

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
Energetický ústav  
Odbor termomechaniky a techniky prostředí**

**Doc. Ing. Milan Pavelek, CSc.**

**INTERFEROMETRICKÝ VÝZKUM  
PŘESTUPU TEPLA  
V SOUSTAVĚ VERTIKÁLNÍCH DESEK**

**Teze habilitační práce**



**Brno, leden 2001**

© 2001 M. Pavelek

ISBN 80-214-1821-4

## **OBSAH**

PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
SEZNAM NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH OZNAČENÍ	5
1. ÚVOD	6
2. MATEMATICKÝ POPIS	7
3. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	9
3.1 Machův - Zehnderův interferometr	9
3.2 Zařízení pro záznam a vyhodnocování interferogramů	11
3.3 Model soustavy desek	12
4. VÝSLEDKY VIZUALIZACE	13
5. TEORETICKÝ ROZBOR VYHODNOCOVÁNÍ MĚŘENÍ	16
6. SOFTWARE PRO VYHODNOCOVÁNÍ MĚŘENÍ	19
7. VÝSLEDKY MĚŘENÍ	22
7.1 Rozložení teplotních polí	22
7.2 Rozložení lokálních parametrů přestupu tepla	24
7.3 Vyhodnocení středních parametrů přestupu tepla	24
7.4 Optimální rozměry soustavy vertikálních desek	26
8. ZÁVĚR	27
LITERATURA	29
ABSTRACT	33

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Doc. Ing. Milan Pavelek, CSc., je zaměstnán na odboru termomechaniky a techniky prostředí Energetického ústavu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Narodil se 2. 10. 1950 v Kravařích v okrese Opava. V roce 1975 ukončil s vyznamenáním vysokoškolské studium na Strojní fakultě Vysokého učení technického v Brně, a to v oboru Přístrojová, regulační a automatizační technika. Po ukončení vysokoškolského studia nastoupil ke studiu řádné vědecké aspirantury v oboru Termomechanika a mechanika tekutin na katedru termomechaniky, kompresorů a chladicích zařízení téže fakulty. Úzce přitom spolupracoval i s pracovníky na katedře fyziky Strojní fakulty v Brně, kde v optické laboratoři prováděl své experimenty z oblasti interferometrické vizualizace teplotních polí. V květnu 1979 obhájil svou kandidátskou disertační práci.

Od roku 1978 pracoval na katedře termomechaniky a jaderné energetiky Strojní fakulty Vysokého učení technického v Brně. Nejdříve působil jako vědecký pracovník, později jako odborný asistent a v roce 1983 byl jmenován docentem pro obor Termomechanika a mechanika tekutin. Přednáší předměty Termomechanika, Přenos tepla a Experimentální metody zaměřené na techniku prostředí. Systematicky vede diplomanty a studenty v odborné vědecké činnosti. Je školitelem několika studentů v doktorském studijním programu. Pro zkoušení studentů z předmětu Termomechanika a z předmětu Přenos tepla využívá vlastní zkušební software.



V 70. a 80. letech řešil řadu státních výzkumných úkolů v oblasti základního výzkumu a v 90. letech se zapojil do řešení grantů Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy a grantů Grantové agentury ČR. Nyní je zodpovědným řešitelem projektu COST a řešitelem výzkumného záměru Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy. Jeho výzkumné aktivity byly většinou zaměřeny na aplikace optických měřicích metod ve strojírenství, v přenosu tepla, v mechanice tekutin a v poslední době také v technice prostředí. Kromě uvedených aplikací se zabýval ve svém výzkumu také numerickým řešením problémů vedení tepla a experimentálním výzkumem přestupu tepla a látky z rotujících povrchů.

V 90. letech vybudoval na katedře termomechaniky a jaderné energetiky optickou laboratoř, kde je instalován unikátní Machův - Zehnderův interferometr a různé další optické sestavy vlastní konstrukce určené pro výukové účely i pro řešení výzkumných problémů. V posledních letech vyvíjel také interaktivní grafické programy pro termodynamické výpočty vodní páry a vlhkého vzduchu. Tyto programy se již řadu let používají ve výuce na různých školách i v praxi. Rovněž vyvinul software pro počítačem podporované vyhodnocování obrazů interferogramů, který je využíván jak ve výzkumu, tak ve výuce.

V roce 1977 absolvoval studijní pobyt na Technické univerzitě v Mnichově, na Univerzitě v Hannoveru a u firmy Rottenkolber Holo-System. V 70. letech absolvoval také krátkodobé studijní pobyty v SVÚSS Běchovice, ve VZLÚ Praha a v Ústavu termomechaniky ČSAV v Praze. V roce 1986 byl na stáži v Budapešti. Ve školním roce 1992/93 vyučoval Termodynamiku na Fachhochschule Schmalkalden v Německu.

Pracuje v oborové radě oboru Technika prostředí a ve státních zkušebních komisích pro obor Technika prostředí a pro obor Dopravní a manipulační technika. Je členem Společnosti chemického inženýrství, Společnosti pro techniku prostředí a členem IBPSA (International Building Performance Simulation Association).

Celkem publikoval okolo 140 článků v časopisech, příspěvků ve sbornících na konferencích a výzkumných zpráv. Podrobnější informace z oblasti výzkumu a z oblasti výukové činnosti doc. Pavelka lze nalézt také na stránkách internetu <http://dt.fme.vutbr.cz/~pavelek>.

## SEZNAM NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH OZNAČENÍ

Symbol	Jednotka	Veličina
$a$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	teplotní vodivost,
$b$	$[\text{m}]$	šířka štěrbin mezi deskami,
$g$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$	tíhové zrychlení,
$h$	$[\text{m}]$	výška desky či štěrbin,
$K$	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	Gladstoneova - Daleova konstanta,
$L$	$[\text{m}]$	délka objektu, desky či štěrbin,
$n$	$[-]$	index lomu,
$o$	$[\text{m}]$	optická dráha,
$p$	$[\text{Pa}]$	tlak,
$\dot{q}$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	hustota tepelného toku,
$r$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná plynová konstanta,
$S$	$[-]$	interferenční řád,
$t, T$	$[^\circ\text{C}], [\text{K}]$	teplota,
$w$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	rychlost,
$x, y, z$	$[\text{m}]$	souřadnice,
$\alpha$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla,
$\beta$	$[\text{K}^{-1}]$	součinitel objemové roztažnosti,
$\delta$	$[\text{m}]$	tloušťka tepelné mezní vrstvy,
$\lambda$	$[\text{m}]$	vlnová délka světla,
$\lambda_v$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	tepelná vodivost tekutiny,
$\nu$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita,
$\rho$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota,
$\tau$	$[\text{s}]$	čas.

### Bezrozměrné parametry

$Gr$	Grashofovo číslo,
$I$	bezrozměrná intenzita obrazových bodů,
$Nu$	Nusseltovo číslo,
$Pr$	Prandtlovo číslo,
$r_i$	míra nesymetrie ohřevu,
$Ra$	Rayleighovo číslo,
$Y$	bezrozměrná souřadnice,
$\Theta$	bezrozměrná teplota,
$\xi$	bezrozměrná souřadnice,
$\xi_{2,3}$	bezrozměrná tloušťka tepelné mezní vrstvy.

### Indexy

$b$	veličina definovaná na šířce $b$ ,
$h$	veličina definovaná na výšce $h$ ,
$o$	veličina v okolí (v ose mezi deskami),
$w$	veličina na povrchu,
$x, y, z$	veličina ve směru či místě $x, y, z$ ,
$1, 2$	veličina na desce $1$ či $2$ ,
$2, 3$	veličina pro polynom druhého či třetího stupně,
$\infty$	veličina ve vzdáleném okolním prostředí (vně štěrbin),
—	střední hodnota (pruh nad symbolem).

# 1. ÚVOD

Práce se zabývá interferometrickým výzkumem přestupu tepla při laminární přirozené konvekci vzduchu v soustavě vyhřívaných 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. V práci jsou vyhodnoceny výsledky našich dílčích měření k dané problematice za delší časové období, a proto zde nalezneme i různé přístupy k měření a k vyhodnocování měření. Cílem uvedeného výzkumu bylo získat podklady pro optimální konstrukční uspořádání tepelných výměníků ve tvaru soustavy vertikálních desek, aby tyto výměníky dosahovaly co největších tepelných výkonů.

Vezmeme-li v úvahu konkrétní uspořádání deskových otopných těles [1], [2], které jsou v popředí zájmu předložené práce, je problematika celkového přenosu tepla z desek do okolí poměrně složitá. Zahrnuje totiž přestup tepla konvekci z povrchů desek do okolního vzduchu, přenos tepla zářením mezi deskovými otopnými tělesy a okolím, ale také přenos tepla vedením držáky desek, které bývají v kontaktu se stěnou místnosti či podlahou. Předložená práce je zaměřena především na výzkum konvektivní složky přenosu tepla, která má výrazný vliv na efektivní a optimální konstrukční uspořádání deskových otopných těles. Desková otopná tělesa jsou převážně složena ze dvou či více svislých paralelních desek, mezi kterými je štěrbina. Přestup tepla konvekci probíhá jednak na čelním povrchu krajní desky směřující do okolního prostředí, viz lit. [3] až [7], ale také na vnitřním povrchu desek tvořících svislé štěrby a na zadním povrchu krajní desky směřující ke stěně, viz lit. [8] až [10].

Interferometrická metoda byla pro výzkum vybrána proto, že se jedná o přesnou a názornou bezdotykovou měřicí metodu, která umožňuje zviditelnit transparentní nehomogenity v celém sledovaném prostoru najednou, čímž lze lépe odhalit podstatu sledovaných jevů, viz např. lit. [11] až [16]. S rozvojem holografie se v 70. letech začaly používat holografické varianty známých interferometrů [17], [18] a interferenční holografická tomografie [19], [20].

Výstupem z interferometrických měření jsou obrazy interferogramů, které lze vyhodnocovat kvalitativně, ale také kvantitativně. Zpracování a vyhodnocování obrazových informací je časově náročné, a proto se obvykle používá výpočetní technika. Po záznamu obrazů interferogramů do počítače je nutné nejdříve upravit jejich kvalitu [21], a pak provést vyhodnocení, tj. rozpoznání průběhů interferenčních proužků a následné přiřazení fyzikálních veličin těmto proužkům. Daný problém spadá do oblasti umělé inteligence a v literatuře lze najít jen zmínky o programech pro vyhodnocování určitých typů interferogramů, nebo zmínky o prováděném vývoji programů, které nelze komerčně využívat [22]. Z tohoto důvodu je výzkum na našem pracovišti zaměřen i na počítačové zpracování a kvantitativní vyhodnocování interferogramů.

Předložená práce je založena na dlouholetých zkušenostech pracoviště s interferometrickým výzkumem v oblasti mechaniky tekutin a speciálně v oblasti přestupu tepla [23] až [57]. Pro měření jsme nejdříve používali holografický a Shearing interferometr vlastní konstrukce (zorné pole o průměru 56 mm), viz lit. [23] až [26] a od roku 1978 jsme používali holografický Machův - Zehnderův interferometr pracující v reálném čase [31], [34], který byl rovněž vlastní konstrukce a měl zorné pole o průměru 80 mm. Od roku 1992 používáme velmi kvalitní Machův - Zehnderův interferometr německé výroby s laserovým zdrojem o průměru zorného pole 200 mm [46], [49]. Interferometr je určený pro výzkum dvojrozměrných nebo rotačně symetrických transparentních objektů. Vzhledem k velikosti zorného pole a vzhledem k vysoké kvalitě získaných interferogramů je toto zařízení v České republice unikátní. Interferometrická měření z oblasti mechaniky tekutin jsme zpočátku prováděli na katedře fyziky Strojní fakulty VUT v Brně. V roce 1991, kdy jsme získali optické prvky pro stavbu různých optických sestav a také uvedený Machův - Zehnderův interferometr, vznikla samostatná optická laboratoř na katedře termomechaniky téže fakulty.

## 2. MATEMATICKÝ POPIS

Typickým útvarem ve zkoumané soustavě vertikálních desek je vertikální deska ve volném prostoru a vertikální štěrbina, viz obr. 1. Štěrbina může mít buď symetrický, nebo nesymetrický ohřev. Uvedený systém lze při zanedbání okrajových efektů považovat za dvojrozměrný. Tvary tepelných mezních vrstev jsou v obr. 1 označeny čárkovaně.

Pro stacionární případy s nestlačitelnou tekutinou a s konstantní viskozitou lze teplotní a rychlostní pole v daných objektech popsat soustavou parciálních diferenciálních rovnic

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0, \quad (1a)$$

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = -\frac{l}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_\infty), \quad (1b)$$

$$w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = \nu \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} \right), \quad (1c)$$

$$w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (1d)$$

Lokální hodnoty součinitele přestupu tepla v místě  $x$  lze na jednotlivých deskách stanovit z diferenciální rovnice přestupu tepla

$$\alpha_x = \lambda_{vx} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{wx} \frac{l}{T_{wx} - T_\infty}. \quad (2)$$

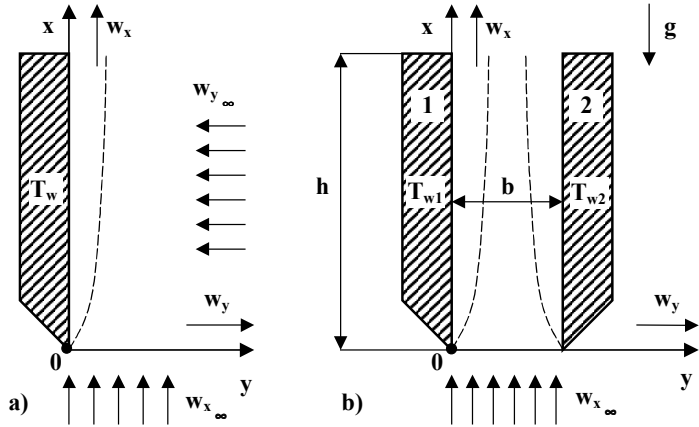
Přestup tepla lze vyjádřit zavedením vhodných bezrozměrných parametrů či kritérií. Výsledné vztahy pro přestup tepla přirozenou konvekcí mají obvykle tvar  $Nu = f(Gr, Pr)$  nebo také  $Nu = f(Ra)$ .

