

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

76

WARSZAWA-POZNAŃ 1978

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

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

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ . ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN,
80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszerza 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1978
Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340+90 egz.	Oddano do składania 27 lutego 1978 r.
Ark. wyd. 12,25. Ark. druk. 9,375	Podpisano do druku 24 października 1978 r.
Papier druk. sat. kl. V, 70 g, 70×100 cm.	Druk ukończono w październiku 1978 r.
Nr zam. 319/98. J-14/662.	Cena zł 40,-

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

PIOTR KUBSKI

Gdańsk

Wymiana ciepła żebra płaskiego przy zmiennym współczynniku przejmowania ciepła

W pracy przedstawiono teorię jednowymiarowego żebra płaskiego dla przypadku, gdy współczynnik przejmwania ciepła jest zmienny wzdłuż jego powierzchni. Wprowadzono pojęcie zastępczego parametru żebrowego, który sprowadza nieliniowy przypadek przewodzenia ciepłego w żebrze do zastępczego, liniowego równania różniczkowego. Jego rozwiązanie — rozkład temperatury wzdłuż powierzchni żebra — zgadza się z badaniami doświadczalnymi.

Wykaz oznaczeń

a — połowa długości źródła ciepła,	λ — współczynnik przewodzenia ciepła,
l — połowa długości płyty, długość żebra,	ϑ — nadwyżka temperatury.
m — parametr żebrowy,	
p — zmienna pomocnicza,	Indeksy
q — gęstość strumienia ciepła,	f — płyn niezaburzony,
t — temperatura,	l — końcowy,
x — współrzędna przestrzeni,	0 — początkowy,
α — współczynnik przejmwania ciepła,	z — zastępczy,
δ — połowa grubości żebra,	$+$ — bezwymiarowy.
η — sprawność żebra,	

1. Wprowadzenie

Badania konwekcyjnej wymiany ciepła w przestrzeni nieograniczonej od płyty poziomej skierowanej powierzchnią ogrzewaną ku górze, w warunkach konwekcji swobodnej, są aktualnym tematem wielu badań doświadczalnych i rozważań teoretycznych. Rozpatrywane w literaturze przedmiotu przypadki ograniczają się zwykle do typowych, granicznych warunków ciepła, a mianowicie stałego strumienia ciepłego na powierzchni płyty lub też stałej temperatury płyty.

Ważnym, z praktycznego punktu widzenia, oraz mało zbadanym doświadczalnie i teoretycznie jest przypadek konwekcji swobodnej od poziomej płyty nieizotermicznej ze zmiennym strumieniem ciepła na jej górnej powierzchni.

Najprostszą realizacją tego przypadku może być np. płyta pozioma z umieszczonym w jej osi symetrii pasmowym źródłem ciepła. Przypadek ten ma duże znaczenia praktyczne,

gdyż występuje podczas ogrzewania ścian zbiorników ładunku płynnego (np. oleje i tłuszcze jadalne). Jeśli taki ładunek należy utrzymywać we właściwej temperaturze i przy określonym rozkładzie temperatury w jego objętości, wówczas, by zapewnić właściwe warunki termiczne ładunku płynnego, stosuje się w dnach zbiorników pasmowe źródła ciepła o określonej wydajności cieplnej. Tymi źródłami mogą być np. kanały grzejne z przepływającym wewnątrz kondensującym się czynnikiem. Powtarzalny fragment dna zbiornika można uznać za płytę poziomą z pasmowym źródłem ciepła.

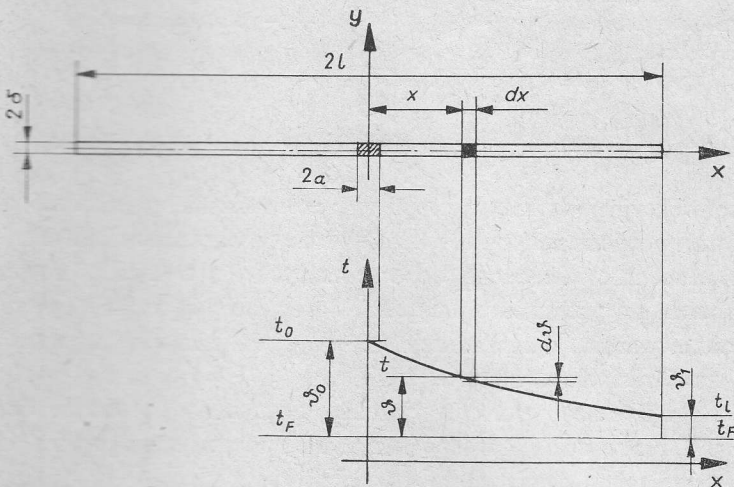
Tak postawiony problem można sprowadzić do znanego modelu żebra płaskiego, jeśli się przyjmuje, że w płycie przepływ ciepła odbywa się w kierunku osi prostopadłej do pasmowego źródła ciepła i leżącej w płaszczyźnie płyty. Wówczas zagadnienie wymiany ciepła dla płyty sprowadza się do ustalonego w czasie jednowymiarowego przewodzenia ciepła. Przyjęcie założenia, że temperatura w dowolnym przekroju płyty, równoległym do pasmowego źródła ciepła jest stała, można uzasadnić znikomą małą grubością płyty w porównaniu z jej długością, a także dużą wartością współczynnika przewodzenia ciepła materiału płyty.

