

HEAT TRANSFER IN THE SYSTEM OF VERTICAL PLATES

Milan PAVELEK, Eva JANOTKOVÁ*

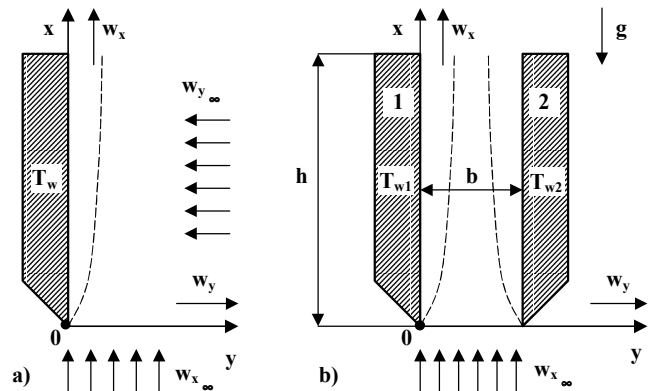
Summary: The article deals with the interferometric research of the heat transfer under the laminar natural air convection in the system of heated vertical plates with constant temperatures of the surfaces. The target of this research was to obtain the data for a suitable structural arrangement of heat exchangers in the form of vertical plates system and to reach maximum heat outputs of these exchangers.

1. ÚVOD

Příspěvek se zabývá interferometrickým výzkumem přestupu tepla při laminární přirozené konvekci vzduchu v soustavě vyhříváných vertikálních desek s konstantními teplotami povrchů. Takové soustavy představují např. desková či článková otopná tělesa, žebrované povrchy chladicích elementů v elektrotechnice, žebrované povrchy motorů, pracovních strojů a technologických zařízení. Cílem výzkumu bylo získat podklady pro vhodné konstrukční uspořádání tepelných výměníků ve tvaru soustavy vertikálních desek, aby tyto výměníky dosahovaly požadovaných tepelných výkonů.

2. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Přestup tepla byl zkoumán na modelu soustavy desek (viz obr. 1), a to na čelním povrchu krajní desky směřující do okolního prostředí a ve štěrbinách mezi svislými deskami se symetrickým, ale i nesymetrickým ohřevem. Jednalo se o elektricky vyhříváné duralové desky o rozměrech $L \times h \times d = 200 \times 140 \times 20$ mm, z nichž bylo možné vytvořit štěrbinu o výšce $h = 140$ mm a šířkách $b = 4$ až 64 mm. Teploty povrchů desek t_{w1} , t_{w2} byly měřeny pomocí termočlánků. Při měřeních byla vždy zaznamenávána také teplota vzduchu okolního prostředí t_∞ , tlak okolního prostředí p_∞ a relativní vlhkost prostředí ϕ . U štěrbin se navíc zaznamenávala teplota uprostřed štěrbin t_o . Měření se prováděla pomocí Machova – Zehnderova interferometru [1] a získané interferogramy byly vyhodnocovány pomocí počítače a vlastního software [2].



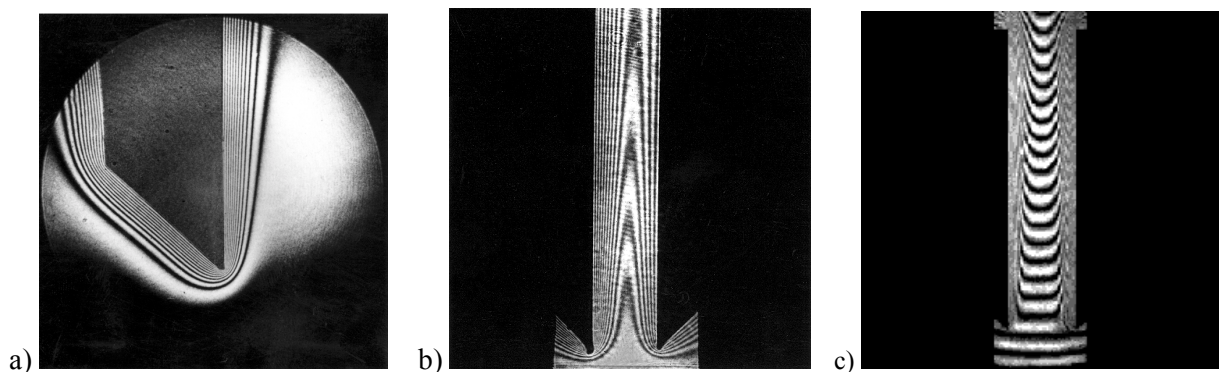
Obr. 1 Schéma uspořádání vytápěných desek

