

doc. dr hab. Kazimierz Brodowicz  
dr inż. Jerzy Stefański

Instytut Techniki Ciepłej  
Politechniki Warszawskiej

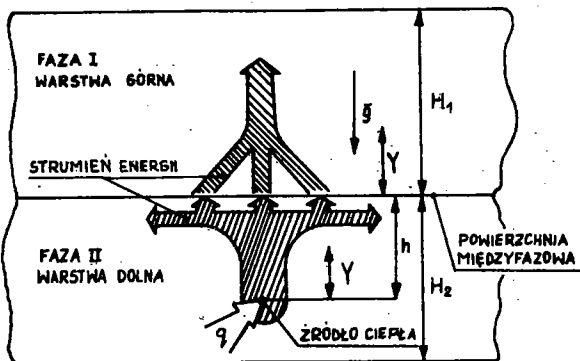
## BADANIE PROCESU CIEPLNEJ KONWEKCYJ SWOBODNEJ W UKŁADZIE DWUFAZOWYM

### 1. WSTĘP

Celem pracy było rozwijanie metod eksperymentalnych i teoretycznych, niezbędnych do badania procesów cieplnych w niewielkich obszarach płynu dwufazowego. Z tych względów praca przedstawia zarówno wyniki badań cieplnej konwekcji swobodnej w dwóch warstwach nie mieszających się cieczy, jak również opis metod w szczególności eksperymentalnych, które mogą być użyte w badaniu tego rodzaju procesów. W ramach przeprowadzonych badań szczególnie rozwinięto metodę pomiaru prędkości.

### 2. MODEL BADAWCZY PROCESU CIEPLNEJ KONWEKCYJ SWOBODNEJ

Badane zjawisko występuje w układzie dwóch nie mieszających się cieczy. Ciecz o mniejszej gęstości tworzy górną warstwę, a ciecz o większej gęstości - dolną, oddzieloną od górnej powierzchnią międzyfazową. Liniowe źródło ciepła w postaci drutu oporowego, zasilanego prądem elektrycznym, umieszczone jest poziomo w dolnej warstwie cieczy, na niezbyt dużej głębokości pod płaszczyznę utworzoną przez powierzchnią międzyfazową. W zasadzie zjawisko jest trójwymiarowe, jednakże nieznaczne wymiary poprzeczne źródła ciepła w porównaniu z jego



Rys.1. Schemat zjawiska

długością oraz jego poziome usytuowanie umożliwiają traktowanie zagadnienia jako płaskiego w płaszczyźnie prostopadłej do liniowego źródła ciepła. Ruch energii w obu warstwach i transport ciepła przez powierzchnię międzyfazową w tej płasz-

czyźnie przedstawiono schematycznie na rys.1.

Model eksperymentalny zrealizowano napełniając prostopadłościennie naczynie kilkudziesięcioma litrami dwóch cieczy, stanowiących badany układ dwufazowy i umieszczając poziomo w dolnej fazie element grzejny, stanowiący źródło ciepła. Ściany naczynia wymieniały z otoczeniem tę samą ilość ciepła, jaką doprowadzono do elementu grzejnego, a nieznaczna niestacjonarność zjawiska nie miała wpływu na wartość mierzonych wielkości podczas trwania doświadczenia i mogła być zaniedbywana.

Badania doświadczalne przeprowadzono w takich przedziałach zmienności parametrów zjawiska, że ruchy cieczy miały charakter ustalony i laminarny.

Zasadniczymi parametrami zjawiska były rodzaje cieczy, odległość znajdującego się w dolnej fazie grzejnika od powierzchni ohni międzyfazowej  $h$ , wysokość obu warstw cieczy: dolna -  $H_1$ , górna -  $H_2$ , oraz moc cieplna źródła -  $q$ .

Zastosowano następujące ciecze w układach:  
gliceryna - olej parafinowy, czterochlorek węgla - woda,  
woda - benzen, woda - alkohol butylowy, woda - powietrze.

