



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

STANOVENÍ SOUČINITELŮ PŘENOSU TEPLA RADIACÍ A KONVEKČÍ Z POVRCHU TEPELNÉHO MANEKÝNA

**DETERMINATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS FROM THE SURFACE OF THE
THERMAL MANIKIN**

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MILOŠ FOJTLÍN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Bc. Ing. JAN FIŠER, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Miloš Fojtlín

který/která studuje v magisterském navazujícím studijním programu

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekcí z povrchu tepelného manekýna

v anglickém jazyce:

Determination of heat transfer coefficients from the surface of the thermal manikin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro posuzování tepelné pohody se v posledních letech stále častěji využívá měření s tepelnými manekýny ve spojení s metodou vypracovanou H. O. Nilssonem v roce 2004. Metoda je založena na určení ekvivalentní teploty jednotlivých částí těla a vyhodnocení tepelného pocitu v diagramu komfortních zón. Metoda vyžaduje přesné stanovení kalibračních koeficientů přenosu tepla z manekýna do okolí, které však kombinují přesnost tepla radiací i konvekcí v jednom koeficientu. Pro potřeby počítačového modelování tepelného komfortu je však potřeba znát separátní hodnoty součinitelů přestupu tepla pro oba dominantní způsoby přenosu tepla: konvekcí a radiací.

Cíle diplomové práce:

Pomocí manekýna Newton provedte stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekcí z lidského těla při laboratorních podmínkách (eliminace radiační složky z celkového tepelného toku bude provedena pomocí snížení emisivity povrchu vhodným materiálem nebo pomocí jiné vhodné metody). Měření a stanovení koeficientů bude provedeno pro sedícího/stojícího manekýna a zvolené okolní podmínky.

Seznam odborné literatury:

- [1] Nilsson HO. Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models, PhD thesis, University of Gävle (2004).
- [2] Kingma B. Human Thermoregulation - A synergy between physiology and mathematical modelling. PhD Thesis, Maastricht University, Maastricht (2011).
- [3] Fiala D. Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort. PhD Thesis, Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University, Leicester (1998).
- [4] Zhang H. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments. PhD thesis, University of California Berkeley (2003).
- [5] Špoinar D , Barták M. Hodnocení tepelné pohody z výsledků CFD simulace a jejich aplikace v interiéru vozidla. Vytápění, větrání a instalace březem, 151-154 (2007).
- [6] ČSN EN ISO 14505-2. Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného komfortu ve vozidlech. Český normalizační institut (2007).

Vedoucí diplomové práce: Bc.Ing. Jan Fišer, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá experimentálnym stanovením súčiniteľov prestupu tepla radiáciou a konvekciou využitím tepelného manekýna. Ťažisko práce leží v rozdelení tepelného toku z povrchu manekýna na radiačnú a konvektívnu zložku. Práca sa zaoberá prestupom tepla z povrchu nahého a oblečeného manekýna, v polohách sed a stoj. Merania prebiehali v definovanom prostredí, pri konštantnej teplote a rýchlosti vzduchu (cca 24°C a 0,05 m.s⁻¹). Zložka radiačného tepelného toku sa potláčala poťahom so zníženou emisivitou, resp. dvojdielnym oblekom so zníženou emisivitou. K úspešnému riešeniu úlohy sa podarilo dospieť len v prípade nahého manekýna. Zmeraných bolo 34 zón, ktoré logicky reprezentujú časti ľudského tela. Potvrdili sa teoretické predpoklady prenosu tepla z povrchu tepelného manekýna a výsledky práce boli porovnané s výsledkami obdobnej experimentálnej práce. Výstupy tejto práce umožňujú vytvorenie detailných počítačových modelov tepelného prostredia, ktoré vyžadujú anatomicky špecifické, separátne hodnoty súčiniteľov prestupu tepla radiáciou a konvekciou.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Súčinitele prestupu tepla radiáciou a konvekciou, Tepelný manekýn, Tepelný komfort, Experimentálna práca

ABSTRACT

This thesis deals with an experimental determination of heat transfer coefficients from the surface of the thermal manikin. The main focus of the work lies on separating radiative and convective heat fluxes from the surface of the thermal manikin. Both, nude and clothed, standing and seated postures were investigated respectively. The tests were conducted in a constant air temperature (cca 24°C) and a constant wind speed (cca 0,05 m.s⁻¹) environment. The major part of the radiative heat flux was eliminated by a low emissivity coating applied to the surface of the nude thermal manikin, and in the case of clothed manikin by a low emissivity two-piece dress. Favorable results were achieved only in the case of the nude manikin measurements. The measurements were performed across 34 zones that logically represent parts of a human body. Experimental work confirms theoretical expectations in the means of a heat transfer. In addition, the results of this work were compared to results of a similar experimental work. The outcomes of this thesis provide essential information in order to create detailed computational models of a thermal environment. Such models require anatomically specific, separate values of convective and radiative heat transfer coefficients.

KEY WORDS

Radiative and convective heat transfer coefficients, Thermal manikin, Thermal comfort, Experimental work

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

FOJTLÍN, M. Stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekcí z povrchu tepelného manekýna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému „*Stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekcí z povrchu tepelného manekýna*“ vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

V Brne, dňa 30. mája 2014

.....
Bc. Miloš Fojtlín

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som chcel v prvom rade poďakovať svojmu vedúcemu diplomovej práce, Ing. Janovi Fišerovi, Ph.D. Vďaka mu patrí za odborné vedenie teoretickej časti práce a pomoc pri riešení technických problémov, vzniknutých v prípravnej a experimentálnej fáze práce. Vďaka patrí i mojej rodine, ktorá ma podporovala počas štúdia.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	VYMEDZENIE CIEĽOV A LIMITY PRÁCE	12
3	NAVRHNUÝ POSTUP RIEŠENIA	13
4	METABOLIZMUS A FYZIOLOGIA ĽUDSKÉHO TELA	14
4.1	Metabolizmus človeka a tepelná pohoda	14
4.2	Fyziológia ľudského tela	15
5	TEPELNÁ INTERAKCIA ČLOVEKA S OKOLÍM	17
5.1	Pasívny systém - výmena tepla s okolím	17
5.1.1	<i>Prenos tepla kondukciou a tepelný odpor odevu</i>	17
5.1.2	<i>Prenos tepla konvekciou</i>	19
5.1.3	<i>Prenos tepla radiáciou</i>	19
5.1.4	<i>Prenos tepla vyparovaním (potením)</i>	22
5.1.5	<i>Prenos tepla dýchaním</i>	23
5.2	Pasívny systém - mechanizmy prenosu tepla medzi tkanivami človeka.....	23
5.3	Aktívny systém.....	24
6	PREHĽAD METÓD MERANIA SÚČINITEĽOV PRESTUPU TEPLA RADIÁCIOU A KONVEKCIOU	25
6.1	Snímač tepelného toku	25
6.2	Sublimácia naftalénu.....	27
6.3	Samostatné čidlo s integrovaným zahrievaním.....	27
6.3.1	<i>Plošné zahrievané čidlá</i>	29
6.3.2	<i>Guľovité a elipsoidné čidlá</i>	29
6.4	Tepelný manekýn.....	29
6.4.1	<i>História tepelných manekýnov</i>	30
6.4.2	<i>Využitie tepelného manekýna pre meranie súčiniteľov prestupu tepla</i>	32
6.5	Voľba experimentálnej metódy.....	33
7	POPIS RIEŠENIA PRÁCE	34
7.1	Metodika práce.....	34
7.1.1	<i>Postup experimentálneho riešenia</i>	34
7.1.2	<i>Výpočet súčiniteľov prestupu tepla z nameraných dát</i>	35
7.2	Popis experimentálneho vybavenia.....	36
7.2.1	<i>Klimatická komora</i>	36