- a) Vertikální deska
- b) Vertikální štěrba

* Doc. Ing. Milan Pavelek, CSc., Doc. Ing. Eva Janotková, CSc., Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Energetický ústav, Fakulta strojního inženýrství VUT, Technická 2, 616 69 Brno, ČR; Tel.: +42 5 4114 3272, +42 5 4114 3268; E-mail: pavelek@dt.fme.vutbr.cz, janot@dt.fme.vutbr.cz

3. INTERFEROGRAMY

Příklady získaných interferogramů jsou uvedené na obr. 2. Jedná se o zviditelnění teplotních polí v okolí náběžné hrany vyhřívané vertikální desky (obr. 2a), ve vstupním úseku nesymetricky vyhřívané vertikální štěrbině (obr. 2b) a v celé symetricky vyhřívané vertikální štěrbině (obr. 2c). Interferogramy na obr. 2a a obr. 2b jsou pořízené při seřízení interferometru na nekonečnou šířku interferenčních proužků, kde interferenční proužky představují prakticky izotermy teplotního pole. Jelikož jsou na těchto interferogramech proužky zřetelné i v blízkosti povrchů desek, lze z interferogramů vyhodnotit teplotní profily ve směrech kolmých k povrchům a z nich pak stanovit derivace teplot v místě povrchů, potřebné pro vyjádření parametrů přestupu tepla. Dojde-li však při vyšších teplotách povrchů desek či v důsledku malé rozlišovací schopnosti zařízení pro záznam interferogramů k zániku interferenčních proužků u povrchů, je vhodnější seřídít interferometr na konečnou šířku horizontálních interferenčních proužků, které se v tepelné mezní vrstvě zakřívují. Z místa zakřivení proužků lze pak velice přesně stanovit tloušťku tepelné mezní vrstvy a z ní určit žádané derivace teplot u povrchů.



Obr. 2 Interferogramy teplotních polí v okolí vertikálních desek při přirozené konvekcii ve vzduchu

- a) Vertikální deska ($t_w = 75\text{ °C}$, $t_\infty = 27\text{ °C}$, $p_\infty = 97300\text{ Pa}$)
- b) Nesymetricky vyhřívaná štěrbina ($b = 8\text{ mm}$, $t_{w1} = 75,8\text{ °C}$, $t_{w2} = 50,8\text{ °C}$, $t_\infty = 21,7\text{ °C}$, $p_\infty = 98770\text{ Pa}$)
- c) Symetricky vyhřívaná štěrbina ($b = 32\text{ mm}$, $t_w = 78,5\text{ °C}$, $t_\infty = 18,5\text{ °C}$, $p_\infty = 97650\text{ Pa}$)