Přestup tepla z vertikální desky s konstantní teplotou povrchu byl exaktně řešen např. Pohlhausenem [3], [4], [5]. Po zavedení definic lokálního Nusseltova a Grashofova čísla

$$Nu_x = \frac{\alpha_x \cdot x}{\lambda_v} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{wx} \frac{x}{T_w - T_\infty}, \quad (3)$$

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

obdržel pro přestup tepla z vertikální desky umístěné ve vzduchu kritériální rovnici ve tvaru



Obr. 1 Schéma uspořádání vytápěných desek

- a) Vertikální deska
- b) Vertikální štěrbina

$$Nu_x = 0,359 \cdot \sqrt[4]{Gr_x} . \quad (5)$$

Po zavedení středních hodnot Nusseltova a Grashofova čísla

$$\overline{Nu}_h = \frac{\bar{\alpha} \cdot h}{\lambda_v} , \quad (6)$$

$$Gr_h = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_\infty) \cdot h^3}{\nu^2} \quad (7)$$

Ize obdržet pro celkový přestup tepla z vertikální desky o výšce  $h$  umístěné ve vzduchu vztah

$$\overline{Nu}_h = \frac{4}{3} Nu_{x=h} = 0,478 \cdot \sqrt[4]{Gr_h} . \quad (8)$$

Přestup tepla ve štěrbině mezi deskami se symetrickým a nesymetrickým ohřevem byl řešen v lit. [10] aj. Lokální hodnoty Nusseltových čísel je vhodné definovat pomocí vztahů

$$Nu_{b1} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{x,y=0} \frac{b}{\Delta T} , \quad Nu_{b2} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{x,y=b} \frac{b}{\Delta T} . \quad (9)$$

Pro lokální hodnotu Nusseltova čísla ve štěrbině v řezu  $x$  platí

$$Nu_b = \frac{Nu_{b1} + Nu_{b2}}{2} \quad (10)$$

a pro střední hodnotu Nusseltova čísla v celé štěrbině pak bude

$$\overline{Nu}_b = \frac{1}{h} \int_0^h Nu_b dx . \quad (11)$$

Rayleighovo číslo je rovněž vhodné definovat pomocí šířky štěrbině  $b$

$$Ra_b = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot b^3}{\nu^2} Pr . \quad (12)$$

V uvedených rovnicích představuje

$$\Delta T = \frac{(T_{w1} - T_\infty) + (T_{w2} - T_\infty)}{2} = (T_{w1} - T_\infty) \frac{1 + r_t}{2} , \quad (13)$$

kde  $r_t$  je míra nesymetrie ohřevu desek, kterou lze vyjádřit vztahem

$$r_t = \frac{T_{w2} - T_\infty}{T_{w1} - T_\infty} . \quad (14)$$

V článku Aunga [9] a Aunga, Fletchera a Sernase [10] je publikováno numerické řešení parciálních diferenciálních rovnic pro přestup tepla přirozenou konvekcí ve štěrbině mezi symetricky i nesymetricky vyhřívanými vertikálními deskami. Autoři dospěli ke vztahům:

$$\text{Pro } Ra_b \cdot b/h < 2 \text{ a } r_t = 1: \quad \overline{Nu}_b = 0,042 \cdot Ra_b \frac{b}{h} . \quad (15)$$

$$\text{Pro } Ra_b \cdot b/h < 2 \text{ a } r_t = 0: \quad \overline{Nu}_b = 0,046 \cdot Ra_b \frac{b}{h} . \quad (16)$$

$$\text{Pro } Ra_b \cdot b/h > 5000 \text{ a } r_t = 0 \text{ až } 1: \quad \overline{Nu}_b = 0,84 \cdot \left( Ra_b \frac{b}{h} \right)^{0,22} . \quad (17)$$



Detailnější výzkum přestupu tepla vyžaduje znalost tvarů teplotních profilů. Poznatky o rozložení teplot v mezních vrstvách umožní však také určovat efektivněji teplotní gradienty u povrchů nutné k výpočtu přestupu tepla (2), (3), (9), a to z tloušťek tepelných mezních vrstev.

Pro konvekci u vertikální desky je známý teplotní profil dle Pohlhausena [3], [4], [5], který je v bezrozměrných souřadnicích vykreslen na obr. 2. Bezrozměrné souřadnice lze definovat vztahy

$$\Theta = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty}, \quad (18)$$

$$\xi = \sqrt[4]{\frac{g(T_w - T_\infty)}{4\nu^2 T_\infty}} \frac{y}{\sqrt{x}}. \quad (19)$$

Kromě Pohlhausenova teplotního profilu se lze setkat s jednoduššími teplotními profily, které mají stejnou derivaci  $(\partial\theta/\partial\xi)_w$  u povrchu, jako profil dle Pohlhausena.

Pro vzduch ( $Pr = 0,733$ ) má tato derivace hodnotu  $(\partial\theta/\partial\xi)_w = -0,508$ . V habilitační práci je odvozen teplotní profil ve tvaru polynomu druhého a třetího stupně.

$$\theta = 1 - \frac{2}{\xi_2} \cdot \xi + \frac{1}{\xi_2^2} \cdot \xi^2 \quad (20)$$

má hranici tepelné mezní vrstvy v místě  $\xi_2 = -2 / (-0,508) = 3,937$ , kde teplotní profil dle Pohlhausena se od teploty okolí liší o 1,98 %.

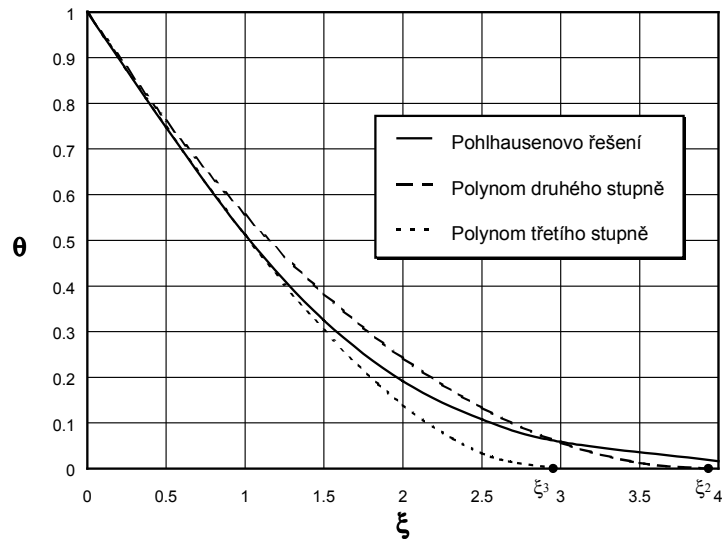
$$\theta = 1 - \frac{3}{2\xi_3} \cdot \xi + \frac{1}{2\xi_3^3} \cdot \xi^3 \quad (21)$$

má hranici tepelné mezní vrstvy v místě  $\xi_3 = -3 / (-0,508.2) = 2,953$ , kde teplotní profil dle Pohlhausena se od teploty okolí liší o 6,20 %.

Bezrozměrné teplotní profily ve štěrbinách jsou vyjadřovány jako funkce  $\Theta = f(Y)$ , kde

$$\Theta = \frac{T - T_\infty}{T_{wl} - T_\infty}, \quad (22)$$

$$Y = \frac{y}{b}. \quad (23)$$



Obr. 2 Porovnání teplotních profilů ( $Pr = 0,733$ )

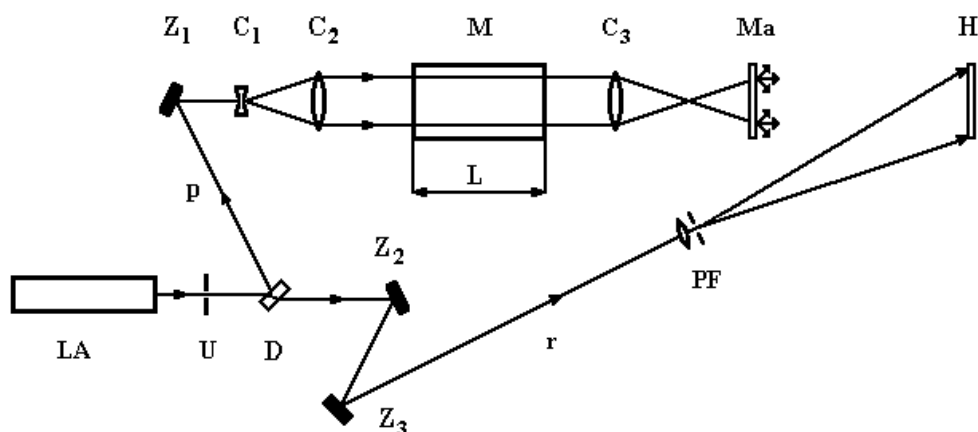
### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Pro výzkum přestupu tepla v soustavě vertikálních desek byly používány různé varianty Machova – Zehnderova interferometru s laserovým zdrojem ( $\lambda = 632,8$  nm), dále pak zařízení pro záznam a zpracování obrazů a model soustavy desek se zařízením a měřicími přístroji pro udržování požadovaných podmínek měření. Při výzkumu se používalo seřízení interferometru na nekonečnou i konečnou šířku interferenčních proužků v referenční oblasti [11], [12].

#### 3.1 Machův – Zehnderův interferometr

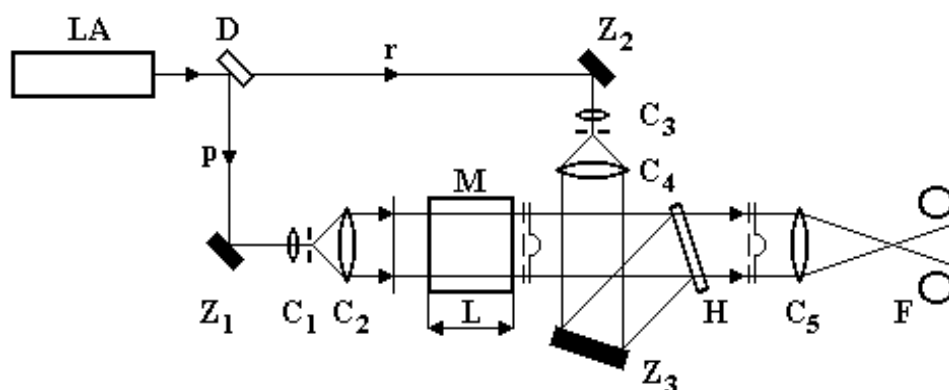
Pro měření teplotních polí a přestupu tepla z vertikálních desek u přirozené konvekce ve vzduchu byl použit holografický Machův – Zehnderův interferometr vlastní konstrukce [23], [24], [25], [26], [30], viz obr. 3. Zařízení s relativně malým zorným polem bylo instalované

v laboratořích katedry fyziky FS VUT v Brně. Výhodou zařízení byla možnost porovnat dva stavy objektu, z nichž ani jeden nemusel být obrazem homogenního prostředí a kvalita získaných interferogramů byla vysoká. Nevýhodou byla nutnost používat pro každé měření novou fotografickou desku. Zařízení navíc neumožňovalo sledovat interferenci v reálném čase a neumožňovalo zaznamenávat dynamická měření. Daný interferometr nebylo možné seřizovat na konečnou šířku interferenčních proužků v referenční oblasti.



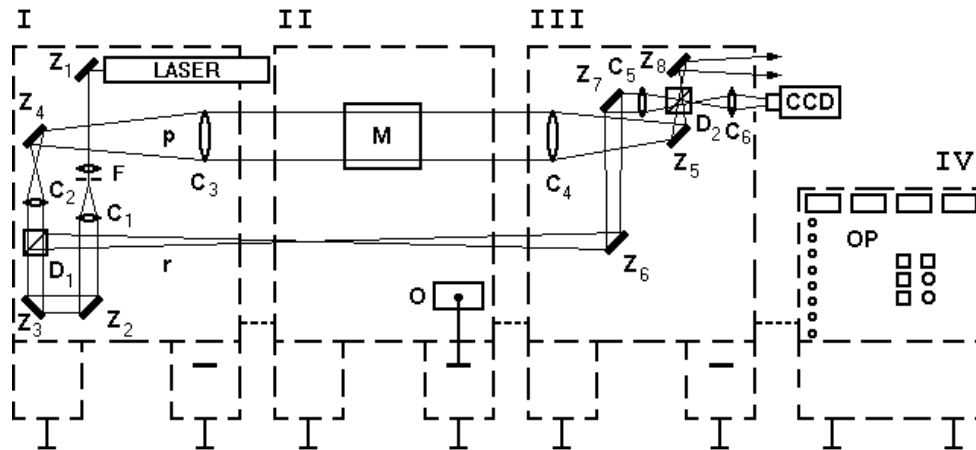
Obr. 3 Schéma holografického Machova – Zehnderova interferometru se zorným polem o průměru 56 mm, pracujícího metodou dvojí expozice  
*LA* - laser, *U* – uzávěrka, *D* - dělič, *Z* - zrcadla, *C* - čočky, *PF* – prostorový filtr, *H* - fotografická deska, *M* - měřicí prostor o délce *L*, *Ma* – matnice, *p* - předmětový svazek, *r* - referenční svazek

Pro interferometrická měření teplotních polí a přestupu tepla ve vstupních úsecích symetricky i nesymetricky vyhřívaných vertikálních či nakloněných štěrbin při přirozené konvekci ve vzduchu byl použit holografický Machův – Zehnderův interferometr vlastní konstrukce [29], [31], [32], [33], [37], viz obr. 4. Zařízení je dosud umístěno v laboratořích Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně. Výhodou zařízení je možnost sledovat interferenci v reálném čase a možnost zaznamenávat i dynamická měření. Interferometr může používat i méně kvalitní optické prvky a lze jej seřadit také na konečnou šířku interferenčních proužků v referenční oblasti. Nevýhodou zařízení je stále relativně malé zorné pole pro měření v mechanice tekutin a poněkud menší kvalita interferenčních proužků.



Obr. 4 Schéma holografického Machova – Zehnderova interferometru se zorným polem o průměru 80 mm, pracujícího v reálném čase  
*LA* - laser, *D* - dělič, *Z* - zrcadla, *C* - čočky, *H* - fotografická deska, *F* - fotoaparát, *M* - měřicí prostor o délce *L*, *p* - předmětový svazek, *r* - referenční svazek

Pro interferometrická měření teplotních polí a přestupu tepla v celých symetricky vyhřívaných vertikálních štěrbinách při přirozené konvekci ve vzduchu byl použit Machův – Zehnderův interferometr bez holografického záznamu firmy LKO Amerang [48], [51], viz obr. 5. Zařízení je instalované v laboratořích odboru termomechaniky a techniky prostředí EÚ FSI VUT v Brně. Vzhledem k velikosti zorného pole se v České republice jedná o unikátní zařízení, které poskytuje kvalitní interferogramy s odchylkou maximálně 1/3 interferenčního řádu, a to na okrajích zorného pole. Interferometr pracuje v reálném čase a je vybaven vysoce kvalitními optickými prvky. Výhodou zařízení je větší zorné pole, možnost sledování interference v reálném čase a možnost záznamu i dynamických měření. Nevýhodou je nemožnost interferometricky porovnat stavy transparentního objektu vůči nehomogennímu objektu.

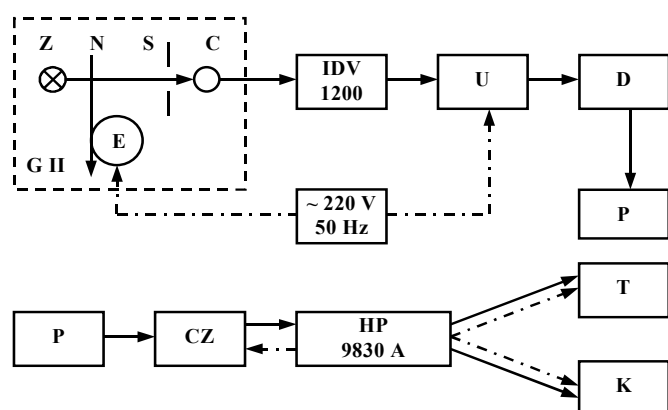


Obr. 5 Schéma Machova – Zehnderova interferometru firmy LKO Amerang (BRD) se zorným polem o průměru 200 mm, pracujícího v reálném čase  
*I* - zdrojový modul, *II* - měřicí modul, *III* - zobrazovací modul, *IV* - ovládací modul,  
*Z* - zrcadla, *F* - prostorový filtr, *C* - čočky, *D* - děliče, *p* - předmětový svazek, *r* - referenční svazek, *M* - měřicí prostor, *O* - ovladač modulů, *OP* - ovládací panel

### 3.2 Zařízení pro záznam a vyhodnocování interferogramů

Obrazy interferogramů uvedené v habilitační práci byly zaznamenávány, zpracovávány a vyhodnocovány různými způsoby. Nejdříve bylo použito manuální zpracování a vyhodnocování, později jsme vyvinuli digitální záznam zvolených řezů obrazů s počítačovým zpracováním a vyhodnocováním a v posledním období, kdy byla již dostupná výkonná výpočetní technika, jsme používali digitální záznam celých obrazů a vyvinuli jsme systém počítačového zpracování a vyhodnocování interferogramů.

