

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**



**Radim Šubert**

**Hodnocení tepelně-izolačních vlastností textilií při vyšších  
rychlostech proudění vzduchu**

**AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE**



Název disertační práce: **HODNOCENÍ TEPELNĚ-IZOLAČNÍCH  
VLASTNOSTÍ TEXTILÍ PŘI VYŠŠÍCH  
RYCHLOSTECH PROUDĚNÍ VZDUCHU**

Autor: **Ing. Radim Šubert**

Obor doktorského studia: textilní technika

Forma studia: prezenční

Školící pracoviště: Katedra oděvnictví

Školitel: Doc. Dr. Ing. Zdeněk Kůs

Školitel specialista:

**Liberec 2006**



# 1. Předmět a cíl práce

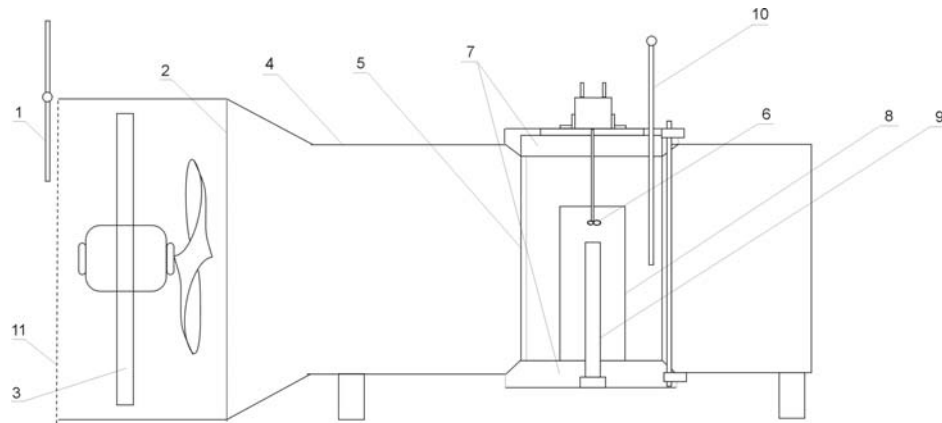
Předmětem práce je termofyziologický komfort oděvů a jeho hodnocení při vyšších rychlostech proudění vzduchu. Tepelná pohoda je jednou ze základních podmínek subjektivního pocitu pohodlí člověka. Disertační práce je zaměřena na studium možností hodnocení tepelně-izolačních vlastností oděvu za extrémních klimatických podmínek a vývoj technického zařízení a metodiky umožňující toto hodnocení. V první části práce shrnuje současný stav a teoretické aspekty studované problematiky. Druhá část se zabývá možnostmi hodnocení tepelně-izolačních vlastností oděvů při rychlosti proudícího vzduchu v rozsahu  $5-20 \text{ m.s}^{-1}$ . Je rozdělena na část zabývající se vývojem technického modelu větru, vývojem modelu lidské paže a vypracováním a otestováním metodiky měření. V další části jsou výsledky, které vyvíjená metoda poskytuje porovnány se standardní metodou (pracující v souladu s mezinárodními normami) a vybraným teoretickým modelem. Naměřené hodnoty tepelného odporu vzorků jsou uvedeny do korelačních vztahů s dalšími vlastnostmi testovaných textilií – tloušťkou, prodyšností, objemovou a plošnou hmotností. V závěrečné části jsou dána doporučení pro další vývoj v této oblasti.

Cílem práce je:

- shrnout současný stav studované problematiky a používaných metod hodnocení tepelně-izolačních vlastností textilií,
- vyvinout zařízení pro hodnocení tepelně-izolačních vlastností textilií při vyšších rychlostech proudění vzduchu,
- vypracovat metodiku měření a otestovat ji,
- porovnat dosažené výsledky se standardní normovanou metodou a vybraným teoretickým modelem.

## 2. Přehled současného stavu problematiky

Pro měření tepelně-izolačních vlastností textilií existuje mnoho metod a přístrojů lišících se principem i aplikovatelností. Některé z nich pracují na shodném nebo podobném principu. Jednotlivé metody, přístroje a postupy nejsou navzájem *kompatibilní* – každý přístroj využívá např. jinou velikost vzorku a různé přitlaky na měřený element, různé druhy snímačů a každá metoda má také jiné požadavky na okolní atmosférické podmínky. Prakticky žádný používaný přístroj ale nevyužívá vystavení textilie proudícímu vzduchu kolmo na ni. Lze to vysvětlit tím, že už jen samotný vývoj a implementace zařízení pro proudění vzduchu jsou technicky i ekonomicky náročné a komerčně vyráběné přístroje by byly tímto neúměrně prodražovány. Vysvětlení je možno ale vidět i v tom, že rychle proudící vzduch má tendenci proudit silně turbulentně s možností výskytu velkých vírových struktur a je faktorem natolik nestabilním, že pokud není tok vzduchu řádně usměrněn a proudění definováno, není naděje na spolehlivá měření. To byl pravděpodobně i osud přístroje pracujícího podle Československé státní normy ČSN 80 0851 s platností od 1.7.1958. Od používání tohoto přístroje i příslušné normy bylo upuštěno, jeho schéma je uvedeno na obr.1.



Obr.1: Schéma měřicího zařízení – tunel a vyhříváný válec

Měřicí zařízení (obr.1) se skládalo z mosazného měřicího válce (5) s tepelně izolovanými čely (7), který byl naplněn destilovanou vodou. Uvnitř válce bylo umístěno topné těleso (9) sahající do dvou třetin výšky válce s příkonem 100 – 150 W a malou tepelnou setrvačností a míchadlo (6). Měřicí válec byl zhotoven z tenkostěnné mosazné trubky, v jehož ose byla umístěna druhá tenkostěnná trubka (8), která usměrňovala proudění kapaliny. Teplota media uvnitř měřicího válce byla měřena teploměrem (10). Povrch válce o ploše 5 dm<sup>2</sup> byl obalen vzorkem. Studijní zpráva Výzkumného ústavu textilního v Liberci doslova uvádí: *měřicí válec byl umístěn do větrného tunelu, délky asi 1 m, v němž pomocí ventilátoru proudil vzduch rychlostí 40 m.s<sup>-1</sup>. Ventilátor byl od vlastního tunelu oddělen sítí z ochranného pletiva, která zajišťovala laminární proudění v tunelu.* Teplota vzduchu se měřila v počáteční části trubky teploměrem a v průběhu zkoušky se nesměla měnit o více než ± 0,2 °C. Ze změřeného rozdílu teplot a konstantních hodnot přístroje byl určen koeficient tepelné propustnosti (uveden v původních jednotkách)  $k$  [kcal.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>] vztahem:

$$k = \frac{\sum m_i c_i}{F \tau} \ln \frac{t_0 - t_v}{t_i - t_v} \quad (1)$$

kde  $m_i$  [kg] je hmotnost měřeného válce,  $c_i$  [kcal.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>] měrné teplo součástí měřeného válce,  $t_v$  [°C] teplota vzduchu,  $t_0$  [°C] počáteční teplota vody, tj.  $t_v + 50^\circ\text{C}$ ,  $t_i$  [°C] konečná naměřená teplota vody,  $F$  [m<sup>2</sup>] plocha měřicího válce a  $\tau$  [s] doba měření (10 minut).