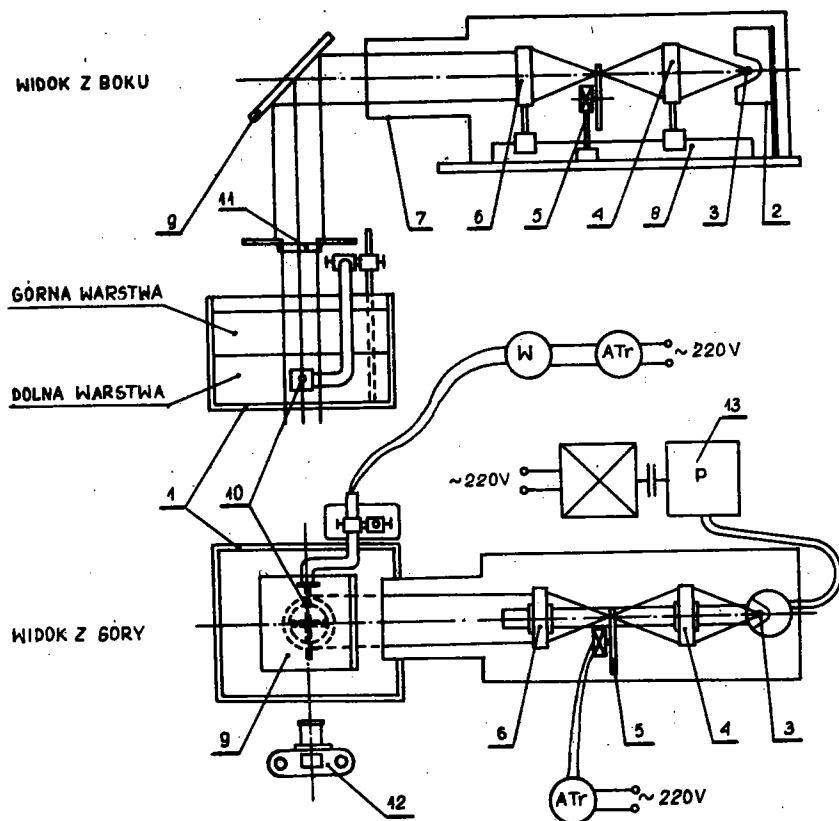
Wartości parametrów zjawiska:  $H = 3 \div 200$  [mm],  $h_1 = 50 \div 200$  [mm],  $h_2 = 20 \div 300$  [mm],  $q = 16,7 \div 500$  [W/m]. (rys.1).

### 3. METODA WYZNACZANIA PRĘDKOŚCI

Metoda ta jest modyfikacją metody opisanej w pracy [1] i pozwala na wyznaczenie płaskiego pola prędkości poprzez wizu-

alizację cząstek śladowych. Prędkość określa się z fotografii trajektorii cząstek śladowych przecinanych cieniami wytworzonymi przez tarczę stroboskopu mechanicznego wirującego ze znaną prędkością kątową. Dodatkowe zdjęcie fotograficzne podziałki milimetrowej, umieszczonej w płaszczyźnie pomiarowej, wykonane dla każdego ustawienia aparatu fotograficznego, umożliwia określenie rzeczywistych wymiarów liniowych na fotogramie. Przy znanej skali fotografii prędkość cząstki śladowej na pewnym odcinku jej trajektorii wyznacza stosunek przemieszczenia do czasu.

Tak wyznaczona prędkość cząstki śladowej odpowiada prędkości strugi otaczającej ją cieczy. Małe wymiary cząstki i jej



Rys.2. Schemat stanowiska do pomiarów prędkości cieczy: 1-zbiornik cieczy, 2-obudowa lampy ksenonowej, 3-lampa ksenonowa, 4-soczewka, 5-stroboskop mechaniczny, 6-soczewka, 7-obudowa, 8-ława, 9-lustro, 10-grzejnik elektryczny, 11-soczewka walcowa, 12-aparat fotograficzny, 13-prądnicą prądu stałego

gęstość równa gęstości cieczy pozwalają bowiem uznać, że cząstka śladowa ma tę samą prędkość co ciecz ją otaczająca.

Modyfikacja metody, przeprowadzona w ramach niniejszej pracy, polega na jej adaptacji do określania pól prędkości w cieczach w małych obszarach. Dokonano doboru cząstek śladowych, oraz doboru oświetlenia, które eliminowało odbicia wewnętrzne od powierzchni międzyfazowej. Uzyskano jednocześnie duże powiększenie badanego obszaru.

Metoda zmodyfikowana pozwoliła na wyznaczenie pola prędkości w obszarze płaskim o wymiarach od  $5 \times 5$  [mm] do  $60 \times 60$  [mm].

Zakres mierzonej prędkości wynosił od 0,01 do 1 [cm/s]. Dokładność względna pomiaru prędkości zależała od wartości pola prędkości, jednakże średnio wynosiła około 5%. Przy małych prędkościach około 0,5 [mm/s] dochodziła do 10%.

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys.2.

#### 4. WYZNACZANIE PÓL TEMPERATUR

Występujące w omawianym zjawisku pole temperatur charakteryzują nieznaczne wymiary i niewielkie różnice temperatur. Głównym problemem badawczym były: miniaturyzacja pola oraz wysoka dokładność w odczytywaniu różnic temperatur. Do mierzenia temperatury zastosowano układ 22 termoelementów zamocowanych na ramce plastikowej. Spoiny gorące umieszczone były w punkcie badanym, a zimne w obszarze cieczy, gdzie nie występowały zmiany temperatur w wyniku prowadzonych badań. Położenie spoin termoelementów wyznaczano przez fotografowanie ich. Do oświetlenia wykorzystano układ optyczny używany do pomiarów prędkości (z wyłączeniem stroboskopu), oświetlający tylko obszar położenia spoin. Punkt odniesienia i skala milimetrowa umożliwiały wyznaczenie położenia każdej spoiny pomiarowej.

Termoelementy wykonano z drutu miedzianego i konstantanowego o średnicy  $50$  [ $\mu$ ]. Spoiny lutowano cyną. Końce konstantanowych spoin gorących były zwarte i drutem konstantanowym połączone z zimną spoiną termoogniwa a dalej drutem miedzianym z rejestratorem. Miedziane końce termoelementów doprowa-

dzony były do odpowiednich zacisków przełącznika, posiadającego 22 położenia. Wyjście z przełącznika połączone było z rejestratorem.

