

# Teplotní pole v neizotermním proudu podél svislé stěny (část 2)



## Temperature Field in Non-Isothermal Jet along Vertical Wall (Part 2)

Recenzent  
 Prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Experimentální studie shrnuje teplotní profily v neizotermním plochém proudu chladného vzduchu podél svislé stěny. Porovnány jsou výsledky zjištěné pro dvě přívodní štěrbinu o různé šířce, při dvou rychlostech a při různých teplotách přiváděného vzduchu. Rozsah podmínek vyjadřují hodnoty  $Re = 1333$  a  $Ar = 0,02$  až  $0,87$  s šířkou štěrbinu jako charakteristický rozměr. Úplně zobecnění výsledků by vyžadovalo analýzu vlivu  $Ar$  kritéria.

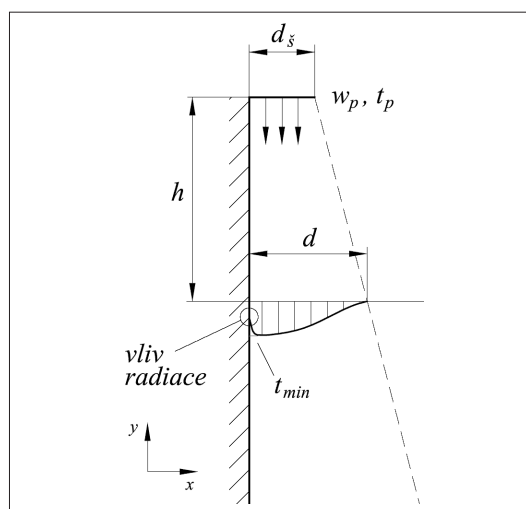
**Klíčová slova:** stěnový proud vzduchu, neizotermní proudění, teplotní pole

Temperature profiles in the non-isothermal flat jet of the cold air along the vertical wall are summarized in the experimental study. There were compared results determined for two slot outlets with different widths, and measured at two velocities and different temperatures of the supplied air. The scope of conditions is expressed in values  $Re = 1333$  and  $Ar = 0.02-0.87$  with the slot width as the characteristic dimension. The comprehensive generalization of results should require the analysis of the  $Ar$  criterion impact.

**Key words:** air wall jet, non-isothermal jet, temperature field

### Přehled označení

$d$ [m, mm]	vodorovná vzdálenost od svislé stěny (ve směru osy $x$ )
$d_s$ [m]	šířka štěrbinu
$d_{w0,5}$ [m]	vzdálenost od svislé stěny, kde je rychlost rovna polovině maximální rychlosti [1]
$h$ [m]	svislá vzdálenost od výusti (ve směru osy $y$ )
$t$ [°C]	teplota vzduchu
$t_{min}$ [°C]	minimální teplota vzduchu v profilu
$t_o$ [°C]	teplota okolního vzduchu
$t_p$ [°C]	teplota přiváděného vzduchu
$w_p$ [m/s]	rychlost přiváděného vzduchu (na čele štěrbinu)
$\Delta t_m$ [K]	rozdíl minimální teploty v teplotním profilu a přiváděného vzduchu ( $t_{min} - t_p$ )
$\Delta t_p$ [K]	rozdíl teploty okolního a přiváděného vzduchu ( $t_o - t_p$ )
$\theta$ [-]	teplotní bezrozměrný parametr
$d/d_{w0,5}$ [-]	délkový bezrozměrný parametr



Obr. 1  
 Schéma rozložení teplotního pole ve svislém neizotermním proudu vzduchu

ce, která má za následek zvýšenou teplotu vzduchu v blízkosti svislé stěny (na obr. 1 vyznačeno kroužkem).

### ÚVOD

Článek pojednává o analýze zákonitostí vývoje teplotního pole neizotermního proudu chladného vzduchu podél svislé stěny, vystupujícího z horizontální štěrbinu nízkou rychlostí. Článek je pokračováním [1], kde byla u neizotermního proudu chladného vzduchu podél svislé stěny uvedena analýza pole rychlostí.

Práce se zabývá případem, kdy vzduch je nuceně přiváděn nízkou rychlostí horizontální štěrbinou směrem dolů a teplota přiváděného vzduchu je nižší než teplota okolí,  $t_p < t_o$ . Řešený případ je určen následujícími okrajovými podmínkami:

1. Jedná se o neizotermní proudění.
2. Přívod vzduchu štěrbinou o konstantní šířce nízkou rychlostí.
3. Přívod vzduchu ve směru působení gravitačních sil (chladný vzduch je přiváděn štěrbinou umístěnou v horní části svislé stěny směrem dolů).
4. Jedná se o ustálený děj.
5. Svislá stěna je adiabatická (nedochází k prostupu tepla mezi proudem vzduchu a svislou stěnou).