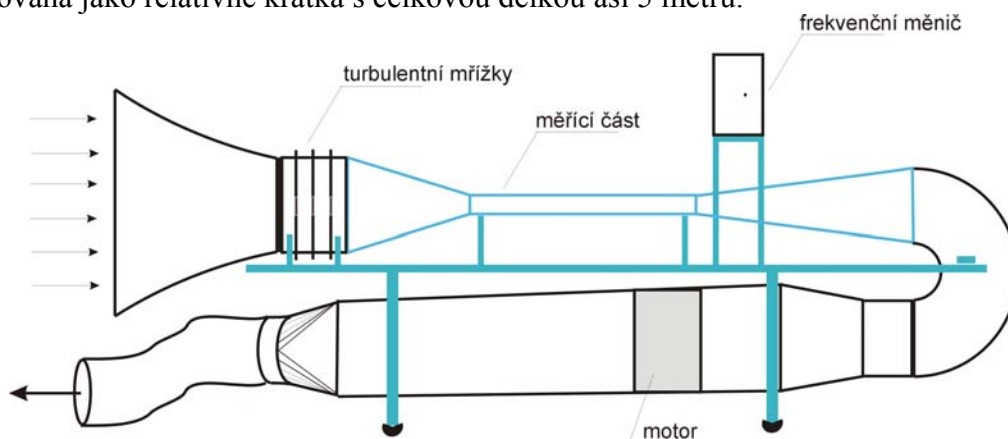
Délka přímého otevřeného tunelu byla pouze 1 metr, proudění vzduchu zajišťoval axiální ventilátor a laminární proudění mělo být zajištěno jednou předřazenou mřížkou. Toto tvrzení je velmi odvážné, neboť délky aerodynamických tunelů zajišťující laminární proudění se pohybují v řádech desítek metrů. I když lze konstruovat pomocí vhodných úprav i tunely kratší, délku tunelu při tak vysokých rychlostech proudění a nízké viskozitě proudící tekutiny (vzduchu) považují za příliš krátkou. Navíc jedna mřížka je pro účinné rozbití turbulentních vírů málo. Z měření provedených na aerodynamickém tunelu katedry oděvnictví TUL (viz.kap.6) bylo zjištěno, že pro účinné rozbití vírů musí být sériově řazeny nejméně tři tzv. turbulentní mřížky za sebou. V tak krátké trati musely při ofukování válce intenzivně vznikat nepravidelné a velké turbulentní víry, které při styku s válcem narušovaly mezní tepelnou vrstvu a vnášely chaos do přenosů tepla v soustavě. Nepravidelným odtrháváním velkých vírů pravděpodobně docházelo k pulznímu přenosu tepla, které může být v každém okamžiku jiné a reprodukovatelnost měření byla z toho důvodu velmi nízká. Navíc při vysokých rychlostech proudícího vzduchu a velkém průměru soustavy válec-vzorek může snadno dojít k překročení hranice kritického Reynoldsova čísla, kdy se Strouhalovo číslo určující frekvenci odtrhávání vírů za válcem dostává do nestabilní oblasti. Taktéž použití axiální vrtule pro zajištění proudění vzduchu může být problematické. Natočení lopatek

axiálního motoru může způsobovat silnou nerovnoměrnost ofukování dolní a horní poloviny a zejména levé a pravé strany válce, což může měření negativně ovlivnit.

U některých v současnosti používaných metod sice vzduch kolem vzorku proudí, ale rovnoběžně s ním (např. přístroj *Togmeter*), čímž sice dochází ke zrychlení přenosu tepla z jeho povrchu, ale nevyužívá se průniku vzduchu do textilie. Měření bez přítomnosti proudícího vzduchu lze dobře využít tam, kde dochází k hodnocení tepelné izolace materiálů, které nebudou vystaveny proudícímu vzduchu. Typicky to může být např. ložní prádlo nebo domácí oblečení. U těchto textilií je nepravděpodobné, že by byly vystavovány proudícímu vzduchu. Pro ně je měření většinou výše uvedených metod dostačující, přičemž dominantním izolačním efektem je tloušťka textilie a množství vzduchu v ní obsažené. Zcela jiná situace ale nastává u outdoorového oblečení, které je zcela jistě vystavováno proudícímu vzduchu a tím spíše, pokud jde o oblečení pro sport.

### 3. Použité metody

Jedním z cílů disertační práce byl vývoj technického zařízení a metodiky pro hodnocení tepelně-izolačních vlastností oděvních materiálů při vyšších rychlostech proudění vzduchu. K tomuto účelu byl vytvořen technický model větru v aerodynamickém tunelu na Katedře oděvnictví (obr.2) a model lidské paže ve formě vyhřívaného válečku. Větrná trať byla vyvíjena ve „standardních“ prostorových podmínkách místnosti, tzn. že byla koncipována jako relativně krátká s celkovou délkou asi 5 metrů.



Obr.2: Otevřená forma aerodynamického tunelu

Pro relevantní hodnocení proudícího vzduchu bylo využita sofistikovaná metoda – měřicí zařízení laserové anemometrie PIV (Particle Image Velocimetry). Měřicí zařízení bylo zapůjčeno *Katedrou měření* Fakulty mechatroniky a mezipředmětových inženýrských studií. Ve spolupráci s odborníky z Katedry měření byla proměřena rychlostní pole v různých hladinách a za různých podmínek proudícího vzduchu. Jedná o metodu bezdotykovou měřicí rychlost media pomocí mikroskopických částic v něm rozptýlených. Měření je v celém rozsahu lineární a výsledky nejsou závislé na okolních vlivech – tlaku, teplotě, vlhkosti apod. Jde o metodu principiálně jednoduchou postihující horizontální řez celým proudovým polem v jednom časovém okamžiku (na rozdíl od „dopplerovských“ metod LDA, PDA, L2F). Jediným požadavkem je transparentnost měřené tekutiny, její nasycení malými stopovými částicemi (1 – 2  $\mu\text{m}$ ) a optický přístup do měřeného prostoru. Princip měření rychlosti proudícího média je založen na zaznamenání posunutí malých částic unášených proudem a následném vyhodnocení tohoto posunu. Ve sledované oblasti proudového pole jsou částice osvětleny dvěma krátkými laserovými pulsy generovanými s definovaným časovým odstupem. Lasery osvětlí měřicí rovinu pouze po dostatečně krátký čas pro zaznamenání

okamžité polohy částic a přitom poskytují dostatečně velký světelný výkon pro expozici obrazu. Polohy částic v měřené rovině jsou zaznamenávány pomocí CCD detektoru kamery.

Model lidské paže je tvořen sondou ve formě vyhřívaného válečku o průměru  $d = 80$  mm. Materiálem válečku je dural (slitina 93,7% Al, 4,3% Cu, 1,4 Mg, 0,6 Mn), s ohledem na jeho vyhovující vlastnosti. Váleček je vyhříván zabudovaným topením o výkonu 300 W, kterým jej lze velmi rychle vyhřát – při plném výkonu z 25 na 37°C za 70÷80 sekund. Na povrchu sondy bylo umístěno šest snímačů tepelného toku. Každý snímač na sondě byl individuálně kalibrován výrobcem. Měření ukázala, že ne vždy tyto kalibrační konstanty zajišťovaly shodné chování všech snímačů. Důvodem mohla být nepřesná kalibrace od výrobce, stárnutí snímačů, vliv nalepení snímačů a přívodních kabelů. Bylo tedy přistoupeno k rekalibraci snímačů v klimatické komoře Binder KBF 240 pro teplotní spád 0-50°C.

K samotnému měření tepelného odporu byly použity vrstvené oděvní materiály. Vzorky byly uspořádány dvouvrstvě – vnitřní vrstvu tvořilo rouno, vnější vrchový materiál. Bylo použito sedm druhů vrchových materiálů a tři druhy roun – v kombinaci celkem 21 vzorků. U všech použitých materiálů i sendvičů byly změřeny základní parametry:

- *tloušťka* - byla měřena na digitálním tloušťkoměru SDL M034A britské firmy *SDL International Ltd* měřící v souladu s normou ČSN EN ISO 5084 (80 0844); tloušťka byla v souladu s normou měřena při tlaku 6,9 Pa,
- *hmotnost* - byla měřena na digitálních vahách HOKA WPS 60/C a naměřené hodnoty sloužily jako podklad pro výpočet plošné a objemové hmotnosti,
- *prodyšnost* - byla měřena na přístroji SDL M021S pracující podle normy ČSN EN ISO 9237 (80 0817).