2. Analiza teoretyczna

Przedstawiona w monografiach poświęconych wymianie ciepła (np. [1, 2, 3]) szczegółowa analiza przewodnictwa cieplnego w płytach, stanowiących tzw. żebra płaskie, została przeprowadzona przy następujących założeniach upraszczających:

- temperatura t w przekroju poprzecznym płyty jest stała,
- temperatura płynu niezaburzonego t_f jest stała,
- współczynnik przewodzenia ciepła materiału płyty jest stały,
- współczynnik przyjmowania ciepła na powierzchni płyty jest stały.

Model teoretyczny płyty o jednostkowej szerokości, grubości 2δ i długości $2l$ wraz



Rys. 1. Model teoretyczny płyty o jednostkowej szerokości, grubości 2δ i długości $2l$ wraz z rozkładem temperatury (zakreskowano obszar działania źródła ciepła)

z rozkładem temperatury przedstawiono na rys. 1, przy czym zakreskowano obszar działania źródła ciepła.

Z bilansu energetycznego elementu dx płyty wynika równanie opisujące rozkład temperatury ϑ płyty

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = m^2\vartheta, \quad (1)$$

gdzie $\vartheta = t - t_f$ jest nadwyżką temperatury płyty t ponad wartość temperatury t_f płynu niezaburzonego, zaś parametr żebrowy m określony jest zależnością

$$m^2 = \frac{\alpha}{\lambda\delta}, \quad (2)$$

przy czym α jest współczynnikiem przejmowania ciepła przez płytę, λ – współczynnikiem przewodzenia ciepła materiału płyty, a δ – połową grubości płyty.

Zgodnie z przyjętymi założeniami upraszczającymi parametr żebrowy m przyjmuje wartość stałą

$$m = \text{const.} \quad (3)$$

Warunki brzegowe można sformułować następująco:

$$x=0, \quad \vartheta = \vartheta_0 \quad (4)$$

dla

$$x=l, \quad \frac{d\vartheta}{dx} = 0. \quad (5)$$

Warunkowi brzegowemu (5) odpowiada płyta izolowana cieplnie na końcu.

Rozwiązaniem równania (1), przy warunkach (3), (4), (5), czyli poszukiwanym rozkładem temperatury

$$\vartheta = \vartheta(x), \quad (6)$$

jest zależność

$$\vartheta = \vartheta_0 \frac{\cosh m(l-x)}{\cosh ml}. \quad (7)$$

Skuteczność zastosowania żebra ocenia się za pomocą tzw. sprawności żebra, która w omawianym przypadku wyraża się związkiem

$$\eta = \frac{\text{tgh } ml}{ml}. \quad (8)$$

Przedstawiona powyżej konwencjonalna analiza rozkładu temperatury wzdłuż płaskiej płyty z pasmowym źródłem ciepła została przeprowadzona dla stałej wartości parametru żebrowego m . Może być zatem stosowana do zagadnień, w których praktycznie biorąc zmienność parametru m jest nieznaczna, np. dla stosunkowo krótkich płyt z wymianą ciepła na drodze konwekcji wymuszonej. W zagadnieniach konwekcji swobodnej, w której współczynnik przejmowania ciepła silnie zależy od zmiennej wzdłuż długości płyty nadwyżki jej temperatury ϑ nad temperaturą płynu niezaburzonego, przyjęcie warunku (3), stałości parametru żebrowego, jest nieuzasadnione.

Ze zmienności współczynnika przejmowania ciepła α wzdłuż płyty, przy czym współczynnik α jest zależny od nadwyżki temperatury

$$\alpha = \alpha(\vartheta) \quad (9)$$

wynika, że współczynnik m określony zależnością (2), przyjmuje wartości zmienne, zależne również od nadwyżki temperatury, czyli

$$m = m(\vartheta). \quad (10)$$

Zależności (9) i (10) mogą być ustalone eksperymentalnie.

