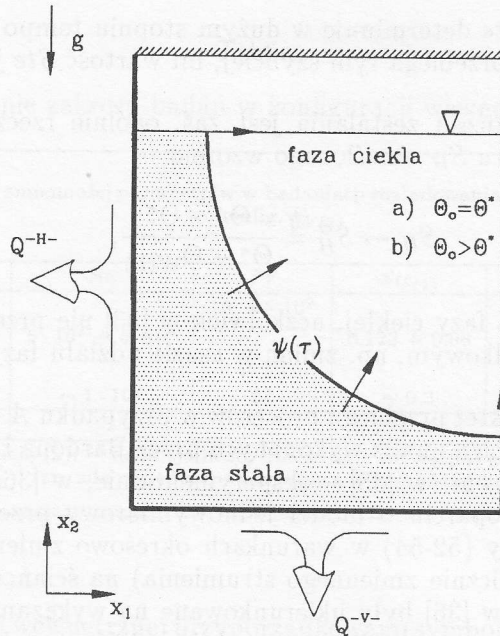
$$S_H \rightarrow S_H^\Theta \stackrel{df}{=} \frac{\Theta_0 - \Theta^*}{\Theta^* - \Theta_{W(L)}}, \quad (9)$$

czyli przegrzania fazy ciekłej, aczkolwiek w [33] nie przedstawiono danych o charakterze całkowym, np. zmian w czasie udziału fazy stałej $(1 - \chi)$.

Uwypuklony charakter przebiegu procesów w przypadku $A \rightarrow \infty$ znalazł pełne potwierdzenie w wynikach analiz wykonanych przez Bardona i in.[35] oraz Delaunay'a i in.[36]. Badali oni (w [35] – eksperymentalnie, w [36] – eksperymentalnie i numerycznie w oparciu o model jednowymiarowy przestrzennie) procesy zestalania cytoparafiny (52-54) w warunkach okresowo zmiennej intensywności wymiany energii (cyklicznie zmiennego strumienia) na ściance pionowej. Eksperymenty analizowane w [36] były ukierunkowane na wykazanie istoty i roli różnych mechanizmów transportu ciepła w trakcie kolejnych cykli ładowania i rozładowania. Badano więc okresowo zmienną kinetykę transportu energii pomiędzy prostopadłościennym zasobnikiem wypełnionym materiałem zmieniającym fazę i układem zewnętrznym. Delaunay i in.[36] przedstawili także jednowymiarowy przestrzennie model, który – mimo złożonych uwarunkowań w postaci cyklicznie przebiegających procesów rozładowania i ładowania oraz silnych nieliniowości związanych z zachowaniem się parametrów termofizycznych materiału zmieniającego fazę – daje wyniki będące w dobrej zgodności z danymi pozyskanymi na drodze doświadczalnej. Równie skutecznym narzędziem okazał się jednowymiarowy model, który zaproponowali Andrieu i Bressat [37]. Rozważali oni proces zestalania w konfiguracji $F_{V(3)}$ w warunkach, w których na ściance zasobnika omywanej płynem roboczym występuje oddziaływanie rozłożone w czasie i na drodze przepływu płynu.

2.8. Zestalanie w konfiguracji wewnętrznej F_{V-H}

Skomentowane dotychczas konfiguracje zestalania przedstawiają sobą proste pojęciowo sytuacje "prototypowe", zwłaszcza w odniesieniu do identyfikacji wpływu otoczenia na obszar medium akumulującego w fazie ciekłej. Rodzajem fuzji powyższych "elementarnych" układów jednostkowych jest konfiguracja wewnętrzna rozpatrywana przez Ho i Viskantę [11]. Przedstawili oni wyniki badań procesów zestalania n-oktadekanu zawartego w otwartym od góry zasobniku o przekroju prostokątnym, który był schładzany na ściankach bocznych i na ściance dolnej. Górna powierzchnia medium zmieniającego fazę była przy tym ograniczona warstwą izolatora (powietrza). Konfigurację tę pokazano schematycznie na rys. 7.

