

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS

OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

86

WARSZAWA — POZNAŃ 1983

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA - EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK · KAZIMIERZ STELER
ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY - CHAIRMAN) · JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELER - REDAKTOR - EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1983

Printed in Poland

ISBN 83-01-04798-4

ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 300+90 egz.

Ark. wyd. 10. Ark. druk. 8,5

Pap. druk. sat. kl. V, 70 g

Nr zam. 47/203

Oddano do składania 8 XI 1982 r.

Podpisano do druku 31 V 1983 r.

Druk ukończono w czerwcu 1983 r.

E-9/324. Cena zł 100,-

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

PIOTR KUBSKI, WITOLD LEWANDOWSKI

Gdańsk*

Badania eksperymentalne konwekcji swobodnej od poziomej płyty

Przeprowadzono badania eksperymentalne konwekcji swobodnej w warunkach przestrzeni nieograniczonej od poziomej płyty, skierowanej powierzchnią grzejną w górę, do wody destylowanej, oleju sojowego lub gliceryny. Otrzymane wyniki skorelowano zależnością kryterialną. Pozwoliły one wyznaczyć krytyczną liczbę Rayleigha określającą stabilność ruchu płynu w komórce konwekcyjnej nad płytą, a także wymiar liniowy tej komórki, niezbędny dla korzystania ze wspomnianej zależności kryterialnej.

Wykaz oznaczeń

a – współczynnik wyrównywania temperatury, dyfuzyjność cieplna płynu,

C – stała, zal. (5),

g – przyspieszenie ziemskie,

k – stała, zal. (2),

l – charakterystyczny wymiar liniowy,

l_w – rozmiar komórki konwekcyjnej nad płytą grzejną, charakterystyczny wymiar liniowy dla konwekcji swobodnej,

$\Delta t = t_w - t_\infty$ – różnica temperatury powierzchni płyty t_w i płynu niezaburzonego t_∞ ,

α – średni współczynnik przejmowania ciepła od płyty,

β – termiczny współczynnik rozszerzalności objętościowej płynu,

λ – współczynnik przewodzenia ciepła płynu,

ν – współczynnik lepkości kinematycznej płynu

Liczby kryterialne:

$(Nu) = \alpha l / \lambda$ – Nusselta,

$(Pr) = \nu / a$ – Prandtla,

$(Ra) = g \beta \Delta t l^3 / \nu a$ – Rayleigha.

Indeksy dotyczą:

u – komórki konwekcyjnej, wielkości umownej,

0 – wielkości liniowej, zbudowanej z własności fizycznych płynu,

kr – wielkości krytycznej,

w – powierzchni płyty,

∞ – płynu niezaburzonego.

1. Wstęp

Ważnym z praktycznego punktu widzenia problemem technicznym jest wymiana ciepła od płyty poziomej o skierowanej w górę powierzchni grzejnej do płynu otaczającego, zachodząca w warunkach konwekcji swobodnej w przestrzeni nieograniczonej.

* Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Gdańskiej.

Chociaż istnieje wiele prac teoretycznych i doświadczalnych dotyczących tego przypadku wymiany ciepła (ich szczegółowy przegląd podano w pracy [1]), to brak jest do tej pory przekonującej zależności kryterialnej opisującej wymianę ciepła na takiej płycie, tym bardziej, że podawane korelacje znacznie różnią się między sobą. Zazwyczaj wyniki badań i rozważań teoretycznych, ujęte w postaci zależności kryterialnych opisujących konwekcję swobodną od płyty poziomej, uzależniają współczynnik przejmowania ciepła od rozmiaru liniowego płyty.