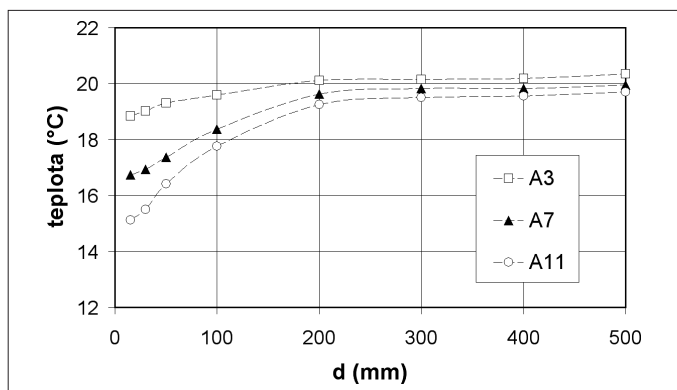
Bylo zjištěno, že charakter teplotního pole lze pro všechny měřené základní okrajové podmínky zobecnit. Důležitým poznatkem je výrazný vliv radia-

### EXPERIMENT

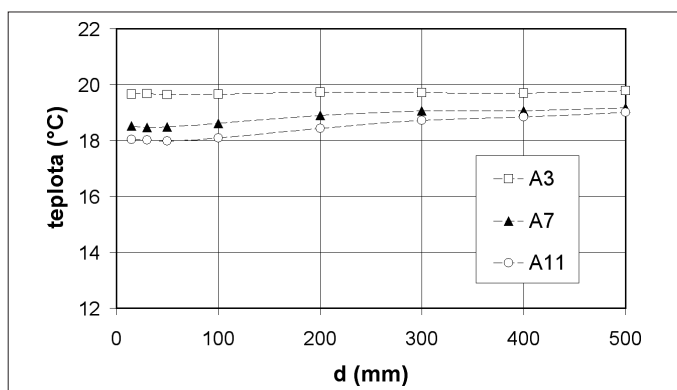
Pro experimentální analýzu byly zvoleny tři základní okrajové podmínky (uvedeny v tab. 1), dále označené jako A, B a C. Pro okrajové podmínky A a B byly měřeny teploty v proudu s různým rozdílem teplot přiváděného a okolního vzduchu  $\Delta t_p$ . Okrajová podmínka C byla charakterizována minimálním průtokem vzduchu, který byl na hranici spolehlivosti měření clonou. Při malém průtoku se navíc projevil vliv ohřátého vzduchu mezi VZT jednotkou a štěrbinou, což výrazně znemožňovalo nastavení stabilizované teploty přiváděného vzduchu. Pro tyto problémy experimentu teplotní pole pro základní okrajovou podmínku C nebylo vyhodnoceno.

Tab. 1 Charakteristické aerodynamické parametry tří okrajových podmínek

Základní okrajová podmínka	A	B	C
Rychlost přiváděného vzduchu $w_p$ (m/s)	0,2	0,4	0,2
Šířka štěrbinu $d_s$ (mm)	100	50	50
Reynoldsovo číslo na štěrbině $Re_s$	1333	1333	667
Archimedovo číslo na štěrbině $Ar_s$	0,18–0,87	0,02–0,11	nehodnoceno



Obr. 2 Příklad naměřených teplotních profilů; pro měření A3, A7 a A11, ve vzdálenosti  $h = 1$  m od štěrbin



Obr. 3 Příklad naměřených teplotních profilů; pro měření A3, A7 a A11, ve vzdálenosti  $h = 3$  m od štěrbin

Cílem měření bylo získat závislost rychlostních a teplotních profilů podél svíslé stěny:

- na rozdílu teploty přiváděného vzduchu štěrbinou a teploty okolí  $\Delta t_p$ ,
- na rychlosti vzduchu vystupujícího ze štěrbin  $w_p$ ,
- na šířce štěrbin  $d_s$ .