Pro řízení a vizualizaci měření byly v programovém prostředí LabVIEW vyvinuty tři aplikace:

- a) aplikace *Ritra* řídící rychlost proudění vzduchu v tunelu,
- b) aplikace *Regkom* řídící vyhřívání modelu lidské paže,
- c) aplikace *Tepelný odpor* zajišťující vizualizaci měření, zpracování a interpretaci výsledků.

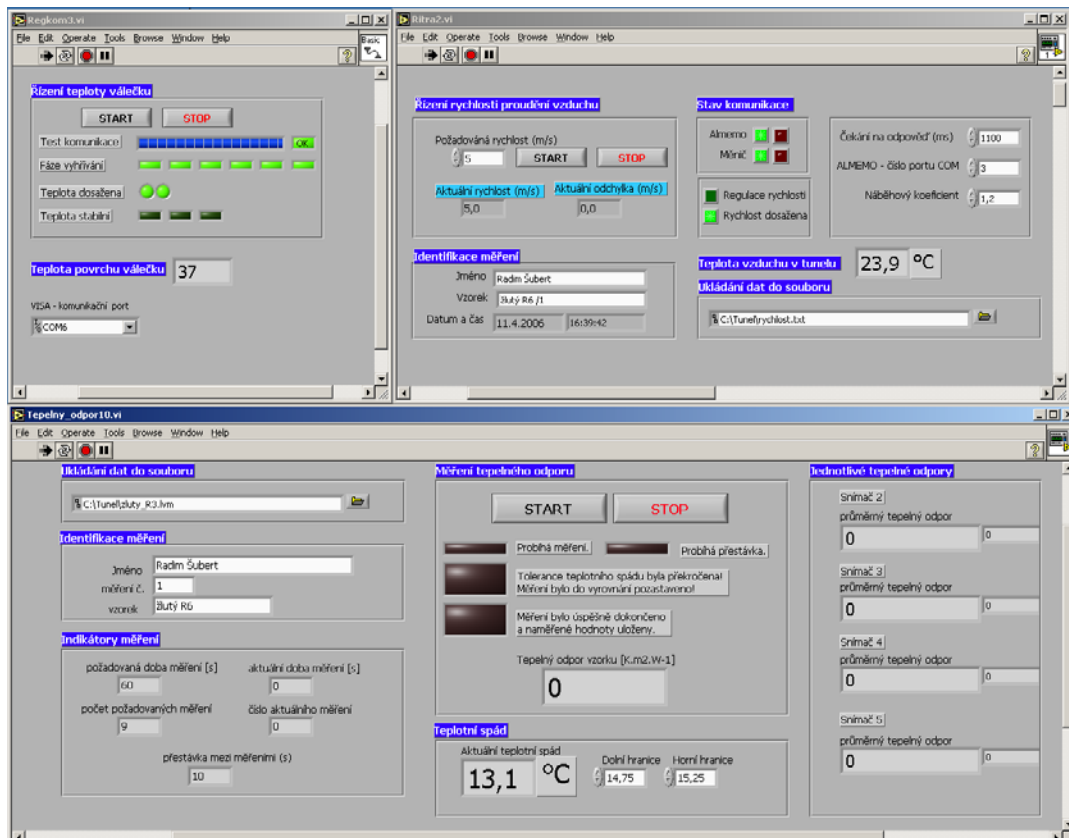
Úmyslně nebyly tyto tři aplikace sloučeny do jedné (i když by to bylo uživatelsky komfortnější), neboť v případě modifikace jedné z aplikací by spojený zdrojový kód mohl značně zkomplikovat řešení.

Aplikace *Ritra* ovládá před sériové rozhraní RS 232 frekvenční měnič řídící otáčky asynchronního motoru. V této aplikaci se zadává požadovaná hodnota rychlosti proudění vzduchu a tato ji ve stanovených regulačních mezích udržuje. Aplikace snímá aktuální teplotu proudícího vzduchu v trati, indikuje stav komunikace s externími zařízeními a ukládá naměřená data rychlostí proudění vzduchu a jeho teploty do souboru ve formátu *txt* (obr. 3 vpravo nahoře).

Aplikace *Regkom37* zajišťuje na základě metody zvané *programová adaptace* vyhřívání modelu lidské paže na teplotu 37°C v regulačních mezích  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  (obr.3 vlevo nahoře).

Aplikace *Tepelný odpor* zajišťuje sběr dat ze snímačů tepelného toku, jejich zpracování a ukládání do souboru. Kromě toho průběžně monitoruje aktuální teplotní spád a při jeho vychýlení mimo oblast tolerance je měření automaticky pozastaveno. Po návratu teplotního spádu do oblasti tolerance je měření opět automaticky spuštěno (obr. 3 dole).



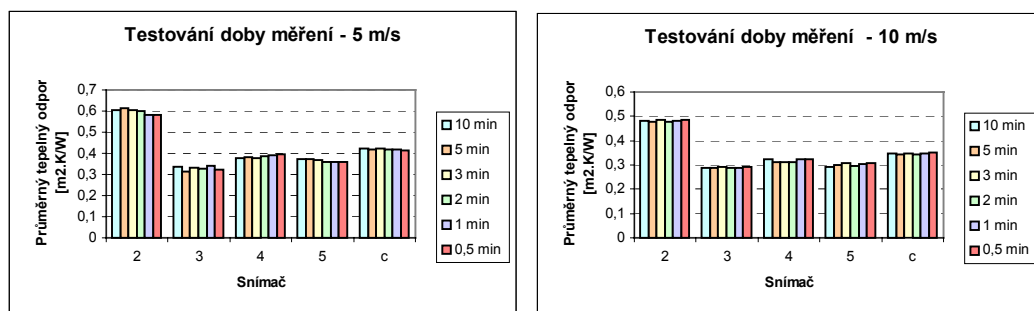


Obr.3: Obrazovka PC se třemi řídicími aplikacemi

Bylo provedeno několik sad měření při rychlostech proudícího vzduchu  $5-20 \text{ m.s}^{-1}$ . Jelikož byla použita sonda válcová, jedná se při měření o symetrický jev, byly zjišťovány hodnoty lokálních tepelných odporů pouze na polovině válce, na které byly umístěny čtyři snímače tepelného toku s polohami (vzhledem k proudu vzduchu):

- snímač č.2, střed  $0^\circ$  (kolmo k proudícímu vzduchu), rozsah  $-18^\circ +18^\circ$ ,
- snímač č.3, střed  $60^\circ$ , rozsah  $+42^\circ +78^\circ$ ,
- snímač č.4, střed  $120^\circ$ , rozsah  $+102^\circ +138^\circ$ ,
- snímač č.5, střed  $180^\circ$ , rozsah  $+162^\circ +198^\circ$ .

Pro stanovení nezbytné délky měření, bylo provedeno testování při době měření 10, 5, 3, 2, 1 a 0,5 minuty. Frekvence snímání napětového signálu ze snímačů tepelného toku je 2 Hz. Výsledky měření jsou uvedeny na obr.4 a je patrné, že rozdíly mezi 10 minutami a 0,5 minuty jsou minimální. S ohledem na reprodukovatelnost a spolehlivost měření byla zvolena doba jednoho měření 60 sekund. V průběhu jednoho měření je z každého snímače tepelného toku sejmuto 120 hodnot. V následujících grafech značí číslice 2-5 pořadové číslo snímače a ve sloupci označené znakem *c* je uveden aritmetický průměr ze všech snímačů.