Rys. 7. Zestalenie w konfiguracji wewnętrznej F_{V-H}

Nadano jej symboliczne oznaczenie F_{V-H} . Jest to więc zasobnik, w którym aktywnymi ściankami są: pionowa (lewa) i pozioma (prawa). Natomiast wszystkie pozostałe ścianki są idealnie zaizolowane cieplnie.

Ho i Viskanta skoncentrowali się przede wszystkim na opracowaniu korelacji opisującej, w ujęciu bezwymiarowym, zmienność udziału zestalonej fazy w funkcji czasu. W wyniku szeregu eksperymentów ustalono, że

$$\chi_{1(0)} = \operatorname{erf}(6.39 \cdot \tau_{(1)}^{0.5}). \quad (10)$$

Zależność ta wskazuje wyraźnie na monotoniczny spadek w czasie intensywności przebiegu procesu zestalania, który należy interpretować jako rezultat wzrostu oporu cieplnego fazy stałej.

Zmienność w czasie udziału zestalonej fazy w schładzonym od dołu zasobniku posiadającym pionowe ścianki przewodzące skorelowano równaniem o identycznej formie, ale ze współczynnikiem 5.95 a nie 6.39. Korekta ta wydaje się być całkowicie zgodna z oczekiwaniami i wynika bezpośrednio ze skończonej wartości przewodności cieplnej pionowych ścianek zasobnika.

Zależność (10) wyznaczono przy założeniu, że $S_H = 0$, a zatem dla warunków, w których medium wypełniające obszar zasobnika utrzymywane jest w chwili początkowej w jednorodnej temperaturze Θ_0 równej temperaturze przemiany fazowej Θ^* . Dla oszacowania wpływu przegrzania na ewolucję procesu przedstawiono również [11] rezultaty badań, w których wariantowano głównie wstępne przegrzanie fazy ciekłej, przy czym w kolejnych eksperymentach utrzymywano – w przy-

bliżeniu – te same wartości Ste . W efekcie stwierdzono, że przegrzanie ewidentnie spowalnia proces zestalania w jego stadium początkowym. Jednak w związku z tym, że energia wymagana do schłodzenia płynu do poziomu temperatury przemiany fazowej jest znacznie mniejsza od efektu cieplnego tej przemiany, to obserwowano szybkie dyssypowanie wstępnego przegrzania, a tym samym znaczne osłabienie oddziaływania S_H . W [11] przeanalizowano także wpływ stosunku wymiarów geometrycznych zasobnika na intensywność procesów rozładowania. Jednak z uwagi na wspomniane już niewielkie oddziaływanie przegrzania płynu nie stwierdzono istotnych różnic w przebiegach procesu zestalania w układach o różnej geometrii.

3. Podsumowanie wyników badań procesów zestalania

Powyżej przytoczone wyniki badań eksperymentalnych i analiz obliczeniowych dowodzą jednoznacznie, że charakter procesów transportowych w trakcie rozładowania magazynu z przemianą fazy typu faza ciekła \leftrightarrow faza stała, czyli podczas zestalania medium akumulującego, zdeterminowany jest temperaturowymi warunkami w momencie zainicjowania cyklu. O dominującym charakterze mechanizmów przenoszenia decyduje więc stan początkowy układu, przy czym dające się zaobserwować ich zróżnicowanie zależy od tego, czy:

- temperatura medium znajdującego się w fazie ciekłej jest bliska teoretycznej temperatury przemiany fazowej ($S_H \cong 0$),
- występuje wstępne przegrzanie płynu ($S_H = 0$).