Manuální zpracování a vyhodnocování interferogramů bylo používáno při výzkumu teplotních polí a přestupu tepla z vyhřívaných verti-



Obr. 6 Schéma zařízení pro digitální záznam řezů obrazů

*GII* – fotometr, *Z* – zdroj světla, *N* – negativ, *E* – elektromotor, *S* – štěrbin, *C* – čidlo, *IDV* – voltmetr, *U* – měřicí ústředna, *D* – děrovací zařízení, *P* – děrná páska, *CZ* – čtecí zařízení, *HP* počítač, *T* – tiskárna, *K* – kreslicí stůl (plotter)

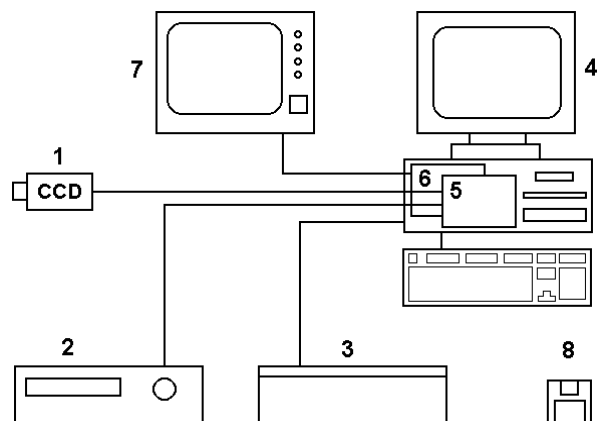
kálních desek při přirozené konvekci ve vzduchu [23], [24], [25]. Fotoaparátem se na kinofilm zaznamenávaly interferogramy sledované při rekonstrukci hologramu. Vyhodnocování poloh interferenčních proužků ve zvolených řezech se provádělo nejdříve ze zvětšených fotografií a později také z negativů interferogramů. Byl přitom využit rychlofotometr G II Carl Zeiss – Jena spojený se zapisovačem. Ze získané křivky propustnosti negativu bylo pak možné určit manuálně a poměrně přesně polohy interferenčních proužků.

Digitální záznam zvolených řezů obrazů interferogramů s počítačovým zpracováním a vyhodnocováním (obr. 6) byl vyvinut v práci [26] a aplikován při výzkumu teplotních polí a přestupu tepla ve vstupních úsecích symetricky i nesymetricky vyhřívaných vertikálních či nakloněných štěrbin při přirozené konvekci ve vzduchu [29], [31], [32], [33], [37]. Fotoaparátem se na kinofilm zaznamenávaly interferogramy při sledování objektu v reálném čase. Vyhodnocování poloh proužků ve zvolených řezech se provádělo z negativů interferogramů, a to s využitím již zmíněného rychlofotometru G II Carl Zeiss – Jena spojeného s měřicí ústřednou a děrovacím zařízením. Děrná páska obsahovala informace o funkci propustnosti negativu ve zvoleném řezu interferogramu a byla zpracovávána dále na počítači HP 9830A.

Digitální záznam obrazů interferogramů s počítačovým zpracováním a vyhodnocováním se prováděl při výzkumu teplotních polí a přestupu tepla v celých symetricky vyhřívaných vertikálních štěrbinách při přirozené konvekci ve vzduchu [48], [51]. Schéma zařízení s počítačem řady PC je uvedeno na obr. 7. Výstupem jsou počítačové soubory obrazů interferogramů uložené na disku v různých obrazových formátech, které se dále zpracovávají a vyhodnocují našim softwarem Interfer. Digitalizační karty používané na pracovišti umožňují zaznamenávat do počítače nejen obrazy, ale také celé videozáznamy.

### 3.3 Model soustavy desek

Pro interferometrický výzkum byly vyrobeny vytápěné desky modelující ve zmenšeném měřítku otopné těleso. Výška skutečného otopného tělesa bývá od 200 do 1000 mm, vzdálenost mezi deskami je až 60 mm. Při projektování vytápění se lze setkat se třemi typy teplotních spádů otopné soustavy, což je poměr teploty vody přívodní a vody vratné. V minulosti se používal převážně teplotní spád 90/70 °C, v současných tepelně izolovaných budovách se hojně využívá teplotní spád 70/50 °C, který vede ke zvýšení komfortu ve vytápěných místnostech. U objektů s velmi dobrou tepelnou izolací lze použít také teplotní spád 55/45 °C. Teplota ve vytápěných místnostech se pohybuje okolo 20 °C. Pro dosažení stejných hodnot  $Ra_b, b/h$  u zmenšeného experimentálního modelu ve vzduchu bylo nutné provádět měření převážně s vyššími teplotami povrchů desek oproti povrchovým teplotám skutečných těles a případně bylo nutné měnit i poměr šířky štěrbiny k výšce  $b/h$ . Měření se prováděla se štěrbinami o šířce 4, 8, 16, 32 a 64 mm a s teplotními diferencemi mezi povrchem desek a okolním prostředím v rozsahu 4,5 K až 150 K.



Obr. 7 Schéma zařízení pro počítačový záznam obrazů interferogramů  
1 - CCD kamera, 2 - videorekordér, 3 - scanner, 4 - počítač, 5 - karta pro vstup videosignálu, 6 - karta pro výstup TV signálu, 7 - televizní přijímač, 8 - programy

Model se skládá ze dvou duralových elektricky vyhříváných desek o výšce  $h = 140$  mm, délce ve směru světelných paprsků  $L = 200$  mm a tloušťce 20 mm. Navržená délka modelu  $L$  je zvolena optimálně, aby nedocházelo k výraznému zakřivení trajektorií světelných paprsků při průchodu tepelnou mezní vrstvou a aby byl potlačen vliv okrajových efektů dvojrozměrného teplotního pole [11], [16], [18]. Uvedené vlivy způsobují odchylky naměřených hodnot teplotních gradientů u povrchů desek až o 5%. Odchylky však lze eliminovat použitím korekcí, které byly použity již v práci [26] a [29].

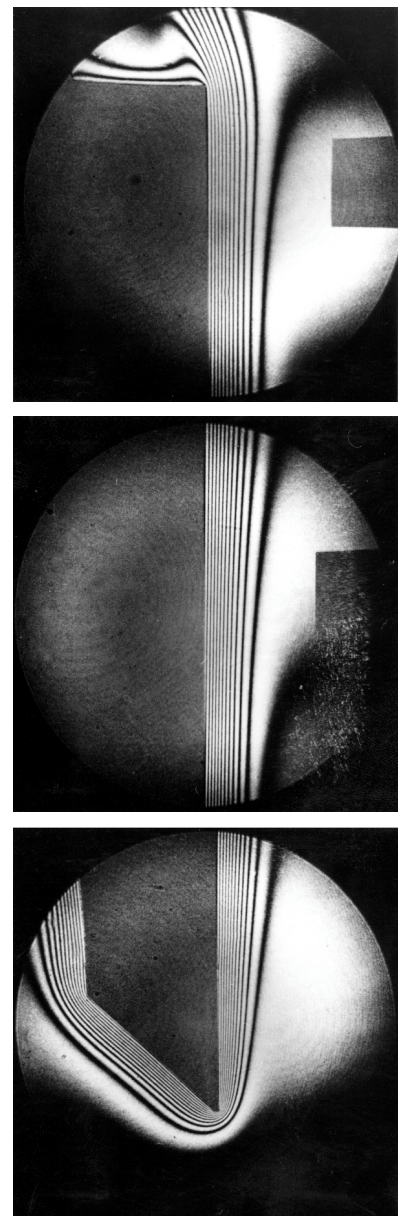
Teploty povrchů desek byly měřeny pomocí dvanácti termočlánků napojených na měřicí ústřednu. Dále byla měřena teplota okolního prostředí, tlak okolního prostředí a vlhkost, která však nemá vliv na výsledky měření.

#### 4. VÝSLEDKY VIZUALIZACE

Výsledkem interferometrické vizualizace teplotních polí v transparentních objektech jsou obrazy interferogramů, které lze nejen posuzovat kvalitativně, ale i vyhodnocovat kvantitativně. Při kvalitativním posuzování interferogramů dvojrozměrných teplotních polí, a to při seřízení interferometru na nekonečnou šířku proužků v referenční oblasti, představují interferenční proužky izotermy teplotního pole a při vhodném seřízení na konečnou šířku proužků v referenční oblasti (referenční osnova proužků musí být kolmá k povrchu) mohou proužky představovat přibližně teplotní profily.

Kvalitativní posuzování obrazů interferogramů umožní odhalit především tvar teplotních polí a jejich vliv na lokální, případně i střední parametry přestupu tepla. Na základě sledování interferogramů v reálném čase nebo na základě posuzování dynamických záznamů je možné vyvodit také závěry o vlivu parazitního proudění v soustavě, o chování dynamických teplotních polí a o dynamickém vývoji parametrů přestupu tepla.

Pomocí holografického Machova – Zehnderova interferometru z obr. 3 byly získány interferogramy teplotních polí v okolí vytápěné vertikální desky, viz obr. 8. U horních dvou interferogramů je vpravo umístěno měřítko. Interferometr při těchto měřeních bylo možné seřít pouze na nekonečnou šířku proužků v referenční oblasti, a proto interferenční proužky představují prakticky izotermy teplotního pole. Jelikož zařízení neumožňovalo sledovat interferenci v reálném čase, zaznamenávané teplotní pole nemuselo být vždy zcela v klidu a mohly se objevovat i parazitní interferenční proužky. Vzhledem k malému zornému poli byla vertikální deska o stejné teplotě povrchu v předmětovém svazku interferometru postupně posouvána, čímž bylo možné zmapovat teplotní pole podél celé výšky desky  $h = 140$  mm. Z interferogramů je zřejmá tepelná mezní vrstva, ve které proudí vzduch směrem vzhůru a vně mezní vrstvy je okolní prostředí s konstantní teplotou vzduchu. Tepelná mezní vrstva se postupně vyvíjí od náběžné hrany

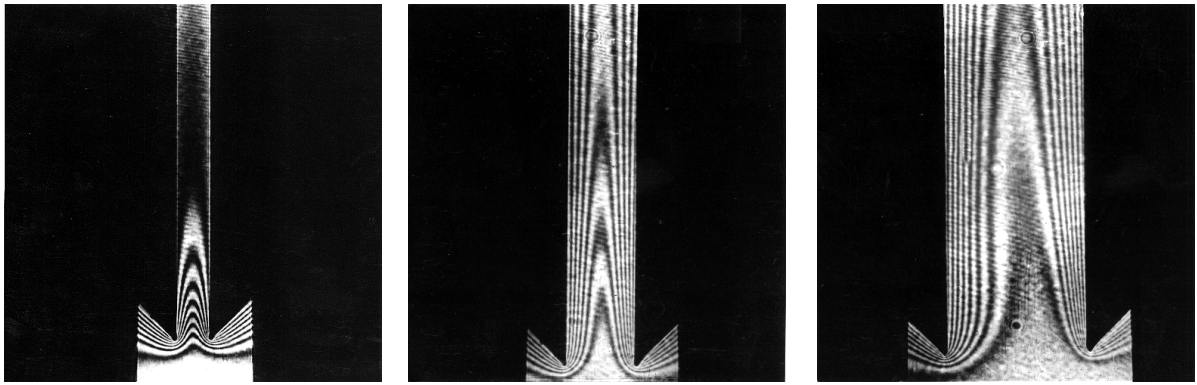


Obr. 8 Teplotní pole u vertikální desky

$$t_w = 75 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_\infty = 27 \text{ }^\circ\text{C},$$

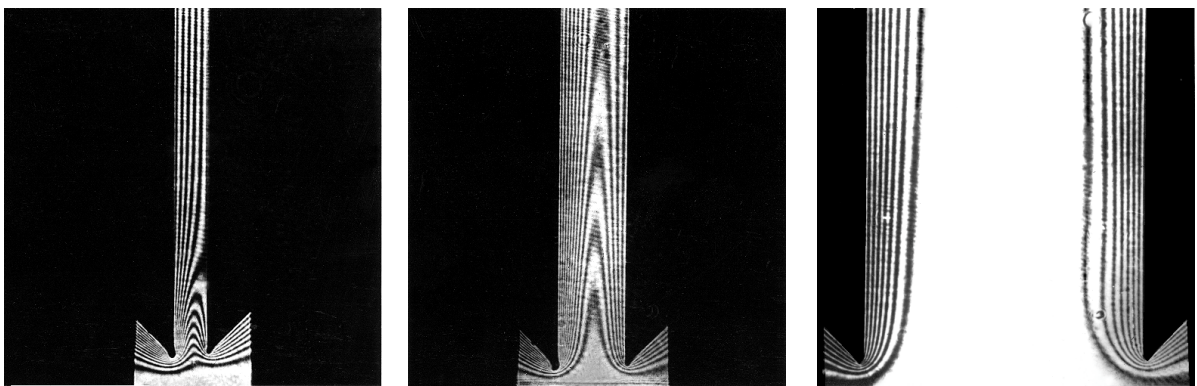
$$p_\infty = 97300 \text{ Pa}$$



a)  $b = 4 \text{ mm}$ ,  $t_{\infty} = 20,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t_{w1} = 51,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{w2} = 51,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $p_{\infty} = 97960 \text{ Pa}$

c)  $b = 8 \text{ mm}$ ,  $t_{\infty} = 21,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t_{w1} = 51,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{w2} = 51,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $p_{\infty} = 98610 \text{ Pa}$

e)  $b = 16 \text{ mm}$ ,  $t_{\infty} = 21,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t_{w1} = 52,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{w2} = 51,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $p_{\infty} = 97300 \text{ Pa}$



b)  $b = 4 \text{ mm}$ ,  $t_{\infty} = 20,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t_{w1} = 76,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{w2} = 51,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $p_{\infty} = 97960 \text{ Pa}$

d)  $b = 8 \text{ mm}$ ,  $t_{\infty} = 21,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t_{w1} = 75,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{w2} = 50,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $p_{\infty} = 98770 \text{ Pa}$

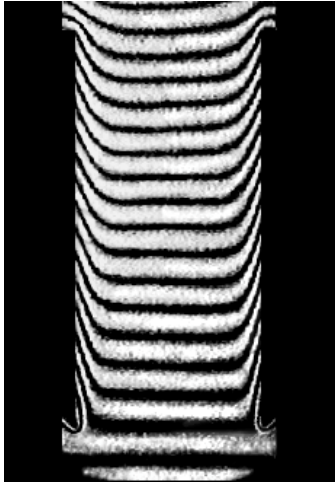
f)  $b = 32 \text{ mm}$ ,  $t_{\infty} = 22,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t_{w1} = 52,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{w2} = 52,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $p_{\infty} = 97760 \text{ Pa}$

Obr. 9 Teplotní pole ve vstupních úsecích štěrbin mezi vertikálními deskami

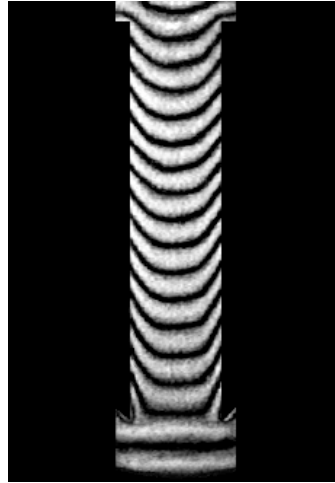
v dolní části k odtokové hraně nahore a téměř stále se rozšiřuje. Rozšiřování mezní vrstvy způsobuje zmenšení teplotního gradientu u povrchu a zmenšení parametrů přestupu tepla. Je zřejmé, že přestup tepla můžeme v daných případech zintenzivnit používáním desek s malou výškou. Rovněž lze dosáhnout vyšších parametrů přestupu tepla používáním desek zvláště vysokých, kdy v horní části desek může být již dosaženo turbulentního proudění.