7.2.2	<i>Kalibračný box</i>	37
7.2.3	<i>Tepelný manekýn Newton</i>	38
7.2.4	<i>Meranie teploty, rýchlosti a vlhkosti vzduchu</i>	43
8	SPRACOVANIE DÁT A VÝSLEDKY Z MERANÍ	45
8.1	Rozbor neistôt meraní.....	45
8.2	Manekýn bez odevu	47
8.2.1	<i>Súčinitele prestupu tepla konevkcioi, úplný prehľad jednotlivých zón</i>	49
8.2.2	<i>Súčinitele prestupu tepla konevkcioi, prehľad jednotlivých segmentov</i>	50
8.2.3	<i>Súčinitele prestupu radiáciou, úplný prehľad jednotlivých zón</i>	51
8.2.4	<i>Súčinitele prestupu tepla radiáciou, prehľad jednotlivých segmentov</i>	52
8.3	Manekýn s odevom	53
9	DISKUSIA	54
9.1	Súčinitele prestupu tepla konvekciou	54
9.2	Súčinitele prestupu tepla radiáciou	55
10	ZÁVER	57
11	LITERÁRNE ZDROJE	59
12	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	62

1 ÚVOD

So zvyšovaním životnej úrovne industriálnych krajín sa zároveň zvyšujú očakávania a nároky na všetky zložky komfortu budov a dopravných prostriedkov. Práve preto i záujem o dosiahnutie tepelného komfortu sa pri návrhu interiérov dostáva do popredia v projekčnej činnosti priestorov pre pobyt človeka. Tento fakt eskaluje skutočnosť, že priemerný Európan strávi 80 až 90% času z pracovného dňa v priestoroch budov alebo dopravných prostriedkov [1]. Nezávislé štúdie taktiež preukázali vplyvy tepelného prostredia na zdravie a únavu človeka, s ktorými sa často spájajú práve negatívne prejavy [2, 3, 11]. V odbornej literatúre sa pre negatívne prejavy vnútorného prostredia budov v dôsledku nedostatočného vetrania ustálil termín SBS (Sick Building Syndrome), s ktorým je zviazaný i tepelný komfort [3].

Platné normy a vyhlášky [4, 5] definujú prípustné parametre prostredia pre dané pobytové podmienky. Avšak tieto normatívy nepostihujú riešenia konkrétnych situácií pri špecifickom návrhu tepelného prostredia. Pred samotnou realizáciou diela je nutné vykonať výpočet dopadov riešení klimatizačných zariadení. Za týmto účelom je potreba kvantifikovať prenos tepla z človeka do okolitého prostredia a naopak. Dominantné faktory prenosu tepla z človeka do prostredia sú prenos tepla konvekciou (prúdením) a prenos tepla radiáciou (žiarením), v prípade suchých tepelných strát (bez uvažovania potenia). Úsilie o výpočet alebo experimentálne stanovenie týchto tepelných tokov (teda zároveň výpočtu príslušných súčiniteľov prenosu tepla) je venovaná pozornosť na viacerých svetových pracoviskách [4, 5, 6]. Motiváciou pre určenie čo najpresnejších súčiniteľov prenosu tepla je predikcia tepelného stavu v navrhovanom priestore za pomoci výpočtovej techniky, čím je možné dosiahnuť relatívne rýchlo a ekonomicky potrebných výsledkov, v porovnaní s experimentálnymi modelmi, či metódami. Aplikácia týchto poznatkov je obsiahnutá v metóde vypracovanej HO. Nilssonom [7], pre posudzovanie tepelného prostredia prostredníctvom určenia ekvivalentných teplôt jednotlivých častí tela a vyhodnotenia tepelného pocitu v diagrame komfortných zón.

K problematike určenia súčiniteľov prenosu tepla je možné pristupovať rôznymi metódami. Zaradenie človeka (dobrovoľníka) do experimentov sa dnes považuje z viacerých dôvodov za neefektívne, v mnohých prípadoch i za nehumánne. Avšak v určitých prípadoch je prítomnosť človeka pri validačných meraniach tepelného komfortu nevyhnutná. V súčasnosti je za najpresnejšiu metódu stanovenia súčiniteľov prenosu tepla považované použitie makety ľudského tela v merítke 1:1, teda tepelného manekýna, ktorý bude využitý i v tejto práci.

Tepelný manekýn simuluje tepelné správanie ľudského tela. Pre účely merania súčiniteľov prenosu tepla bude povrchová teplota tepelného manekýna udržiavaná na konštantnej hodnote 34°C. Teplo sa z povrchu manekýna prenáša do okolia kombinovane, radiáciou a konvekciou, v zanedbateľnej miere vedením (napr. v miestach dotyku manekýna s okolitými plochami). Pre potreby počítačového modelovania je potrebné jednotlivé zložky prenosu tepla oddeliť vhodnou metódou. V tejto práci sa bude radičná zložka tepelného toku z tepelného manekýna potláčať poťahom so zníženou emisivitou.

2 VYMEDZENIE CIEĽOV A LIMITY PRÁČE

Vymedzenie cieľov práce

- Stanovenie súčiniteľov prenosu tepla radiáciou a konvekciou z povrchu ľudského tela za pomoci tepelného manekýna Newton v kalibračnom boxe pri jednej (rovnakej) teplote vzduchu a okolia, a pri jednej rýchlosti prúdenia vzduchu.
- Meranie a stanovenie súčiniteľov prenosu tepla radiáciou a konvekciou pre sediaceho a stojaceho manekýna.
- Meranie a stanovenie súčiniteľov prenosu tepla radiáciou a konvekciou pre nahého a oblečeného manekýna (jeden typ zvoleného odevu).

Vymedzenie limitov práce

- Práca sa nezaobrá meraním súčiniteľov prenosu tepla radiáciou a konvekciou pri asymetrických okolitých podmienkach.
- Práca sa nezaobrá meraním súčiniteľov prenosu tepla radiáciou a konvekciou pri nestacionárnych podmienkach.
- Experimentálna práca je limitovaná obmedzeným počtom opakovaní meraní.