Uzyskane rezultaty dowodzą, że jeśli płyn nie jest przegrzany, to faza stała powstaje zgodnie z opisem opartym na modelu "czystego przewodzenia". Stwierdzenie to, w pełni zgodne z intuicją, jest słuszne dla każdej z rozpatrywanych konfiguracji. Potwierdza ono zarazem zaniedbywalnie małe znaczenie ewentualnego transportu konwekcyjnego generowanego przez skokową zmianę gęstości medium na granicy rozdziału faz. Analiza ilościowa procesów zestalania sprowadza się zatem do badania zagadnień przewodnictwa z przemianą fazy typu faza ciekła \leftrightarrow faza stała, które – jakkolwiek uszczuplone o efekty konwekcyjne – mogą jeszcze stwarzać pewne trudności w układach wielowymiarowych.

Istnienie przegrzania rodzi z kolei potencjalną możliwość wystąpienia konwekcyjnego transportu (mechanizmem konwekcji naturalnej) w fazie ciekłej medium zmieniającego fazę. Transport ten oddziałuje jednak na przebieg zestalania w sposób bardzo zróżnicowany. Niestety, jak do tej pory, nie udało się wprowadzić miary tego zróżnicowania. Można jednak zaproponować podział jednostek magazynujących (z przemianą fazy typu faza ciekła \leftrightarrow faza stała) na układy:

- stabilne konwekcyjnie ($F_{H(1)}$), w których – mimo przegrzania płynu – nie rozwija się konwekcja naturalna ;

- stabilnie stratyfikowane (F_{V-H} , przy czym o stratyfikacji można twierdzić jedynie na podstawie przesłanek o charakterze intuicyjnym (elementy płynu o mniejszej gęstości są położone powyżej elementów o większej gęstości);
- konwekcyjne ($F_{H(2)}, F_{H(3)}, F_{V(1)}, F_{V(2)}, F_{V(3)}$), w których obserwuje się znaczny wpływ konwekcji naturalnej na przebieg procesów zestalania.

Układy stabilnie konwekcyjnie – właściwe dla zagadnień formułowanych w obiektach o geometrii prostokątnej – umożliwiają pozyskiwanie danych ilościowych w oparciu o rozwiązania jednowymiarowych przestrzennie równań przewodzenia z ruchomą granicą. Oznacza to, że – w zasadzie – analiza takich układów nie następuje większych trudności.

Stwierdzono także, że oddziaływanie przegrzania jest również niewielkie w układach stabilnie stratyfikowanych. Konwekcja naturalna w fazie ciekłej odgrywa bowiem umiarkowaną rolę, i to jedynie we wczesnych stadiach przebiegu procesu zestalania, przy czym początkowe przegrzanie fazy ciekłej jest szybko dyssypowane. Wpływ konwekcji naturalnej zanika zaś całkowicie wtedy, gdy przegrzanie jest zredukowane do zera. Transport konwekcyjny w fazie ciekłej zmniejsza więc jedynie umiarkowanie intensywność przebiegu cykli rozładowania. Odbierane ilości energii – zmagazynowanej przy pomocy ciepła właściwego przegrzanej fazy – mogą jednak istotnie kompensować, np. niewielki efekt cieplny przemiany fazowej.

Istnienie przegrzania w układzie konwekcyjnym może mieć – w przeciwieństwie do zestalania realizowanego w układach stabilnych konwekcyjnie i stabilnie stratyfikowanych – istotny wpływ na intensywność przemiany fazowej i kształt nowej fazy. Konwekcja naturalna w fazie ciekłej może przy tym nie tylko silnie oddziaływać na ruch granicy rozdziału faz ψ , ale może go nawet całkowicie powstrzymać.

Interesujący jest również eksperymentalnie obserwowany efekt w postaci kurczenia się fazy stałej [11]. Wzrost gęstości fazy stałej (nowej) w stosunku do gęstości fazy ciekłej (starej) powoduje, że w bezpośrednim sąsiedztwie swobodnej powierzchni fazy ciekłej pojawiają się dwie granice rozdziału: jedna na granicy rozdziału fazy ciekłej i stałej oraz druga na granicy rozdziału fazy gazowej i stałej. W konsekwencji może pojawić się "kożuch", poniżej którego opada faza ciekła i tym samym pozostawia pustą przestrzeń.