4. VZTAHY PRO VYHODNOCOVÁNÍ

Jsou-li teplotní pole v okolí vyhřívaných desek dvojrozměrná a v celém sledovaném prostoru je konstantní tlak p_∞ , lze dle lit. [3] vyjádřit teplotu $T(x, y)$ v místě x, y jako funkci změny interferenčního řádu $\Delta S(x, y)$ v místě x, y , a to od referenčního místa, které má teplotu T_∞ . Za uvedených podmínek platí vztah

$$T(x, y) = \frac{T_\infty}{1 + \frac{r T_\infty \Delta S(x, y) \lambda}{K p_\infty L}} \quad (1)$$

kde r je plynová konstanta vzduchu, K je Gladstoneova – Daleova konstanta závislá na druhu plynu a použité vlnové délce světla, λ je vlnová délka světla a L je délka desek ve směru šíření světelných paprsků - ve směru z . Vztah (1) byl odvozen za předpokladu ideální interferometrie, která neuvažuje efekty na okrajích dvojrozměrného teplotního pole a zakřivení paprsků při průchodu tepelnou mezní vrstvou. Uvedené jevy byly při vyhodnocování interferogramů korigovány, a to dle poznatků z lit. [4] a [5].

Z teplotních profilů byly pak vyhodnocovány derivace teplot ve směru y kolmém k povrchu. Pokud došlo při záznamu interferogramů k zániku interferenčních proužků u povrchů desek, určovaly se potřebné derivace teplot $(dT/dy)_{wx}$ u povrchu v místě x z tloušťky tepelné mezní vrstvy δ_x , a to pomocí vztahu

$$\left(\frac{dT}{dy}\right)_{wx} = -2 \frac{T_{wx} - T_{ox}}{\delta_x}. \quad (2)$$

Tento vztah lze odvodit, za předpokladu náhrady skutečného teplotního profilu pomocí polynomu druhého stupně. Tloušťka tepelné mezní vrstvy se pak určuje v místě, kde teplotní profil dosahuje hodnoty 2 % z celkového rozdílu teplot mezi teplotou povrchu T_{wx} a teplotou vně mezní vrstvy T_{ox} [3]. U vertikální desky nebo u štěrbin, kde nedošlo ke spojení tepelných mezních vrstev, je $T_{ox} = T_{\infty}$. U štěrbin, kde došlo ke spojení tepelných mezních vrstev, je třeba určit teplotu T_{ox} vně mezní vrstvy (v ose štěrbin) z interferogramu.

Výsledky měření jsou v příspěvku vyjádřeny pomocí bezrozměrných podobnostních čísel. Při přestupu tepla přirozenou konvekcí z vertikální desky je přestup tepla definován Nusseltovým číslem a intenzita přirozené konvekce Grashofovým číslem. Pro lokální hodnoty těchto podobnostních čísel platí vztahy

$$Nu_x = \left.\frac{dT}{dy}\right|_{wx} \frac{x}{T_w - T_{\infty}}, \quad (3)$$

$$Gr_x = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_{\infty}) \cdot x^3}{\nu^2}, \quad (4)$$

kde g je tíhové zrychlení, β je součinitel objemové roztažnosti a ν je kinematická viskozita vzduchu. Střední hodnoty podobnostních čísel při přirozené konvekcí z vertikální desky jsou definovány pomocí vztahů

$$\overline{Nu}_h = \left.\frac{dT}{dy}\right|_w \frac{h}{T_w - T_{\infty}}, \quad (5)$$

$$\overline{Gr}_h = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_{\infty}) \cdot h^3}{\nu^2}, \quad (6)$$

kde $dT/dy|_w$ je střední integrální hodnota derivací teplot na povrchu ve směru y kolmém k povrchu, a to po celé výšce desky.

Při přestupu tepla přirozenou konvekcí ve vertikální štěrbině je přestup tepla definován Nusseltovým číslem a intenzita přirozené konvekce Rayleighovým číslem. Pro lokální hodnoty Nusseltových čísel na desce 1 či desce 2 a na obou deskách platí