3 NAVRHNUTÝ POSTUP RIEŠENIA

1) Rešerš, prípravné práce

- Získanie dostupných informácií o produkcii tepelnej energie ľudského tela a prenose tepla z ľudského tela.
- Získanie dostupných informácií z oblasti experimentálneho stanovenia súčiniteľov prestupu tepla, najmä z povrchu tepelného manekýna.
- Zhodnotenie technických možností pracoviska OTTP FSI VUT Brno.
- Voľba realizovateľnej metódy merania súčiniteľov prestupu tepla.
- Konštrukcia kalibračného boxu.
- Vytvorenie potľahu a obleku tepelného manekýna, so zníženou emisivitou, v prípade merania s potlačenou radiáciou.

2) Meranie

- Ustavenie tepelného manekýna do kalibračného boxu, oživenie meracej techniky a záznamového softvéru.
- Premeranie jednotlivých prípadov, polôh tepelného manekýna.

3) Vyhodnotenie dát

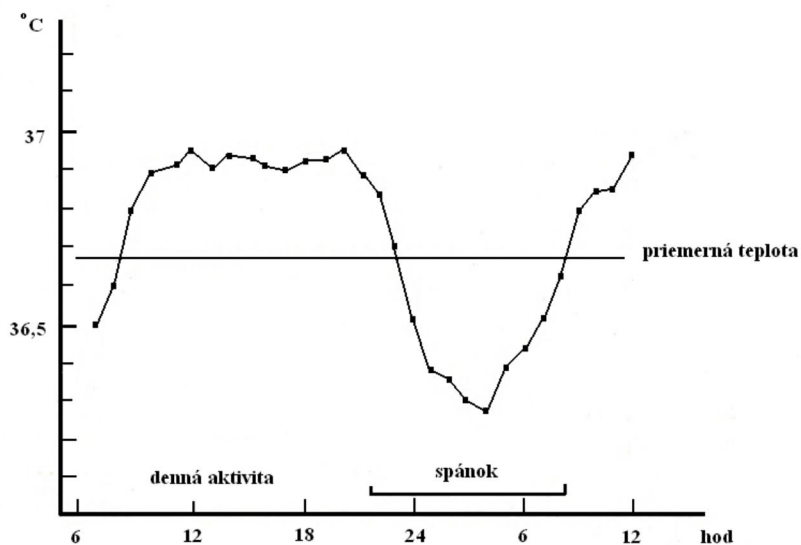
- Spracovanie nameraných dát v programe MS Excel, vytvorenie grafov a tabuliek.
- Spracovanie fotografickej dokumentácie z meraní.

4) Zhrnutie výsledkov a definovanie záveru

4 METABOLIZMUS A FYZIOLOGIA ĽUDSKÉHO TELA

4.1 Metabolizmus človeka a tepelná pohoda

Zdravé ľudské telo sa snaží udržiavať za všetkých podmienok stálu teplotu jadra na úrovni $36,5 \pm 0,5$ °C vnútornou termoreguláciou, vedome neovplyvniteľnou nervovou sústavou človeka. Táto teplota je esenciálna pre zachovanie správneho chodu biochemických procesov v ľudskom tele. K silnému narušeniu chodu týchto procesov dochádza už pri zmene teploty jadra o ± 1 °C, s možnosťou nezvratných poškodení organizmu [22]. Typický priebeh teplôt ľudského tela za periódu 24 hodín znázorňuje obr. 1.



Obr. 1 Typický priebeh teploty ľudského tela za 24 hodín [22]

Mierne kolísanie teploty okolo priemernej hodnoty teploty ľudského tela ovplyvňujú látkové premeny (biochemické a oxidačné procesy) prebiehajúce v ľudskom tele, uvoľňujúce energiu, ktorej veľkosť je predovšetkým závislá na intenzite fyzickej činnosti, hmotnosti človeka a mnohých ďalších faktoroch. Nárast teploty ľudského tela teda súvisí so zvýšenou fyzickou (príp. mentálnou) aktivitou počas aktívnej časti dňa. Naopak, počas spánku dosahuje teplota svojho minima, spomalením metabolických procesov.

Z pohľadu produkcie tepla rozlišujeme bazálne metabolické teplo, ktoré je generované vnútornými orgánmi, činnými bez ohľadu na aktivitu človeka, a teplo vznikajúce činnosťou svalov alebo zvýšenou aktivitou vnútorných orgánov. Väčšina energie (90 až 100%) sa transformuje na vnútorné teplo a zvyšok energie na mechanickú prácu svalov [9].

Za účelom stabilizácie teploty jadra ľudského tela na určitej hodnote, je potrebné dosiahnuť stavu tepelnej rovnováhy. Tepelná rovnováha človeka s okolím je daná podmienkou, aby teplo vyprodukované človekom za jednotku času \dot{Q} bolo rovné teplu odvedenému do okolia vedením \dot{Q}_{ved} , konvekciou \dot{Q}_k , radiáciou \dot{Q}_r , vyparovaním \dot{Q}_v a dýchaním \dot{Q}_d , za predpokladu, že nedochádza k akumulácii tepla v tkanivách (akumulácia tepla sa však obvykle považuje za patologickú). Tepelnú rovnováhu možno vyjadriť rovnicou (1) pomocou zmieňovaných tepelných tokov [13].

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{ved} + \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d [W] \quad (1)$$

V prípade, že nedochádza k majoritnému kontaktu subjektu s plochami s výrazne rozdielnymi teplotami, možno tepelný tok prenášaný vedením zanedbať. Vo väčšine praktických prípadov sa dá predpokladať, že všetko teplo je nutné odvádzať z tela konvekciou, radiáciou, vyparovaním a dýchaním [10]. Rovnica (1) sa potom redukuje na tvar

$$\dot{Q} = \dot{Q}_k + \dot{Q}_v + \dot{Q}_r + \dot{Q}_d [W] \quad (2)$$

Tepelná rovnováha predstavuje nevyhnutnosť z pohľadu stability metabolických procesov, ale je i prvou podmienkou pre dosiahnutie tepelnej pohody, teda stavu, ktorý subjektívne naplňuje pocit spokojnosti s tepelným prostredím [9]. Napriek jednoduchosti tejto podmienky je podstatné, akým spôsobom je tepelná rovnováha dosiahnutá. V prípade, že termoregulačné mechanizmy sú nútené zasahovať vo vysokej miere, napríklad vylučovaním veľkého množstva potu alebo znížením teploty pokožky končatín, nie je možné hovoriť o stavoch blízkyh k tepelnej pohode. Dá sa tak usudzovať, že stav tepelnej rovnováhy musí byť dosiahnuteľný pri minimálnych zásahoch telesnej regulácie teploty [10].