Literatura

- [1] Brodowicz K. : *Teoria wymienników ciepła i masy*, PWN, Warszawa, 1982.
- [2] Viskanta R. : *Natural convection in melting and solidification*, in: *Natural Convection Fundamentals and Applications* (edited by Kakac S. , Aung W. and Viskanta R.), Advanced Study Institute Book, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1985.
- [3] Van Buren P. D. and Viskanta R. : *Interferometric observation of natural convection during freezing from a vertical flat plate*, J. Heat Transfer, vol. 102(1980), no. 2, 375-378.
- [4] Van Buren P. D. and Viskanta R. : *Interferometric measurement of heat transfer during melting from a vertical surface*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 23(1980), 568-571.
- [5] Gau C. and Viskanta R. : *Flow visualization during solid-liquid phase change heat transfer, I - freezing in a rectangular cavity*, Int. Comm. Heat Mass Transfer, vol. 10(1983), no. 3, 73-181.
- [6] Hale Jr. N. W. and Viskanta R. : *Solid-liquid phase-change heat transfer and interface motion in materials cooled or heated from above or below*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 23(1980), 283-292.
- [7] Bathelt A. G. and Viskanta R. : *Heat transfer and interface motion during melting and solidification around a finned heat source/sink*, J. Heat Transfer, vol. 103(1981), 720-726.
- [8] Sparrow E. M. and Mendes P. S. : *Natural convection heat transfer coefficients measured in experiments on freezing*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 25(1982), 293-297.
- [9] Ramsey J. W. and Sparrow E. M. : *Melting and natural convection due to a vertical embedded heater*, J. Heat Transfer, vol. 100(1978), 368-370.
- [10] Ramsey J. W. , Sparrow E. M. and Varejao L. M. C. : *Melting about a horizontal row of heating cylinders*, J. Heat Transfer, vol. 101(1979), 732-753.
- [11] Ho C. J. and Viskanta R. : *Experimental study of solidification heat transfer in an open rectangular cavity*, J. Heat Transfer, vol. 105(1983), no. 3, 671-673.
- [12] Ho C. J. and Viskanta R. : *Experimental study of melting in a rectangular cavity*, The Proceedings of the Seventh International Heat Transfer Conference, Munchen, Fed. Rep. of Germany, HEAT TRANSFER - 1982, vol. 2, NC 44, 369-374.

- [13] Marshall R. H. : *Natural convection effects in rectangular enclosures containing a phase-change material*, in: Thermal Storage and Heat Transfer in Solar Energy System (ed. by Kreith F. et al.), ASME, New York, 1978, 61-69.
- [14] Ho C. J. and Viskanta R. : *Heat transfer during inward melting in a horizontal tube*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 27(1984), 705-716.
- [15] Sparrow E. M. and Broadbent J. A. : *Inward melting in a vertical tube which allows free expansion of the phase - change medium*, J. Heat Transfer, vol. 104(1982), 309-315.
- [16] Sparrow E. M. and Broadbent J. A. : *Freezing in a vertical tube*, J. Heat Transfer, vol. 105(1983), 217-225.
- [17] Roy S. K. and Sengupta S. : *A generalized model for gravity-assisted melting in enclosures*, J. Heat Transfer, vol. 112(1990), 804-808.
- [18] Bennon W. D. and Incropera F. P. : *A continuum model for momentum, heat and species transport in binary solid-liquid phase change systems - II. Application to solidification in a rectangular cavity*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 30(1987), no. 10, 2171-2187.
- [19] Vives Ch. and Perry Ch. : *Effects of electromagnetic stirring during the controlled solidification of tin*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 29(1986), no. 1, 21-33.
- [20] Keller J. R. and Bergman T. L. : *Prediction of conjugate heat transfer in a solid-liquid system. Inclusion of buoyancy and surface tension forces in the liquid phase*, J. Heat Transfer, vol. 111(1989), 690-698.
- [21] Fukusako S. and Yamada M. : *Recent advances in research on freezing and melting heat-transfer phenomena*, in: Proc. of the Sec. World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (ed. by Keffer J. F. et al.), Elsevier, New York, 1991, 1157-1170.
- [22] Rubinstein L. I. : *Problema Stefana*, Zvaizgne, Riga, 1967.
- [23] Carslaw J. and Jaeger J. C. : *Conduction of heat in solids*, Clarendon Press, Oxford, 1959.
- [24] Heertjes P. M. , Jongenelen F. C. H. and De Leeuw den Bouter J. A. : *The effect of a moving boundary on heat transfer by free convection*, Chem. Eng. Sci. , vol. 25(1970), part 3, 1881-1890.
- [25] Tarzia D. A. : *Una revision sobre problemas de frontera movil y libre para la ecuacion del calor. El problema de Stefan*, Mathematicae Notae, Ano. XXIX, 1981/82, 147-241.