Rejestrator MICROGRAPH BD 5 produkcji KIPP and ZONEN zapisywał sygnały uzyskane z poszczególnych termoelementów na taśmie o szerokości 200 [mm]. Rejestrator pracował na następujących zakresach: 0,1; 0,2; 0,5 [mV]. Oznacza to, że dwustu milimetrom szerokości taśmy odpowiadała zmiana temperatury w różnicowo połączonych termoelementach odpowiednio o ok. 2,6; 5,2; 13,0 [°C]. Szybkość posuwu taśmy, bezwładność pisaka oraz obsługa przełącznika umożliwiły rejestrację 22 sygnałów w czasie mniejszym od 3 sekund. Praktycznie jednak czas rejestracji był nieco większy, ale nie przekraczał 10 sekund. Błędy pomiaru temperatury nie przekraczały 4%.

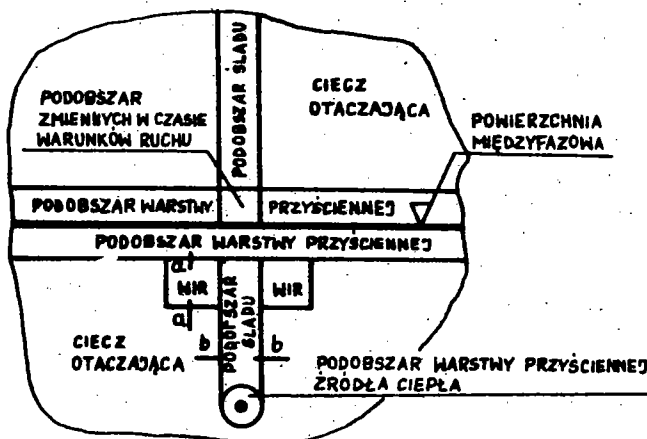
Ze względu na występowanie niewielkich sił termoelektrycznych należało wyeliminować zmiany w polu elektrostatycznym przestrzeni pomiarowej. W związku z tym, przy wyznaczaniu pola temperatur jako źródła ciepła, nie można było zastosować gołego drutu oporowego, używanego przy wyznaczaniu pól prędkości. Zastosowano ekranowany elektrycznie element grzejny, w którym drut oporowy przebiegał dwukrotnie na kształt litery U. Miał on przekrój owalny o wymiarach  $2,8 \times [1,7]$  mm.

## 5. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH CIEPLNEJ KONWEKCJI SWOBODNEJ

Badania eksperymentalne dotyczą zarówno pewnych badań wstępnych, jak i właściwych badań ilościowych. Badania wstępne przedstawiają charakter zjawiska zarówno w całym obszarze jak i w podobszarach. Umożliwiają one analizę stabilności ruchu i zachowania się powierzchni międzyfazowej. Właściwe badania ilościowe polegają na wyznaczaniu [1], [2] rozkładów prędkości i temperatur dla szczególnych wartości parametrów zjawiska w charakterystycznych przekrojach. W niniejszej pracy ograniczono ilość wyników i podano je tylko dla zilustrowania metod: szczegółowe dane zawarte są w pracy [7].

Ponieważ pole prędkości obejmuje znacznie większy obszar niż pole temperatur, można je uważać za bardziej reprezentatywny parametr zjawiska i względem tego parametru można po-

dzielić obszar występowania zjawiska na szereg podobszarów (rys.3). Wprawdzie granice między tymi podobszarami nie są zbyt ostre, jednakże warunki ruchu i transportu energii w poszczególnych podobszarach są wyraźnie różne.



Rys.3. Zwizualizowane pole prędkości i podział obszaru.

Ciepłota konwekcja swobodna rozumiana jako ruch w polu ciężenia płynu nieizotermicznego, którego gęstość jest zależna od temperatury, występuje tylko w warstwie przyściennej źródła ciepła, w podobszarach śladu w dolnej i górnej warstwie oraz w obszarze przy powierzchni międzyfazowej w górnej warstwie.

Podobszar warstwy przyściennej elementu grzejnego nie odgrywa w rozpatrywanym przypadku istotnej roli z powodu nieznanych wymiarów samego elementu grzejnego jak i tej warstwy. Na podstawie badań wstępnych stwierdzono, że wpływ wielkości i kształtu elementu grzejnego na pole prędkości w śladzie jest do pominięcia, a w innych podobszarach jest zupełnie niezauważalny.

Podobszar śladu był przedmiotem zarówno szeregu badań eksperymentalnych [2] jak i teoretycznych [3], [4]. Jednakże badania doświadczalne dotyczyły procesu zachodzącego w dużej objętości płynu tak, że długość śladu była kilkadziesiąt razy większa od jego szerokości, natomiast rozwiązania teoretyczne dotyczyły modelu matematycznego, opartego na założeniu nieskończonej przestrzeni.