Rovnica tepelnej rovnováhy je vyjadrená funkčnou závislosťou

$$\dot{Q} = f(R_{cl}, f_{cl}, w, t_a, t_r, \varphi) \quad (3)$$

Kde:

\dot{Q}	tepelný tok vyprodukovaný človekom	[W]
R_{cl}	tepelný odpor odevu	[m ² .K.W ⁻¹]
f_{cl}	stupeň pokrytia tela odevom (plochy oblečený/nahý)	[-]
w	rýchlosť prúdenia vzduchu	[m.s ⁻¹]
t_a	teplota okolitého vzduchu	[°C]
t_r	stredná radiačná teplota	[°C]
φ	relatívna vlhkosť	[-]

Funkčná závislosť (3) je zároveň označovaná ako rovnica tepelnej pohody, v ktorej sú zahrnuté jednotlivé činitele charakterizujúce nasledovné veličiny:

- činnosť človeka, vyjadrená prostredníctvom tepelnej produkcie človeka \dot{Q} ,
- vlastnosti odevu, definované tepelným odporom odevu R_{cl} a stupňom pokrytia tela odevom f_{cl} ,
- tepelný stav mikroklímy je daný teplotou vzduchu t_a , strednou radiačnou teplotou t_r , rýchlosťou prúdenia vzduchu w a relatívnou vlhkosťou vzduchu φ [13].

4.2 Fyziológia ľudského tela

Fyziológia je vedný obor, ktorý sa zaoberá funkciou živých organizmov, ich častí a systémov. Z pohľadu výskumu tepelného komfortu je podstatný popis vzniku a distribúcie tepla v rámci ľudského organizmu. Rovnako je esenciálne pochopenie riadiacich systémov, teda systémov termoregulácie, ktoré zabezpečujú optimálnu teplotu jadra tela.

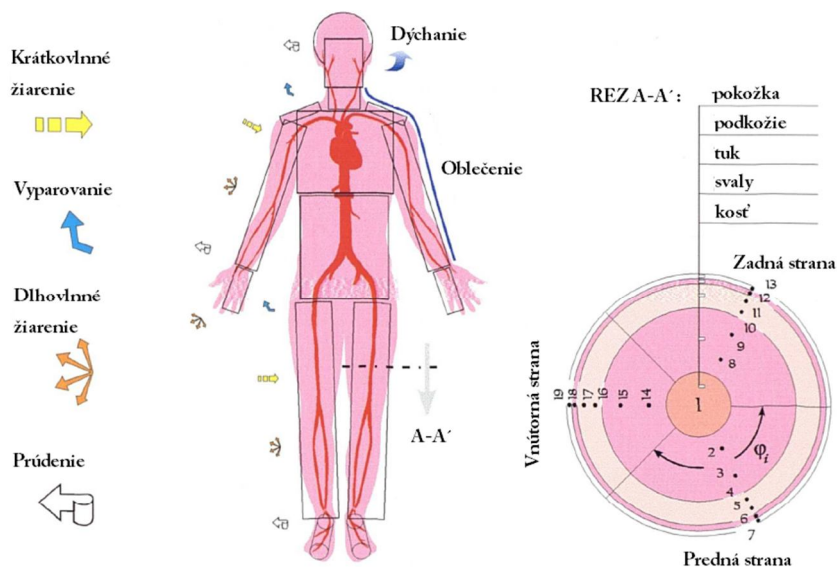
Fyziológia ľudského tela je čiastočne závislá na veku, pohlaví, rasovej príslušnosti, ale i na mnohých ďalších faktoroch a mení sa v priebehu života človeka. Napriek tomu sú črty človeka natoľko charakteristické, že pre zachytenie podstaty jednotlivých procesov sú do určitej miery dostatočné zjednodušujúce modely. Motiváciou pre vytvorenie fyziologických modelov je predikcia tepelného stavu človeka, teda jeho reakcií na okolité prostredie.

Prvý analytický model prenosu tepla v tkanive človeka vytvoril Pennes [30] už v roku 1948. Jedná sa o parciálnu diferenciálnu rovnicu známu ako „Bioheat equation“, ktorá sa v rôznych obmenách používa i v súčasnosti [12]. Neskôr, v roku 1966, vytvoril Stolwijk a Hardy [31] prvý model termoregulačného systému. S rozvojom výpočtovej techniky bolo možné vytvárať komplikovanejšie modely s viacerými segmentmi, ktorým sa venuje viacero autorov. Viac informácií k tejto problematike je možné nájsť v práci napr. Pokorného [12].

Pre ilustráciu súčasného stavu popisu fyziológie človeka bude predstavený jeden z posledných zverejnených modelov, Fialov model [14]. Fiala vo svojej práci popisuje stavbu ľudského tela pomocou pätnástich cylindrických alebo guľových objektov, ktoré reprezentujú hlavné časti tela (hlava, krk, končatiny, trup atď.). Na základe týchto zjednodušení vytvoril Fiala humanoida, priemerného muža, ktorý váži 73,5 kg, má 14 hm-% tuku, plochu tela 1,9 m², bazálny metabolizmus produkuje 87 W tepla, suchým potením sa prenesie 18 W tepla do okolitého prostredia a bazálny prietok krvi zo srdca činí 4,9 l.min⁻¹ [14]. Obr. 2 vykresľuje popisované zjednodušenia a schematicky znázorňuje spôsoby prenosu tepla do okolitého prostredia, ktoré budú detailne popísané v ďalšej kapitole.

Problémom v presnosti každého fyziologického modelu je popis tzv. „priemerného humanoida“, ktorý nezohľadňuje individuálne atribúty človeka. Tento nedostatok odstránil Fiala publikáciou z roku 2012, tzv. UTCI-Fiala modelom [32]. UTCI-Fiala model je rozšírením pôvodného Fialovho modelu [14], ktorý je doplnený o možnosť nastavenia individuálnych proporcií postavy, intenzity dýchania, stupňa aklimatizácie atď.

Využitie fyziologických modelov nie je obmedzené len na výskum tepelného komfortu. Uplatnenie nachádza hlavne v zdravotníctve, vo vojenskom sektore, kozmonautike vývoji odevov apod.



Obr. 2 Znáznornenie zjednodušení stavby ľudského tela podľa Fialu [14]

5 TEPELNÁ INTERAKCIA ČLOVEKA S OKOLÍM

Ľudské telo je schopné reagovať na okolité tepelné podmienky zmenou miery tepelnej výmeny s prostredím. Obvykle sa rozlišujú dve „vrstvy“ riadiace tieto procesy, jedná sa o pasívny a aktívny systém termoregulácie.

Pasívny systém reprezentujú fyzikálne vlastnosti ľudského tela a popisuje produkciu a prenos tepla vo vnútri ľudského tela, ktorý priamo nadväzuje na tepelnú výmenu človeka s okolím. Naopak aktívny systém predstavuje nervový systém človeka, ktorý na základe podnetov z termoreceptorov, nervových zakončení citlivých na zmenu teploty, riadi termoregulačné odozvy. Pasívny systém tak reprezentuje ľudské telo ako také a aktívny systém jeho termoregulačné mechanizmy, oba systémy sú vzájomne prepojené [12].