Obr.4: Testování doby nutné pro měření

Výstupem jednoho měření je pět datových souborů:

- 1) soubor aplikace *Ritra* s rychlostí ofukování vzorku během celého měření (frekvence snímání asi 0,8 Hz),
- 2) soubor aplikace *Tepelný odpor* s výslednými průměrnými hodnotami tepelných odporů z jednoho měření (60 s), vždy jsou uvedeny 4 hodnoty tepelných odporů po polovině obvodu vzorku a hodnota celkového tepelného odporu vzorku,
- 3) pomocný soubor aplikace *Tepelný odpor* se všemi změřenými hodnotami napětí ze snímačů tepelného toku (frekvence snímání 2 Hz),
- 4) pomocný soubor aplikace *Tepelný odpor* se všemi změřenými hodnotami teplotních spádů (frekvence snímání 2 Hz), pro korektní měření nesmí směrodatná odchylka tohoto souboru překročit hodnotu 0,25 (viz.kap.7.4.4).

Při snímání hodnot s frekvencí 2 Hz je jedno měření určeno 120 hodnotami elektrického napětí odpovídajícího tepelným tokům. Každé měření je provedeno třikrát na třech vzorcích, tzn. celkem devět měření. Výsledkem je devět průměrných hodnot tepelných odporů. Tento statistický soubor je nejdříve podroben testu *odlehklých měření*. Pomocí něj jsou identifikována a ze souboru vyloučena odlehlá měření, která silně ovlivňují aritmetický průměr a směrodatnou odchylku. Pro testování byl zvolen *Grubbsův test*, neboť se jedná o metodu použitelnou i při vyšším počtu měření ( $n > 10$ ), který spočívá ve stanovení dvou parametrů  $K_1$  a  $K_2$  a porovnání s kritickou hodnotou z tabulek odlehklých měření pro příslušnou velikost statistického souboru. Vztahy pro parametry  $K_1$  a  $K_2$ :

$$K_1 = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{s} \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{s} \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (3)$$

kde  $n$  je počet měření a  $s$  směrodatná odchylka. Vypočtené koeficienty se porovnají s příslušnými tabulkovými hodnotami. Pokud je koeficient  $K_1$  vyšší než tabulková hodnota je vybočující nejmenší hodnota statistického souboru, pokud je koeficient  $K_2$  vyšší než tabulková hodnota je vybočujícím měřením největší hodnota statistického souboru. Z výsledného homogenního souboru jsou určeny hodnoty aritmetického průměru, výběrové směrodatné odchylky a variačního koeficientu.

Naměřené hodnoty tepelného odporu vzorků jsou dány do souvislosti s dalšími parametry hodnocených textilií – prodyšností, tloušťkou, objemovou a plošnou hmotností. Pro vyhodnocení lineární závislosti dvou souborů dat byl použit jako vhodný nástroj korelační koeficient  $\rho_{xy}$ . Pro jeho výpočet byl použit vztah:

$$\rho_{xy} = \frac{\overline{XY} - \overline{X} \cdot \overline{Y}}{\sqrt{s_x^2 \cdot s_y^2}} \quad (4)$$

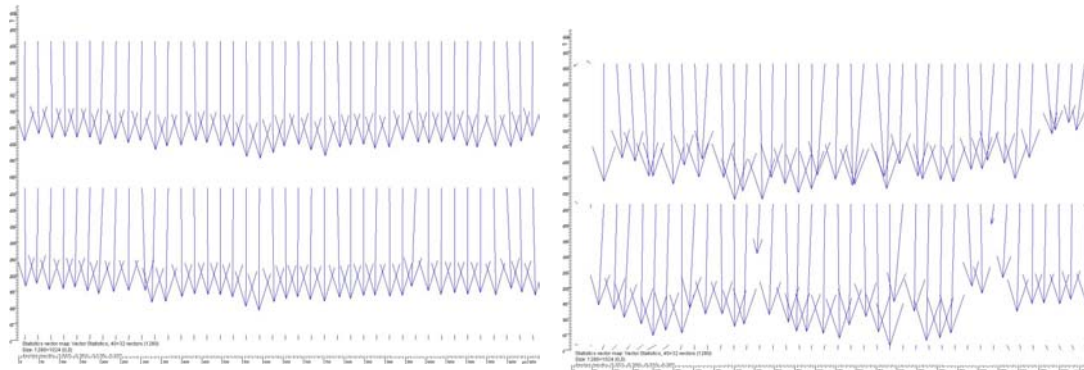
Naměřená data byla porovnána s měřením na přístroji *Togmeter* pracující v souladu s normou ISO 5085 a BS 4745. Na přístroji byly proměřeny všechny sendviče obsahující rouna R3 a R6. Sendviče obsahující rouna R8 nebyly proměřeny, protože přístroj neumožňuje měřit vzorky s tloušťkou vyšší než 25 mm. Tloušťka vzorků byla měřena podle normy ISO 5085 při tlaku 6,9 Pa a změřená hodnota nastavena jako vzdálenost mezi horní a dolní deskou přístroje. Výsledky z aerodynamického tunelu byly rovněž porovnány s teoretickým modelem, který navrhl Kind a kol. (kap.9).

## 4. Přehled dosažených výsledků

Vzhledem k homogenitě, vířivosti a turbulenci proudícího vzduchu v tunelu byla porovnána uzavřená a otevřená forma tunelu, použití axiálního a radiálního ventilátoru

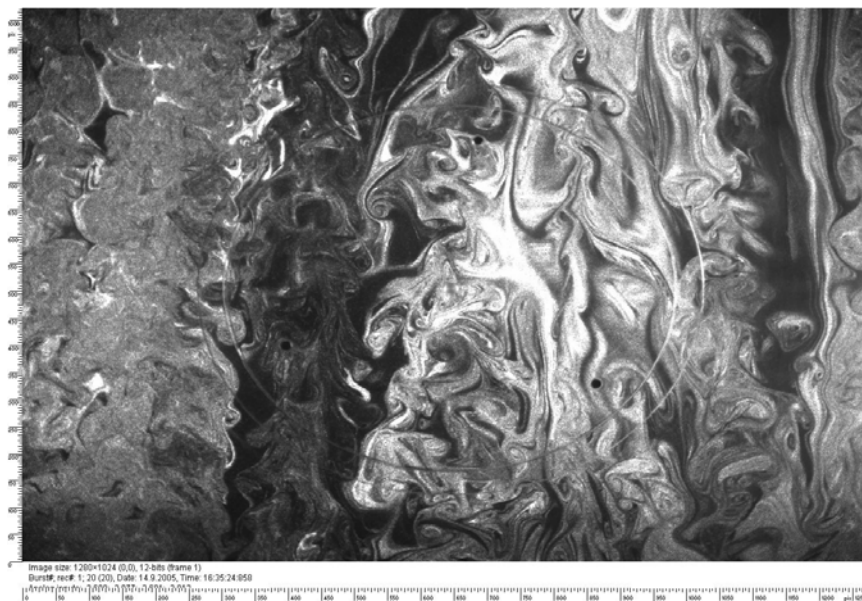
a řazení žádné, jedné, dvou a tří turbulentních mřížek na vstupu tunelu. Na základě měření metodou PIV bylo vyhodnoceno optimální uspořádání aerodynamického tunelu.