$$Nu_{b1} = \left.\frac{dT}{dy}\right|_{x,y=0} \frac{b}{\Delta T}, \quad (7)$$

$$Nu_b = \frac{Nu_{b1} + Nu_{b2}}{2} \quad (8)$$

a pro střední hodnotu Nusseltova čísla v celé štěrbině pak bude

$$\overline{Nu_b} = \frac{1}{h} \int_0^h Nu_b dx. \quad (9)$$

Intenzita přirozené konvekce ve štěrbině je dána Rayleighovým číslem, které je vhodné definovat jak při výzkumu lokálních parametrů přestupu tepla, tak při výzkumu středních parametrů přestupu tepla pomocí šířky štěrbin b

$$Ra_b = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot b^3}{\nu^2} Pr, \quad (10)$$

kde Pr je Prandtlovo číslo. V rovnicích (7) a (10) představuje ΔT teplotní diferenci, která je pro symetricky i nesymetricky vyhříváné štěrbinu počítána z rovnice

$$\Delta T = \frac{(T_{w1} - T_\infty) + (T_{w2} - T_\infty)}{2} = (T_{w1} - T_\infty) \frac{1 + r_t}{2}, \quad (11)$$

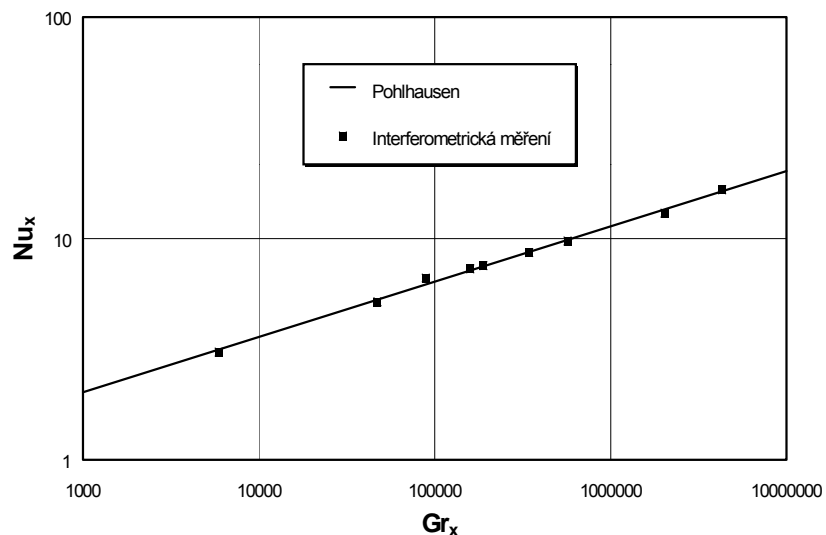
kde r_t je míra nesymetrie ohřevu desek vyjádřena vztahem

$$r_t = \frac{T_{w2} - T_\infty}{T_{w1} - T_\infty}. \quad (12)$$

5. VÝSLEDKY

Interferometricky naměřené lokální hodnoty Nusseltových čísel při laminární přirozené konvekci u vertikální desky v závislosti na lokálním Grashofově čísle jsou uvedeny na obr. 3. Naměřené hodnoty jsou porovnány s teoretickým řešením dle Pohlhausena [6] a lze je vyjádřit vztahem

$$Nu_x = 0,359 \cdot \sqrt[4]{Gr_x}. \quad (13)$$



Obr. 3 Interferometricky naměřené lokální hodnoty Nusseltových čísel na vertikální desce a jejich porovnání s teoretickým řešením dle Pohlhausena

Pro střední hodnoty Nusseltových čísel při laminární přirozené konvekci u vertikální desky pak platí rovněž závislost dle Pohlhausena [6]