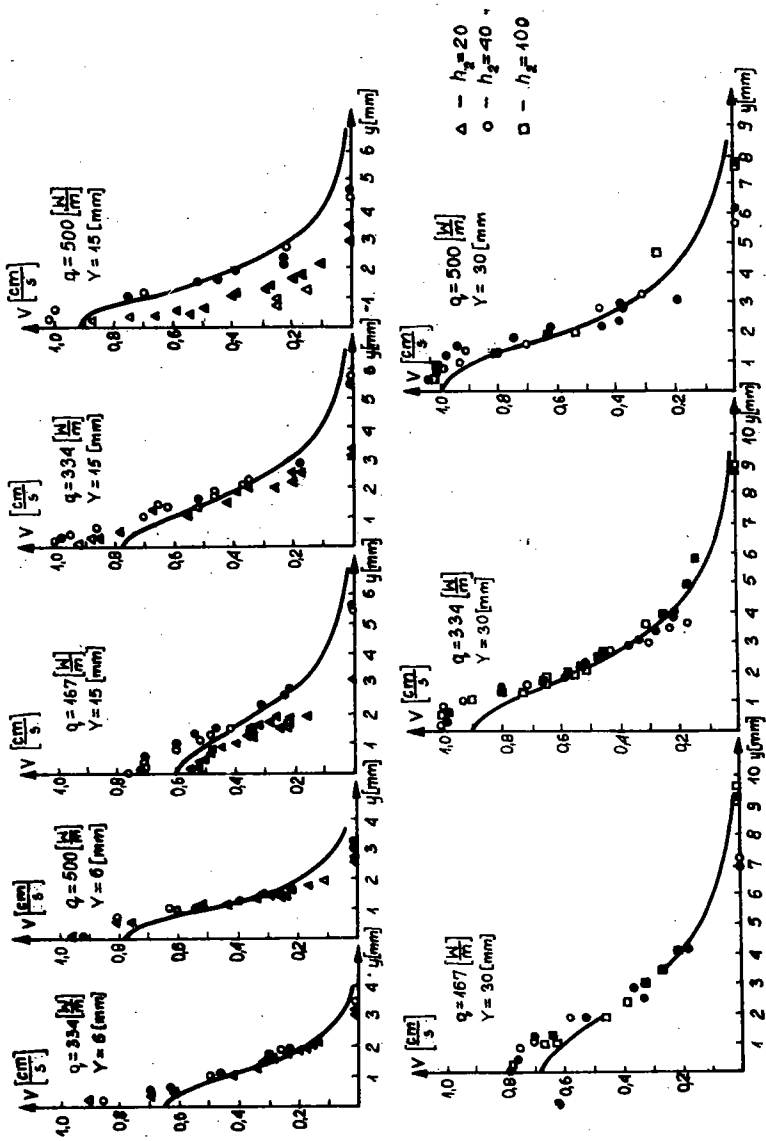
W nieizotermicznym podobszarze warstwy przyściennej na granicy faz w dolnej warstwie nie jest spełniony warunek występowania cieplnej konwekcji swobodnej, a ruch w tym podobszarze wywołany jest przez konwekcyjny transport pędu. Natomiast w podobszarach wiru ciecz cyrkuluje w wyniku molekularnego transportu pędu.

W górnej fazie stabilne pole prędkości występuje tylko przy pewnych warunkach określonych głębokością zanurzenia grzałki, własnościami fizycznymi badanych cieczy i mocą dostarczaną do grzałki. Podobszar śladu w górnej fazie w pewnej odległości od warstwy przyściennej jest zbliżony do śladu laminarnego, występującego nad liniowym źródłem ciepła przy nieskończonej dużej objętości płynu. Przy nieznacznej grubości warstwy górnej ślad w tej warstwie rozpyływa się na dwie poziome strugi pod powierzchnią, która ogranicza warstwę górną od góry. Wówczas tworzą się podobszary warstwy przyściennej i wirów, podobnie jak w warstwie dolnej.

Dodatkowe badania wykazały, że ograniczenie obszaru adiabatycznymi ścianami pionowymi ustawionymi w odległościach większych niż kilka odległości źródła ciepła od powierzchni międzyfazowej nie wpływa w sposób istotny na charakter zjawiska. Jeszcze mniejszy wpływ ma ograniczenie obszaru ścianami diatermicznymi i izotermicznymi, które ustawione nawet w odległości zbliżonej do odległości źródła ciepła od powierzchni międzyfazowej nie zmieniają charakteru zjawiska.