Předpokladem bylo, že axiální ventilátor se symetrickou konstrukcí (oproti ventilátoru radiálnímu) bude vyhovující. Skalární mapy u axiálního ventilátoru však ukázaly značné rozdíly mezi pravou a levou částí tunelu (až o 50%) a rozložení rychlostí je výrazně nesouvislé. I ve středové měřicí části je rozdíl rychlostí až 25%. Rozdíly jsou pravděpodobně způsobeny tím, že axiální ventilátor rotuje v jenom směru a chová se tak výrazně jinak ke každé straně profilu tunelu. U radiálního ventilátoru je rozdíl rychlostí mezi pravou a levou částí tunelu téměř zanedbatelný a ve středovém kruhu dosahují rozdíly jen 7-8%. I přes nesymetrickou konstrukci se tento ventilátor ukázal jako vhodnější. Dokumentují to i (obr.5) vektorové profily při použití radiálního a axiálního ventilátoru.

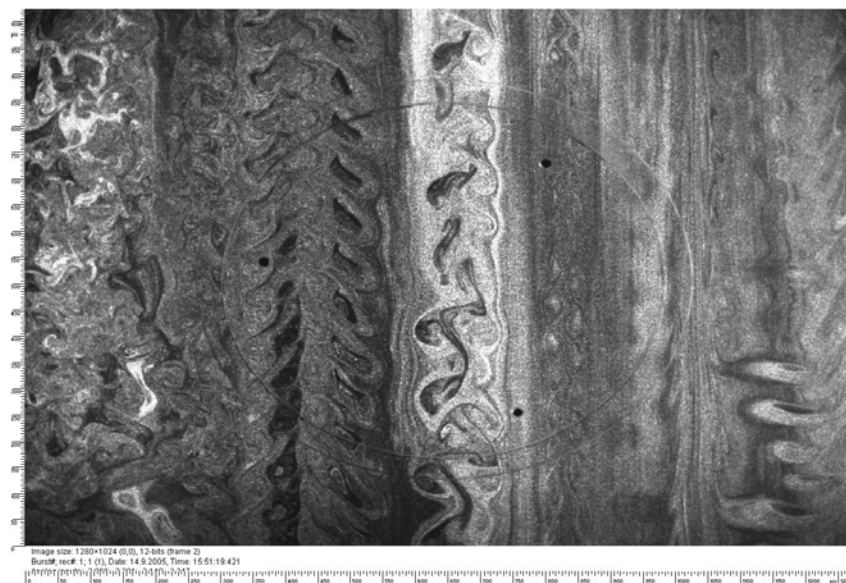


Obr.5: Vektorové profily pohybu částic při použití radiálního (vlevo) a axiálního ventilátoru ( $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Jelikož délka tunelu před měřicí částí je pouze 2,1 m, nelze očekávat, vzhledem k rozměrům měřicí části, laminární tok vzduchu. Je zde vysoká pravděpodobnost vzniku větších vírových struktur. K jejich eliminaci byl na vstup do tunelu umístěn čtvercový difuzor o hraně 1,2 m se zaoblenými stěnami a tři sériově řazené turbulentní mřížky. Mřížky byly voleny jako relativně husté s rozměrem ok  $1,75 \times 1,75 \text{ mm}$  a propustností 55%. Na obr.6 je možno vidět vírové struktury při 2 m/s bez použití turbulentních mřížek, kdy jsou víry vzhledem k rozměrům trati velké, což je s pro přenos tepla nežádoucí. Na obr.7 jsou vírové struktury při téže rychlosti proudění vzduchu a použití tří sériově řazených turbulentních mřížek.



Obr.6: Vírové struktury bez použití turbulentních mřížek (2 m/s)



Obr.7: Vírové struktury při použití turbulentních mřížek (2 m/s)

Z metody PIV byly vyhodnoceny i dva důležité parametry proudícího vzduchu – vířivost a intenzita turbulence. Hodnoty vířivosti značí o kolik radiánů se daný bod tekutiny pootočí v průběhu jedné sekundy. Z tab. 1 tabulky vyplývá, že se zvyšující rychlostí proudění se vířivost nepatrně zvyšuje. Nicméně i nejvyšší hodnota 0,85 rad značí, že se částice pootočí o necelých 49°, což nelze považovat za výraznou rotaci a lze konstatovat, že vířivost proudící tekutiny je zanedbatelná.

Tab.1: Pootočení částic proudící tekutiny při průchodu úsekem o délce 0,1 m

rychlost proudění	pootočení
2 m.s <sup>-1</sup>	0,5 rad
5 m.s <sup>-1</sup>	0,5 rad
15 m.s <sup>-1</sup>	0,75 rad
20 m.s <sup>-1</sup>	0,85 rad

Intenzita turbulence proudící tekutiny charakterizuje relativní velikost amplitud rychlosti vzhledem ke střední hodnotě rychlosti pro daný směr. Pro směr osy x je intenzita turbulence  $\varepsilon_x$  [%] definována:

$$\varepsilon_x = \frac{s_x}{w_x} \cdot 100 \quad (5)$$

Intenzita turbulence se s narůstajícím počtem turbulentních mřížek většinou zvyšuje. Nárůst je způsoben rozbitím velkých vírů na víry mnohem menší, které způsobují vyšší frekvenci rychlostních pulsů, je tím však zároveň omezen negativní vliv velkých vírových struktur. Intenzita turbulence klesá s nárůstem rychlosti proudění. Tento jev lze vysvětlit „laminarizačním“ účinkem vyšších rychlostí proudění, který víry natáhne do směru osy tunelu. Hodnoty intenzity turbulence se při použití tří turbulentních mřížek pohybují v rozmezí 2-10% v závislosti na rychlosti proudění vzduchu.

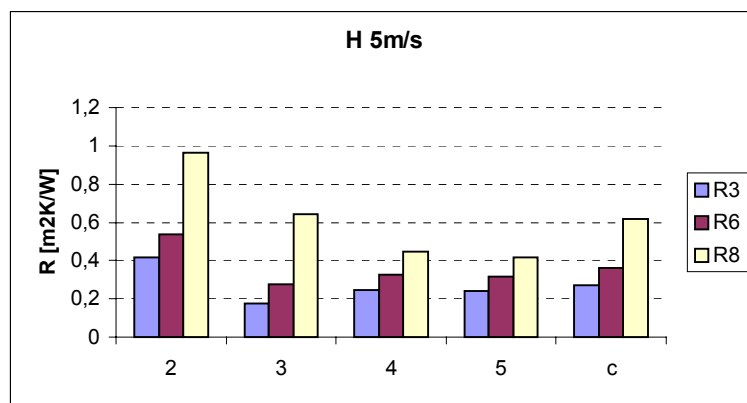
Tato disertační práce byla postavena na předpokladu, že při hodnocení tepelně-izolačních vlastností materiálů za působení proudícího vzduchu, bude chování vysoce a málo prodyšných materiálů odlišné. Použitá rouna mají vysokou hodnotu prodyšnosti a jak bylo uvedeno výše jsou součástí všech sendvičů. Na prodyšnosti výsledného sendviče bude mít tedy zásadní vliv zejména vrchový materiál. Proto byly pro testování zvoleny vrchové materiály s řádově odlišnými hodnotami prodyšnosti. Byly vybrány vysoce prodyšné

pleteniny (prodyšnost cca  $1-3 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ ) označeny jako typ A a málo prodyšné tkaniny (prodyšnost cca  $1-3 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ ) označeny jako typ B. Pro ukázkou jsou na obr.8 a 9 vybrány zástupci obou rozdílných typů sendvičů. Tab.2 uvádí jejich základní vlastnosti.