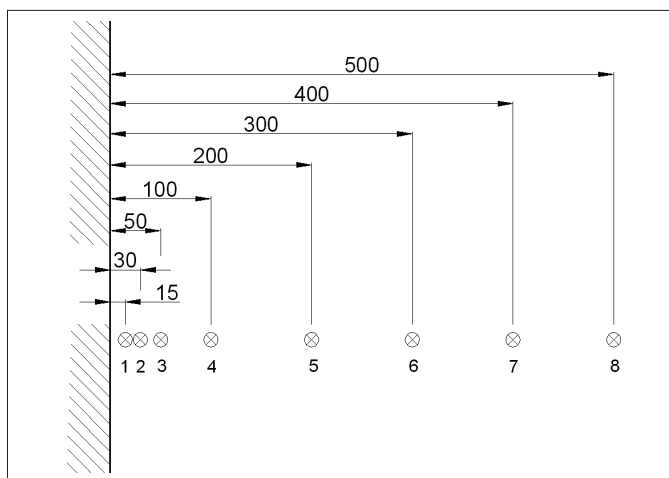
Do vyhodnocení byl zahrnut gradient teploty v okolí proudu. Detaily experimentálního modelu a přístrojového vybavení jsou uvedeny v [1] a [2].

### ZÁKLADNÍ OKRAJOVÁ PODMÍNKA TYPU A

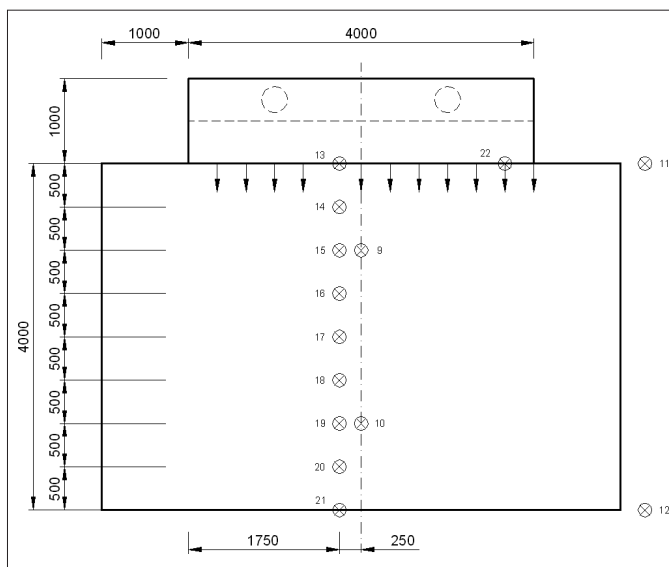
Okrajová podmínka A je dána šířkou štěrbin  $d_s = 100$  mm a rychlostí přiváděného vzduchu  $w_p = 0,2$  m/s. Na obr. 2 a 3, jsou uvedeny příklady naměřených teplotních profilů pro různé  $\Delta t_p$  ve vzdálenosti  $h = 1$  a 3 m od štěrbin. Jednotlivá prezentovaná měření jsou označena A3, A7 a A11.

Z naměřených teplotních profilů je patrný poměrně výrazný nárůst teploty se vzdáleností od štěrbin. Například u měření označenému A11 byl rozdíl teploty na štěrbině přiváděného a okolního vzduchu  $\Delta t_p = 10,6$  K. Ve vzdálenosti  $h = 1$  m od štěrbin a  $d = 15$  mm od svíslé stěny je rozdíl teploty proudu vzduchu oproti okolí  $\Delta t_{1,0m} = 4,7$  K a ve vzdálenosti  $h = 3$  m od štěrbin a  $d = 15$  mm od svíslé stěny je rozdíl teploty proudu vzduchu oproti okolí již pouze  $\Delta t_{3,0m} = 1,3$  K.

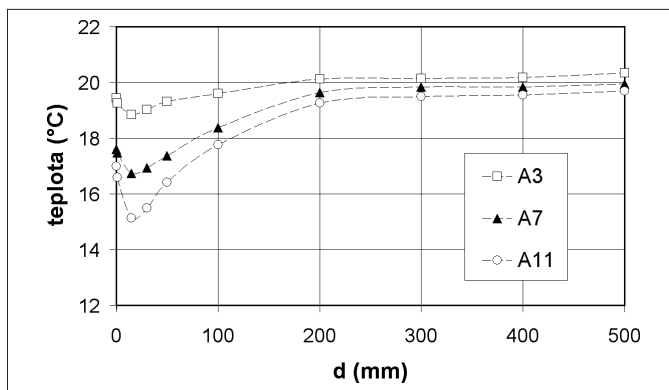
Vzhledem k uspořádání polohovacího mechanismu nebylo možné teplotní sondy přiblížit ke svíslé stěně více než 15 mm (obr. 4). Během měření byly proto zaznamenávány teploty ve vzdálenosti 1 mm od svíslé stěny a povrchová teplota stěny teplotními čidly, která nebyla součástí polohovacího mechanismu, a která byla upevněna ke svíslé stěně přímo. Poloha těchto