W pracy [2] wyniki badań eksperymentalnych tego przypadku opisano zależnością kryterialną zbudowaną na podstawie grubości warstwy cieczy jako charakterystycznego wymiaru liniowego zagadnienia. Następnie w pracy [3] badano wpływ grubości warstwy cieczy i liczby Rayleigha (zbudowanej na tym wymiarze) na rozmiar komórki, głównie w zakresie ustalonej konwekcji komórkowej. Zauważono, że względna wartość rozmiaru komórki (odniesienia do grubości warstwy cieczy) nie zależy praktycznie biorąc od wspomnianej liczby Rayleigha. Wynika stąd przypuszczenie, że istnieje pewna stała, krytyczna wartość liczby Rayleigha, oparta na rozmiarze komórki konwekcyjnej, stanowiąc charakterystyczny wymiar liniowy zagadnienia. Liczba ta wyznacza zarazem rozmiar komórki.

W pracy [4] przedstawiono analizę teoretyczną ogółu przypadków błonowej wymiany ciepła zachodzącej na płycie dowolnie zorientowanej w przestrzeni, do których zaliczono również konwekcję swobodną. Właśnie dla interesującego nas przypadku konwekcji swobodnej od płyty poziomej zwróconej powierzchnią grzejną w górę, jako szczególnego przypadku ogólnej teorii, podano zależność kryterialną, opisującą wymianę ciepła w postaci związku

$$(Nu)_u = 0,766(Ra)_u^{1/5}, \quad (1)$$

gdzie

$$(Nu)_u = \frac{\alpha l_u}{\lambda} \quad \text{— umowna liczba Nusselta,}$$

$$(Ra)_u = \frac{g\beta\Delta t l_u^3}{\nu\alpha} \quad \text{— umowna liczba Rayleigha,}$$

do zbudowania których, jako charakterystycznego wymiaru liniowego l_u zagadnienia, użyto rozmiaru komórki konwekcyjnej tworzącej się nad powierzchnią płyty.

Wprowadzimy charakterystyczny wymiar liniowy dla konwekcji swobodnej od płyty poziomej, zbudowany na podstawie własności fizycznych płynu i różnicy temperatur powierzchni płyty i płynu niezaburzonego, jako

$$l_u = k l_0 = k \left[\frac{g\beta\Delta t}{\nu\alpha} \right]^{-1/3}, \quad (2)$$

gdzie współczynnik proporcjonalności k jest pewną wielkością zależną od l_u . Wówczas związek (1) można przedstawić w postaci zależności

$$\frac{\alpha}{\lambda} \left[\frac{\nu\alpha}{g\beta\Delta t} \right]^{1/3} = 0,766 k^{-2/5} \quad (3)$$

lub jej równoważnej

$$(Nu)_0 = \frac{\alpha l_0}{\lambda} = \text{const} = C, \quad (4)$$

gdzie stała C przyjmuje wartość

$$C = 0,766k^{-2/5}. \quad (5)$$

Celem więc niniejszej pracy było przeprowadzenie badań eksperymentalnych wymiany ciepła od płyty poziomej, zwróconej powierzchnią grzejną w górę, do otaczającego płynu, zachodzącej w warunkach konwekcji swobodnej w przestrzeni nieograniczonej. Badania te, poprzez pomiar temperatury płynu i płyty oraz współczynnika przejmowania ciepła przy określonych własnościach fizycznych płynu, zmierzały do eksperymentalnego wyznaczenia stałej k , określającej charakterystyczny wymiar liniowy płyty – rozmiar komórki konwekcyjnej tworzącej się nad powierzchnią płyty.

Zgodnie ze wzorem (2) znajomość stałej k jest równoznaczna z określeniem rozmiaru komórki scharakteryzowanego wymiarem l_u . Oparta na tym wymiarze liczba Rayleigha będzie się nazywać liczbą krytyczną

$$(Ra)_{kr} = \frac{g\beta\Delta t l_u^3}{\nu\alpha} = k^3.$$

Wprowadzenie wymiaru komórki konwekcyjnej do analizy wymiany ciepła od poziomej płyty nie tylko przekształca wzór do innej postaci, ale wnika głębiej w fizykę zjawiska i dostarcza oprócz informacji o intensywności wymiany ciepła dodatkowych informacji o charakterze ruchu makroskopowego w warstwie przyściennej. Takie właśnie informacje są w niektórych przypadkach szczególnie istotne, np. podczas wzrostu kryształów, a także w czasie ogrzewania dużych zbiorników z cieczami, gdzie ważne jest, czy zaburzenia cieplne docierają do górnej powierzchni cieczy itp.