Wstawienie zależności (10) do równania (1) przewodnictwa cieplnego w płycie sprowadza rozpatrywane równanie różniczkowe do nieliniowego. Aby rozwiązać zagadnienie nieliniowe, linearyzuje się je przez wprowadzenie zastępczego parametru żebrowego.

Podejście polegające na wprowadzeniu żebra zastępczego, scharakteryzowanego zastępczym parametrem m_z jest znacznie bliższe fizyce zagadnienia niż posługiwanie się uśrednianiem temperatury lub też gęstości strumienia ciepła wzdłuż długości płyty. Wprowadzenie zastępczego parametru m_z uśrednia jednocześnie lokalne wartości temperatury płyty i gęstość strumienia ciepła na jej powierzchni. Przedstawmy więc tok rozumowania prowadzący do wyznaczenia zastępczego parametru żebrowego m_z . W tym celu przepisujemy równanie (1) wprowadzając w miejsce stałego m wartości:

– zastępczą m_z

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = m_z^2 \vartheta, \quad (11)$$

– oraz zmienną m

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = m^2(\vartheta)\vartheta. \quad (12)$$

Wprowadźmy teraz nową zmienną $p = p(\vartheta)$ zdefiniowaną jako

$$\frac{d\vartheta}{dx} = p(\vartheta), \quad (13)$$

dla której zachodzi zależność

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = \frac{dp}{d\vartheta} \frac{d\vartheta}{dx} = p \frac{dp}{d\vartheta}. \quad (14)$$

Podstawiając zależność (14) do równań (11) i (12) otrzymujemy, po rozdzieleniu zmiennych, następujące równania:

$$p dp = m_z^2 \vartheta d\vartheta, \quad (15)$$

$$p dp = m^2(\vartheta) \vartheta d\vartheta. \quad (16)$$

Ustalmy granice całkowania tych równań:

– dla osi płyty $x=0$,

$$\left. \begin{aligned} \vartheta &= \vartheta_0 \\ \frac{d\vartheta}{dx} &= p_0 = -\frac{q_0}{\lambda}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

– na końcu płyty $x=l$,

$$\left. \begin{aligned} \vartheta &= \vartheta_l \\ \frac{d\vartheta}{dx} &= p_l = -\frac{q_l}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

gdzie q_0 , q_l oznacza gęstość strumienia ciepła przewodzonego wzdłuż długości płyty, odpowiednio w osi płyty i na jej końcu.

Całkując równania (15) i (16) w granicach (17) i (18) otrzymuje się odpowiednio

$$\frac{1}{\lambda^2}(q_0^2 - q_l^2) = m_z^2(\vartheta_0^2 - \vartheta_l^2), \quad (19)$$

$$\frac{1}{\lambda^2}(q_0^2 - q_l^2) = 2 \int_{\vartheta_l}^{\vartheta_0} m^2(\vartheta) \vartheta d\vartheta. \quad (20)$$

Z porównania związków (19) i (20) wynika definicyjne równanie określające zastępczą wartość parametru żebrowego

$$m_z^2 = \frac{2}{\vartheta_0^2 - \vartheta_l^2} \int_{\vartheta_l}^{\vartheta_0} m^2(\vartheta) \vartheta d\vartheta. \quad (21)$$

Podstawiając do równania (21) wartość $m^2(\vartheta)$ wyznaczoną z zależności (12) otrzymuje się

$$m_z^2 = \frac{2}{\vartheta_0^2 - \vartheta_l^2} \int_{\vartheta_l}^{\vartheta_0} \frac{d^2\vartheta}{dx^2} d\vartheta,$$

zaś podstawiając związek (14) i zmieniając granice całkowania zgodnie z równaniami (17) i (18), po scałkowaniu i podstawieniu granic ostatecznie otrzymuje się zależność

$$m_z = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{q_0^2 - q_l^2}{\vartheta_0^2 - \vartheta_l^2}}. \quad (22)$$

Otrzymana zależność (22), określająca zastępczy parametr żebrowy może być z powodzeniem stosowana w praktyce inżynierskiej. Wyraża się ona przez łatwo mierzalne wielkości: gęstość strumienia ciepła, nadwyżki temperatury płyty ponad wartość temperatury płynu niezaburzonego oraz współczynnik przewodzenia ciepła materiału płyty. Dysponując odpowiednimi wynikami z badań eksperymentalnych, łatwo więc można dla płyty w określonych warunkach termicznych wyznaczyć wartość zastępczego parametru żebrowego m_z .