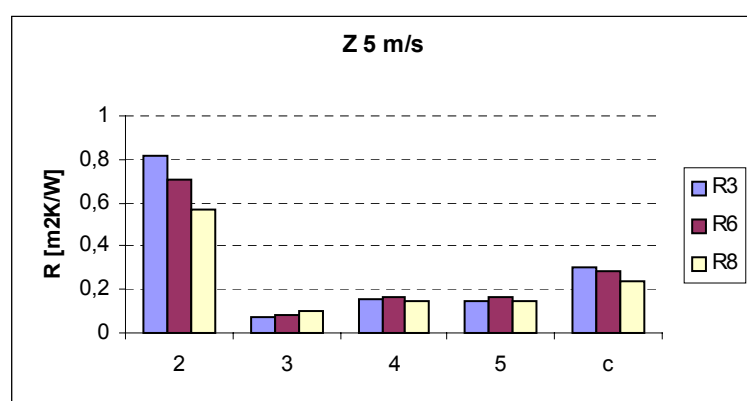
*Tab.2: Vlastnosti sendvičů H a Z*

Sendvič	tloušťka [mm]	plošná hmotnost [ $\text{g.m}^{-2}$ ]	objemová hmotnost [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	prodyšnost [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
<b>H R3</b>	18,33	361,03	19,70	$3,16 \cdot 10^{-4}$
<b>H R6</b>	21,43	355,49	16,59	$2,56 \cdot 10^{-4}$
<b>H R8</b>	33,11	448,32	13,54	$1,14 \cdot 10^{-4}$
<b>Z R3</b>	19,63	360,91	18,64	$2,65 \cdot 10^{-2}$
<b>Z R6</b>	21,58	355,37	16,47	$2,08 \cdot 10^{-2}$
<b>Z R8</b>	34,39	448,21	13,03	$0,67 \cdot 10^{-2}$

Bylo zjištěno, že u sendvičů s vysoce prodyšným pleteným vrchovým materiálem (typ A) klesá tepelný odpor s poklesem objemové hmotnosti, i když tloušťka výrazně roste. Naopak u sendvičů s velmi málo prodyšným tkaným vrchovým materiálem (typ B) tepelný odpor roste s rostoucí tloušťkou přesto, že objemová hmotnost výrazně klesá. U sendvičů typu A byly zjištěny výrazné rozdíly mezi tepelnými odpory jednotlivých částí obvodu ofukované „paže“. Rozdíl hodnot tepelných odporů na návětrné straně, mezi snímači č. 2 a 3 (podobně ale i 4 a 5) je byl u sendvičů typu A 200-700%, u sendvičů typu B byly rozdíly daleko menší 50-100%. Je patrné, že proudící vzduch na návětrné straně snadno proniká strukturou vysoce prodyšné textilie a silně ovlivňuje tepelný odpor po celém obvodu paže.



Obr.8: Hodnoty tepelného odporu sendvičů se vzorkem H při rychlostech proudění vzduchu ( $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) – typ B



Obr.9: Hodnoty tepelného odporu sendvičů se vzorkem Z při rychlostech proudění vzduchu ( $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) – typ A

U sendvičů typu A byly rozdíly mezi vzorky s různou hodnotou tloušťky a objemové hmotnosti zřetelně patrné pouze na návětrné straně vzorku (snímač č.2), na boční a závětrné straně vzorku (snímače č.3,4,5) jsou rozdíly ve snímaných hodnotách minimální, navíc bez jasné tendence vzestupu nebo poklesu. U sendvičů typu B je tendence zachována na všech částech sondy a rozdíly mezi vzorky s odlišnými rovinami jsou zřetelné. Z uvedeného je zřejmé, že u vysoce prodyšných vzorků chrání „lépe“ tepelně izolující textilie pouze návětrnou část paže. V oblasti přibližně  $5-25^\circ$  dochází k průniku proudícího vzduchu do struktury textilie, vzduch dále obvodově proudí až do závětrné strany, kde přes textilií opět uniká. Po průniku do struktury textilie, tzn. v oblasti  $25 - 180^\circ$ , výrazně ovlivňuje odvod tepla z paže a v této oblasti již nezáleží na tom, má-li vysoce prodyšná textilie dále „lepší“ nebo „horší“ izolační schopnosti. Nejvyšší odvod tepla byl zaznamenán v oblasti snímače č.3, kde pravděpodobně dochází k nejvyššímu tlaku prostupujícího vzduchu na „paži“. Po překonání  $90^\circ$  se vzduch od válce mírně odklání, proto odvod tepla zjištěný u snímačů č. 4 a 5 je nižší.

U sendvičů typu B nedochází v takové míře k průniku vzduchu do struktury textilie a textilie tak po celém obvodu chrání „paži“ v souladu se svými izolačními schopnostmi. U této skupiny sendvičů záleží zejména na jejich tloušťce. Málo prodyšný vrchový materiál vytváří ochrannou bariéru a i když dochází k poklesu objemové hmotnosti vzorku, zůstávají izolační vlastnosti zachovány.

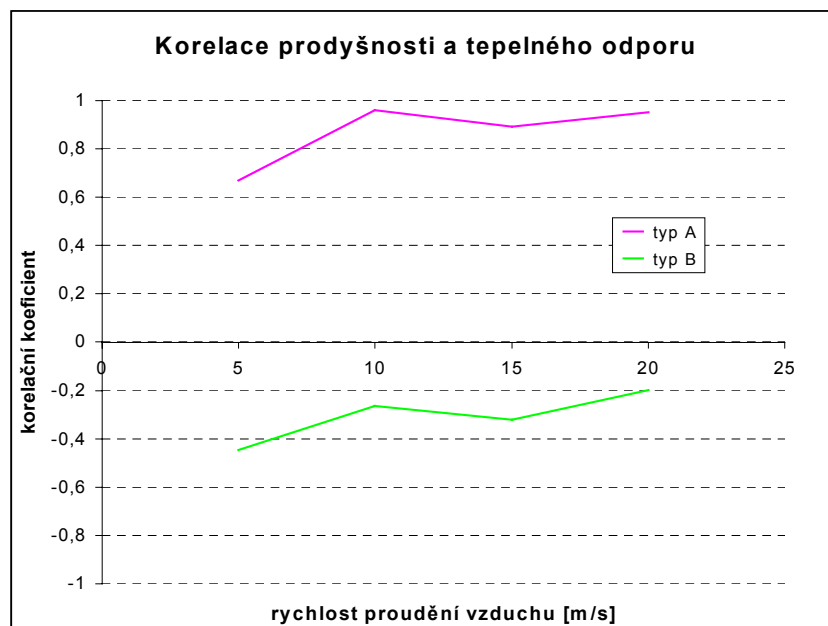
U sendvičů typu A se snižující se objemovou hmotností (bez ohledu na tloušťku) dochází na návětrné straně k poklesu tepelného odporu. Tento pokles je rychlejší se zvyšující se rychlostí ofukování, zatímco při rychlosti  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je klesání pozvolné (typicky o 10%),

při rychlosti  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je pokles strmý (typicky 20 – 60%). U sendvičů typu B se zvyšující se tloušťkou (bez ohledu na objemovou hmotnost) dochází k nárůstu tepelného odporu. Rychlost proudícího vzduchu neovlivňuje rychlost nárůstu tepelného odporu.

Dále byly stanoveny koeficienty korelace:

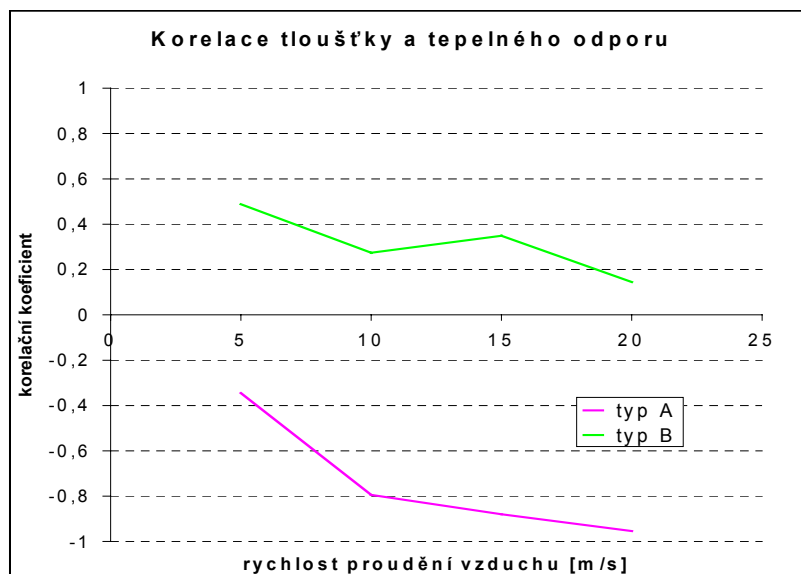
- tloušťka/tepelný odpor,
- plošná hmotnost/tepelný odpor,
- objemová hmotnost/tepelný odpor,
- prodyšnost/tepelný odpor.