2. Badania eksperymentalne

Pełny opis stanowiska badawczego oraz użytej aparatury i zastosowanej metody pomiarowej podano w pracy [5]. W tym miejscu ograniczono się jedynie do najistotniejszych informacji charakteryzujących badania.

Miedzianą płytę pomiarową o wymiarach 100×60 mm grzaną elektrycznie, umieszczono w zbiorniku o wymiarach $200 \times 300 \times 300$ mm, napelnionym wodą destylowaną, olejem sojowym lub gliceryną.

Gęstość strumienia ciepła na powierzchni płyty dopływającego do płynu zmieniała się w granicach: dla wody $300 \div 1500$ W/m², oleju sojowego $300 \div 600$ W/m² i gliceryny $50 \div 450$ W/m².

Strumień ciepła odbieranego od płyty grzejnej regulowano różnicą temperatury ($1,3 \div 8,4^\circ\text{C}$) między temperaturą powierzchni grzejnej a temperaturą płynu niezaburzonego ustaloną przez przepływ, przez przestrzeń wodną zbiornika, wody z ultratermostatu. Temperatura płynu niezaburzonego zmieniała się w granicach $13 \div 37^\circ\text{C}$ dla wody, $17 \div$

$\div 30^{\circ}\text{C}$ dla oleju sojowego i $18 \div 32^{\circ}\text{C}$ dla gliceryny. Uzyskano w ten sposób zmienność liczby Prandtla odpowiednio w granicach: dla wody $4 \div 9$, oleju sojowego $400 \div 750$ i gliceryny $3000 \div 13000$, a ponadto zmienność parametru $(\beta\Delta t)(Pr)$ dla wody $0,001 \div 0,012$, oleju sojowego $2,4 \div 3,4$ i gliceryny $27 \div 50$.

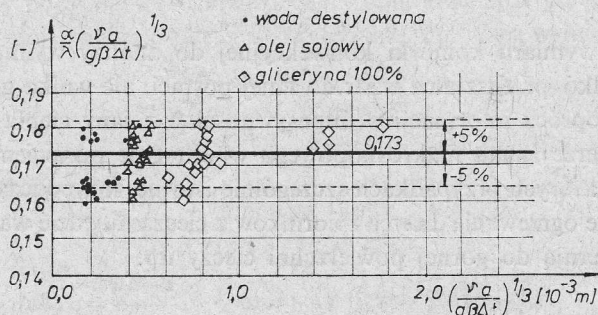
Oszacowano również odniesione do współczynnika przejmowania ciepła maksymalne błędy pomiarów: błąd bezwzględny $\pm 3,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ i błędy względne — dla wody $\pm 1,5\%$, oleju sojowego $\pm 6,0\%$ i gliceryny $\pm 11,8\%$.

Wyniki opisanych wyżej badań konwekcji swobodnej od płyty poziomej skierowanej powierzchnią grzejną w górę przedstawiono na rysunku 1 w układzie współrzędnych $\left[\frac{va}{g\beta\Delta t}\right]^{1/3}$, $\frac{\alpha}{\lambda} \left[\frac{va}{g\beta\Delta t}\right]^{1/3}$. Na tym samym wykresie naniesiono linię teoretycznej zależności (1), którą w warunkach pomiarowych można aproksymować równaniem

$$\frac{\alpha}{\lambda} \left[\frac{v^2}{g}\right]^{1/3} = 0,173 [(\beta\Delta t)(Pr)]^{1/3}, \quad (6)$$

przy czym iloczyn $(\beta\Delta t)(Pr)$ zmienia się w zakresie $0,015 \div 50$. Otrzymana zależność pozwala wyznaczyć wartość współczynnika

$$k = 41,25,$$



Rys. 1. Badania konwekcji swobodnej od poziomej płyty skierowanej powierzchnią grzejną w górę do wody, oleju sojowego i gliceryny