Pomocí holografického Machova – Zehnderova interferometru z obr. 4 byly získány interferogramy teplotních polí ve vstupních úsecích různých štěrbin mezi vertikálními deskami se symetrickým i nesymetrickým ohřevem, viz obr. 9. Interferometr byl při těchto měřeních rovněž seřízen na nekonečnou šířku proužků v referenční oblasti, a proto interferenční proužky představují prakticky izotermy teplotního pole. Vzhledem k malému zornému poli interferometru ( $\phi 80 \text{ mm}$ ) byly štěrbiny o výšce  $h = 140 \text{ mm}$  také snímány ve třech různých výškách jako u samotné vertikální desky, ale vyhodnocování teplotních polí a přestupu tepla se provádělo pouze ve vstupních úsecích štěrbin. Vzhledem k možnosti sledování interference v reálném čase bylo možné tímto zařízením provést záznam měření ve vhodném okamžiku, kdy na sledovanou přirozenou konvekci nepůsobilo parazitní proudění. Je zřejmé, že mezi vyhřívanými deskami dochází v důsledku vztlakových sil k proudění vzduchu směrem vzhůru, přičemž tepelné mezní vrstvy se rozšiřují a může dojít i k jejich spojení. Zvětšování tloušťek tepelných mezních vrstev způsobuje zmenšování teplotních gradientů na povrchu a zmenšo-

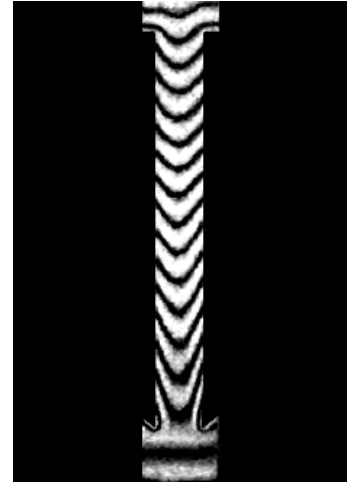




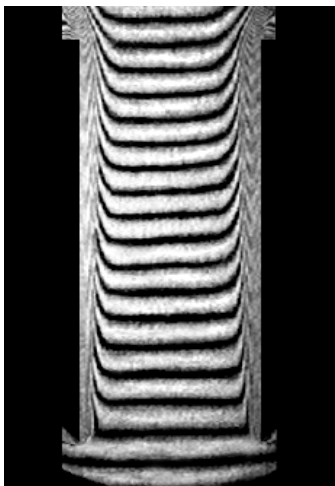
a)  $b = 64 \text{ mm}$ ,  $t_w = 23,3 \text{ °C}$   
 $t_\infty = 16,0 \text{ °C}$ ,  $p_\infty = 98230 \text{ Pa}$



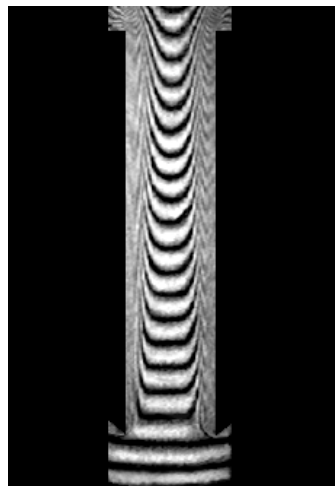
c)  $b = 32 \text{ mm}$ ,  $t_w = 22,5 \text{ °C}$   
 $t_\infty = 18,0 \text{ °C}$ ,  $p_\infty = 97640 \text{ Pa}$



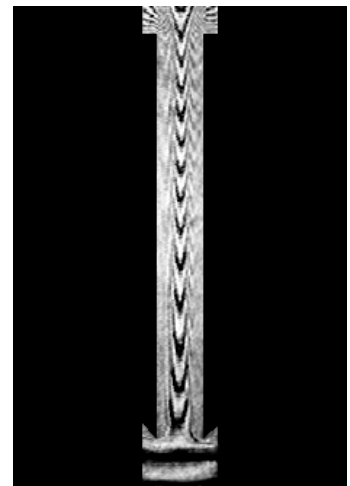
e)  $b = 16 \text{ mm}$ ,  $t_w = 20,0 \text{ °C}$   
 $t_\infty = 15,5 \text{ °C}$ ,  $p_\infty = 98460 \text{ Pa}$



b)  $b = 64 \text{ mm}$ ,  $t_w = 75,0 \text{ °C}$   
 $t_\infty = 16,5 \text{ °C}$ ,  $p_\infty = 98210 \text{ Pa}$



d)  $b = 32 \text{ mm}$ ,  $t_w = 78,5 \text{ °C}$   
 $t_\infty = 18,5 \text{ °C}$ ,  $p_\infty = 97650 \text{ Pa}$



f)  $b = 16 \text{ mm}$ ,  $t_w = 75,0 \text{ °C}$   
 $t_\infty = 16,0 \text{ °C}$ ,  $p_\infty = 98450 \text{ Pa}$

Obr. 10 Teplotní pole ve štěrbinách mezi symetricky vyhřívánými vertikálními deskami

vání parametrů přestupu tepla. Po spojení tepelných mezních vrstev dochází k nárůstu teplot i v ose mezi deskami.

Pomocí Machova – Zehnderova interferometru s laserovým zdrojem a zorným polem o průměru 200 mm (viz obr. 5) byly získány interferogramy teplotních polí ve štěrbinách mezi vertikálními symetricky vyhřívánými deskami. Příklady těchto interferogramů jsou uvedené na obr. 10. Interferometr pracoval v reálném čase a umožnil zaznamenávat teplotní pole i v celé štěrbině najednou. Tato skutečnost byla nezbytným předpokladem pro aplikaci získaných výsledků na relativně velká desková otopná tělesa. Interferometr byl při těchto experimentech seřízen na vhodnou konečnou šířku horizontálních interferenčních proužků, aby bylo možné při vyšších teplotách povrchů desek, kdy dochází k zániku interferenčních proužků u povrchů desek, určovat alespoň přesně hranice tepelné mezní vrstvy. Z tloušťek tepelných mezních vrstev a z průběhu teplot uprostřed štěrbin, a to dle postupu uvedeného v další kapitole, lze pak vyjádřit žádané hodnoty přestupu tepla.

## 5. TEORETICKÝ ROZBOR VYHODNOCOVÁNÍ MĚŘENÍ

Pro kvantitativní vyhodnocování interferogramů s cílem získat parametry přestupu tepla je nutné se zabývat problematikou určování rozložení teplotních polí, případně také určování tloušťek tepelných mezních vrstev. Z rozložení teplot v blízkosti teplosměnných povrchů či z tloušťek tepelných mezních vrstev lze pak stanovit žádané parametry přestupu tepla.

**Princip interferometrické vizualizace** v Machově – Zehnderově interferometru s koherentním zdrojem světla (např. dle obr. 5) lze vysvětlit následovně. Paralelní předmětový svazek prochází měřeným transparentním objektem s nehomogenitami a po průchodu tímto objektem se rovinná vlnoplocha předmětového svazku postupně deformuje. Předmětový svazek se dále v interferometru skládá s nenarušeným referenčním svazkem a oba svazky spolu interferují. U ideální interferometrie, viz obr. 11, kdy uvažujeme přímočaré šíření světelných paprsků dvojrozměrným transparentním objektem o indexu lomu  $n(x, y)$  a délce  $L$ , jsou rozdíly optických drah mezi předmětovými a referenčními paprsky definovány vztahem

$$\Delta o(x, y) = \int_0^L [n(x, y) - n_\infty] dz = L \cdot [n(x, y) - n_\infty]. \quad (24)$$

Po spojení obou svazků v interferometru dochází při nehomogenním rozložení indexu lomu v měřeném objektu k interferenci, která se projevuje interferenčními proužky v obraze. Změna interferenčního řádu proužků  $\Delta S(x, y)$  vůči referenčnímu stavu je pak definována rovnicí

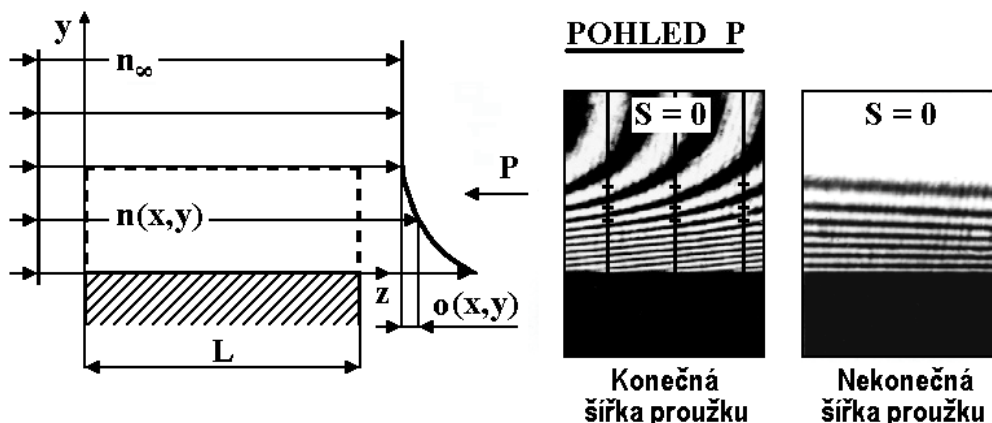
$$\Delta o(x, y) = \Delta S(x, y) \cdot \lambda. \quad (25)$$

Po dosazení rovnice (24) do rovnice (25) dostaneme rovnici ideální interferometrie pro výpočet indexu lomu v měřeném objektu v závislosti na rozložení změny interferenčního řádu

$$n(x, y) = \frac{\Delta S(x, y) \cdot \lambda}{L} + n_\infty. \quad (26)$$

Určování interferenčního řádu z obrazů interferogramů je zřejmé z obr. 11. Při seřízení interferometru na nekonečnou šířku proužků představují interferenční proužky místa stejného interferenčního řádu. U ideální interferometrie dvojrozměrných objektů jsou tyto proužky místa stejného indexu lomu či za konstantního tlaku i místa stejné teploty - izotermy. Interferenční řád  $S(x, y)$  či změna interferenčního řádu  $\Delta S(x, y)$  od referenčního místa nabývá hodnot

$$\Delta S(x, y) = \dots -2; -1; 0; 1; 2; \dots \quad \text{v místech světlých proužků,}$$



Obr. 11 Interferogramy dvojrozměrné transparentní nehomogenity v okolí teplosměnného povrchu o délce  $L$ , získané pomocí ideální interferometrie



$$\Delta S(x,y) = \dots \quad -1,5; -0,5; 0,5; 1,5; \quad \dots \quad \text{v místech tmavých proužků.}$$

Za konstantního tlaku v objektu interferenční řád s rostoucí teplotou klesá. Při seřízení interferometru na konečnou šířku proužků lze změnu interferenčního řádu způsobenou transparentním objektem získat z relativního posuvu proužků vůči osnově proužků v referenční oblasti. Změna interferenčního řádu bude rovna hodnotě  $\pm 1$ , dojde-li k posuvu o rozteč proužků v referenční osnově (viz obr. 11). Proužky u teplosměnného povrchu se mohou zakřivovat doleva i doprava. Směr zakřivení nezávisí však jen na tom, zda k povrchu index lomu (hustota, teplota) roste či klesá, ale také na tom, zda osnova proužků byla způsobena natočením referenčního svazku interferometru kolem vertikální osy doleva či doprava. Při seřízení interferometru na konečnou šířku proužků, které jsou v referenční oblasti kolmé k teplosměnnému povrchu, představují interferenční proužky u ideální interferometrie dvojrozměrných objektů profily indexu lomu a za konstantního tlaku přibližně teplotní profily.

**Vyhodnocování teplotních polí** z interferogramů se provádí na základě stavových rovnic, které vyjadřují vazby mezi termodynamickými a optickými veličinami. Pro ideální plyny nebo homogenní směsi ideálních plynů je možné z Gladstoneova – Daleova vztahu vyjádřit index lomu jako funkci hustoty

$$n = 1 + K \cdot \rho, \quad (27)$$

kde  $K$  je Gladstoneova - Daleova konstanta závislá na druhu plynu a na vlnové délce světla<sup>1</sup>. Vyjádříme-li hustotu ze stavové rovnice ideálního plynu, dostaneme

$$\rho = \frac{p}{rT}, \quad (28)$$

kde  $r$  je měrná plynová konstanta<sup>2</sup>. Pro index lomu  $n$  či  $n_\infty$  za konstantního tlaku pak platí

$$n = 1 + \frac{K}{r} \cdot \frac{p}{T}, \quad n_\infty = 1 + \frac{K}{r} \cdot \frac{p}{T_\infty}. \quad (29)$$

Po dosazení indexu lomu z rovnice (29) do rovnice (26) a následných úpravách dostaneme výsledný vztah pro výpočet rozložení teplot z rozložení interferenčního řádu ve tvaru

$$T(x,y) = \frac{T_\infty}{1 + \frac{r}{K} \frac{T_\infty}{p_\infty} \frac{\Delta S(x,y)\lambda}{L}}, \quad (30)$$

platný pro ideální interferometrii. Nelze-li zanedbat okrajové efekty, vznikající u reálného teplotního pole v okolí vertikálních hran desky [11], [16], [18], jsou interferogramy nejdříve vyhodnoceny dle vzorců pro ideální interferometrii (bez uvažování okrajových efektů) a pak je provedena korekce vypočtených hodnot na okrajové efekty, a to obvykle spolu s korekcí na zakřivení trajektorií světelných paprsků [26], [29]. Po aplikaci korekcí je maximální nejistota určení difference teplot  $T(x,y) - T_\infty$  asi 0,5 K. Při měřeních pomocí interferometru se zorným polem  $\phi$  200 mm musely být pro dosažení této nejistoty prováděné i korekce nehomogenního pole interferometru.

**Vyhodnocování tloušťek tepelných mezních vrstev** lze z interferogramů provádět velmi snadno a rychle. Vyhodnocené tloušťky mohou sloužit jednak ke kvalitativnímu popisu tvaru

<sup>1</sup> Pro suchý vzduch a vlnovou délku světla He-Ne laseru  $\lambda = 632,8$  nm má Gladstoneova - Daleova konstanta hodnotu  $K = 2,2563 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , přičemž vlhkost vzduchu má na index lomu vzduchu v běžných laboratorních podmínkách jen zanedbatelný vliv.

<sup>2</sup> Pro vzduch  $r = 287,04 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

teplotního pole, ale také ke kvantitativnímu určování lokálních parametrů přestupu tepla. Přestup tepla pak lze vyhodnocovat i při vysokých teplotách teplosměnných povrchů, kdy v místech velkých teplotních gradientů interferenční proužky v důsledku malé rozlišovací schopnosti záznamového prostředí zanikají.

Stanovení tloušťek tepelných mezních vrstev vyžaduje použití vhodné definice této tloušťky, neboť teplotní profil se v mnohých případech jen zvolna přimyká k teplotě okolního prostředí. V literatuře se lze setkat s různými definicemi tloušťek tepelných mezních vrstev. Jelikož však předložená práce využívá tloušťku tepelné mezní vrstvy k určování lokálních hodnot přestupu tepla, a to za předpokladu náhrady teplotního profilu polynomem druhého či třetího stupně, je tloušťka tepelné mezní vrstvy definována jako místo, kde se teplota v tepelné mezní vrstvě liší od teploty vně mezní vrstvy o 1,98 % při náhradě teplotního profilu polynomem druhého stupně, nebo o 6,2 % při náhradě teplotního profilu polynomem třetího stupně. Vzhledem k tomu, že je třeba dané procentuální hodnoty respektovat poměrně přesně, je vhodné interferometrický výzkum přestupu tepla provádět při seřízení interferometru s optimální horizontální osnovou interferenčních proužků v referenční oblasti, kdy lze přímo z interferogramu stanovit místo s požadovaným odchýlením proužku od jeho referenční polohy.

Přesnost určování tloušťek tepelných mezních vrstev závisí především na počtu obrazových bodů, které lze na vzdálenosti o velikosti tepelné mezní vrstvy rozlišit. Tato přesnost úzce souvisí s rozlišovací schopností použité CCD kamery, která byla v předložené práci 640 x 596 obrazových bodů. Nejistota při určování lokálních tloušťek tepelných mezních vrstev se většinou pohybovala okolo 3 %<sup>3</sup>.

**Vyhodnocování přestupu tepla** z interferogramů lze provádět z gradientů teplot, indexu lomu či interferenčního řádu u povrchů, nebo také z tloušťek tepelných mezních vrstev. V předložené práci se přestup tepla vyhodnocoval dvěma způsoby, a to z teplotních gradientů u povrchů a z tloušťek tepelných mezních vrstev.