Napriek snahe organizmu stabilizovať teplotu prostredníctvom uvedených systémov na úrovni cca 36,5°C, môžu nastať prípady, kedy telo nie je schopné teplotu úspešne regulovať:

- prehriate organizmu (hypertermia) - typicky nastáva pri vysokej fyzickej záťažii alebo pri veľmi vysokej teplote okolia,
- horúčka - reakcia organizmu na zmenené nastavenie centra pre reguláciu teploty v hypotalame. Možné dôvody: poškodenie mozgu, cudzorodé baktérie a vírusy,
- podchladenie organizmu (hypotermia) - pokles teploty jadra pod 35°C [16].

5.1 Pasívny systém - výmena tepla s okolím

5.1.1 Prenos tepla kondukciou a tepelný odpor odevu

Kondukcia (vedenie) reprezentuje prenos tepla v prostredí, ktorého častice sa v smere tepelného toku nepohybujú. Popísané pravidlo najlepšie vystihujú látky tuhého skupenstva. Daný jav však nastáva i pri laminárnom prúdení tekutín, kde je vektor tepelného toku kolmý na vektor rýchlosti.

Z pohľadu kinetickej teórie látok ide o pohyb a nárazy molekúl, pri ktorých sa energia odovzdáva z miesta vyššej hladiny energie (teda teploty) na miesto nižšej hladiny energie. V kovoch (ktoré sú zároveň vodiče elektrického prúdu) sa uplatňuje pohyb voľných elektrónov, teda principiálne mechanizmus vedenia elektrického prúdu.

Prenos tepla vedením je podmienený existenciou materiálneho prostredia a prítomnosťou teplotného spádu. Jav vedenia tepla popisuje Fourierov zákon. Tento vzťah nebol teoreticky odvodený, jedná sa o empirický zákon, v jednorozmernom prípade je popísaný nasledovne

$$\dot{Q}_{ved} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Kde:

λ	súčiniteľ tepelnej vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
S	plocha prenosu tepla	[m ²]
$\frac{dT}{dx}$	teplotný gradient, os x značí smer šírenia tepla	[K. m ⁻¹]

Vedením je odvádzaná minoritná zložka tepla z človeka do okolitého prostredia. Dochádza k nej len v prípade bezprostredného kontaktu pokožky či odevu s povrchom iného telesa. Vo väčšine praktických prípadov je tento tok zanedbateľný. Výnimky tvoria prípady, kedy majú dotýkajúce sa telesá relatívne vysokú alebo nízku povrchovú teplotu. V tomto prípade vhodný odev alebo poťah (tapaciovanie) zabezpečí dosiahnutie zníženia tepelnej vodivosti (zároveň i tepelného toku) na minimum. Naopak, v určitých prípadoch je tento stav žiaduci pre dosiahnutie tepelného komfortu, napríklad pri použití vyhrievaných alebo chladených sedadiel v automobiloch atd. [12].

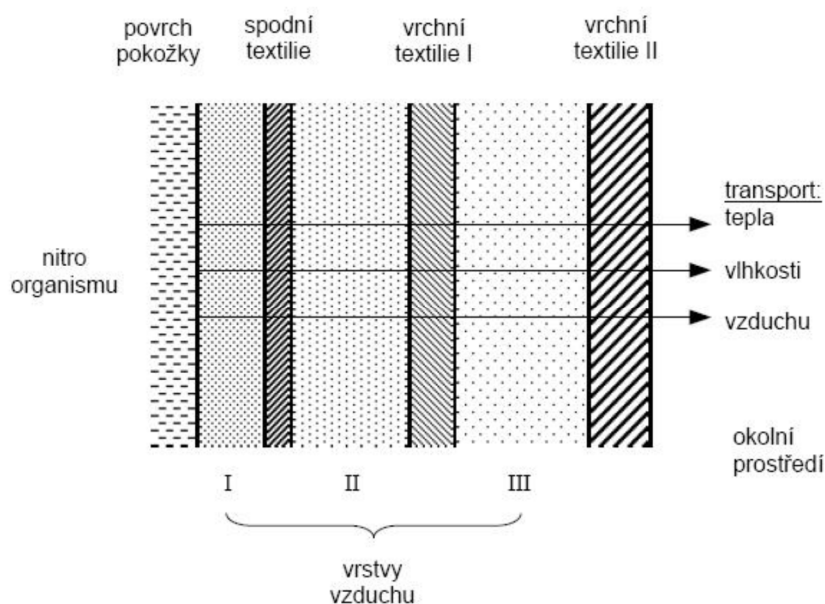
Pre odvod tepelného toku z povrchu tela musí tepelný tok prekonať tepelný odpor odevu a vrstiev vzduchu. Odpor je závislý na počte oblečených vrstiev, ich tepelnej vodivosti atd. Vzťah pre výpočet tepelného odporu popisuje rovnica (5) [17].

$$R = \sum \left(\frac{T}{\lambda} \right)_{tk} + \sum \left(\frac{V}{\lambda} \right)_{vzd} \quad (5)$$

Kde:

R	tepelný odpor odevu	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
T, V	hrúbka vrstvy: T - textília, V - vzduch	$[m]$
λ	tepelná vodivosť odevu - tk, vzduchu - vzd	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

Odvodenie rovnice (5) je dané predpokladom, že medzi pokožkou a jednotlivými vrstvami odevu vzniká vzduchová medzera. Tento predpoklad ilustruje obr. 3.



Obr. 3 Ilustrácia vrstiev vytvárajúcich tepelný odpor medzi pokožkou a okolitým prostredím [17]

V technike prostredia sa pre tepelný odpor R obvykle používa jednotka clo, ktorá závisí na druhu a skladbe odevu a je definovaná nasledovne [17]

$$1 \text{ clo} = \frac{R}{0,155} \quad (6)$$

V literatúre sú bežne dostupné hodnoty tepelného odporu pre jednotlivé typy oblečenia. Z praktického hľadiska sa hodnoty clo pohybujú v otvorenom intervale: 0 (bez oblečenia, nahý) až 4 (polárny odev).

5.1.2 Prenos tepla konvekciou

Konvekcia (prúdenie) predstavuje prenos tepla z povrchu telesa tuhého skupenstva do okolitého média, ktoré obklopuje povrch daného telesa. Prenos je sprostredkovaný makroskopickými časticami tekutiny, ktoré pri styku s telesom menia teplotu a následne vytvárajú prúdenie, miešajú sa s ostatnými vrstvami média a tak ďalej prenášajú teplo. Nevyhnutnosťou pre prenos tepla prúdením je existencia materiálneho prostredia a tepelného spádu medzi tuhým telesom a prostredím. Tento jav je popísaný Newtonovým ochladzovacím zákonom, ktorý je uvedený nasledovne [13]

$$\dot{Q}_k = \alpha \cdot S \cdot (t_{st} - t_t) \quad (7)$$

Kde:

\dot{Q}_k	tepelný tok prenesený konvekciou	[W]
α	súčiniteľ prestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
S	plocha obtekaného povrchu	[m ²]
t_{st}	teplota povrchu steny daného telesa	[K]
t_t	teplota tekutiny v dostatočnej vzdialenosti od telesa	[K]

Konvektívny prenos tepla sa môže odohrávať v dvoch základných režimoch. Hovoríme o prirodzenej a nútenej konvekcií.