$$\overline{Nu}_h = 0,478 \cdot \sqrt[4]{Gr_h} . \quad (14)$$

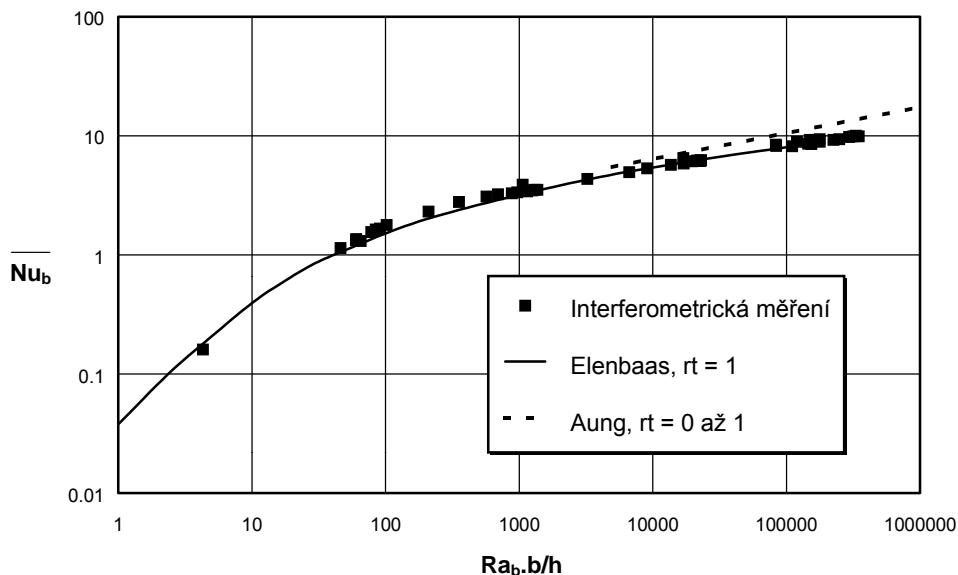
Tato závislost byla v rozsahu středních Grashofových čísel Gr_h od $5,6 \cdot 10^6$ do $1,6 \cdot 10^7$ také potvrzena našimi interferometrickými měřeními.

Interferometricky naměřené střední hodnoty Nusseltových čísel při laminární přirozené konvekci ve vertikální štěrbině, a to v závislosti na Rayleighově čísle Ra_b , modifikovaném poměrem b/h jsou uvedeny na obr. 4. Naměřené hodnoty jsou porovnány s výsledky dle Elenbaase [7], které lze pro symetricky vyhřívané vertikální štěrbinu při přirozené konvekci ve vzduchu v rozsahu parametrů $Ra_b \cdot b/h$ od 1 do $3,5 \cdot 10^5$ vyjádřit rovnicí

$$\log(\overline{Nu}_b) = \sum_{i=0}^{i=4} a_i \left[\log \left(Ra_b \cdot \frac{b}{h} \right) \right]^i , \quad (15)$$

kde $a_0 = -1,490154$, $a_1 = 1,435389$, $a_2 = -4,052674 \cdot 10^{-1}$,
 $a_3 = 6,038416 \cdot 10^{-2}$, $a_4 = -3,516534 \cdot 10^{-3}$.

Interferometricky naměřené hodnoty středních Nusseltových čísel ve štěrbině byly také porovnány s numerickým řešením provedeným Aungem [8], [9]. Zjistilo se, že pro menší hodnoty $Ra_b \cdot b/h$ je Aungovo řešení shodné s výsledky Elenbaase a s interferometricky naměřenými hodnotami. V oblasti větších hodnot $Ra_b \cdot b/h$ jsou však interferometricky naměřené hodnoty středních Nusseltových čísel menší, než hodnoty uváděné Aungem, viz obr. 4. V literatuře [8], [9] je také uvedeno, že pro $Ra_b \cdot b/h > 200$ lze závislosti pro symetricky i nesymetricky vyhřívanou štěrbinu ztotožnit, což bylo také interferometricky ověřeno.