Obr. 4 Poloha teplotních čidel a jejich vzdálenost kolmo ke svíslé stěně



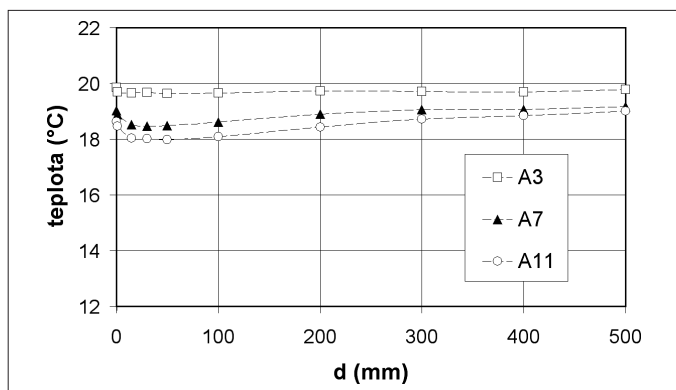
Obr. 5 Poloha teplotních čidel 9 a 10 umístěných na stěně a ve vzdálenosti 1 mm od stěny a jejich označení; čelní pohled na stěnu



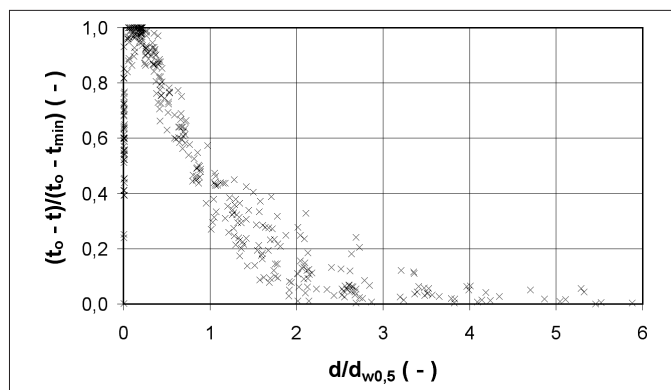
Obr. 6 Rozšířené teplotní profily; pro měření A3, A7 a A11, ve vzdálenosti  $h = 1$  m od štěrbin

teplotních čidel je vyznačena na obr. 5. Teplotní profil je potom možné doplnit směrem ke stěně, jak je vyznačeno na obr. 6 a 7.

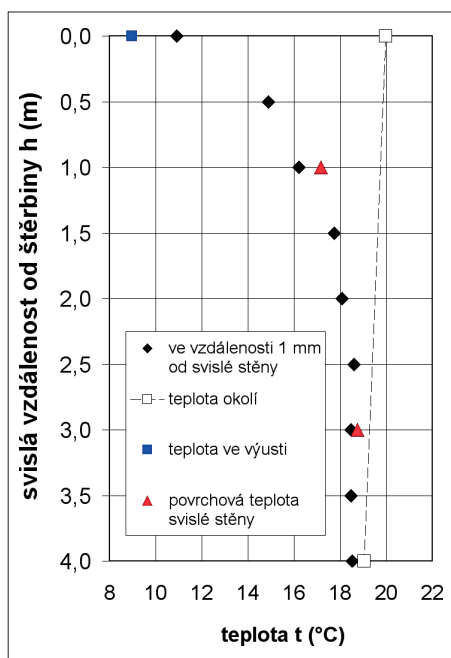
Z obr. 6 a 7 je patrné významné zvýšení teploty ve vzdálenosti 1 mm od stěny a na svíslé stěně. To je způsobeno sáláním, které ohřívá povrch svíslé stěny. Vzhledem k předpokládané možné aplikaci stěnového proudu (pro lokální chlazení), je tato skutečnost nevýhodná. Dalším charakteristickým znakem je i výrazné zvyšování teploty ve svíslém směru se vzdáleností od štěrbin. Na obr. 8 je vidět průběh teploty ve vzdálenosti



Obr. 7 Rozšířené teplotní profily; pro měření A3, A7 a A11, ve vzdálenosti  $h = 3$  m od štěrby



Obr. 9 Bezrozměrné teplotní profily pro všechna měření při základních okrajových podmínkách typu A; pro svislou vzdálenost od štěrby  $h \geq 0,5$  m



Obr. 8 Průběh teplot podél svislé stěny ve vzdálenosti  $d = 1$  mm od svislé stěny, povrchová teplota a teplota okolí pro měření A11

1 mm od svislé stěny. V obrázku je zároveň vyznačena povrchová teplota svislé stěny ve vzdálenosti od štěrby  $h = 1$  a 3 m. Na obr. 8 je dále vyznačena teplota okolního vzduchu pro daný okamžik měření a teplota vzduchu ve výusti. Prezentovány jsou výsledky měření okrajové podmínky A11, kdy byl nejvyšší rozdíl teplot přiváděného a okolního vzduchu.