Vznik prirodzenej konvekcie je daný rozdielom hustôt v tekutine. Rozdiel hustôt je vyvolaný nerovnomerným rozložením teplotných polí v priestore, vzniknutá Archimedova vztlaková sila tak pôsobí proti vektoru tiažového zrýchlenia. Prirodzená konvekcia sa môže vyskytovať so zmenou alebo bez zmeny skupenstva (kondenzácia, var a pod.) [13].

Nútená konvekcia vzniká pôsobením vonkajších síl na tekutinu. Rovnako ako v prípade prirodzenej konvekcie je možné rozlišovať stavy so zmenou a bez zmeny skupenstva.

Ako je známe z mechaniky tekutín, pri pohybe tekutiny pozdĺž povrchu telesa existuje vždy laminárna oblasť medznej vrstvy. Tepelný tok z povrchu telesa je na ňu kolmý a teplo sa šíri vedením. Je teda zrejme, že súčasťou prenosu tepla prúdením je i prenos tepla vedením, ktorý je menej intenzívny. Laminárna vrstva preto predstavuje určitú tepelne izolačnú vrstvu.

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou α sa stanoví meraním, vhodnou kriteriálnou rovnicou alebo pomocou CFD simulácie [12]. Tento súčiniteľ v sebe vo výsledku spája viaceré atribúty prúdenia a vlastnosti prúdiacej tekutiny. Je závislý na charaktere prúdenia (laminárny/turbulentný profil), viskozite a zmáčavosti tekutiny, geometrii obtekaného telesa atď. [13].

5.1.3 Prenos tepla radiáciou

Radiácia (žiarenie) predstavuje prenos tepla medzi telesami prostredníctvom elektromagnetických vln. Každé teleso s teplotou vyššou než 0 K vyžaruje časť svojej energie

v podobe elektromagnetických vln. Dopadom týchto vln na teleso sa časť vyžiarenej energie pohltí a premení na vnútornú energiu, ktorej vonkajším prejavom je teplota. Proces vyžarovania a pohlcovania energie prebieha neustále, i za predpokladu, že navzájom pôsobiace telesá majú rovnakú teplotu. Teoretické základy prenosu tepla žiarením boli položené Jamesom C. Maxwellom. Vzhľadom na fyzikálnu podstatu žiarenia platia rovnaké zákonitosti ako napríklad pre viditeľné svetlo, rozdielom je iba ich vlnová dĺžka. Maximum preneseného tepla je možné dosiahnuť vo vákuu. Vo vzduchu je časť žiarenia pohltená trojatómovými zložkami atmosféry (napr. ozón, vodná para). Dvoatómové molekuly obsiahnuté vo vzduchu tepelné žiarenie nepohlcujú [13].

Z pohľadu prenosu tepla žiarením rozlišujeme nasledovné vlastnosti látok:

- Schopnosť prepúšťať žiarenie, transmisivita t
- Schopnosť absorbovať žiarenie, absorptivita a
- Schopnosť odrážať žiarenie, reflexivita r
- Schopnosť vyžarovať žiarenie, emisivita ε

Podľa 1. Kirchhoffova zákona optiky platí, že súčet transmisivity, absorptivity a reflexivity sa rovná jednej. Podľa 2. Kirchhoffova zákona pre dlhovlnné žiarenie platí, že v stave tepelnej rovnováhy platí rovnosť absorptivity a emisivity.

Aplikácia Kirchhoffových zákonov pre potreby tejto práce spočíva v tom, že pre tuhé netransparentné látky je transmisivita rovná nule. Z toho plynie, že takéto látky žiarenie iba pohlcujú, odrážajú a samé vyžarujú žiarenie úmerné ich absorptivite, resp. emisivite. Rozsah teplôt ľudského tela zodpovedá dlhovlnnému žiareniu [13].

Celkové množstvo vyžiareného tepla radiáciou telesa (1) do priestoru (2) $\dot{Q}_{r\ 1-2}$ [W], za jednotku času vyjadruje Stefan-Bolzmannov zákon

$$\dot{Q}_{r\ 1-2} = F_{1 \rightarrow 2} \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot S_1 \cdot (T_1 + 273,15)^4 \quad (8)$$

Kde:

$F_{1 \rightarrow 2}$	uhlový faktor medzi telesom (1) a (2)	[-]
ε_1	emisivita telesa (1)	[-]
σ	Stefan-Bolzmanna konštanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
S_1	plocha telesa (1)	[m ²]
T_1	teplota povrchu telesa (1)	[°C]

Uhlový faktor vyjadruje podiel radiačnej energie opúšťajúcej povrch telesa (1), ktorá je zachytená povrchom telesa (2). Vyjadruje teda vzájomné geometrické usporiadanie dvoch povrchov v priestore.

Teleso s nenulovou termodynamickou teplotou vyžaruje elektromagnetické vlny v prevažne celom rozsahu vlnových dĺžok, podstatná časť je však sústredená do úzkeho intervalu. Má teda spojité spektrum žiarenia. Naopak, niektoré látky vyžarujú len určité vlnové dĺžky, majú nespojité spektrum a hovoríme o selektívnom žiarení. Planck sa zaoberal spojitým spektrom žeravých látok, zistil, že telesá nevyžarujú spojite, ale v určitých dávkach, kvantách. Množstvo energie kvanta je priamoúmerné frekvencii (kmitočtu) f a tak sa

zavádzajú spektrálne veličiny: emisivita, transmisivita a absorptivita, ktoré popisujú chovanie materiálu voči rôznym spektrám žiarení. Poloha maxima závislosti intenzity žiarenia, ktorú popisuje Planckov zákon, je daná Wienovým posunovacím zákonom

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} \quad (9)$$

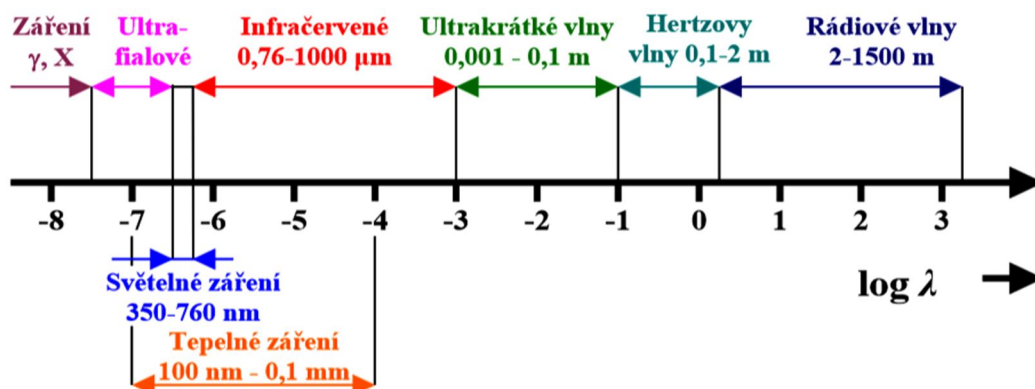
Kde:

λ_{max}	vlnová dĺžka žiarenia s najvyššou intenzitou	[m]
T	termodynamická teplota čierneho telesa	[K]

Wienov posunovací zákon teda hovorí, že vlnová dĺžka žiarenia s najvyššou intenzitou je nepriamoúmerná termodynamickej teplote čierneho telesa.