Obr. 4 Interferometricky naměřené střední hodnoty Nusseltových čísel ve štěrbině v závislosti na Rayleighově čísle modifikovaném poměrem b/h a jejich porovnání s výsledky jiných autorů

6. ZÁVĚR

Příspěvek se zabývá interferometrickým výzkumem přestupu tepla při laminární přirozené konvekci vzduchu v soustavě vyhříváných vertikálních desek s konstantními teplotami povrchů. Měření byla vyhodnocována jak kvalitativně, tak kvantitativně s využitím vlastního software. Nejdůležitější jsou však výsledky kvantitativního vyhodnocení, a to vyhodnocení teplotních polí, lokálních parametrů přestupu tepla a středních parametrů přestupu tepla. Naměřené hodnoty Nusseltových čísel při přirozené konvekci u vyhříváné vertikální desky se velice dobře shodují s teoretickým řešením dle Pohlhausena [6]. Výsledky interferometrického výzkumu středních hodnot Nusseltových čísel při přirozené konvekci ve vyhříváných vertikálních štěrbinách potvrdily výsledky uvedené Elenbaasem [7] pro $Ra_{b,b/h}$ v intervalu od 4,3 do $3,5 \cdot 10^5$, nepotvrdily se však výsledky dle Aunga [8], [9], a to v oblasti $Ra_{b,b/h} > 5000$. Získané hodnoty středních Nusseltových čísel mohou sloužit k výpočtům výměníků tepla tvořených soustavou vyhříváných vertikálních desek s konstantními teplotami povrchů umístěných ve volném prostoru při laminární přirozené konvekci vzduchu a jsou základním předpokladem pro návrh vhodného uspořádání desek s cílem dosáhnout požadované parametry přestupu tepla.

Interferometrie byla pro daný výzkum zvolena proto, že se jedná o perspektivní optickou bezdotykovou vizualizační a měřicí metodu, vhodnou právě pro výzkum přestupu tepla, která poskytuje přesné, ucelené a názorné informace o celém sledovaném objektu najednou. Tyto informace umožňují pak lépe odhalit podstatu sledovaných dějů probíhajících v technologických zařízeních, ve strojích či jiných objektech. Použitá metoda vyhodnocování přestupu tepla z tloušťek tepelných mezních vrstev posouvá hranice použitelnosti interferometrie pro vyšetřování teplotních polí a přestupu tepla i do oblasti s většími teplotními diferencemi a gradienty.

Příspěvek je založen na práci provedené v rámci řešení grantového projektu Grantové agentury České republiky č. 101/94/1348.

7. LITERATURA

- [1] Pavelek M., Janotková E.: Interferometric visualization of dynamic temperature fields. 10th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry. Budapest 1997, pp. 123 - 128.
- [2] Pavelek M., Janotková E.: Software pro zpracování interferometrických měření v mechanice tekutin. Sborník konference Inženýrská mechanika '97, Vol. IV, Svratka 1997, s. 151-156.
- [3] Pavelek M., Ramík Z., Liška M.: Použití holografické interferometrie k vizualizaci tepelných mezních vrstev u přirozené konvekce ve vzduchu. Strojnícky časopis 28, 1977, 3, s. 301 – 311.
- [4] Hauf W., Grigull U.: Optical methods in heat transfer. In: Advances in heat transfer. 6. (J. P. Hartnett, ed.). London, Academic Press 1970.
- [5] Bíca J.: Některé problémy použití interferometrie při výzkumu pole indexu lomu v blízkosti fázového rozhraní. Strojnícky časopis 26, 1975, s. 550 - 562.
- [6] Schlichting H.: Grenzschicht-Theorie. 5. Auflage. Karlsruhe, Verlag G. Braun 1965.
- [7] Elenbaas W.: Heat dissipation of parallel plates by free convection. Physica 9, 1942, s. 1 - 28.
- [8] Aung W.: Fully developed laminar free convection between vertical plates heated asymmetrically. Int. J. of Heat and Mass Transfer 15, 1972, s. 1577 - 1580.
- [9] Aung W., Fletcher L. S., Sernas V.: Developing laminar free convection between vertical flat plates with asymmetric heating. Int. J. of Heat and Mass Transfer 15, 1972, s. 2293 - 2308.