### TEPLOTNÍ PROFILY PRO ZÁKLADNÍ OKRAJOVOU PODMÍNKU TYPU A

Naměřené teplotní profily byly převedeny do bezrozměrných parametrů dle závislosti (1). Pro délkový údaj na ose  $x$  byl použit bezrozměrný parametr  $d/d_{w0,5}$ .

$$\theta = \frac{(t_o - t)}{(t_o - t_{min})} \quad (1)$$

Na obr. 9 je vidět převedení teplotních profilů do bezrozměrných parametrů pro všechna měření základní okrajové podmínky typu A. Prezentované jsou bezrozměrné teplotní profily pro svislou vzdálenost od štěrby  $h \geq 0,5$  m.

Z obr. 9 je patrné poměrně úspěšné sjednocení teplotních profilů. Vzhledem k použití na ose  $x$  bezrozměrného délkového parametru  $d/d_{w0,5}$  je teplotní profil provázán s profilem rychlostním (obr. 7 v [1]).

### VYHODNOCENÍ $\Delta t_m$ PRO ZÁKLADNÍ OKRAJOVOU PODMÍNKU TYPU A

Dosaženo bylo sjednocení teplotních profilů za použití bezrozměrných parametrů:

$$\frac{(t_o - t)}{(t_o - t_{min})} = f\left(\frac{d}{d_{w0,5}}\right) \quad (2)$$

Pro odečet teploty v libovolném místě podle závislosti (2) je však třeba znát průběh minimální teploty  $t_{min}$  v závislosti na rozdílu teploty přiváděného a okolního vzduchu  $\Delta t_p$  a vzdálenosti od štěrby  $h$ . Pro zobecnění nebyl uvažován průběh  $t_{min}$ , ale rozdíl minimální teploty v měřeném teplotním profilu oproti teplotě přiváděného vzduchu  $t_{min} - t_p = \Delta t_m$ .

$$\Delta t_m = f(\Delta t_p, h) \quad (3)$$

Pro každé měření ve svislé vzdálenosti od štěrby byla v daném rychlostním profilu odečtena hodnota minimální teploty  $t_{min}$ , a dále byl určen rozdíl minimální teploty oproti teplotě přiváděného vzduchu  $t_{min} - t_p = \Delta t_m$ .

Konečným výsledkem analýzy vztahu (3) na základě naměřených hodnot byl získán polynom 3. stupně (4).

$$\Delta t_m = (K_1 \cdot h^3 + K_2 \cdot h^2 + K_3 \cdot h + K_4) \cdot \Delta t_p \quad (4)$$

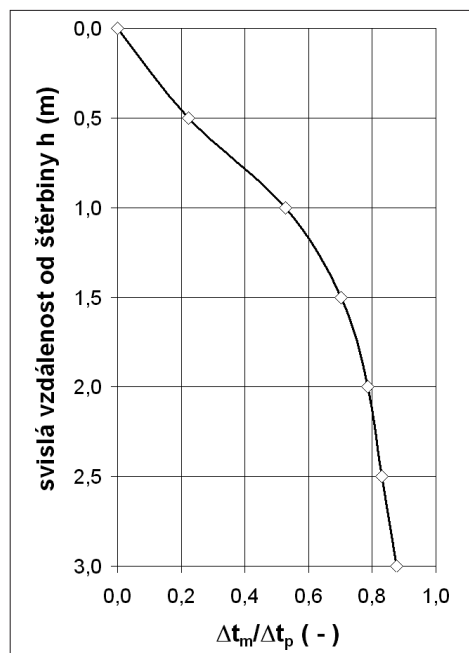
Rozšířené informace, týkající se konstant  $K_1$  až  $K_4$  ve vztahu (4) lze nalézt v [2].