*Při menších teplotách povrchů desek*, kdy byly zřetelné proužky i u teplosměnných povrchů, se vyhodnocovaly nejdříve teplotní profily ve směrech kolmých k povrchům a z nich derivace teplot u povrchů  $(dT/dy)_{wx}$ . Po dosažení lokálních derivací teplot do rovnice (2) bylo možné určit lokální hodnoty součinitele přestupu tepla a po dosažení těchto hodnot do rovnic (3), (9) je možné vyjádřit lokální hodnoty Nusseltových čísel. Nejistota určování derivace teploty na povrchu, či Nusseltova čísla dle vztahů (3), (9) se v daných měřeních pohybovala okolo hodnoty 2,5 %, viz lit. [26]. Nejistota určování součinitele přestupu tepla byla pak větší (okolo 4,3 %), a to především díky nejistotě určování tepelné vodivosti vzduchu.

*Při větších teplotách povrchů desek*, kdy nebyly zřetelné proužky u teplosměnných povrchů, se vyhodnocovaly nejdříve lokální tloušťky tepelných mezních vrstev  $\delta_x$ , teploty vně mezních vrstev<sup>4</sup>  $T_{ox}$  a z nich derivace teplot u povrchů  $(dT/dy)_{wx}$ , které pak bylo možné dosadit pro určení lokální hodnoty součinitele přestupu tepla do rovnice (2) nebo pro určení lokálních hodnot Nusseltových čísel do rovnic (3), (9).

Při vyhodnocování přestupu tepla z tloušťek tepelných mezních vrstev  $\delta_x$  je třeba stanovit závislost lokální derivace teploty v místě povrchu  $(dT/dy)_{wx}$  na tloušťce tepelné mezní vrstvy  $\delta_x$  a teploty vně vrstvy  $T_{ox}$ . Pro teplotní profil  $T = f(y)$  ve tvaru polynomu druhého stupně a pro okrajové podmínky

$$y = 0 \quad \rightarrow \quad T = T_{wx}, \quad (31)$$

<sup>3</sup> V okolí náběžných hran desek, tvořících jen malou část jejich výšky, mohla být chyba až 10 %, ale po proložení hranice mezní vrstvy funkcí se i tato chyba výrazně potlačila.

<sup>4</sup> U vertikální desky se jedná o teplotu okolního prostředí a ve štěrbině se jedná o teplotu uprostřed štěrbině, kde po spojení mezních vrstev může teplota směrem vzhůru stoupat a lze ji určit z interferogramu.

$$y = \delta_x \quad \rightarrow \quad T = T_{ox}, \quad \frac{dT}{dy} = 0 \quad (32)$$

Lze hledanou derivaci teploty v místě povrchu vyjádřit vztahem

$$\left( \frac{dT}{dy} \right)_{wx} = -2 \frac{T_{wx} - T_{ox}}{\delta_x}. \quad (33)$$

Pro teplotní profil  $T = f(y)$  ve tvaru polynomu třetího stupně a pro okrajové podmínky

$$y = 0 \quad \rightarrow \quad T = T_{wx}, \quad \frac{d^2T}{dy^2} = 0, \quad (34)$$

$$y = \delta_x \quad \rightarrow \quad T = T_{ox}, \quad \frac{dT}{dy} = 0 \quad (35)$$

Lze hledanou derivaci teploty v místě povrchu vyjádřit vztahem

$$\left( \frac{dT}{dy} \right)_{wx} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{T_{wx} - T_{ox}}{\delta_x}. \quad (36)$$

Nejistota určování derivace teploty na povrchu z tlouštěk tepelných mezních vrstev (33), (36), či nejistota následného vyhodnocení Nusseltova čísla dle vztahů (3), (9) se u daných měření pohybovala okolo hodnoty 3,5 %. Nejistota určování součinitele přestupu tepla dle rovnice (2) byla pak větší (přes 5 %), a to díky nejistotě určování tepelné vodivosti vzduchu z tabulek. Vyhodnocování teplotních derivací u povrchů z tlouštěk tepelných mezních vrstev vyžaduje vysoce odborný přístup a hluboké znalosti tvarů teplotních profilů. Uvedená metoda má však i své přednosti, jelikož je efektivní a prakticky odstraní vliv okrajových efektů a vliv zakřivení paprsků při průchodu tepelnou mezní vrstvou.

## 6. SOFTWARE PRO VYHODNOCOVÁNÍ MĚŘENÍ

Mezi důležité úkony interferometrického výzkumu patří vyhodnocování interferogramů. Jedná se o odborně i časově náročný proces, jehož efektivní zvládnutí vyžaduje obvykle použití výpočetní techniky a speciálního software. Cílem tohoto procesu v daném výzkumu bylo především vyhodnocení rozložení poloh interferenčních proužků ve sledované oblasti, z něhož se dále počítalo rozložení teplot a rozložení lokálních parametrů přestupu tepla. Vyhodnocování se provádělo obvykle v různých řezech, které byly buď kolmé k povrchům, nebo byly s povrchy paralelní. Z uvedeného plyne, že pro vyhodnocování daných interferogramů bylo třeba najít prostředky, které bez vlivu subjektu automaticky a rychle určovaly polohy interferenčních proužků. Pro případy, kdy bylo třeba pracovat s vyššími teplotami povrchů desek a docházelo k zániku interferenčních proužků u povrchu, bylo nutné vyvinout i algoritmy pro efektivní určování tlouštěk tepelných mezních vrstev.

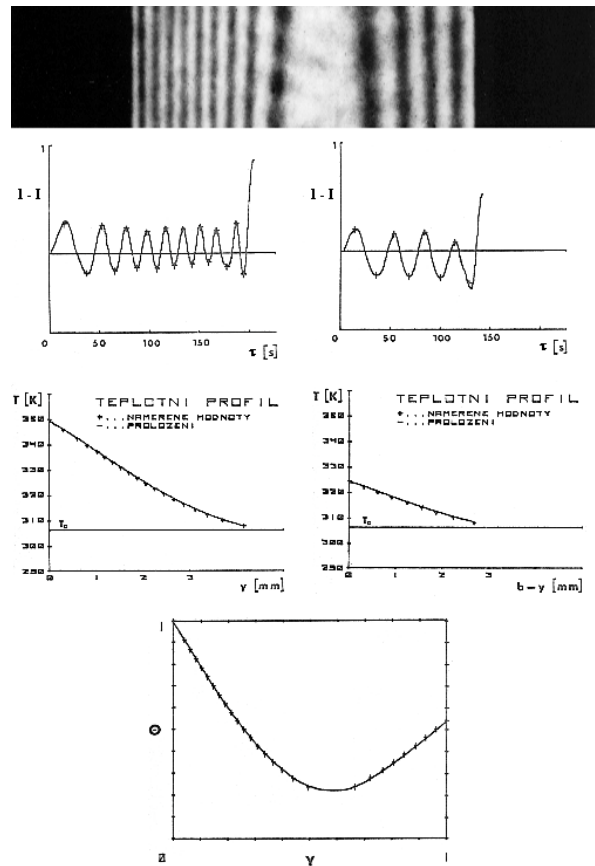
**Software používaný při manuálním vyhodnocování interferogramů** byl aplikován ve výzkumu teplotních polí a přestupu tepla z vyhřívané vertikální desky. Manuálně nebo pomocí fotometru vyhodnoceným polohám proužků byly počítačem přiřazovány teploty, vykreslovány nekorigované a korigované teplotní profily a počítány lokální hodnoty přestupu tepla. Je zřejmé, že daný způsob zpracování měření byl zdoluhavý, pracný a výsledky bývaly zatíženy subjektivními vlivy. Z tohoto důvodu byl později na pracovišti prováděn systematický vývoj dokonalejšího software pro vyhodnocování interferogramů, jelikož dostupné komerční produkty nevyhovovaly a dodnes nevyhovují požadavkům efektivního, rychlého a přesného vyhodnocování interferogramů.

**Software pro zpracování digitálních záznamů řezů interferogramů** byl aplikován ve výzkumu teplotních polí a přestupu tepla ve vstupních úsecích symetricky i nesymetricky

vyhříváných vertikálních či nakloněných štěrbin při přirozené konvekci ve vzduchu. Funkce propustnosti negativu  $I - I = f(\tau)$  (viz obr. 12) zaznamenávaná na děrné pásce pomocí zařízení z obr. 6, a to na obou deskách štěrbin ve zvoleném řezu  $x$ , byla dále zpracovávána počítačem HP 9830A. Počítačový program nejdříve automaticky zjistil polohy proužků (vlastní rutina), a to prokládáním naměřených bodů funkce propustnosti negativu, vykreslil nekorigované i korigované teplotní profily u jednotlivých desek  $T = f(y)$ , propojil teplotní profily v daném řezu v bezrozměrném tvaru  $\Theta = f(Y)$  a vyhodnotil žádané lokální parametry přestupu tepla. Uvedený software umožnil již přesné a relativně efektivní vyhodnocování interferogramů bez vlivu subjektu.

**Software pro zpracování digitálních záznamů obrazů interferogramů** byl aplikován ve výzkumu teplotních polí a přestupu tepla v celých symetricky vyhříváných vertikálních štěrbinách při přirozené konvekci ve vzduchu. Tento software s názvem Interfer, určený pro počítače řady PC, bylo možné vyvinout jedině díky rozvoji výpočetní a audiovizuální techniky v 90. letech. Na pracovišti máme k dispozici několik jednoúčelových verzí programu Interfer pracujících pod operačním systémem DOS (Interfer 1.0 až 1.4). Dále byl vyvinut obecněji pojatý program Interfer 2.0, který je určený k vyhodnocování jakýchkoliv typů interferogramů a v současné době je již odladen obecný software Interfer 3.0, který je určen pro operační systém Windows 98.

*Software Interfer 1.2* je jednoúčelový program pro vyhodnocování teplotních polí a přestupu tepla ve štěrbinách mezi vyhřívánými deskami. Software byl vyvíjen v rámci výzkumu prováděného při řešení projektu pro Grantovou agenturu České republiky [48]. Cílem výzkumu bylo zjistit rozložení teplot v ose štěrbin mezi deskami, interaktivně určit tloušťky tepelných mezních vrstev a z těchto veličin dále vyhodnotit lokální a střední hodnoty Nusseltových čísel na povrchu vyhříváných desek. Program pracuje s nekomprimovanými obrazovými soubory typu \*.tif, s 256 úrovněmi šedi a s 320 x 200 obrazovými body. Ovládá se interaktivně pomocí klávesnice a myši, má účelně rozvrženy atributy barev (pro vyhodnocování obrazů v šedé škále se současným zobrazením barevných objektů) a umožňuje tisk obrazů pomocí programu PizazzPlus. Je vybaven kalkulátorem, návodem k obsluze a možností přerušit vyhodnocování pro dočasnou práci v DOS. Program obsahuje různé důležité funkce pro úpravu kvality obrazů (kontrast a jas, Gaussovský kontrast a jas – vlastní funkce, filtrace obrazů, absolutní a relativní retušování – vlastní funkce), umožňuje zadávat konkrétní parametry k obrazům (vlnovou délku, počátek souřadného systému, měřítka ve směru  $x$  a  $y$ , teploty povrchů, tlak a teplotu okolního prostředí, rozměry štěrbin) a obsahuje i různé funkce pro úpravu obrazu k prezentaci (kreslení bodů, čar, obdélníků, kružnic, vyplňování oblastí, změny atributů,



Obr. 12 Funkce propustnosti negativu a korigované teplotní profily ve vyhříváné vertikální štěrbině

$$b = 8 \text{ mm}, x = 20 \text{ mm},$$

$$t_{w1} = 75,8^\circ\text{C}, t_{w2} = 50,8^\circ\text{C},$$

$$t_\infty = 21,7^\circ\text{C}, p_\infty = 98770 \text{ Pa}$$

změny palety barev, psaní textů, překlopení obrazu apod.). Uvedená verze programu je do jisté míry univerzální, jelikož obsahuje proceduru zvanou dimenzování, pomocí které lze ukládat do textového souboru různé absolutní i relativní polohy a úhly v obraze, nastavené pomocí myši. Hlavní předností programu je však možnost automatického určování poloh proužků v libovolně vedeném řezu (vlastní funkce) a interaktivní určování tloušťek tepelných mezních vrstev. Důležitou je v programu funkce pro vyhodnocení teplotního profilu a vyhodnocení parametrů přestupu tepla v numerické i grafické podobě. Tato funkce řadí software Interfer 1.2 mezi jednoúčelové programy, jelikož ji nelze beze změn využít v programu pro vyhodnocování jiných typů interferogramů. Aktuálně naměřené střední hodnoty Nusseltových čísel bylo možné okamžitě porovnat i s hodnotami naměřenými z dříve vyhodnocených interferogramů. Ve vyhodnocovací proceduře byl využit vztah (30) pro vyhodnocování teplot z interferenčního řádu, vztahy (9), (33), (36) pro určení lokálních parametrů přestupu tepla z lokálních tloušťek tepelných mezních vrstev a další vztahy pro vyjádření přestupu tepla v bezrozměrných souřadnicích. Pro dosažení vyšší přesnosti byla provedena také korekce naměřeného interferenčního řádu na nehomogenní referenční pozadí interferometru.

Příklad vyhodnocení obrazu interferogramu teplotního pole v symetricky vyhřívané štěrbině pomocí software Interfer verze 1.2 je uveden na obr. 13. Obraz je z důvodu omezené rozlišovací schopnosti otočen o 90°, uprostřed mezi deskami jsou automaticky vyhodnocené polohy interferenčních proužků (pro určení rozložení teplot na okraji mezních vrstev), v dolní části obrazu jsou automaticky vyhodnocené polohy interferenčních proužků v referenční oblasti a interaktivně jsou určeny hranice obou mezních vrstev.

Příklad vyhodnocení teplotních polí a přestupu tepla z interferogramu teplotního pole ve štěrbině mezi vyhřívány vertikálními deskami při přirozené konvekci ve vzduchu pomocí software Interfer verze 1.2 je na obr. 14. Ve formuláři je vlevo nahoře tabulka naměřených hodnot a vlevo dole tabulka vypočtených hodnot. Vpravo nahoře je průběh referenčního interferenčního řádu (horní křivka) a měřeného interferenčního řádu v ose mezi deskami (dolní křivka), ze kterých je určována změna interferenčního řádu způsobená teplotním polem v ose mezi deskami. Vpravo uprostřed je průběh difference teploty mezi deskami vůči teplotě okolí (dolní křivka) a průběh lokálních Nusseltových čísel (horní křivka). Je zřejmé, že při proudění vzduchu štěrbinou se postupně zvyšuje teplota uprostřed štěrbiny  $T_o$  a z průběhu lokálních Nusseltových čísel plyne, že nejvyšší hodnoty  $Nu_x$  jsou na vstupu do štěrbiny. Vpravo dole vidíme pak výsledné zobrazení závislosti středních Nusseltových čísel (11) na Rayleighově čísle (12) modifikovaném poměrem  $b/h$ , a to v logaritmických souřadnicích. V tomto grafu je kroužkem označena hodnota pro vyhodnocovaný interferogram a plnými body jsou označeny hodnoty ostatních, již vyhodnocených interferogramů.