- [26] Crank J. : *Free and Moving Boundary Problems*, Clarendon Press, Oxford, 1984.
- [27] Gau C. and Viskanta R. : *Effect of natural convection on solidification from above and melting from below of a pure metal*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 28(1985), no. 3, 573-587.
- [28] Lapadula C. A. and Mueller W. K. : *The effect of bouyancy on the formation of a solid deposit freezing on a vertical surface*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 13(1970), no. 1, 13-26.
- [29] Ramachandran N. , Jaluria Y. and Gupta J. P. : *Thermal and fluid flow characteristics in one-dimensional solidification*, Lett. Heat Mass Transfer, vol. 8(1981), no. 1, 69-77.
- [30] Wolff F. and Viskanta R. : *Solidification of a pure metal at a vertical wall in the presence of liquid superheat*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 31(1988), no. 8, 1735-1744.
- [31] Shyy W. and Chen M. -H. : *Steady-state natural convection with phase change*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 33(1990), no. 11, 2545-2563.
- [32] Shyy W. and Chen M. -H. : *Effect of Prandtl number on buoyancy-induced transport processes with and without solidification*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 33(1990), no. 11, 2565-2578.
- [33] Ramachandran N. , Gupta J. P. and Jaluria J. P. : *Thermal fluid flow effect during solidification in a rectangular enclosure*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 25(1982), no. 2, 187-194.
- [34] Ramachandran M. and Gupta J. P. : *Experiments on solidification with natural convection in a rectangular enclosed region*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 25(1982), no. 4, 595-596.
- [35] Bardon J. P. , Vrignaud E. et Delaunay D. : *Etude experimentale de la fusion et de la solidification periodique d'une plaque paraffine*, Rev. Gen. Therm. , Fr. , no. 212-213, 1979.
- [36] Delaunay D. , Bransier J. and Bardon J. P. : *Experimental study and numerical model for a phase - change thermal energy storage unit*, The Proceedings of the Seventh International Heat Transfer Conference, Munchen, Fed. Rep. of Germany, HEAT TRANSFER - 1982, vol. 6, no. EU1, 449-454.
- [37] Andrieu J. et Bressat R. : *Comportement dynamique d'un accumulateur thermique a chaleur latent a bas niveau de temperature*, Rev. Gen. Therm. Fr. , no. 242, Fevrier 1982, 115-124.

Analysis of Transport Phenomena Occuring in Rectangular Latent Heat Storage Units

Part I: Description of the Destorage Cycle

Summary

The paper is devoted to the presentation of the state of art of both quantitative and qualitative descriptions of the destorage cycle in the latent heat storage unit. Main attention has been paid to both selection of the most important conclusions drawn from available experimental data and quantitative description of the destorage cycle by means of some simple formulae useful in engineering practice. It was assumed that the whole family of latent heat storage recuperators can be exemplified by a rectangular unit. For a lack of significant review works referring to this type of latent heat storage units, certain general classification has been proposed. However neither the sophisticated analysis of mathematical descriptions of multidimensional freezing processes nor the construction of their solutions have been discussed in the paper.