Pro nalezenou obecnou závislost dle vztahu (4) lze na obr. 10 grafickou formou sledovat průběh  $\Delta t_m/\Delta t_p$  v závislosti na vzdálenosti od štěrby  $h$ .

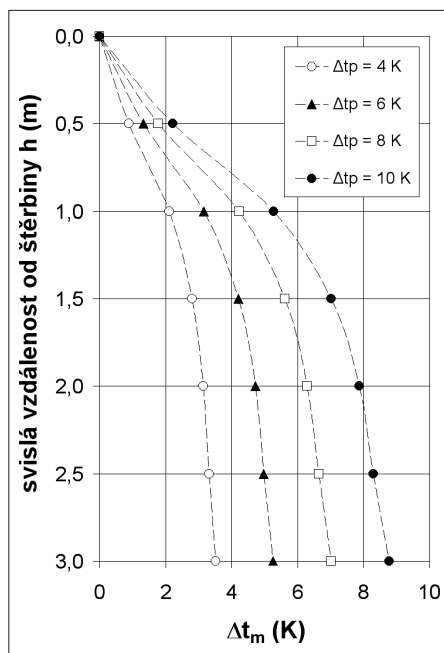
Pro různé teplotní rozdíly je výsledek dle vztahu (4) pro ilustraci uveden na obr. 11. Jedná se o průběh  $\Delta t_m$  v závislosti na vzdálenosti od štěrby  $h$ .

Z obr. 11 je patrné výrazné zvyšování rozdílu teploty přiváděného vzduchu a minimální teploty v teplotním profilu  $\Delta t_m$  se vzdáleností od štěrby  $h$ . Například pro  $\Delta t_p = 8$  K je ve vzdálenosti  $h = 1$  m rozdíl teploty přiváděného vzduchu a minimální teploty v rychlostním profilu  $\Delta t_m = 4,23$  K. To znamená, že je-li přiváděn vzduch o teplotě  $t_p = 12$  °C do prostředí o teplotě  $t_o = 20$  °C, je v této vzdálenosti minimální teplota v teplotním profilu:

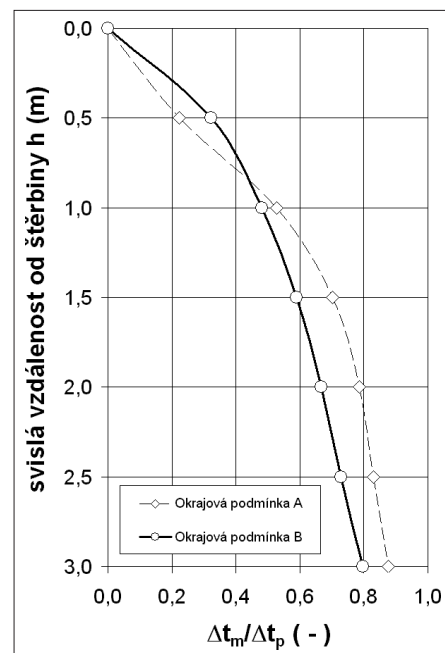
$$t_{min \ h=1m} = t_p + \Delta t_m \ h=1m = 12 + 4,23 = 16,23 \text{ °C} \quad (5)$$



Obr. 10 Průběh  $\Delta t_m/\Delta t_p$  v závislosti na vzdálenosti od štěrbin  $h$  pro okrajovou podmínku A



Obr. 11 Průběh rozdílu teploty přiváděného vzduchu a minimální teploty v rychlostním profilu  $\Delta t_m$  v závislosti na vzdálenosti od štěrbin  $h$ , vyhodnocený z aproximovaného vztahu; pro rozdíly teploty přiváděného a okolního vzduchu  $\Delta t_p = 4, 6, 8$  a  $10$  K a základní okrajovou podmínku typu A ( $w_p = 0,2$  m/s;  $d_s = 0,1$  m)



Obr. 13 Průběhy  $\Delta t_m/\Delta t_p$  v závislosti na vzdálenosti od štěrbin  $h$  pro okrajové podmínky A a B