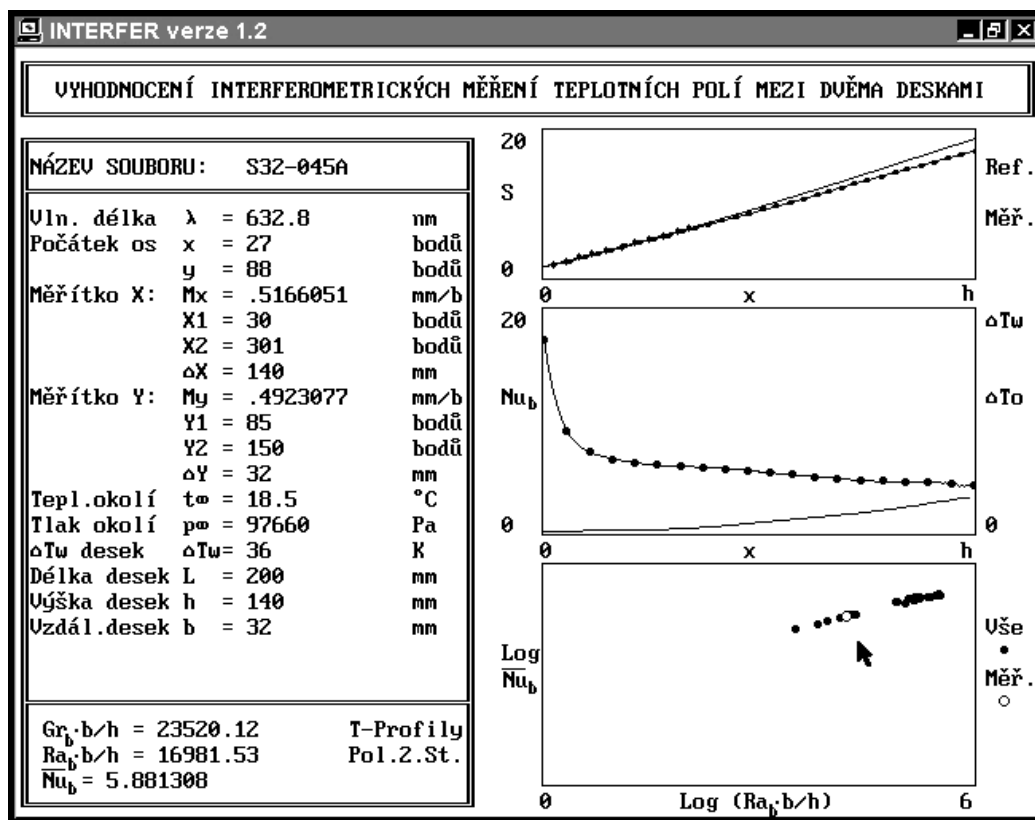
Software Interfer 2.0 je obecným programem pro vyhodnocování interferogramů a jeho podrobnější popis lze nalézt v lit. [50]. Použití tohoto software pro vyhodnocování přestupu tepla ve štěrbinách z tloušťek tepelných mezních vrstev je sice možné, avšak méně efektivní



Obr. 13 Vyhodnocování interferogramu teplotního pole v symetricky vyhřívané štěrbině pomocí software Interfer 1.2

$$b = 32 \text{ mm}, t_w = 28,0 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_\infty = 18,0 \text{ }^\circ\text{C}, p_\infty = 97660 \text{ Pa}$$



Obr. 14 Vyhodnocení teplotních polí a přestupu tepla z interferogramu teplotního pole ve štěrbině pomocí software Interfer 1.2

než použití speciálního software Interfer 1.2. Automatické vyhodnocování rozložení interferenčních proužků v ose mezi deskami a v referenční oblasti je ve verzi 2.0 obdobné, jako ve speciální verzi 1.2, ale interaktivní určování tloušťek tepelných mezních vrstev je v obecné verzi 2.0 poněkud složitější. Obecný software je navíc vybaven vlastní rutinou pro automatické určování průběhů interferenčních proužků, což by bylo možné využít např. pro automatické určování tloušťek tepelných mezních vrstev a odstranit tak subjektivní vliv při jejich interaktivním určování. Je třeba však poznamenat, že aplikace obecného software Interfer 2.0 na vyhodnocování teplotních polí a přestupu tepla ve štěrbinách vyžaduje také vytvoření speciálního externího programu (typu \*.exe) pro vyhodnocení žádaných parametrů přestupu tepla.

## 7. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Cílem práce je prozkoumat teplotní pole v okolí soustavy vertikálních desek, abychom zjistili celkový tvar teplotního pole a odhalili tak podmínky pro optimální uspořádání desek z pohledu získání maximálních hodnot přestupu tepla přirozenou konvekcí. Výsledkem práce jsou proto informace o teplotních polích, informace o rozložení lokálních parametrů přestupu tepla, ale především střední hodnoty přestupu tepla, ze kterých je možné stanovit optimální rozměry soustavy desek.

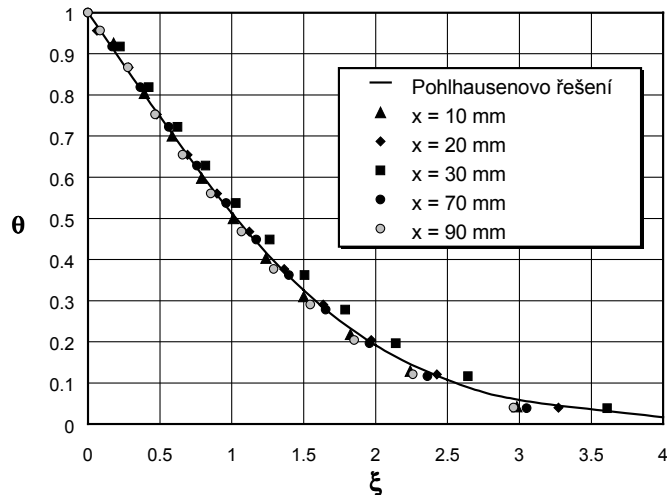
### 7.1 Rozložení teplotních polí

Detailní rozložení teplot nebývá obvykle středem zájmů při hodnocení výměníků tepla z energetického pohledu. Interferometrický výzkum však poskytuje především informace o teplotních polích, ze kterých se pak určují parametry přestupu tepla, a proto se zde naskytá možnost posouzení optimálního uspořádání soustavy desek z pohledu znalosti teplotních polí.

Příklad vyhodnocení bezrozměrných teplotních profilů v různých vzdálenostech  $x$  od náběžné hrany vertikální desky, a to z interferogramů na obr. 8, je uveden na obr. 15. Jedná se o závislost  $\Theta = f(\xi)$ , kde  $\theta$  je definováno rovnicí (18) a  $\xi$  je definováno rovnicí (19). Naměřené hodnoty jsou porovnány s teplotním profilem dle Pohlhausena [3], [4], [5]. Z obrázku je zřejmá dobrá shoda mezi Pohlhausenovým teplotním profilem a interferometricky naměřenými hodnotami. Tato shoda opodstatňuje zvolený způsob vyhodnocování přestupu tepla z tlouštěk tepelných mezních vrstev, jejichž hranice byly definovány právě ve vztahu k teplotnímu profilu dle Pohlhausena.

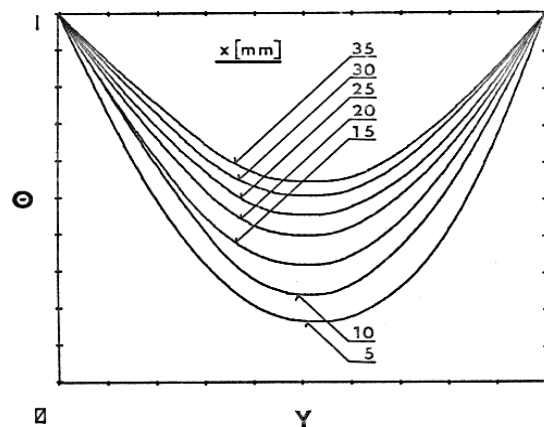
Na obr. 16 jsou teplotní profily ve vstupním úseku symetricky vyhřívané štěrbině šířky 8 mm vyhodnocené z interferogramu na obr. 9c. Jedná se o závislost  $\Theta = f(Y)$ , kde bezrozměrná teplota  $\Theta$  je definována rovnicí (22) a bezrozměrná souřadnice  $Y$  je definována rovnicí (23). Je zřejmé, že po krátké vzdálenosti  $x$  se teplota uprostřed štěrbině vlivem spojení tepelných mezních vrstev zvyšuje, což má za následek i zmenšování teplotních gradientů u povrchů a zmenšování parametrů přestupu tepla.

Porovnání vybraných bezrozměrných teplotních profilů v ose štěrbině o šířce 32 mm, podél celé její výšky, lze vidět na obr. 17. Je zřejmé, že po spojení tepelných mezních vrstev dochází v podstatě k nárůstu teploty v ose štěrbině, ale někdy můžeme za vstupním průřezem pozorovat nárůst, pokles a opět nárůst teploty. Tento jev zřejmě způsobuje rychlostní pole na vstupu do štěrbině, kdy vzduch



Obr. 15 Porovnání bezrozměrných teplotních profilů naměřených u vertikální desky s teplotním profilem dle Pohlhausena ( $Pr = 0,733$ )

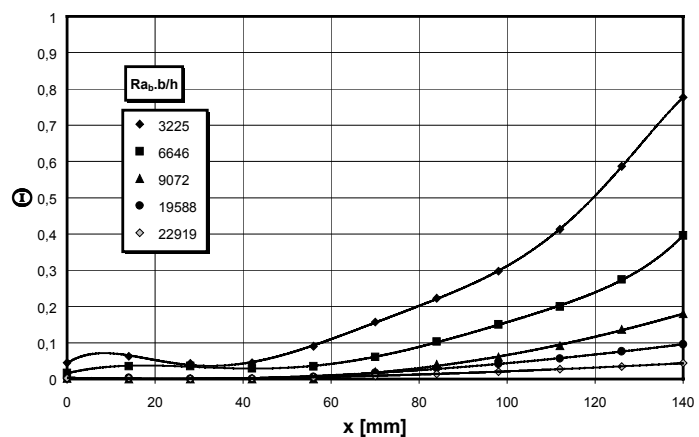
$$t_w = 75 \text{ } ^\circ\text{C}, t_\infty = 27 \text{ } ^\circ\text{C}, p_\infty = 97300 \text{ Pa}$$



Obr. 16 Naměřené bezrozměrné teplotní profily v symetricky vyhřívané štěrbině ( $b = 8 \text{ mm}$ )

$$t_\infty = 21,8 \text{ } ^\circ\text{C}, p_\infty = 98610 \text{ Pa},$$

$$t_{w1} = 51,1 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{w2} = 51,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obr. 17 Porovnání teplotních profilů v ose štěrbině o šířce  $b = 32 \text{ mm}$



proudí do štěrbině ze všech stran, obdobně jako u rovinného propadu. V užších štěrbinách je daný jev potlačen spojenými tepelnými mezními vrstvami, v širších štěrbinách nedosáhne tento jev až do osy štěrbině a šikmé proudění v blízkosti náběžných hran je proto relativně menší.

## 7.2 Rozložení lokálních parametrů přestupu tepla

V uvedených výzkumech bylo prováděno také detailní vyhodnocování lokálních parametrů přestupu tepla, což patří rovněž k výhodám interferometrického výzkumu. Rozložení lokálních parametrů přestupu tepla umožní především kvantitativně posoudit konkrétní místa s nevyhovujícími parametry přestupu tepla.

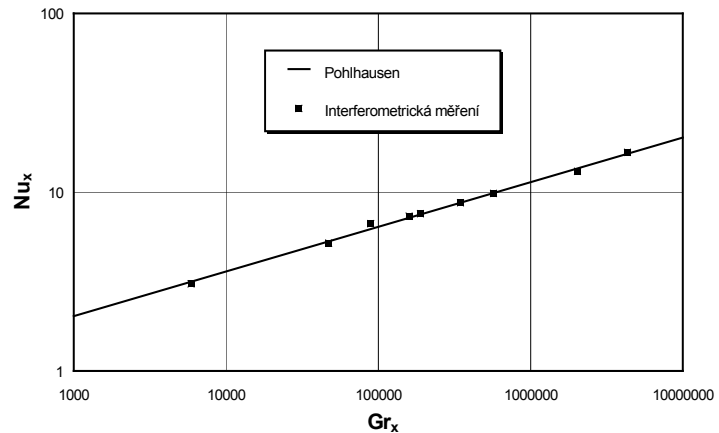
Na obr. 18 je porovnání naměřených hodnot lokálních Nusseltových čísel (3), v závislosti na Grashofově čísle (4), a to s teoretickým řešením dle Pohlhausena (5). Naměřené hodnoty Nusseltových čísel byly určeny z interferometricky vyhodnocených teplotních profilů u vertikálních desek. Z obrázku je zřejmá dobrá shoda mezi teoretickým řešením a interferometricky naměřenými hodnotami.

Porovnání lokálních hodnot Nusseltových čísel (10) ve vstupních úsecích symetricky vyhřívaných štěrbin různých šířek lze vidět na obr. 19. Jedná se o vyhodnocení interferogramů z obr. 9a, 9c, 9e, 9f ve vzdálenostech  $x = 5$  až 35 mm od vstupu do štěrbině. Na obr. 19 je možné pozorovat zvlnění vykreslených závislostí u širších štěrbin, což způsobuje proudění na vstupu do štěrbině diskutované již v textu u obr. 17. Je zřejmé, že s rostoucí šířkou štěrbině rostou i lokální hodnoty Nusseltových čísel. Jejich růst není však způsoben jen zvětšováním teplotních gradientů u povrchů desek, ale také charakteristickým rozměrem  $b$  v definici Nusseltova čísla (9).

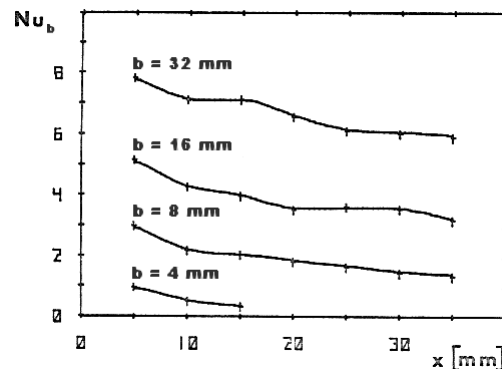
## 7.3 Vyhodnocení středních parametrů přestupu tepla

Z energetického pohledu je třeba znát především střední parametry přestupu tepla. Tyto parametry byly v práci určovány jako střední integrální hodnoty lokálních parametrů přestupu tepla podél výšky vertikální desky nebo štěrbině se symetrickým či nesymetrickým ohřevem.

Střední hodnoty Nusseltových čísel při přirozené konvekci u vyhřívané vertikální desky s konstantní teplotou povrchu byly vyhodnocovány z interferogramů teplotních polí manuálně. Vzhledem k náročnosti vyhodnocování bylo systematicky zpracováno jen šest interferogramů dvou odlišných tepelných stavů desky, a to v rozsahu  $Gr_h = 5,6 \cdot 10^6$  až  $1,6 \cdot 10^7$ . Namě-

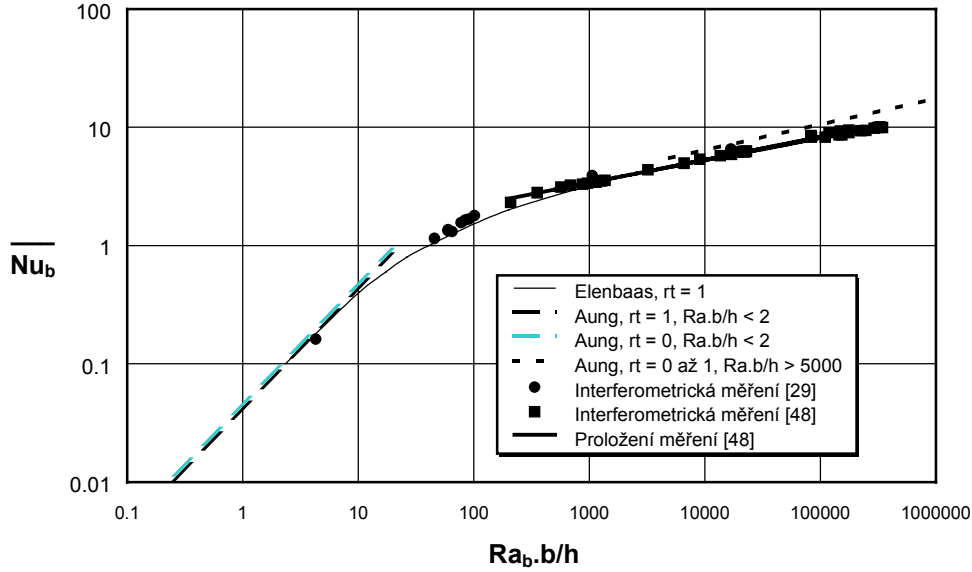


Obr. 18 Porovnání lokálních hodnot Nusseltových čísel na vertikální desce s teoretickým řešením dle Pohlhausena.