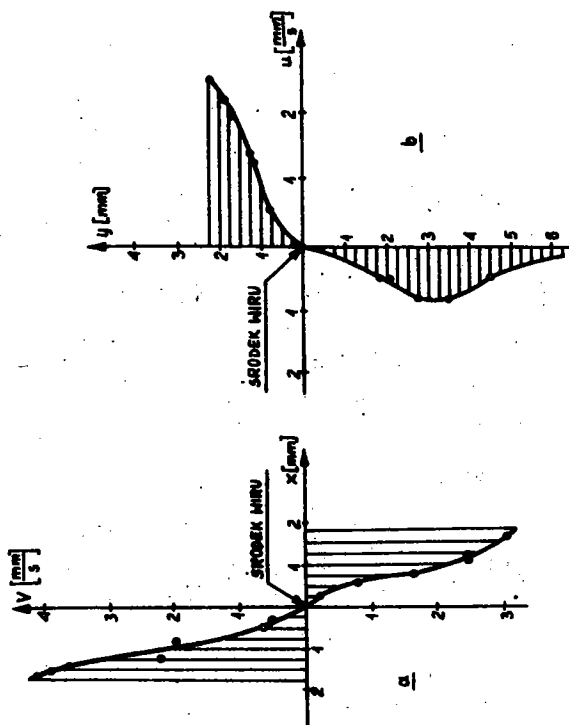
W ramach analizy kształtu pola prędkości i temperatur badano również wpływ wielkości grzejnika - ściślej jego przekroju poprzecznego - na przebieg procesu w dolnej i górnej warstwie. Do tych doświadczeń użyto kilku grzałek o różnych przekrojach poprzecznych: kołowym o średnicy 0,4 i 7 [mm], i owalnym o osiach  $2,8 \times 1,7$  [mm]. Stwierdzono, że wielkość elementów nie wpływa na charakter jakościowy zjawiska, a nie ma też zasadniczego wpływu na ilościowe wyniki z wyjątkiem najbliższego sąsiedztwa powierzchni grzejnej.

Przeprowadzono również badanie warunków stabilności procesu. Na stabilność ma wpływ rodzaj cieczy oraz dodatkowo dla fazy dolnej głębokość zanurzenia elementu grzejnego, a dla fazy górnej grubość warstwy cieczy. Gdy obie te wielkości są nieznaczne, istnieje duża tendencja do stabilnego zachowania się

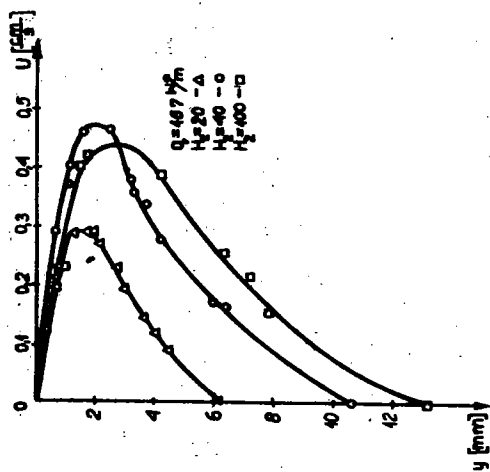


Rys.4. Rozkłady składowej pionowej prędkości w warstwie wody (warstwa dolna) w obszarze śladu dla różnych mocy źródła ciepła  $q$  i różnych głębokości zanurzenia źródła ciepła  $h$ , w przekrojach poziomych oddalonych od źródła o  $Y$ . Układ woda - powietrze. Punkty czernione oznaczają prędkości z jednej, a niezczernione z drugiej strony osi symetrii śladu. Linia ciągłą przedstawiono rozwiązanie wg Ushary i Fujii

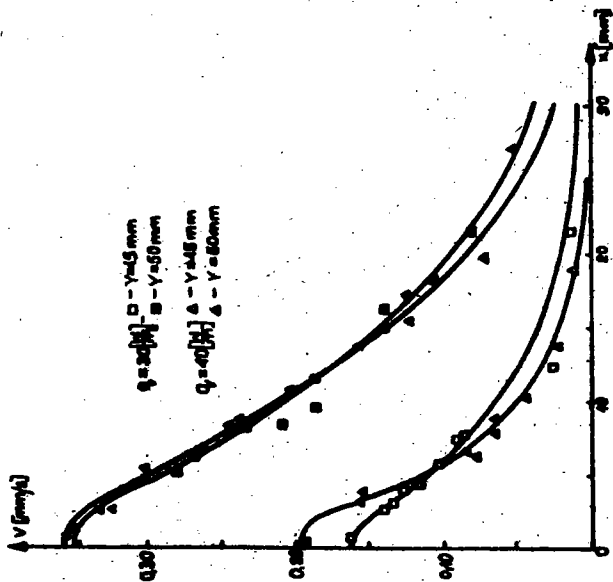




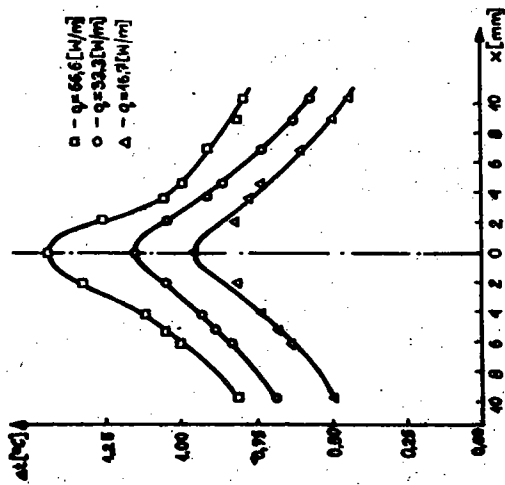
Rys. 5. Rozkłady prędkości w wodzie w obszarze wiru dla  $H_2 = 10$  [mm],  $q = 167$  [W/m] w przekrojach przechodzących przez środek wiru: a) przekrój pionowy, b) przekrój poziomy. Układ woda-powietrze