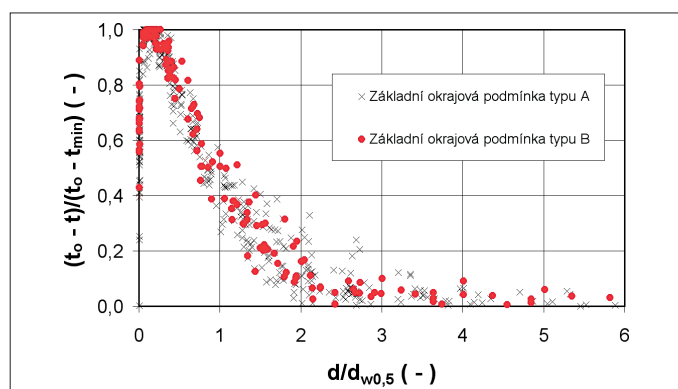
## TEPLOTNÍ PROFILY PRO ZÁKLADNÍ OKRAJOVOU PODMÍNKU TYPU B

Okrajová podmínka B je charakterizována šířkou štěrbin  $d_s = 50$  mm a rychlostí přiváděného vzduchu  $w_p = 0,4$  m/s (stejný objemový průtok jako v předchozím případě – užší štěrbina, vyšší rychlost).

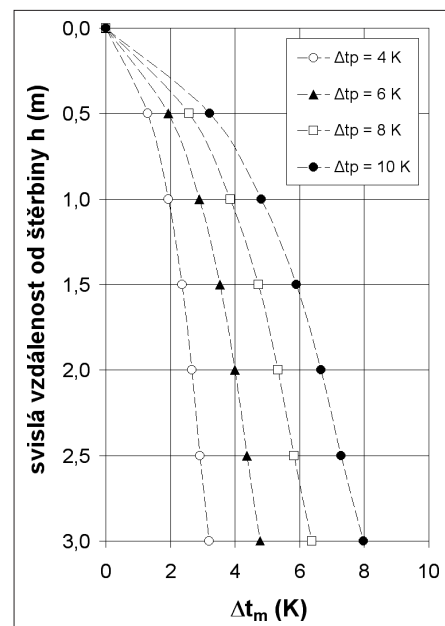
V souladu s vyhodnocením měření základní okrajové podmínky typu A byl vyhodnocen stejným postupem i měření pro základní okrajovou podmínku typu B. Na obr. 12 je vidět převedení teplotních profilů do bezrozměrných parametrů pro všechna měření při základní okrajové podmínce typu B. Prezentovány jsou bezrozměrné teplotní profily pro svislou vzdálenost os štěrbin  $h \geq 0,5$  m. Pro porovnání jsou součástí grafu i výsledky vyhodnocení pro okrajovou podmínku typu A.

Z obr. 12 je patrné poměrně úspěšné sjednocení teplotních profilů a zároveň shoda se základními okrajovými podmínkami typu A.

Pro nalezenou obecnou závislost lze dále v závislosti na vzdálenosti od štěrbin  $h$  sledovat průběh  $\Delta t_m/\Delta t_p$  (obr. 13). Na obr. 13 je pro ilustraci také znázorněna závislost pro okrajovou podmínku typu A.



Obr. 12 Bezrozměrné teplotní profily pro všechna měření při základních okrajových podmínkách typu A a B; pro svislou vzdálenost od štěrbin  $h \geq 0,5$  m



Obr. 14 Průběh rozdílu teploty přiváděného vzduchu a minimální teploty v rychlostním profilu v závislosti na vzdálenosti od štěrbin  $h$  a rozdílu teploty okolního a přiváděného vzduchu  $\Delta t_p$  vyhodnocený z aproximovaného vztahu; pro rozdíly teploty přiváděného a okolního vzduchu  $\Delta t_p = 4, 6, 8$  a  $10$  K a pro základní okrajovou podmínku typu B ( $w_p = 0,4$  m/s;  $d_s = 0,05$  m)

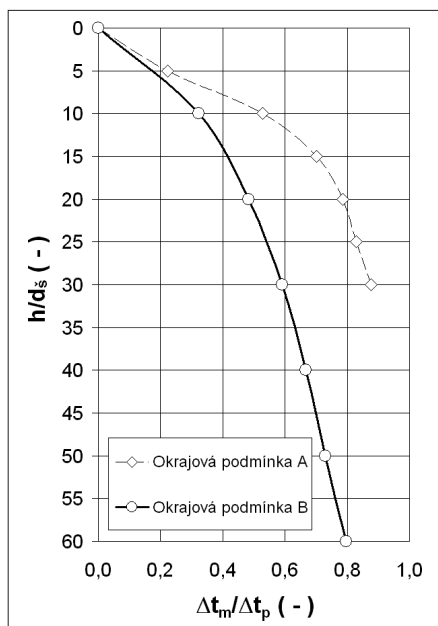
Pro různé teplotní rozdíly je výsledek prezentován na obr. 14.