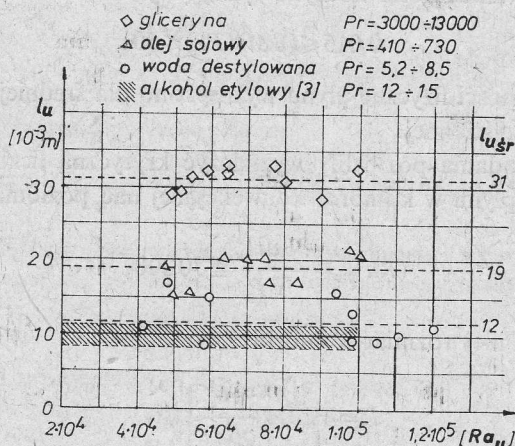
a wówczas związek (2) określający rozmiar komórki konwekcyjnej przyjmuje postać

$$l_u = 41,25 \left[\frac{va}{g\beta\Delta t}\right]^{1/3} \quad (7)$$

lub jej równoważną — określającą krytyczną liczbę Rayleigha

$$(Ra)_{kr} = \frac{g\beta\Delta t l_u^3}{va} \cong 70\,200.$$

Uzyskana wartość krytycznej liczby Rayleigha pozwala wyznaczyć wymiar charakterystyczny l_u dla konwekcji swobodnej od poziomej płyty grzejnej. Znajomość tego wymiaru jest nieodzowna do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła we wszystkich podobnych zagadnieniach wymiany ciepła.



Rys. 2. Porównanie wyników własnych badań z badaniami według pracy [3], na przykładzie charakterystycznego wymiaru liniowego l_u (rozmiaru komórki konwekcyjnej) dla konwekcji swobodnej od płyty poziomej

Na rysunku 2 w układzie współrzędnych l_u , $(Ra)_u$ przedstawiono wyniki własnych badań oraz badań opisanych w pracy [3] uzyskując ich dobrą zgodność. Zwraca tutaj uwagę istotny wpływ liczby Prandtla określającej wpływ rodzaju płynu na rozmiar komórki konwekcyjnej.

W pracy [2] wyniki badań aproksymowano związkiem

$$(Nu) = 0,18(Ra)^{1/3},$$

ślusznym w zakresie zmienności liczby Rayleigha

$$1,7 \cdot 10^3 \leq (Ra) \leq 4,5 \cdot 10^4.$$

I tutaj też zwraca uwagę dobra zgodność wyników z przedstawionymi powyżej.

3. Wnioski

Dla poziomej płyty, zwróconej stroną grzejną w górę, wymianę ciepła zachodzącą w warunkach konwekcji swobodnej w przestrzeni nieograniczonej, dobrze opisuje teoretycznie wyprowadzona w pracy [4] zależność kryterialna

$$(Nu)_u = 0,766(Ra)_u^{1/5},$$

gdzie liczby kryterialne Nusselta i Rayleigha zostały zbudowane na podstawie rozmiaru komórki konwekcyjnej jako charakterystycznego wymiaru liniowego zagadnienia.

Wyniki badań eksperymentalnych dla tego przypadku wymiany ciepła dotyczącego wody, oleju sojowego i gliceryny, można skorelować w postaci równania

$$\frac{\alpha}{\lambda} \left[\frac{v^2}{g} \right]^{1/3} = 0,173 [(\beta \Delta t)(Pr)]^{1/3},$$

ślusznego dla zakresu zmienności iloczynu $(\beta \Delta t)(Pr)$ w zakresie

$$0,015 \leq (\beta \Delta t)(Pr) \leq 50.$$

W równaniu tym własności fizyczne płynu wyznaczono dla średniej arytmetycznej temperatury w warstwie przysciennej.