Obr. 19 Porovnání lokálních hodnot Nusseltových čísel v symetricky vyhřívaných štěrbinách





Obr. 20 Středních hodnoty Nusseltových čísel ve štěrbině v závislosti na Rayleighově čísle modifikovaném poměrem  $b/h$

řené střední hodnoty Nusseltových čísel se velmi dobře shodovaly s teoretickým řešením dle Pohlhausena (8).

Střední hodnoty Nusseltových čísel při přirozené konvekci ve štěrbinách s konstantními teplotami povrchů byly vyhodnocovány z interferogramů teplotních polí pomocí počítače. Měření pokrývala rozsah  $Ra_b \cdot b/h$  od 4,3 až do  $3,5 \cdot 10^5$ . Na obr. 20 vidíme interferometricky naměřené střední hodnoty Nusseltových čísel  $\overline{Nu}_b$  (11) v závislosti na  $Ra_b \cdot b/h$ , kde Rayleighovo číslo je definované vztahem (12). Naměřené hodnoty jsou porovnány s výsledky jiných autorů, viz kritériální rovnice (15), (16), (17) dle Aunga [9], [10] a výsledky dle Elenbaase [8], [7]. Interferometricky naměřené hodnoty středních Nusseltových čísel v symetricky vyhřívaných vertikálních štěrbinách lze vyjádřit v rozsahu parametrů  $Ra_b \cdot b/h$  od  $2,1 \cdot 10^2$  do  $3,5 \cdot 10^5$  pomocí vztahu

$$\overline{Nu}_b = 0,905 \cdot \left( Ra_b \cdot \frac{b}{h} \right)^{0,191} \quad (37)$$

Pro případ plně vyvinutého proudění ve štěrbině se symetrickým ohřevem ( $Ra_b \cdot b/h < 2$ ,  $r_t = 1$ ) lze použít vztah (15) a pro případ plně vyvinutého proudění ve štěrbině s nesymetrickým ohřevem ( $Ra_b \cdot b/h < 2$ ,  $r_t = 0$ ) lze použít vztah (16), což bylo ověřeno interferometrickými měřeními jen částečně. Chceme-li vyjádřit střední hodnoty Nusseltových čísel v symetricky vyhřívaných vertikálních štěrbinách v rozsahu  $Ra_b \cdot b/h$  od 1 do  $3,5 \cdot 10^5$ , lze použít rovnici proloženou hodnotami Elenbaase [8], viz tenká plná čára na obr. 20, která byla pro  $Ra_b \cdot b/h$  od  $2,1 \cdot 10^2$  do  $3,5 \cdot 10^5$  plně ověřena interferometrickými měřeními. Pro symetricky vyhřívané vertikální štěrbinu při přirozené konvekci ve vzduchu v rozsahu parametrů  $Ra_b \cdot b/h$  od 1 do  $3,5 \cdot 10^5$  má proložená závislost tvar

$$\log(\overline{Nu}_b) = \sum_{i=0}^{i=4} a_i \left[ \log \left( Ra_b \cdot \frac{b}{h} \right) \right]^i, \quad (38)$$

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

Z výsledků vyplývá, že interferometricky naměřené hodnoty středních Nusseltových čísel v symetricky i nesymetricky vyhřívaných vertikálních štěrbinách při přirozené konvekci ve vzduchu potvrzují vztahy (15) a (16) dle Aunga a pro větší parametry  $Ra_b, b/h$  lze použít výsledky dle Elenbaase vyjádřené rovnicí (38), nebo v menším rozsahu parametrů  $Ra_b, b/h$  od  $2,1 \cdot 10^2$  do  $3,5 \cdot 10^5$  také rovnicí (37). Z obr. 20 je zřejmé, že interferometricky naměřené střední hodnoty Nusseltových čísel v celých štěrbinách [48] se od proložené závislosti (37) nebo (38) liší maximálně o  $\pm 5\%$ , což je v oblasti měření přenosu tepla konvekcí velmi dobrý výsledek. Nepatrně větší nejistoty jsou u interferometrických měření v práci [29], jelikož tam byly kvantitativně vyhodnocovány pouze vstupní úseky štěrbin.

#### 7.4 Optimální rozměry soustavy vertikálních desek

Pro praktické aplikace je vhodné provést rozbor výsledků a vyvodit konkrétní závěry pro optimální návrh soustavy vertikálních desek s konstantními teplotami povrchů ochlazovaných přirozenou konvekcí ve vzduchu. Pod pojmem optimální návrh se rozumí vhodná volba rozměrů soustavy vertikálních desek  $b \times h \times L$  pro teplotní diferenci  $\Delta T_w = T_w - T_\infty$ , kde  $T_w$  je teplota povrchů desek a  $T_\infty$  je teplota okolního prostředí. Cílem optimálního návrhu je získat maximální přenos tepla konvekcí pro danou teplotu okolního prostředí. Jelikož se v práci jedná o dvojrozměrné útvary, lze z dalších úvah vypustit délku desek  $L$ . Pro danou teplotu okolí je třeba tudíž nalézt optimální vztah mezi parametry  $b$ ,  $h$  a  $\Delta T_w$ .

Z definic Nusseltových čísel pro vertikální desku (3), (6) a štěrbinu (9), (10), (11) vyplývá, že tato čísla závisí nejen na teplotních gradientech u povrchů, ale také na charakteristickém rozměru. Tato skutečnost může např. u štěrbin s velkými vzdálenostmi desek způsobit, že dojde k růstu Nusseltova čísla, aniž by došlo k růstu přestupu tepla, a to právě díky zvětšování vzdálenosti mezi deskami. Z tohoto důvodu je vhodné pro rozbor optimálních rozměrů soustavy desek vyjádřit např. průměrné hustoty tepelných toků z povrchů, které přímo vyjadřují, zda dané řešení je z energetického pohledu vhodné. Průměrná hustota tepelného toku konvekcí z vyhřívaného povrchu do okolního prostředí je dána vztahem

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T_w. \quad (39)$$

Pro vyhřívanou vertikální desku u přirozené konvekce ve vzduchu lze vztah (39) pro průměrnou hustotu tepelného toku dále upravit, a to s využitím rovnic (6) až (8) a s uvážením objemové roztažnosti pro ideální plyny ve tvaru  $\beta = 1/T_\infty$  a dostaneme

$$\dot{q} = 0,478 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \Delta T_w \cdot h^3}{T_\infty \cdot \nu^2} \frac{\lambda_v}{h}} \Delta T_w. \quad (40)$$

Z rovnice je zřejmé, že hustota tepelného toku z vertikální desky roste s rostoucí teplotní diferencí  $\Delta T_w$  a klesá s rostoucí výškou desky  $h$ . Z uvedených důvodů nelze stanovit optimální rozměr vertikální desky. Vyjádření průměrné hustoty tepelného toku z vertikální desky však může sloužit k porovnání s průměrnou hustotou tepelného toku z jednotlivých povrchů desek tvořících štěrbinu. Je třeba však upozornit, že rovnice (40) platí pouze pro laminární přirozenou konvekci vzduchu a její platnost je omezena kritickým Grashofovým číslem, které má hodnotu  $2,25 \cdot 10^{10}$  [6].

Pro symetricky i nesymetricky vyhřívanou štěrbinu při přirozené konvekci ve vzduchu lze vztah (39) pro průměrnou hustotu tepelného toku upravit s využitím rovnic (9) až (11) a dostaneme

$$\dot{q} = \overline{Nu}_b \frac{\lambda_v}{b} \Delta T_w, \quad (41)$$

kde Nusseltovo číslo  $\bar{Nu}_b$  je dáno vztahem (38). Vykreslení hustoty tepelného toku v závislosti na šířce štěrbin  $b$  při různých hodnotách  $\Delta T_w$  a  $h$  je uvedeno na obr. 21. Pro vykreslení byla zvolena teplota okolí 20 °C,  $Pr = 0,722$  a několik typických parametrů  $\Delta T_w$  a  $h$ , vhodných pro reálná desková otopná tělesa. Ukázalo se, že existuje maximální hustota tepelného toku, a to vždy při  $Ra_b \cdot b/h = 1104$ . Tato hustota tepelného toku je zřejmě v důsledku komínového efektu vždy o 12 % větší, než hustota tepelného toku ze samostatné vertikální desky dle rovnice (40), a to při stejných parametrech  $\Delta T_w$  a  $h$ . Vezmeme-li v úvahu definici Rayleighova čísla (12), dostaneme rovnici pro optimální parametry štěrbin  $b$ ,  $h$  a  $\Delta T_w$  ve tvaru

$$\frac{g \cdot \Delta T_w \cdot b^3}{T_\infty \nu^2} \cdot Pr \cdot \frac{b}{h} = 1104. \quad (42)$$

Z vyhodnocených interferogramů, pořizovaných přibližně při optimálním uspořádání soustavy desek, bylo zjištěno, že tepelné mezní vrstvy jsou prakticky od počátku spojené a ve výstupním průřezu dosahuje teplotní difference v ose mezi deskami až 30 % teplotní difference povrchů desek vůči teplotě okolí. Samotný růst teploty v ose štěrbin by sice měl způsobovat zmenšování přestupu tepla, ale při  $Ra_b \cdot b/h = 1104$  je daný efekt optimálně vyvážen komínovým efektem, který naopak roste s rostoucí průměrnou teplotou ve štěrbině.

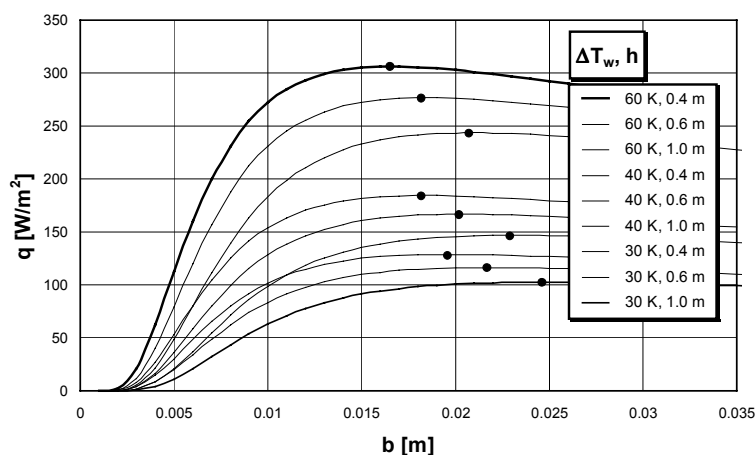
Optimální rozměry nesymetricky vyhřívané štěrbiny lze stanovit obdobně, jako u symetricky vyhřívané štěrbin, viz rovnice (42), jelikož optimální hodnota  $Ra_b \cdot b/h = 1104$  leží v oblasti, kde kritériální rovnice pro symetricky i nesymetricky vyhřívanou štěrbinu jsou stejné.

## 8. ZÁVĚR

Práce se zabývá experimentálním výzkumem přestupu tepla při laminární přirozené konvekcí vzduchu v soustavě vyhřívaných vertikálních desek s konstantními teplotami povrchů. Zaměření na konvektivní složku přenosu tepla bylo zvoleno proto, že má z energetického pohledu největší vliv na optimální uspořádání tepelných výměníků ve tvaru soustavy vertikálních desek.

Přestup tepla přirozenou konvekcí ve vzduchu byl zkoumán na modelu, a to na čelním povrchu krajní desky o rozměrech 140 x 200 x 20 mm směřující do okolního prostředí, na zadním povrchu krajní desky směřující ke stěně (tvořící nesymetricky vyhřívanou štěrbinu) a na vnitřních plochách soustavy desek tvořících svislé štěrbinu o výšce 140 mm a šířkách 4 až 64 mm. Výzkum přestupu tepla z vertikální desky byl prováděn pro  $Gr_h = 5,6 \cdot 10^6$  až  $1,6 \cdot 10^7$  a výzkum přestupu tepla ve štěrbinách byl prováděn pro  $Ra_b \cdot b/h = 4,3$  až  $3,5 \cdot 10^5$ .

Pro výzkum byla zvolena bezdotyková a přesná interferometrická metoda, která dokáže zviditelnit teplotní pole v celém prostoru najednou. Toto zviditelnění umožní pak odhalit



Obr. 21 Průměrná hustota tepelného toku ve štěrbině v závislosti na vzdálenosti desek  $b$  při různých hodnotách parametrů  $\Delta T_w$  a  $h$

i vzájemné interakce teplotních polí. Měření byla prováděna pomocí různých typů Machova – Zehnderova interferometru. Zpracování a vyhodnocování interferogramů bylo prováděno pomocí vlastních počítačových programů, jelikož zatím nejsou k dispozici vhodné komerční produkty. V práci je popsán vývoj vlastních programů od software pro zpracování digitalizovaných řezů interferogramů na počítači HP 9830A až po software Interfer pro zpracování celých digitalizovaných obrazů interferogramů na počítačích řady PC. Vyvinuté programy obsahují především speciální vlastní rutiny pro rozpoznávání obrazových informací (určování rozložení proužků v libovolných řezech interferogramů a zjišťování průběhů proužků v obraze), což lze řadit do oblasti vývoje umělé inteligence. Dále jsou zde vlastní rutiny pro úpravu kvality obrazu (Gaussovská úprava kontrastu a jasů, relativní retušování apod.), ale také známé algoritmy pro úpravu kvality obrazů.

V práci jsou odvozeny vztahy pro vyhodnocování teplotních polí z interferogramů a vztahy pro určení parametrů přestupu tepla. Přestup tepla je určován dvojím způsobem, a to z derivace teplot u povrchu a z tloušťek tepelných mezních vrstev. Vyhodnocování přestupu tepla z tloušťek tepelných mezních vrstev je nová metoda, která je efektivní a relativně přesná. Byla použita proto, že při vyšších teplotách desek docházelo k zániku interferenčních proužků u povrchů. Tato vyhodnocovací metoda posouvá hranice použitelnosti interferometrie ve výzkumu přestupu tepla do oblasti s většími teplotními diferencemi a gradienty.

Měření byla vyhodnocována jak kvalitativně, tak kvantitativně. Nejdůležitější jsou však výsledky kvantitativního vyhodnocení, a to teplotních polí, lokálních parametrů přestupu tepla, středních parametrů přestupu tepla a z nich vyvozené závěry pro optimální návrhy výměníků tepla ve tvaru soustavy vertikálních desek. Naměřené střední hodnoty Nusseltových čísel při přirozené konvekci u vyhřívané vertikální desky se velmi dobře shodují s kritériální rovnicí dle Pohlhausena [3], [4], [5]. Výsledky interferometrického výzkumu středních hodnot Nusseltových čísel při přirozené konvekci v symetricky vyhřívaných šterbinách potvrdily výsledky uvedené Elenbaasem [7], [8], a to pro  $Ra_b \cdot b/h$  v intervalu od 1 do  $3,5 \cdot 10^5$ . Rovněž byly potvrzeny kritériální rovnice pro symetricky i nesymetricky vyhřívané vertikální šterbiny dle Aunga [9], [10], a to pro  $Ra_b \cdot b/h < 2$ . Interferometrická měření však nepotvrdila kritériální závislost dle Aunga v oblasti  $Ra_b \cdot b/h > 5000$ , kde interferometrická měření vykazovala menší hodnoty Nusseltových čísel, které odpovídají spíše výsledkům Elenbaase [7], [8].

Z výsledků byly v práci vyvozeny závěry pro optimální návrhy výměníků tepla ve tvaru soustavy vertikálních desek, a to s cílem získat maximální hustoty tepelného toku. Bylo zjištěno, že pro danou teplotu okolního vzduchu  $T_\infty$  je třeba volit šířku šterbiny  $b$ , výšku šterbiny  $h$  a rozdíl teplot mezi povrchem desek ve šterbině a okolním prostředím  $\Delta T_w$  tak, aby mělo Rayleighovo číslo modifikované poměrem  $b/h$  optimální hodnotu, tj.  $Ra_b \cdot b/h = 1104$ . Při takovém stavu je ve šterbině hustota tepelného toku o 12 % větší, než je hustota tepelného toku ze samostatné vertikální desky umístěné ve volném prostoru při stejných parametrech  $\Delta T_w$  a  $h$ . Zvýšení hustoty tepelného toku lze přičíst vlivu komínového efektu, který roste s rostoucí průměrnou teplotou ve šterbině.