Wskażemy jeszcze na możliwość wyznaczenia zastępczego współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni nieizotermicznej. Przyjmuje on zgodnie z zależnością (2) postać

$$\alpha_z = \lambda \delta m_z^2,$$

a po uwzględnieniu związku (22)

$$\alpha_z = \frac{\delta(q_0^2 - q_l^2)}{\lambda(\vartheta_0^2 - \vartheta_l^2)} \quad (23)$$

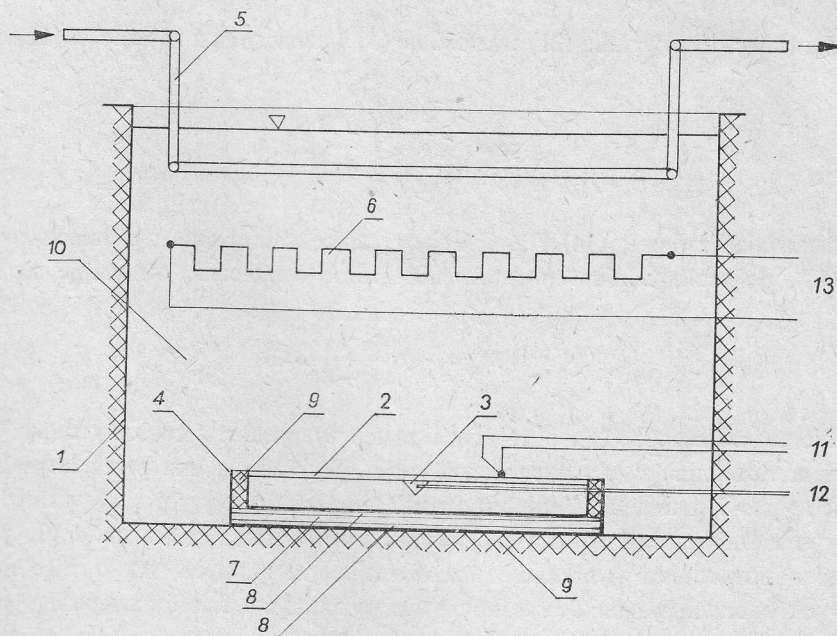
Można również sprawność żebra (8) wyrazić poprzez zastępczy parametr żebrowy

$$\eta = \frac{\operatorname{tgh} m_z l}{m_z l} \quad (24)$$

3. Badania eksperymentalne

Jako przykład zastosowania omawianego modelu mogą służyć badania eksperymentalne wymiany ciepła w przestrzeni nieograniczonej od płyty poziomej skierowanej powierzchnią ogrzewaną ku górze w warunkach konwekcji swobodnej. Pełny opis stanowiska badawczego oraz użytej aparatury, które służyło powyższemu celowi, a także zasady pomiaru, cechowania zastosowanych przyrządów wraz z opracowaniem wyników, łącznie z analizą błędów, podano w pracy [4]. W niniejszym opracowaniu ograniczono się jedynie do najistotniejszych informacji dotyczących obiektu badań eksperymentalnych.

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 2. Podstawowym elementem stanowiska badawczego jest zbiornik o wymiarach $0,8 \times 0,8 \times 0,4 \text{ m}^3$, specjalnie przy-



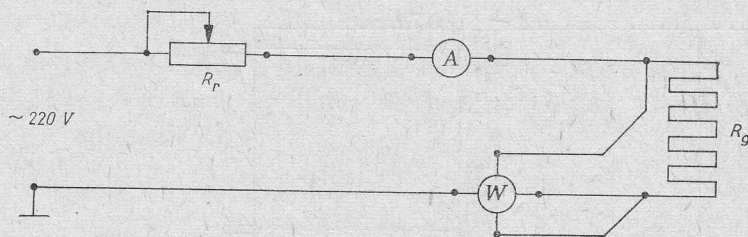
Rys. 2. Schemat stanowiska do badania współczynnika przyjmowania ciepła w warunkach konwekcji swobodnej, w stanie ustalonym

1 – zbiornik cieczy, 2 – płyta pomiarowa, 3 – grzałka elektryczna, 4 – wanna, 5 – chłodnica z wodą chłodzącą, 6 – całkowity termometr rezystancyjny, 7 – płyta szklana, 8 – płyta azbestowa, 9 – izolacja, 10 – olej rzepakowy, 11 – pomiar temperatury płyty, 12 – pomiar mocy elektrycznej, 13 – pomiar oporu elektrycznego

gotowany do badania konwekcji swobodnej w stanie ustalonym. W zbiorniku tym – na jego dnie – umieszczono płytę pomiarową ze znajdującym się w symetrii grzejnikiem elektrycznym. Płyta oddawała ciepło w warunkach konwekcji swobodnej do płynu wypełniającego objętość zbiornika, którym był olej rzepakowy.