Rys. 6. Rozkłady poziomej składowej prędkości  $U$  pomiędzy powierzchnią międzycząsową, a środkiem wiru w wodzie w przekroju pionowym przechodzącym przez środek wiru. Układ woda-powietrze



Rys. 7. Rozkłady składowej pionowej prędkości  $v$  w oleju parafinowym (górna warstwa) dla  $H_2 = 70$  [mm],  $h = 70$  [mm]. Układ gliceryna - olej parafinowy



Rys. 8. Rozkłady temperatur w wodzie (górna warstwa) dla  $H_2 = 30$  [mm],  $h = 3$  [mm],  $\gamma = 15$  [mm]. Układ czterochlorek węgla - woda

ruchu. Dla większości cieczy stabilność ruchu utrzymuje się w warstwach do grubości kilkudziesięciu, a w lepkich nawet do kilkuset milimetrów. Dla większych grubości fazy górnej i większych głębokości zanurzenia grzałki występuje rozchwianie śladu konwekcyjnego, który ma wówczas oscylujący charakter ruchu. W górnej warstwie stabilność zależy również od rozkładu temperatur na powierzchni międzyfazowej. Rozkład ten posiada maksimum na osi symetrii. Przy stromych rozkładach stabilność występuje, przy bardziej płaskich - tendencja do jej utraty.

Z obserwacji powierzchni międzyfazowej wynika, że jest ona we wszystkich doświadczeniach nieruchoma. Stanowi ponadto zwykle powierzchnię płaską. Jedynie przy umieszczeniu elementu grzejnego na głębokości kilku milimetrów pod powierzchnią międzyfazową, dawało się zaobserwować (przy dużej mocy grzałki) pewne deformacje powierzchni płaskiej, około dziesiątych części milimetra, nad grzałką.

Omawiane badania wstępne pozwoliły określić wielkość obszaru niezbędnego do przeprowadzenia szczegółowych badań eksperymentalnych, jak również wielkość obszaru i warunki brzegowe przy formułowaniu modelu matematycznego.

## 6. MODEL MATEMATYCZNY ZJAWISKA

Opis matematyczny zjawiska cieplnej konwekcji swobodnej obejmuje układ równań ciągłości, ruchu i energii. Wprowadzając uproszczenie, że zjawisko ma charakter płaski, pomijając funkcję dysypacji i przyjmując, że parametry materiałowe płynu nie zależą od temperatury oraz przyjmując układ współrzędnych jak na rys.9, układ równań dla każdej warstwy jest następujący:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0,$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right),$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = - \rho_0 g \beta \Delta T - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right),$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),$$

gdzie:  $u, v$  - składowe prędkości,

$T$  - temperatura,

$a$  - współczynnik wyrównywania temperatury,

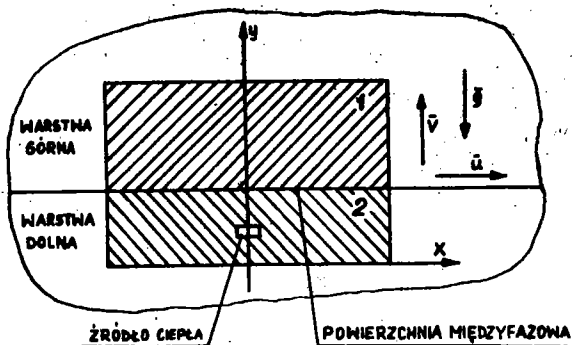
$\mu$  - lepkość dynamiczna,

$\beta$  - współczynnik rozszerzalności objętościowej,

$\rho$  - gęstość,

$p$  - ciśnienie.

W rozwiązaniu numerycznym przyjęto dwa obszary wyodrębnione z obu warstw w sposób przedstawiony na rys.9.