Prehľad rozdelenia spektra podľa vlnových dĺžok ilustruje obr. 4. Pre účely tejto práce nie je podstatné presné rozloženie spektra. Z hľadiska tepelného vnímania človeka je podstatné rozlíšenie krátkovlnného žiarenia a žiarenia dlhovlnného. Dlhovlnné žiarenie je žiarenie s vlnovou dĺžkou väčšou než 4 μm . Je často označované ako infračervené (IR - Infrared) žiarenie. Toto žiarenie je typicky vyžarované telesami do teploty cca 725°C. Krátkovlnné žiarenie, s vlnovou dĺžkou menšou než 4 μm , je zastúpené typicky v slnečnom žiarení a tvorí jeho podstatnú energetickú zložku.

Povrch ľudského tela, pokožka, je typická svojou vysokou krátkovlnnou absorptivitou a dlhovlnnou emisivitou. Tieto hodnoty sa pohybujú na úrovni približne 0,97 až 1. So znižujúcou sa vlnovou dĺžkou žiarenia dochádza pri rovnakej dávke ožiarenia k závažnejším poškodeniam tkanív. Žiarenie UV-A (vlnová dĺžka 400 – 315 nm) je považované za neškodné a nie je pohlcované ozónovou vrstvou. Naopak žiarenie UV-B (vlnová dĺžka 315 – 280 nm) má z dlhodobého hľadiska patologický vplyv na tkanivá a je čiastočne pohlcované ozónovou vrstvou. Spôsobuje napríklad spálenie pokožky a podporuje vznik rakoviny kože. Najzhubnejším žiarením je UV-C (vlnová dĺžka 280 – 100 nm), prenikajúce hlboko do tkanív človeka. V nekontrolovaných dávkach môžu spôsobiť smrť. Atmosféra zeme majoritný podiel tohto žiarenia zachytáva v ozónovej vrstve [12].



Obr. 4 Rozdelenie spektra podľa vlnových dĺžok [13]

5.1.4 Prenos tepla vyparovaním (potením)

Vyparovanie (evaporácia) je zvláštnym prípadom konvekcie, ktoré využíva fázovej premeny, z kvapalnej na plynnú fázu. Pre vyparenie určitého množstva tekutiny je nutné sústave dodať latentné teplo výparné. Teplo potrebné pre odparovanie sa privádza z povrchu, na ktorom dochádza k vyparovaniu, čím je zároveň povrch ochladzovaný. V prípade človeka sa jedná o mechanizmus, kedy sa na povrchu kože v rôznej miere vylučuje pot (voda s obsahom iónov sodíka, draslíka a iných minerálov, či organických zlúčenín). Princíp vyparovania je možné definovať princípom difúzie, pomocou 1. Fickova zákona. Pre prípad jednorozmernej sústavy je definovaný nasledovne [12]

$$\frac{dm}{dt} = - \frac{(p_a - p_a'') \cdot dT}{\lambda_{H_2O} \cdot R_e \cdot dx} \quad (10)$$

Kde:

p_a	parciálny tlak vodných pár vo vzduchu	[Pa]
p_a''	parciálny tlak nasýtených vodných pár vo vzduchu	[Pa]
λ_{H_2O}	merné skupenské výparné teplo vody	[J.kg ⁻¹]
m	hmotnosť vody na povrchu telesa	[kg]
R_e	súčiniteľ tepelného odporu vyparovaním	[m ² .Pa.W ⁻¹]
t	čas	[s]

Množstvo preneseného tepla vyparovaním na jednotku plochy a času je potom dané nasledovnou rovnicou

$$\dot{q}_{w1} = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (256 \cdot \bar{t}_s - 3360 - p_a) \quad (11)$$

Kde:

\dot{q}_{w1}	merný tepelný tok suchým vyparovaním	[W.m ⁻²]
p_a	parciálny tlak vodných pár v okolitom vzduchu	[Pa]
\bar{t}_s	stredná teplota pokožky	[°C]

V reálnych podmienkach nie je možné dosiahnuť uniformnej teploty povrchu pokožky. Stredná teplota pokožky závisí na viacerých faktoroch, najmä na intenzite prekrvenia príslušnej časti tela, hrúbke podkožného tuku a okolitých podmienkach. Obecne možno tvrdiť, že stredná teplota pokožky má nižšiu teplotu ako teplota jadra a pre výpočty sa obvykle používa hodnota $\bar{t}_s = 34^\circ\text{C}$ [12].

Pre človeka je prenos tepla vyparovaním významný. V neutrálnom prostredí človek suchým potením (množstvo vylúčeného potu na pokožku je minimálne, nepozorovateľné) odvádza do prostredia približne štvrtinu svojho metabolického tepla. V horúcich prostrediach a pri vysokej telesnej alebo psychickej záťaži ľudské telo reguluje svoju teplotu aktívne, mokrým potením (na povrchu kože sa vytvára film potu). Mokré potenie sa zaraďuje medzi takzvané aktívne systémy regulácie telesnej podoby, popísané v kapitole 5.3. Potenciál prenosu tepla vyparovaním prevyšuje všetky doteraz zmienené spôsoby prenosu tepla [12].

Obmedzenie prenosu tepla vyparovaním nastáva v prípade, kedy sa parciálny tlak vodných pár vo vzduchu blíži alebo je rovný tlaku nasýtených vodných pár vo vzduchu,

v tomto prípade nedochádza k ďalšiemu odparovaniu potu. To je jeden z dôvodov, prečo je potrebné regulovať i relatívnu vlhkosť vzduchu v miestach pre pobyt človeka.

5.1.5 Prenos tepla dýchaním

Dýchanie (respirácia) je špecifické kombináciou dvoch spôsobov prenosu tepla. Pri nádychu (výdychu) dochádza k nútenej konvekčii vstupom (výstupom) vzduchu do dýchacieho traktu, kde sa môže teplo privádzať alebo odvádzať. Súčasným dejom je i vyparovanie prebiehajúce na slizniciach dýchacích ciest a pľúc. Táto vlhkosť je viazaná na vydychovaný vzduch. Pre kvantifikáciu tepelných strát dýchaním sú dostupné iba empirické vzťahy. Veľký vplyv na tepelnú výmenu má intenzita dýchania, tá sa obvykle spája s určitým druhom vykonávanej aktivity a rastie s fyzickou záťažou [12].