Na obr. 13 je vidět průběh  $\Delta t_m/\Delta t_p$  v závislosti na vzdálenosti od štěrbin  $h$  (m) pro okrajové podmínky A a B. Pro dosažení bezrozměrných parametrů na obou osách, byl na svislé ose zvolen poměr svislé vzdálenosti od štěrbin a šířky štěrbin  $h/d_s$  (-). Na obr. 15 je vidět výsledný průběh. Z obr. 15 je zřejmé, že úplného zobecnění u obou okrajových podmínek nebylo dosaženo.

## DISKUSE K EXPERIMENTU

Pro jednotlivé základní okrajové podmínky A a B byl pro různé teploty přiváděného chladného vzduchu zjišťován charakter proudění podél svislé stěny. Případy A a B jsou charakterizovány rozdílnou geometrií štěrbin ( $d_{sA} = 100$  mm,  $d_{sB} = 50$  mm). V případě B byla rychlost přiváděného vzduchu volena s ohledem na stejný objemový průtok ( $w_{pA} = 0,2$  m/s,  $w_{pB} = 0,4$  m/s). Měření byly rychlosti [1] a teploty.

Převedením teplotních profilů do bezrozměrných parametrů obou os podle závislosti (2) bylo dosaženo jejich sjednocení. Porovnání pro základní



Obr. 15 Průběhy  $\Delta t_m/\Delta t_p$  v závislosti na bezrozměrném parametru  $h/d_s$  pro okrajové podmínky A a B

okrajovou podmínku typu A a B je znázorněno na obr. 12. Součástí vyhodnocení byl také průběh rozdílu minimální teploty v teplotním profilu a přiváděného vzduchu  $\Delta t_m$  se svislou vzdáleností od štěrbin  $h$ .

Charakteristiku teplotního pole lze určit z obr. 12. Průběh rozdílu minimální teploty v teplotním profilu a přiváděného vzduchu  $\Delta t_m$  v závislosti na vzdálenosti od štěrbin  $h$  pro okrajové podmínky A a B lze určit z obr. 11 a 14.

Důležitým poznatkem je výrazný vliv radiace, jak je vidět na průběhu vybraných naměřených teplotních profilů na obr. 6 a 7. Vliv radiace se projeví zvýšením teploty na stěně a v její bezprostřední blízkosti.

Dalším významným parametrem je výrazné zvyšování rozdílu teploty přiváděného vzduchu a minimální teploty v rychlostním profilu  $\Delta t_m$ . Zjednodušeně řečeno, přiváděný chladný vzduch o teplotě  $t_p$  se se vzdáleností od štěrbin poměrně rychle ohřívá.

V případě použití lokálního chlazení svislým stěnovým proudem je nezbytné s výše uvedenými závěry počítat.

Kontakt na autora: Jan.Schwarzer@fs.cvut.cz.

## Použité zdroje:

- [1] Schwarzer, J., *Rychlosti v neizotermním proudu podél svislé stěny*: Vytápění, větrání, instalace. 2010, roč. 19, č. 5, s. 237–240. ISSN 1210–1389.
- [2] Schwarzer, J., (2008) *Disertační práce*: ČVUT v Praze, Ústav techniky prostředí
- [3] Goodfellow, H., Tahti, E. (2001) *Industrial Ventilation, Design Guidebook*. ISBN 0–12–289676–9
- [4] Schwarzer, J., Barták, M., Drkal, F., Lain, M.; (2004) *Počítačová simulace proudění chladného vzduchu podél svislé stěny*: Vytápění, větrání, instalace, roč. 13, č. 5, s. 209–211. ISSN 1210–1389
- [5] Schwarzer, J., (2006) *Vliv hustoty numerické sítě a metodiky výpočtu na charakter rychlostní mezní vrstvy*: Simulace budov a techniky prostředí 2006, Sborník 4. konference IBPSA–CZ, s.179–182. ISBN 80–01–03577–8
- [6] Barták, M., (2007) *Disertační práce*: ČVUT v Praze, Ústav techniky prostředí
- [7] ČSN ISO 5167–1: *Měření průtoku tekutin snímači diferenčního tlaku*
- [8] Cihelka, J., (1964) *Modelování větracích zařízení*. Zdravotní technika a vzduchotechnika, ročník 7. Nakladatelství Československé akademie
- [9] Hemzal, K., (1974) *Vybrané statě z větrání*: Vydavatelství ČVUT v Praze
- [10] Havet, M. – Blay, D., (1999) *Natural Convection Over a Non-isothermal Vertical Plate*: International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 42. ■