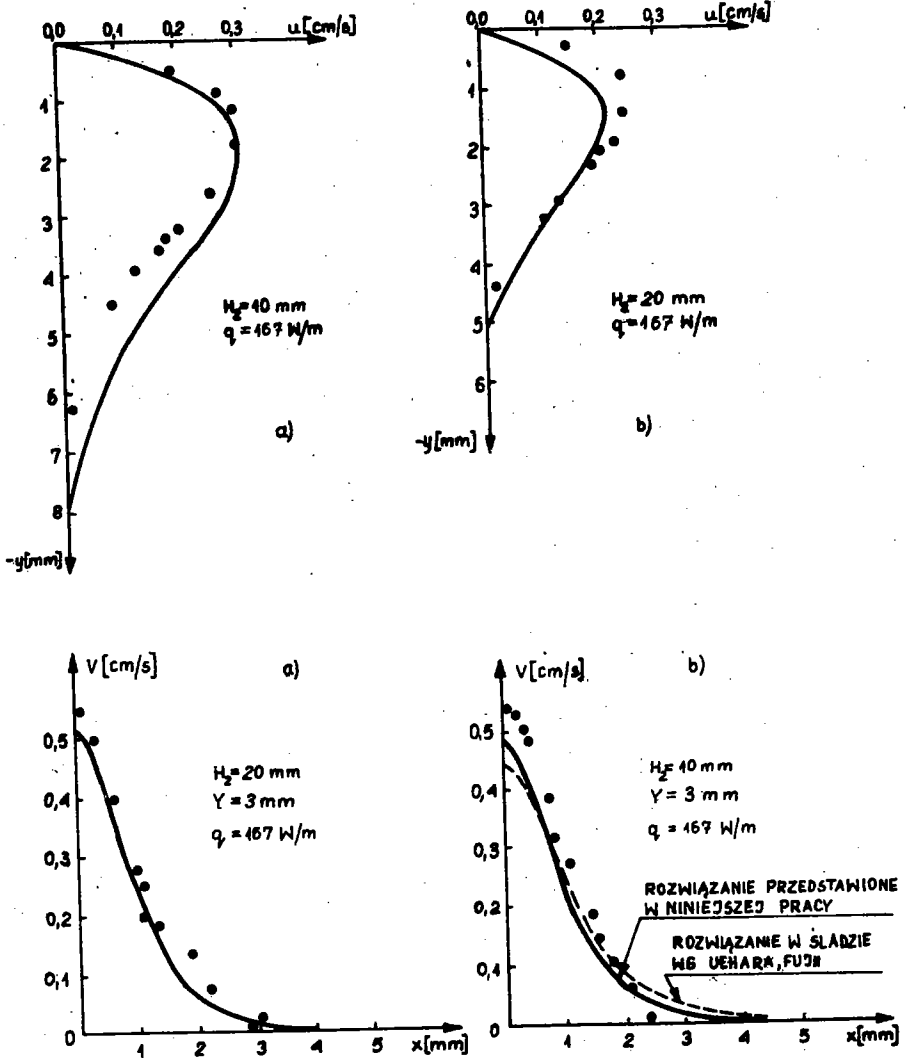


Rys.9. Obszary obliczeniowe i obszary badań eksperymentalnych

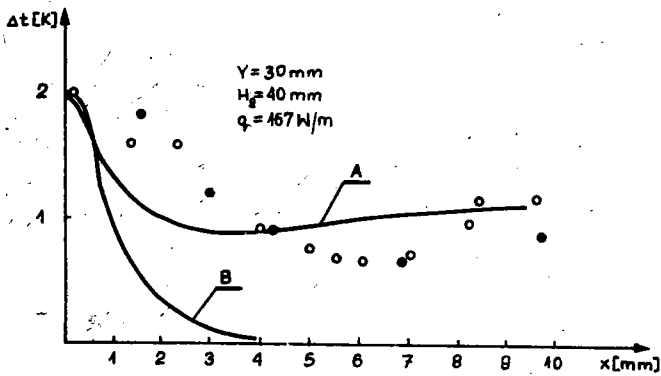
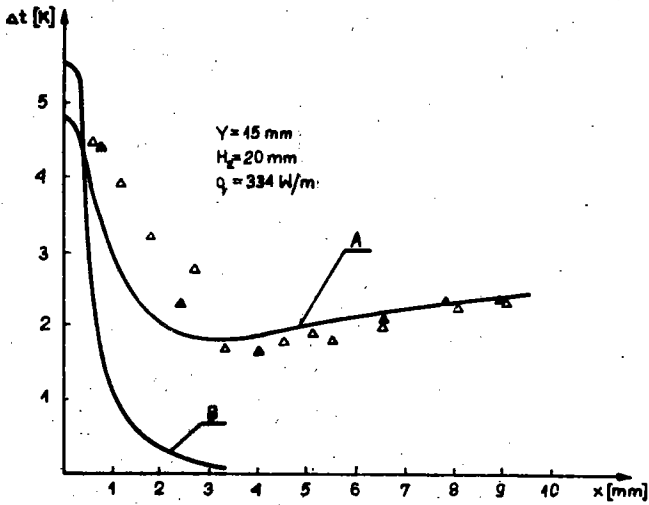
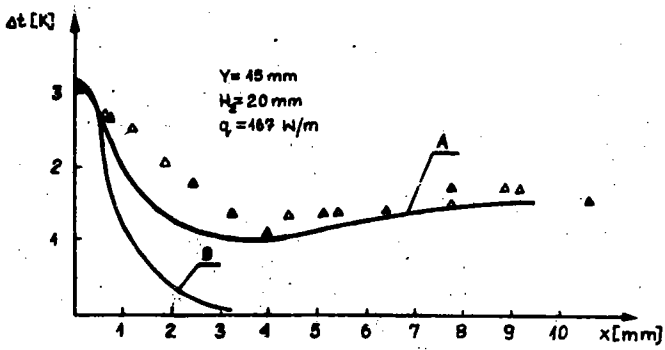
Obszar 1 obejmuje część warstwy górnej i określa go prostokąt. Obszar 2 obejmuje część warstwy dolnej i też ma kształt prostokąta, z wyłączeniem prostokąta reprezentującego skończony wymiar źródła ciepła.