W zbiorniku nad płytą znajdowała się chłodnica rurkowa umożliwiająca odbiór ciepła wydzielanego w płycie pomiarowej, co zapewniało możliwość prowadzenia badań konwekcji w stanie ustalonym. Przez chłodnicę płynęła woda z sieci wodociągowej, zaś regulacja odbioru ciepła odbywała się ilościowo, poprzez zmianę strumienia wody chłodzącej. Przesuwne zamocowanie chłodnicy względem dna zbiornika zapewniało regulację głębokości jej zanurzenia.

W skład stanowiska badawczego wchodził ponadto układ zasilania elektrycznego elementu grzejjego. Schemat układu zasilania oraz zasadę pomiaru mocy elementu grzejjego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat układu zasilania oraz zasada pomiaru mocy elektrycznej elementu grzejjego

R_g – rezystorowy element grzejjny, R_r – rezystor regulacyjny do regulacji mocy elementu grzejjego o obciążalności prądowej $i_{max}=30$ A, W – watomierz wielozakresowy klasy 0,5, A – amperomierz wielozakresowy klasy 0,5, służący do kontroli zakresu prądowego watomierza

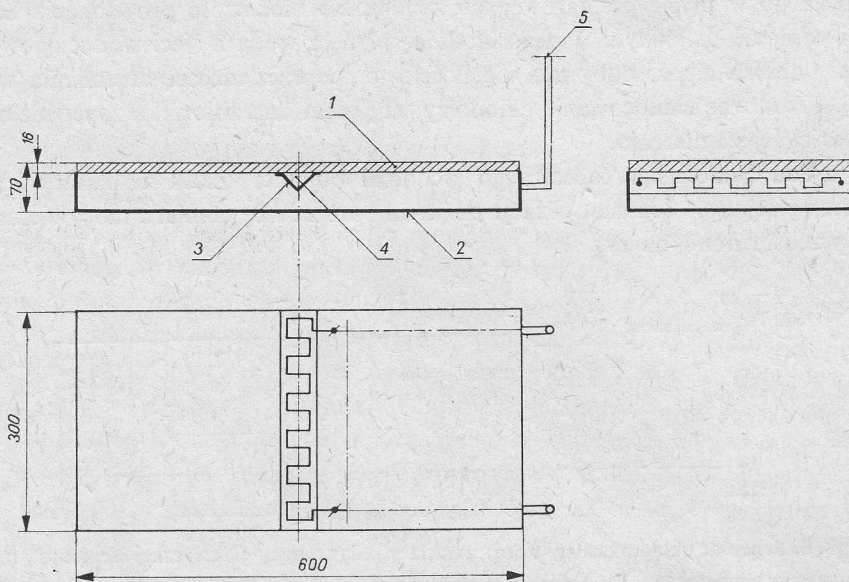
Do pomiaru temperatury płynu niezaburzonego wpływem konwekcji, znajdującego się w zbiorniku, zastosowano całkowity termometr rezystancyjny, wykonany w formie ramy z rozpiętym drucikiem miedzianym. Termometr ten, uprzednio wycechowany, również posiadał możliwość regulacji głębokości jego zanurzenia w zbiorniku.

Płytę pomiarową stanowiła płaska blacha stalowa o grubości $2\delta=16$ mm, o długości $2l=600$ mm i o szerokości $s=300$ mm, do której od dołu, w osi symetrii biegnącej w kierunku wymiaru s , przyspawano kształtkę o profilu kątowym. W kształtce tej umieszczono na płytkach azbestowych grzejnik elektryczny o oporze $24\ \Omega$, również izolowany bocznie azbestem. Płytę zamknięto od dołu płaskim płaszczem, z blachy stalowej, przyspawanym szczelnie do płyty na jej obrzeżu. Wskutek tego dolna część płyty pomiarowej stykała się z warstwą powietrza wypełniającego wnętrze płaszcza. Szkic płyty pomiarowej przedstawiono na rys. 4. Płyta pomiarowa spoczywała w stalowej wannie. Między płytą pomiarową a wanną znajdowała się płyta szklana, oddzielona obustronnie płytami azbestowymi od płyty pomiarowej i od wanny. Górna i dolna powierzchnia płyty szklanej oprzyrządowana była termoelementami, co dawało możliwości określenia strumienia ciepła przekazywanego od płyty pomiarowej do dołu. Ściany boczne płyty pomiarowej zaizolowano azbestem. Temperaturę tych ścian mierzono termoelementami.