Przeprowadzone badania pozwoliły wyznaczyć krytyczną liczbę Rayleigha, określającą stabilność ruchu płynu w komórce konwekcyjnej nad poziomą płytą

$$(Ra)_{kr} = \frac{g\beta \Delta t l_u^3}{\nu \alpha} \cong 70\,200,$$

a także wynikający z niej rozmiar komórki

$$l_u = 41,25 \left[\frac{\nu \alpha}{g\beta \Delta t} \right]^{1/3},$$

czyli charakterystyczny wymiar liniowy dla konwekcji swobodnej od płyty poziomej zwróconej stroną grzejną w górę.

Otrzymane rozmiary komórek konwekcyjnych porównano z badaniami [3] przeprowadzonymi dla alkoholu etylowego, uzyskując dobrą zgodność wyników.

Praca wpłynęła do Redakcji w marcu 1982 r.

Literatura

- [1] J. Bandrowski, W. Rybski, *Analiza wnikania ciepła przy konwekcji naturalnej dla płyt poziomych*. Inż. Chem. 5, 1, 3 (1975).
- [2] A. I. Leontiev, A. G. Kirdyashkin, *Heat Transfer during Free Convection in Horizontal Layer and in Large Volume above a Horizontal Surfaces*. Int. Chem. Eng. 6, 1, 126 - 129, (1966).
- [3] A. I. Leontiev, A. G. Kirdyashkin, *Experimental Study of Flow Patterns and Temperature Fields in Horizontal Free Convection Liquid Layers*. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 11, pp. 1461 - 1466 (1968).
- [4] P. Kubski, *Błonowa wymiana ciepła*. Materiały sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Jabłonna 1979.
- [5] W. Lewandowski, *Systematyczne badania wymiany ciepła w warunkach konwekcji naturalnej w przestrzeni nieograniczonej*. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 1980.

Экспериментальные исследования естественной конвекции от горизонтальной нагревающей поверхности

Резюме

Произведено экспериментальные исследования естественной конвекции в условиях безграничного пространства от горизонтальной поверхности направленной в верх к воде, к соевому маслу или к глицерину. Полученные результаты аппроксимировано к теоретическому уравнению [4]

$$(Nu)_u = 0,766 (Ra)_u^{1/5}$$

или подобной зависимости

$$\frac{\alpha}{\lambda} \left[\frac{v^2}{g} \right]^{1/3} = 0,173 [(\beta \Delta t)(Pr)]^{1/3}.$$

Этим путем найдено критическое число Райля

$$(Ra)_{kr} = \frac{g \beta \Delta t l_u^3}{\nu \alpha} \approx 70\,200,$$

определяющее стабильность движения жидкости в конвекционной ячейке над поверхностью, а также линейный размер l_u этой ячейки пользуясь вышеприведенным уравнением.

Experimental Investigation of the Natural Convection from a Horizontal Plate

Summary

The paper describes experimental investigations of the natural convection in an infinite space from a horizontal plate with the heating surface facing up to water, soya-bean oil or glycerin. The results obtained were correlated, using the relation derived from theoretical considerations in [4]

$$(Nu)_u = 0,766 (Ra)_u^{1/5}$$

or another relation

$$\frac{\alpha}{\lambda} \left[\frac{v^2}{g} \right]^{1/3} = 0,173 [(\beta \Delta t)(Pr)]^{1/3}.$$

The results made possible finding the critical value of the Rayleigh number

$$(Ra)_{kr} = \frac{g \beta \Delta t l_u^3}{\nu \alpha} \approx 70\,200.$$

The Rayleigh number defines the stability of fluid in the convection cell above the plate as well as the dimension l_u of the cell which should be used in the theoretical relation as given above.