Vypočítané korelační koeficienty ovšem nebyly a ani nemohly být zjišťovány izolovaně vzhledem k jednotlivým vlastnostem. K naměřeným hodnotám tepelného odporu byly postupně počítány korelační koeficienty s dalšími čtyřmi vlastnostmi. Na základě fyzikální interpretace bylo poté posuzováno, která vlastnost ovlivňuje tepelný odpor u větrného tunelu, a která na přístroji Togmeter.



Obr.10: Korelace prodyšnosti a tepelného odporu (větrný tunel)

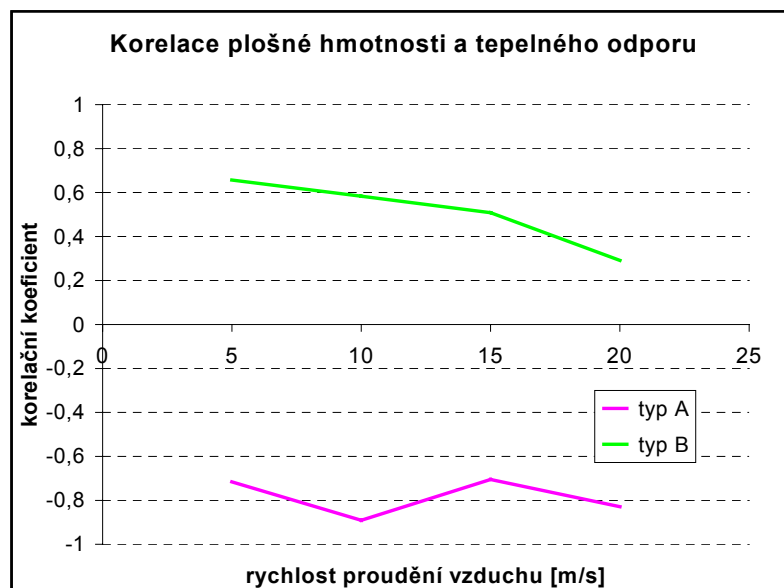
U málo prodyšných sendvičů typu B se jedná o předpokládané chování (obr.10) – roste-li prodyšnost, tepelný odpor klesá. Čím je rychlost proudění kolem vzorku vyšší, tím je závislost méně výrazná. U sendvičů typu A indikuje korelační koeficient naprosto opačné chování – se vzrůstající hodnotou prodyšnosti výrazně roste tepelný odpor. Takové chování je nelogické a takto interpretované nemá fyzikální opodstatnění. Vyvozuji z toho závěr, že při překročení určité *kritické hodnoty prodyšnosti* již prodyšnost dále neovlivňuje výrazně hodnotu tepelného odporu. Výsledná hodnota tepelného odporu je pravděpodobně ovlivněna jiným faktorem, který je daleko významnější než prodyšnost, a proto vychází tato nelogická závislost.



Obr.11: Korelace tloušťky a tepelného odporu (větrný tunel)

Obr 11. ukazuje, že u sendvičů typu B se vzrůstající tloušťkou roste tepelný odpor. Jedná se o očekávané chování. V tlustějších vzorcích je obsažen vyšší objem vzduchu, který v materiálu působí jako tepelný izolant. Jelikož vrchový materiál je málo prodyšný, nepropustí takové množství proudícího vzduchu do struktury textilie, které by významným způsobem tepelný odpor textilie ovlivnilo.

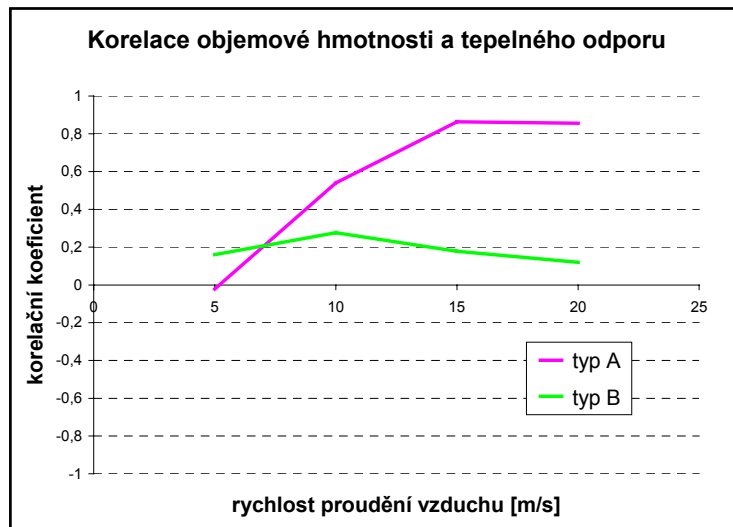
U sendvičů typu A se jako v předchozím případě objevuje výrazně odlišná závislost. Se vzrůstající tloušťkou výrazně klesá tepelný odpor. Jako v předchozím případě se i tady jedná o fyzikálně neopodstatněné chování a platí tentýž závěr jako v předchozím případě. Graf ukazuje, že tloušťka je při překročení kritické hodnoty prodyšnosti sendviče nevýznamným faktorem a stanovování korelace mezi těmito veličinami je zavádějící.



Obr.12: Korelace plošné hmotnosti a tepelného odporu (větrný tunel)

Plošná hmotnost (obr.12) nebyla parametrem, který by byl u objemných vzorků významný a neočekávalo se, že by tepelný odpor byl plošnou hmotností výrazně ovlivněn. Chování je opět shodné s předchozími případy a proto i tento parametr lze označit při vyšší prodyšnosti vzorků za nevýznamný.





Obr.13: Korelace objemové hmotnosti a tepelného odporu (větrný tunel)

U sendvičů typu B je hodnota korelace objemové hmotnosti (hustoty) a tepelného odporu slabě pozitivní, se vzrůstající hodnotou objemové hmotnosti mírně roste tepelný odpor (obr.13). U sendvičů typu A je závislost pozitivní. Při rychlosti ofukování  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  indikuje koeficient korelace nulovou závislost, se vzrůstající rychlosti ofukování silně roste a při rychlosti ofukování  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dosahuje již hodnoty  $\rho=0,86$ . Objemová hmotnost je parametrem, který silně ovlivňuje právě vysoce prodyšné vzorky.

Závěrem lze konstatovat, že podle výše uvedených grafů je tepelný odpor sendvičů typu B nejvíce ovlivněn tloušťkou a plošnou hmotností, v menší míře vykazuje závislost na prodyšnosti a objemové hmotnosti. U vysoce prodyšných sendvičů typu A již hodnota tepelného odporu vzorku nemá výraznou korelaci s tloušťkou, plošnou hmotností a prodyšností. Ukazuje se, že stěžejním parametrem je objemová hmotnost materiálu.