W celu zbadania zmian temperatury powierzchni płyty pomiarowej wraz z odległością od źródła ciepła, zainstalowano w osi płyty termoelementy, co 43 mm, licząc od krawędzi

źródła ciepła w kierunku wymiaru l . Kontrolowano również, za pomocą termoelementów, rozkład temperatury na całej powierzchni płyty.

Nadwyżka temperatury ϑ płyty nad temperaturą płynu niezaburzonego zmieniała się w zakresie do około 100°C , przy czym temperaturę płynu niezaburzonego utrzymywano, jako stałą, w 40°C .



Rys. 4. Szkic płyty pomiarowej

1 – stalowa płyta pomiarowa, 2 – płaszcz stalowy, 3 – kątownik L $60 \times 60 \times 5$, 4 – grzałka elektryczna, 5 – zasilanie (220 V)

W tych warunkach własności fizyczne oleju rzepakowego określone liczbą Prandla były zawarte w przedziale

$$60 \leq (Pr) \leq 525.$$

Podczas badań osiągnięto zmienność liczby Rayleigha w przedziale

$$10^6 \leq (Ra) \leq 10^{10}.$$

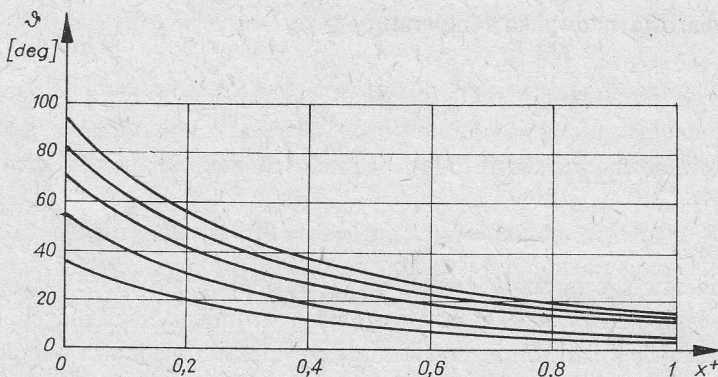
Dla pięciu wybranych wartości mocy elektrycznej wydzielonej przez źródło, po ustaleniu się równowagi termicznej płyty i otaczającego ją oleju, zmierzono rozkład temperatury wzdłuż długości płyty za pomocą siedmiu termoelementów rozmieszczonych w osi płyty. Ponadto mierzono temperaturę płynu niezaburzonego oraz moc cieplną źródła.

Na rys. 5 przedstawiono rozkład zmierzonych nadwyżek temperatury ϑ powierzchni płyty nad temperaturą płynu niezaburzonego w funkcji bezwymiarowej odległości

$$x^+ = \frac{x}{l}$$

od pasmowego źródła ciepła.

Znając wartości nadwyżki temperatury ϑ w określonych punktach pomiarowych, w sposób numeryczny, za pomocą operatorów różnicowych, określono wartość drugiej



Rys. 5. Rozkład nadwyżek temperatury ϑ powierzchni płyty nad temperaturą płynu niezaburzonego w funkcji bezwymiarowej odległości x^+ od pasmowego źródła ciepła, dla różnych wartości mocy cieplnej źródła

pochodnej nadwyżki temperatury ϑ względem współrzędnej x , czyli $d^2\vartheta/dx^2$, dla każdego punktu pomiarowego. Tworząc ich iloraz wyznaczono lokalną wartość parametru m występującego w zależności (21)

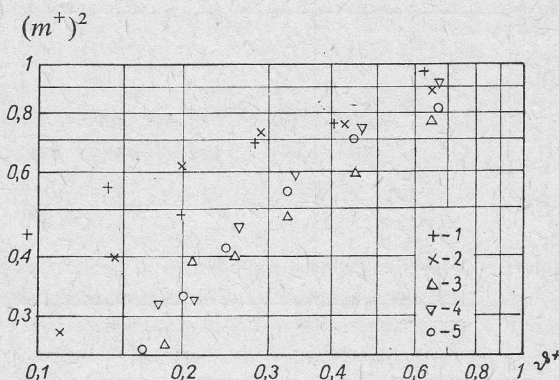
$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = m^2 \vartheta \quad (25)$$

Ponieważ dla każdego punktu pomiarowego została zmierzona wartość nadwyżki temperatury ϑ i jednocześnie przyporządkowana wartość parametru m , przeto zależność

$$m = m(\vartheta)$$

jest jednoznacznie określona.