Práce ukazuje, že interferometrie se v daném výzkumu velmi dobře osvědčila, a proto ji bude možné uplatnit i v dalších výzkumech. V současnosti se interferometrie na našem pracovišti využívá pro řešení projektu COST [56] a pro řešení výzkumného záměru [57]. Perspektivně by bylo vhodné zabývat se také holografickou tomografií [19], [20], která umožní získat i prostorové rozložení žádaných fyzikálních veličin. Efektivní využití interferometrie je však podmíněno rozvojem počítačového zpracování obrazů, což je předmětem zájmu i našeho současného výzkumu. Rozvoj počítačového zpracování obrazů interferogramů přispěje i k rozvoji poznatků v oblasti počítačového vidění, což spadá do kategorie umělé inteligence. Doplněním interferometrické metody o počítačové zpracování obrazových informací získáme vysoce efektivní experimentální nástroj pro různé oblasti výzkumu.

Interferometrie je perspektivní metoda nejen v oblasti výzkumu, ale také ve výuce, kde může vhodně doplnit výklad fyzikálních problémů zajímavými obrazovými informacemi. Našla své uplatnění jak v laboratorní výuce, tak na přednáškách a cvičeních, kde interferogramy ve formě diapozitivů a výukových filmů slouží k objasnění látky či nahrazení náročné laboratorní výuky. Výsledky našeho interferometrického výzkumu se uplatnily především ve výuce na oboru Technika prostředí a ve výuce Termomechaniky. Naši optickou laboratoř využívá řada studentů doktorského studijního programu, a to při řešení svých disertačních prací.

## LITERATURA

- [1] CIHELKA, J. a kol.: Vytápění, větrání a klimatizace. SNTL Praha, 1985.
- [2] RECKNAGEL, H. - SPRENGER, E. - SCHRAMEK, E. R.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. R. Oldenbourg Verlag GmbH, München 1995.
- [3] NUSSELT, W. - JÜRGES, W.: Das Temperaturfeld über einer lotrecht stehenden geheizten Platte. Zeitschrift VDI, 72, 1928, s. 597 - 603.
- [4] SCHMIDT, E. - BECKMANN, W.: Das Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld vor einer Wärme abgebenden senkrechten Platte bei natürlicher Konvektion. Technische Mechanik und Thermodynamik, 1, 1930, s. 391 - 406.
- [5] SCHLICHTING, H.: Grenzschicht-Theorie. 5. Auflage. Karlsruhe, Verlag G. Braun 1965.
- [6] ŠORIN, S. N.: Tělopředača. Moskva, izd. Vyššaja škola 1964. Český překlad: Sdílení tepla. Praha, SNTL/ALFA 1968.
- [7] KERN, D. Q. - KRAUS, A. D.: Extended surface heat transfer. McGraw-Hill, New York 1972.
- [8] ELENBAAS, W.: Heat dissipation of parallel plates by free convection. Physica 9, 1942, s. 1 - 28.
- [9] AUNG, W.: Fully developed laminar free convection between vertical plates heated asymmetrically. Int. J. of Heat and Mass Transfer 15, 1972, s. 1577 - 1580.
- [10] 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.
- [11] HAUF, W. - GRIGULL, U.: Optical methods in heat transfer. In: Advances in heat transfer. 6. (J. P. Hartnett, ed.). London, Academic Press 1970.
- [12] BÍCA, J.: Interferometrické metody výzkumu volné konvekce na laserovém interferometru typu Mach - Zehnder. Výzkumná zpráva. SVÚSS Běchovice 1971.
- [13] ŘEZNÍČEK, R.: Visualisace proudění. ACADEMIA, nakl. ČSAV, Praha 1972.
- [14] BORN, M. - WOLF, E.: Principles of optics. Oxford - London, Pergamon Press 1968. Ruský překlad: Osnovy optiky. Moskva, izd. Nauka 1973.
- [15] MERZKIRCH, W.: Flow visualization. Academic Press, New York 1974.
- [16] BÍCA, J.: Některé problémy použití interferometrie při výzkumu pole indexu lomu v blízkosti fázového rozhraní. Strojnícky časopis 26, 1975, s. 550 - 562.
- [17] MENZEL, E. - MIRANDÉ, W. - WEINGÄRTNER, I.: Fourier-Optik und Holographie. Wien - New York, Springer-Verlag 1973.
- [18] PANKNIN, W.: Eine holographische Zweiwellenlänge-Interferometrie zur Messung überlagerter Temperatur- und Konzentrationsgrenzschichten. Kandidátská disertace. Technische Universität Hannover 1977.
- [19] SWEENEY, D. W. - VEST, C. M.: Measurement of threedimensional temperature fields above heated surfaces by holographic interferometry. Int. J. of Heat and Mass Transfer 17, 1974, č. 12, s. 1443 - 1454.

- [20] WENSKUS, R.: Tomographische Untersuchungen an schwach gestörten Überschallfreistrahlen. Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institut für Strömungsforschung. Göttingen 1988.
- [21] JAROSLAVSKIJ, L. - BAJLA, I.: Metódy a systémy číslicového spracovania obrazov. Alfa, Bratislava 1989.
- [22] BARTELS-LEHNHOFF, H. H. - BAUMANN, P. H. - BRETTHAUER, B. - MEIER, G. E. A.: Computer aided evaluation of interferograms. Experiments in Fluids 16, 1993, s. 46 - 53.
- [23] PAVELEK, M.: Vizualizace tepelných mezních vrstev pomocí interferometrů. Diplomová práce. VUT FS Brno, 1975.
- [24] PAVELEK, M. - LIŠKA, M. - BOČEK, V. - RAMÍK, Z.: Vyšetřování teplotních polí holografickou a diferenční interferometrií. Jemná mechanika a optika 21, 1976, 6, s. 162 - 166.
- [25] 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.
- [26] PAVELEK, M.: Vyhodnocování holografických interferogramů tepelných mezních vrstev. Písemná práce k odborné kandidátské zkoušce, s. 110. VUT FS Brno, 1977.
- [27] PAVELEK, M. - RAMÍK, Z. - LIŠKA, M.: Automatizace při vyhodnocování interferogramů tepelných mezních vrstev. Jemná mechanika a optika 23, 1978, 4, s. 97 - 100.
- [28] PAVELEK, M. - RAMÍK, Z. - LIŠKA, M.: Určování lokálních hodnot součinitele přestupu tepla z holografických interferogramů. Strojnícky časopis 29, 1978, 5, s. 592 - 602.
- [29] PAVELEK, M.: Výzkum sdílení tepla ve štěrbinách metodou holografické interferometrie. Kandidátská disertace. VUT FS Brno, 1978.
- [30] PAVELEK, M. - RAMÍK, Z.: Použití holografické interferometrie k určování lokálních hodnot součinitele přestupu tepla u přirozené konvekce ve vzduchu. Zdravotní technika a vzduchotechnika 22, 1979, 1, s. 17-26.
- [31] PAVELEK, M. - RAMÍK, Z.: Výzkum sdílení tepla ve štěrbinách pomocí holografického interferometru pracujícího v reálném čase. Zborník seminára Experimentálne metódy v mechanike tekutín. Poprad 1979, s. 219 - 228.
- [32] PAVELEK, M. - RAMÍK, Z.: Experimentální výzkum sdílení tepla ve vertikálních a nakloněných štěrbinách. Příspěvek C2.4 na 26. konferenci CHISA, Mariánské Lázně 1979.
- [33] PAVELEK, M. - RAMÍK, Z. - ENENKL, V.: Aplikace holografické interferometrie při výzkumu teplotních polí a sdílení tepla ve štěrbinách. Strojirenství 30, 1980, 1, s. 55 - 59.
- [34] PAVELEK, M. - LIŠKA, M. - BOČEK, V.: Holografický interferometr k vyšetřování dynamicky se měnících fázových objektů. Jemná mechanika a optika 25, 1980, 6, s. 149 - 152.
- [35] LIŠKA, M. - PAVELEK, M.: Kontrola pneumatických trysek optickými metodami. Jemná mechanika a optika 25, 1980, 12, s. 334 - 335.
- [36] ENENKL, V. - PAVELEK, M. - HORÁČEK, M.: Temperature fields interferometric measurements in neighbourhood of axial-symmetric shell moulds. Proceedings of the International Heat Transfer Conference, Vol.4, Mnichov 1982, s. 485 - 490.
- [37] PAVELEK, M. - RAMÍK, Z.: Přenos tepla ve vertikálních štěrbinách různých šířek a ve štěrbinách nakloněných. Zdravotní technika a vzduchotechnika 26, 1983, 1, s. 29 - 37.
- [38] PAVELEK, M. - LIŠKA, M.: Evaluation of interferograms of axial - symmetric phase objects. Optica Acta 30, 1983, 7, s. 943 - 954.

- [39] HORÁČEK, M. - PAVELEK, M. - RUSÍN, K.: K problematice tuhnutí odlitků ve skořepinových formách. *Slévarenství* 31, 1983, 6, s. 278 - 284.
- [40] PAVELEK, M. - LIŠKA, M.: A Study of heat transfer from a horizontal vibrating cylinder by means of holographic interferometry. *Proceedings of IUTAM Symposium on Optical Methods in the Dynamics of Fluids and Solids*. Liblice 1984, s. 43 - 49.
- [41] PAVELEK, M. - LIŠKA, M.: Výzkum rotačně symetrických fázových objektů pomocí interferometrie. *Jemná mechanika a optika* 30, 1985, 2, s. 33 - 37.
- [42] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: A Study of heat transfer from a rotating disk by means of holographic interferometry. *5-th Conference on Thermogrammetry and Thermal Engineering*, Budapest 1987, s. 41 - 44.
- [43] PAVELEK, M. - FILAKOVSKÝ, K.: Evaluating velocities from interferograms of boundary layers. *5-th ISFV*, Praha 1989, s. 870 - 874.
- [44] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: Výzkum sdílení tepla z rotujících neizotermických disků metodou holografické interferometrie. *Sborník konference Aplikácia experimentálnych metód v mechanike tekutín*. Tatry 1989, s. 98 - 107.
- [45] JANOTKOVÁ, E. - PAVELEK, M.: An experimental study of heat transfer from co-rotating disks. *International Congress CHISA'93*. Praha 1993. Paper G8.48.
- [46] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: Application of interferometry to temperature field measurements in neighbourhood of rotating discs. *International Congress CHISA'96*. Paper No. 0015, Praha 1996.
- [47] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: Počítačový záznam a zpracování obrazů interferogramů. *Sborník konference Inženýrská mechanika'96*, Vol. III, s. 65 - 70. Svratka 1996.
- [48] JANOTKOVÁ, E. - PAVELEK, M.: Interferometrický výzkum teplotních polí v transparentním prostředí a počítačové zpracování interferogramů. *Závěrečná zpráva o řešení grantu č. 101/94/ 1348 pro GAČR*. FS VUT Brno 1996.
- [49] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: Interferometric visualization of dynamic temperature fields. *10-th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry*. Budapest 1997, s. 123 - 128.
- [50] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: Software pro zpracování interferometrických měření v mechanice tekutin. *Sborník konference Inženýrská mechanika '97*, Vol. IV, s. 151 - 156. Svratka 1997.
- [51] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: Výzkum transparentních teplotních polí v technice prostředí. *Proceedings of the XVII. International Conference of Departments of Fluid Mechanics and Thermomechanics*, s. 156 - 161. Herlany 1998.
- [52] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: Research of dynamic temperature fields by means of Mach - Zehnder interferometer. *International Congress CHISA '98*. Paper No. P1.146. Praha 1998.
- [53] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: Interferometric research of enthalpy distribution in non-isothermic air jets. *Proceedings of the XVIII. International Conference of Departments of Fluid Mechanics and Thermomechanics*, s. 115 - 118. Praha 1999.
- [54] JANOTKOVÁ, E. - PAVELEK, M.: Measurements of constants of ventilating outlets by means of interferometric method. *Proceedings of the XVIII. International Conference of Departments of Fluid Mechanics and Thermomechanics*, s. 55 - 58. Praha 1999.
- [55] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: Interferometrická měření středních rychlostí ve volném neizotermním vzduchovém proudu. *Sborník přednášek 16. Symposia o anemometrii a měření průtoků*, s. 51 - 54. Brno 1999.
- [56] PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E.: Investigation of temperature fields in industrial buildings with various manners of ventilation and heating. *Zpráva o řešení projektu COST akce G3*. FSI VUT Brno 2000.

- [57] JÍCHA, M. a kol.: Výpočtové a fyzikální modelování problémů inženýrské termofluidní mechaniky, mechaniky těles a fázových přeměn. Zpráva o řešení výzkumného záměru MŠMT. FSI VUT Brno 2000.



# THE INTERFEROMETRIC RESEARCH OF THE HEAT TRANSFER IN THE SYSTEM OF VERTICAL PLATES

## ABSTRACT

The work 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. These systems are represented e.g. by panel or sectional radiators, ribbed surfaces of motors, machines and technological equipment. In this work the results of partial measurements for given problems for a longer time period have been analysed, therefore we can find even different approaches to the measurement and its evaluation. The target of this research was to obtain the data for an optimum structural arrangement of heat exchangers in the form of vertical plates system and to reach maximum heat outputs of these exchangers.

The heat transfer has been studied on the model of the plate system, namely on the frontal surface of a boundary plate directed into the surrounding environment for  $Gr_h = 5.6 \cdot 10^6$  up to  $1.6 \cdot 10^7$ , and in vertical slots with a symmetric and with an asymmetric heating for  $Ra_b \cdot b/h = 4.3$  up to  $3.5 \cdot 10^5$ . The measurement was realised by means of different types of the Mach - Zehnder interferometer. At the beginning the interferograms have been evaluated in a manual way. Later the interferograms have been recorded in a different way in a computer and have been evaluated using own software. In this work the relations for the evaluation of temperature fields from the interferograms are derived. Furthermore the relations for the determination of the heat transfer from the temperature derivations at the surface are given here as well as the relations for the determination of the heat transfer parameters from the thicknesses of thermal boundary layers. The method of the heat transfer evaluation from the thicknesses of thermal boundary layers applied shifts the boundaries of interferometry applicability for the investigation of temperature fields and heat transfer even to the area of higher temperature differences and gradients.

The evaluation of temperature fields interferograms in the neighbourhood of the vertical plate has confirmed the theoretical solution according to Pohlhausen [3], [4], [5]. The results of the interferometric research of mean values of the Nusselt numbers under a natural convection in symmetrically heated slots have confirmed the results given by Elenbaas [7], [8], namely for  $Ra_b \cdot b/h = 1$  up to  $3.5 \cdot 10^5$ . At the same time the criterion equations for the vertical slots heated both in a symmetric and asymmetric ways according to Aung [9], [10] have been confirmed for  $Ra_b \cdot b/h < 2$ , but the criterion dependence by Aung in the sphere  $Ra_b \cdot b/h > 5000$  has not been confirmed.

From the above results, the conclusions for optimum designs of the heat exchangers in the form of a vertical plate system have been derived in this work. In the first place the optimum arrangement can be influenced by the choice of suitable slot dimensions  $b \times h$ , namely in the connection with the difference of temperatures between the plate surface and surrounding. It has been proved that for the given temperature of ambient air it is necessary to choose  $Ra_b \cdot b/h$  with the optimum value 1104. In such case the heat transfer in the slot is by 12 % higher at least than the heat transfer from a freely placed vertical plate.

The interferometry has been selected for this research because a optical contactless visualising and measuring method is concerned, which provides accurate, complete and clear information of the subject. But the utilisation of the interferometry is effective even in teaching at schools, namely both in laboratories and in lectures. The effective application of optical methods in further research is conditioned by the development of computerised picture processing, which belong to the artificial intelligence category. With respect to the lack of commercial programs in this sphere, processing and evaluation of interferograms are a subject of interest even for our research.