Przekształcając przedstawiony układ równań do postaci użytej do efektywnego rozwią-

zania wprowadzono powszechnie stosowane funkcje: wirowość, funkcję prądu i bezwymiarową temperaturę. Określono w następujący sposób warunki brzegowe. Na brzegu obszaru znikają obie składowe prędkości, wynika stąd, że funkcja prądu ma stałą wartość, natomiast rozkład temperatury bezwymiarowej na brzegu obszaru zadawano w postaci funkcji ciągłych. Przy formułowaniu warunków brzegowych dla wirowości korzystano z pracy [5]. Warunki te wprowadzono na podstawie własności modelu fizycznego brzegu obszaru przy założeniu, że jest on nieprzepuszczalny oraz, że nie występuje poślizg między ścianą a cie-



Rys.10. Porównanie rozkładów prędkości w wodzie uzyskanych eksperymentalnie z rozwiązaniem modelu matematycznego: a) w przekroju pionowym przechodzącym przez środek wiru (przekrój "a-a" wg rys. 3), b) w przekroju poziomym przechodzącym przez środek śladu (przekrój "b - b" rys.3)



Rys.11. Porównanie rozkładów temperatur (przekrój "b - b" wg rys.3), linia A rozwiązanie przedstawione w niniejszej pracy, linia B rozwiązanie Uehary i Fujii, punkty z eksperymentu.

czą, a ponadto wykorzystano ogólne uproszczenia stosowane w modelu laminarnej warstwy przyściennej.

Nie znana jest skuteczna metoda numeryczna, która umożliwiłaby uzyskanie rozwiązania omawianego zagadnienia numerycznego dla dowolnego przykładu obliczeniowego. Praca [5] proponuje drogę i zawiera wiele wskazówek ułatwiających numeryczne rozwiązanie zagadnienia różniczkowego, eliptycznego, stanowiącego model matematyczny badanego zjawiska. Korzystając z tych wskazówek rozwiązano szereg przykładów obliczeniowych.

Zostały one szczegółowo przedstawione w pracy [7].

## 7. PORÓWNANIE WYNIKÓW EKSPERYMENTU I OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Ogólne porównanie jakościowe wykazuje duże podobieństwo pól prędkości i temperatur uzyskanych eksperymentalnie i teoretycznie. Ilościowe porównanie jest możliwe do przeprowadzenia w ograniczonych obszarach pól. Wynika to z ograniczonego przybliżenia między zjawiskiem fizycznym, a przyjętym modelem matematycznym. W wykonanych przykładach obliczeniowych starało się tak dobrać warunki brzegowe aby rozwiązanie można porównać z wykonanym eksperymentem laboratoryjnym w charakterystycznych obszarach.

Porównanie wyników eksperymentu i obliczeń numerycznych przedstawiono na rys.10. Jest to porównanie jakościowe i ilościowe rozkładów prędkości w przekrojach najbardziej charakterystycznych dla badanego zjawiska, a oznaczonych na rys.3. Linia ciągła oznacza rozwiązanie teoretyczne.

Rys.11. przedstawia porównanie rozkładów temperatur.

## BIBLIOGRAFIA

- [ 1 ] B r o d o w i c z K., K i e r k u s W.: Arch.Bud.Maszyn, str. 473 - 486, 1965.
- [ 2 ] B r o d o w i c z K., K i e r k u s W.: Int.J.Heat Mass Transfer str. 81 - 94, 1966.
- [ 3 ] F u j i i T.: Int.J.Heat Mass Transfer, str.597 - 606, 1963.

- [4] U e h a r a H., F u j i i T.: Report 38 University of Kyushu, 1964.
- [5] G o s m a n A.D., S p a l d i n g D.E. i inni: Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows. Academic Press, London 1969.
- [6] B r o d o w i c z K., S t e f a ń s k i J.: "Badania cieplnej konwekcji swobodnej w cienkich warstwach płynu" Referaty Sympozjum W M i C - PAN Jabłonna 1971.
- [7] S t e f a ń s k i J.: Praca doktorska. PW 1973.

## СВОБОДНАЯ ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В СИСТЕМЕ ДВУХ ФАЗ

### К р а т к о е   с о д е р ж а н и е

В работе представлено результаты исследований свободной тепловой конвекции в системе двух фаз составленной из двух горизонтальных несоединяющихся слоев жидкостей.

Проведённые испытания включали как экспериментальное определение поля скоростей и температур, так и числовое решение проблемы. Представлено примерные результаты и сравнено числовое решение с экспериментом. Приведено также применяемые, исследовательские методы в частности касающиеся определения поля скоростей.

### FREE THERMAL CONVECTION IN A TWO-PHASE SYSTEM

#### S u m m a r y

Results have been presented in this paper, of examinations of free thermal convection within a two-phase system made up of two horizontal layers of nonmiscible liquids. The examinations conducted involved both and experimental determination of fields of velocities and temperatures, and numerical solutions to the problems.



Exemplary results have been presented herein, and numerical solutions compared with those experimental.

Research methods applied have also been discussed herein, particularly those involved in the determination of the velocity field.

Rękopis dostarczono w sierpniu 1974 r.