Na rys. 6 w układzie logarytmicznym o osiach z wielkościami bezwymiarowymi $(m^+)^2$, ϑ^+ , przedstawiono wyniki badań dla różnych strumieni cieplnych wydzielanych przez źródło.



Rys. 6. Wyniki badań lokalnych wartości bezwymiarowego parametru żebrowego m^+ w funkcji bezwymiarowej nadwyżki temperatury płyty dla różnych wartości mocy cieplnej źródła $m_z l$

1 - 2,33, 2 - 2,43, 3 - 2,53, 4 - 2,79, 5 - 2,87

Bezwymiarowy parametr

$$m^+ = \frac{m}{m_0}$$

oraz bezwymiarowa nadwyżka temperatury płyty

$$\vartheta^+ = \frac{\vartheta}{\vartheta_0}$$

zostały zbudowane na podstawie odpowiednich ich wartości w miejscu o współrzędnej $x-a=0$, czyli

$$m_0 = m|_{x^+=0}, \quad \vartheta_0 = \vartheta|_{x^+=0}.$$

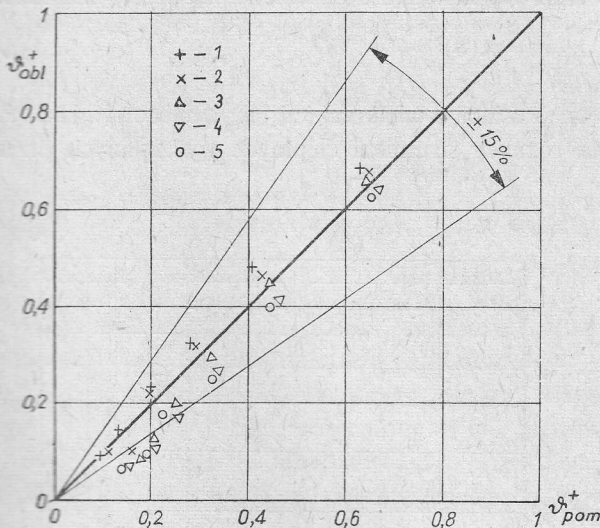
Przedstawiona na rys. 6 zależność zwraca uwagę na istotną zmienność parametru m w funkcji nadwyżki temperatury ϑ . Przy poszczególnych strumieniach cieplnych, wielkość parametru m zmienia się kilkakrotnie, co świadczy również o zmienności współczynnika przewodzenia ciepła oraz uzasadnia zaproponowane podejście teoretyczne.

Badania eksperymentalne pozwoliły również na doświadczalne wyznaczenie wartości zastępczego parametru żebrowego dla różnych strumieni ciepła wydzielanych przez źródło. Ich znajomość pozwala na podstawie wzoru (7), zapisanego przy użyciu zastępczego parametru m_z , czyli

$$\vartheta^+ = \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \frac{\cosh m_z(l-x)}{\cosh m_z l}, \quad (26)$$

wyznaczyć teoretyczne rozkłady temperatury w badanej płycie.

W celu określenia błędu dla przyjętego modelu obliczeniowego, na rys. 7 przedstawiono bezwymiarową nadwyżkę temperatury ϑ_{pom}^+ , wyznaczoną na podstawie pomiarów temperatury płyty, w funkcji bezwymiarowej nadwyżki temperatury ϑ_{obl}^+ obliczoną na



Rys. 7. Korelacja bezwymiarowej nadwyżki temperatury ϑ_{pom}^+ , wyznaczonej na podstawie pomiarów temperatury płyty, z bezwymiarową nadwyżką temperatury ϑ_{obl}^+ , obliczoną na podstawie zależności (26)

1 - 2,33, 2 - 2,43, 3 - 2,53, 4 - 2,79,
5 - 2,87

podstawie zależności (26). Na podkreślenie zasługuje duża zgodność wartości zmierzonych z obliczonymi. Błąd korelacji można ocenić stwierdzeniem, że wartości około 70% punktów pomiarowych nie odbiegają o wartość większą niż 15% od wartości wyznaczonej na podstawie przedstawionego modelu teoretycznego.