Stejně sendviče byly proměřeny na normovaném přístroji Togmeter a tedy bez přítomnosti proudícího vzduchu. Byly opět vypočteny korelační koeficienty výše uvedených závislostí a ukázalo se, že metoda není schopna rozlišovat strukturu hodnocené textilie, neboť sendviče A i B vykázaly obdobné chování:

- oba typy vykázaly silnou korelaci tloušťky a tepelného odporu ( $\rho_B = 0,87$ ,  $\rho_A = 0,73$ ),
- korelace objemové hmotnosti a tepelného odporu byla u obou typů velice slabá.

## 5. Zhodnocení výsledků a nových poznatků

V rámci vypracování práce byl sestaven funkční měřicí systém sestávající z modelu větru a lidské paže, kterým lze hodnotit tepelný odpor oděvních materiálů při rychlostech proudícího vzduchu do  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V aerodynamickém tunelu byl vytvořen za daných podmínek vyhovující model větru s definovaným prouděním vzduchu. Dále byl sestaven model lidské paže v podobě vyhřívaného válečku, na který jsou navlékány testované materiály. Kombinací PID regulátoru a metody nazvané programová adaptace se podařilo zajistit stabilní vyhřívání válečku s přesností  $\pm 0,1^\circ$  za všech uvažovaných rychlostí proudícího vzduchu (do  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Klimatizováním laboratoře byl dosažen požadovaný teplotní spád. Bylo provedeno experimentální měření a dosažená data porovnána s daty z normovaného přístroje Togmeter měřícího tepelný odpor bez proudícího vzduchu. Potvrdil se původní předpoklad, že prodyšnost materiálů hraje u hodnocení tepelně-izolačních vlastností zásadní roli. Bylo

prokázáno, že při vystavení proudícímu vzduchu se vysoce prodyšné materiály chovají z hlediska tepelné izolace velmi odlišně, zatímco při měření na přístroji *Togmeter* se materiály s různou prodyšností chovaly z hlediska tepelného odporu obdobně. Přístroj *Togmeter* není schopen relevantně ohodnotit tepelný odpor v případě, že je oděv vystaven proudícímu vzduchu. Hodnocení ve větrné trati lépe postihuje skutečný odvod tepla z lidské paže vystavené proudícímu vzduchu a její technická realizace se ukázala jako vhodná k hodnocení tepelně-izolačních vlastností oděvních materiálů určených do extrémních klimatických podmínek.

Pro vybrané materiály bylo provedeno srovnání s teoretickým modelem. Absolutní hodnoty naměřených a vypočtených dat nejsou ve shodě. Model ale potvrdil, že nejvyšší hodnoty tepelného odporu jsou dosahovány na návětrné straně vzorku. Po obvodu válce hodnoty klesají (shodně s experimentem), nicméně jejich absolutní hodnoty jsou řádově nižší.

Jelikož zařízení nabízí mnoho možností vylepšení a rozvoje, nelze jeho vývoj z tohoto hlediska považovat za ukončený. Proto byla v kap.12 dána doporučení pro další vývoj, ke kterým patří:

- přemístit laboratorní větrnou trať do větší místnosti s prodloužením před její měřicí části na 3,5-4 m,
- instalovat do měřicí trati minimálně dva bodové snímače intenzity turbulence,
- část plexiskla v měřicí části tunelu nahradit infračerveně „průhledným“ sklem a využít k měření tepelných přestupů infračervenou kameru.

Skladba použitých vzorků neumožnila postřehnout hranici prodyšnosti textilie, při které dochází k výraznému pronikání proudícího vzduchu do struktury textilie a ovlivnění tepelného odporu vzorku. V doporučeních pro další měření je tedy i sestavit řadu vzorků lišících se svou prodyšností, které budou postihovat širokou škálu prodyšnosti a pro každou rychlost proudění vzduchu určit hranici prodyšnosti (nebo rozpětí), kdy se projevuje významné pronikání proudícího vzduchu do textilie a ovlivnění tepelného odporu vzorků.

## 6. Práce autora se vztahem ke studované problematice

[1] Šubert,R.: *Řízení laboratorní větrné trati*, DP, TU v Liberci 2003

[2] Kůs, Z.;Šubert,R.: *The equipment for valuation of textile properties by higher speed of air flow*, First internet conference, Liberec 2004

[3] Kůs,Z.;Šubert,R.;Halasová,A.;Kotek,M;Kopecký,V.: *Methods of textiles evaluation at extreme wind conditions – model of wind* - Strutex 2005, Liberec

[4] Kůs, Z.;Šubert,R.: *Evaluation of clothing material thermal resistance in wind tunnel*, Hanoi university of technology, Hanoi, Vietnam 2006

[5] Šubert,R.; Kůs,Z.: *Fabrics thermal resistance measurement in wind tunnel – heated circular cylinder as a human arm model*, TEXCO 06, Ružomberok, Slovakia 2006

[6] Kůs, Z.;Šubert,R.: *Influence of flowing air at thermal resistance measurement of fabrics*, Strutex 2006, Liberec

## 7. Literatura

[1] Fonseca, G.F.; Breckenridge, J.R.: *Wind penetration through fabric system part I*, Textile Research Journal 35, 1965, pp. 95-103

[2] Churchill, S.W.: *Viscous flows – The practical use of theory*, Butterworth Publishers, Stoneham, 1988

- [3] Kind, R.J.; Jenkins, J.M.; Broughton, C.A.: *Measurements and prediction of wind-induced heat transfer through permeable cold-weather clothing*, Cold Regions Science and Technology (23), 1995, pp. 305-316
- [4] Kind, R.J.; Jenkins, J.M.; Seddigh, F.: *Experimental investigation of heat transfer through wind permeable clothing*, Cold Regions Science and Technology (20), 1991, pp.39-49
- [5] Zdravkovich, M.: *Flow around circular cylinder*, Vol.1: Fundamentals, Oxford University Press, 1997
- [6] *Flow manager software and introduction to PIV instrumentation – uživatelský manuál*
- [7] Oslzlá M.; Nadačová, J.: *Fyziologie odívání*, studijní zpráva, Státní výzkumný ústav textilní Liberec 1970
- [8] Kopecký, V.: *Laserové anemometrie v experimentální mechanice tekutin*, habilitační práce, Technická univerzita v Liberci 2001
- [9] Axamit, P.: *Fyziologie odívání I*, Státní výzkumný ústav textilní Liberec, Svazek 5, 1980, Liberec
- [10] Hájek, K.: *Hávrh stanovení tepelné produkce lidského organismu*, Státní výzkumný ústav textilní Liberec, 1981, Liberec
- [11] Farnworth, B.: *Mechanism of heat flow through clothing insulation*, Textile Research Journal 53, 1983, pp.717-725
- [12] Sobera, P., M.; Kleijn, C.R.; Akker, H.: *Convective heat and mass transfer to a cylinder sheathed by a porous layer*, AIChE Journal, 2003, Vol.49, No.12, pp.3018-3028

## 8. Summary

Disseratation thesis is aimed for study of thermal-insulating properties evaluation of clothing materials at extreme climatic conditions and development of technical equipment and measuring methodology. In the first part, there is a review of present state of studied problems and their theoretical aspects. The second part delas with thermal-insulating properties evaluation of clothing materials at wind velocities interval 5-20 m.s<sup>-1</sup>. This section is divided into parts deal with development of technical model of wind, model of human arm and creation and testing of measuring methodology. The technical equipment were developed in the wind tunnel at the Department of clothing technology. In the next part, there are measured data being presented. Thermal resistance of sandwiched clothing materials were evaluated. The results were compared to standard method operating in accordance with international norms ISO and chosen theoretical model. In the thesis, there is also stated correlation of measured thermal resistance of materials with their other parameters – especially air permeability and bulk density. In the final part, there are given reccomendations for next development in this field.



Vydala Textilní fakulta, Technické univerzity v Liberci  
jako interní publikaci pod pořadovým číslem 5/2006  
v počtu 20 výtisků