4. Wnioski

1. Badania eksperymentalne wymiany ciepła od żebra płaskiego w warunkach konwekcji swobodnej w przestrzeni nieograniczonej wskazały na istotną zmienność lokalnych wartości współczynnika przyjmowania ciepła, a co za tym idzie, zmienność parametru żebrowego m .

2. Wobec poważnej zmienności parametru żebrowego m , zależnego od nadwyżki temperatury płyty nad temperaturą płynu, zagadnienie ustalonego przewodnictwa cieplnego w żebrze staje się problemem nieliniowym.

3. W celu rozwiązania nieliniowego problemu przewodnictwa cieplnego w żebrze płaskim, uzasadniono, a następnie wyprowadzono teoretycznie zastępczy parametr żebrowy m_z , który uśrednia jednocześnie lokalne temperatury płyty i gęstość strumienia ciepła na jej powierzchni. Wskazano również na prosty doświadczalny sposób jego wyznaczania.

4. Na podstawie zastępczego parametru żebrowego zaproponowano sposób określenia zastępczego współczynnika przyjmowania ciepła od płyty o nieizotermicznym rozkładzie temperatury i przy zmiennym strumieniu ciepła na jej powierzchni, a także podano sposób określenia jej sprawności.

5. Porównanie wyników doświadczalnego rozkładu temperatury z wyznaczonym teoretycznie, na podstawie wartości zastępczego parametru żebrowego, wykazuje dobrą zgodność.

Praca wpłynęła do Redakcji w maju 1977 r.

Literatura

- [1] J. Madejski, *Teoria wymiany ciepła*. Warszawa 1963.
- [2] B. Staniszewski, *Wymiana ciepła*. Warszawa 1963.
- [3] T. Hobler, *Ruch ciepła i wymienniki*. Warszawa 1971.
- [4] W. Jasiński, P. Kuński i in., *Badanie zagadnień wymiany ciepła podczas ogrzewania zbiorników ładunku płynnego*. Gdańsk 1975.

Теплообмен на плоском ребре при переменном значении коэффициента теплоотдачи

Резюме

В работе представлен случай свободной конвекции в неограниченном пространстве от горизонтальной плиты, направленной обогреваемой поверхностью кверху. Самым простым решением такого случая является горизонтальная плита с помещенным в ее оси полосным источником тепла, который способствует неизотермичности поверхности. Повторяющийся фрагмент дна трюма для жидких грузов с греющими каналами можно считать горизонтальной плитой с полосным источником тепла.

Представленную проблему можно привести к модели плоского ребра, которого анализ известен в случае постоянства ребрового параметра. Таким образом эту модель можно применять для относительно коротких плит с теплообменом при вынужденной конвекции. В случаях свободной кон-

векции, для которой коэффициент теплоотдачи сильно зависит от переменной по длине температуры плиты, прием постоянства ребрового параметра, зависящего от коэффициента теплоотдачи, является необоснованным.

Прием заменяющего ребра, характеризующегося заменяющим ребровым параметром, приводит нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности в ребре к заменяющему линейному уравнению.

В работе представлено определение заменяющего ребрового параметра, а также показан практический способ его определения. Пользуясь заменяющим ребровым параметром определяется заменяющий коэффициент теплоотдачи для неизотермической плиты и ее эффективность.

Описанный в работе эксперимент подтвердил сходимость представленной теории с результатами экспериментальных исследований.

Flat Rib Heat Exchange for a Variable Heat Transfer Coefficient

Summary

In the paper a case of free convection in an infinite space from a horizontal plate having its heated surface directed upwards has been discussed. A most simple embodiment of this model is a horizontal plate with a heat source in form of a strip placed along the plate symmetry axis. The plate surface becomes nonisothermal due to this source. Repeated section of the bottom of a liquid cargo tank accommodating heating ducts can be regarded as a horizontal plate with a strip heat source.

The problem can be reduced to that of a flat rib, which has already been solved for a constant rib parameter. This model can therefore be used for relatively short plates where the heat exchange is caused by forced convection. When free convection is considered the heat transfer coefficient depends heavily on the plate temperature, which varies along the plate. In this case the assumption of constant rib parameter is inappropriate as the parameter depends on the heat transfer coefficient.

If a substitute rib, characterized by a substitute rib parameter, is introduced, then the nonlinear differential equation of heat conduction in the rib reduces to a substitute linear equation. The definition of the substitute rib parameter has been presented in the paper together with a method of determination of this parameter in practice. A substitute heat transfer coefficient for nonisothermal plate and its efficiency have been determined based on the substitute rib parameter.

Results of experimental investigations described in the paper show a good agreement between the theory presented and the experiment.