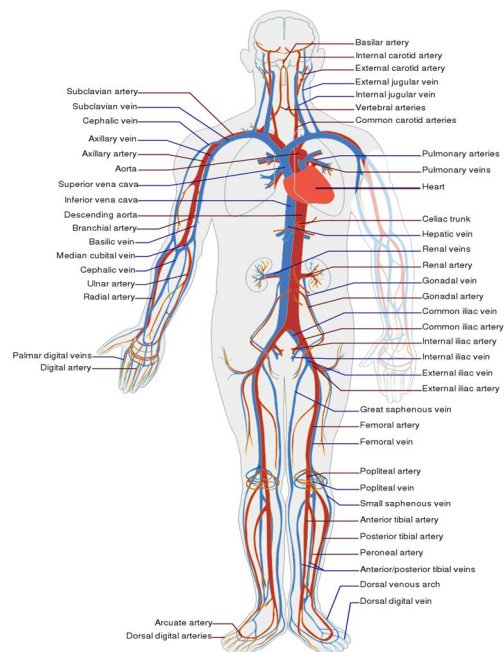
5.2 Pasívny systém - mechanizmy prenosu tepla medzi tkanivami človeka

Metabolické teplo človeka vzniká ako vedľajší produkt pri metabolických premenách a svalovou činnosťou. Je teda zrejme, že orgány s najvyššou biochemickou aktivitou sú zároveň i najväčšími producentmi tepla, menovite pečeň, srdce, mozog, obličky. Distribúcia vyprodukovaného tepla vo vnútri človeka musí zabezpečiť rovnomerný odvod tepla na povrch, pokožku, aby bola zabezpečená správna funkcia vnútorných orgánov.

Z pasívnych systémov prenosu tepla sa uplatňujú princípy prenosu tepla vedením a prúdením medzi jednotlivými tkanivami. V podkoží prevláda tuková vrstva, ktorá vytvára tepelne izolačný obal človeka a podieľa sa na výraznej redukcii tepelných strát ľudského tela. Intenzívny prenos tepla z povrchu orgánov je realizovaný prúdením krvi, veľkými cievami, ktoré sa ďalej rozvetvujú na menšie vlásoknice, kapiláry a na venózne plexy, umožňujúc tak prekrvenie tkanív v blízkosti povrchu tela, kože. Z povrchu kože je ďalej teplo odvádzané do okolitého prostredia.

Na zber odkysličenej, zároveň i ochladenej krvi, slúži systém žíl, ktorý vstupuje koronárnym splavom do srdca. Žily vytvárajú na končatinách dva systémy: povrchový systém (viditeľný cez pokožku) a hlboký systém, ktorý je umiestnený pozdĺž dráh tepien medzi svalmi. Relatívne chladnejšia krv v žilách prúdiaca z končatin sa, ohrieva krvou z tepien. Principiálne toto usporiadanie predstavuje protiprúdy výmenník tepla [12].

Pri zvýšenej záťaži ľudského tela sa zvyšuje vyprodukované metabolické teplo, zároveň sa zvyšuje i dopyt po kyslíku dodávanom jednotlivým tkanivám. Srdce zvýši svoju tepovú frekvenciu, zároveň i prietok krvi cievami, ktorý zabezpečí vyšší prenos kyslíka, ale i tepla medzi žilami a cievami. Obr. 5 ilustruje uloženie hlavných tepien (červené dráhy) a žíl (modré dráhy) v ľudskom tele.



Obr. 5 Uloženie hlavných tepien a žíl v ľudskom tele [15]

5.3 Aktívny systém

Človek je bežne vystavený širokému rozsahu klimatických podmienok, v ktorých môžu byť pre udržanie tepelnej rovnováhy pasívne systémy málo účinné. K najúčinnejším spôsobom zabráneniu tepelných strát alebo ziskov je termoregulačné chovanie človeka. Medzi typické prejavy patrí: schúlne sa, úkryt v tieni alebo v závetrí, zmena odevu atd. V ostatných prípadoch, ak sú tieto metódy neúčinné alebo nepoužiteľné, hypotalamus (podmozgová žľaza, hypofýza) aktivuje termoregulačné systémy pre zvýšenie alebo zníženie telesnej teploty [12].

Systemy pre zníženie telesnej teploty

- Vasodilatácia ciev - rozšírenie prierezu ciev, zabezpečenie väčšieho prietoku krvi do periférnych oblastí za účelom zvýšenia prenosu tepla. Sprievodným javom je prekrvenie pokožky (je možné pozorovať sčervenanie kože) a zvýšenie povrchovej teploty kože. Teplo sa do prostredia ďalej odvádza pasívne. Ak je teplota prostredia rovnaká alebo vyššia než teplota povrchu tela, táto metóda sa stáva neúčinnou.
- Potenie - pot sa vylučuje na povrch pokožky potnými žľazami. Teplo sa pri vyparovaní potu odoberá z povrchu kože, čím dochádza k výraznému ochladzovaniu. Človek však stráca veľké množstvo tekutín a minerálov, čo môže v krajnom prípade viesť k strate až 1000 ml potu za hodinu [16]. Miera ochladzovacieho efektu je závislá na relatívnej vlhkosti okolitého vzduchu.

Systemy pre zvýšenie telesnej teploty

- Vasokonstrikcia ciev - zníženie prietokového prierezu ciev a žíl, čím sa redukuje množstvo prúdiacej krvi do periférnych oblastí tela (hlavne končatín). Prekrvenie najdôležitejších orgánov má vyššiu prioritu na úkor okrajových častí.
- Svalový tras - je odpoveďou na chlad, ten vyvoláva zvýšený svalový tonus, ktorý môže prejsť do periodicky sa opakujúcich svalových kontrakcií. Svalová aktivita tak vytvára teplo a pozitívne pôsobí na zvýšenie telesnej teploty.
- Chemická termogenézia - zvýšenie rýchlosti metabolických premien (tzv. Q10 efekt), aktivuje sa až pri dlhodobom (niekoľko týždennom) pôsobení chladu na organizmus [16].

6 PREHLAD METÓD MERANIA SÚČINITEĽOV PRESTUPU TEPLA RADIÁCIOU A KONVEKCIOU

Cieľom výskumu tepelnej pohody a únavy vyvolanej tepelným prostredím je vytvorenie komplexného modelu ľudskej termoregulácie a predikcie tepelného komfortu numerickými algoritmi. Takýto model musí byť anatomicky podrobný a schopný rozlíšiť priestorové a časové zmeny podmienok okolitého prostredia. Kompletizácia takéhoto modelu čiastočne závisí na stanovení empiricky overených súčiniteľov prenosu tepla a to na úrovni jednotlivých častí tela, ako sú horné a dolné končatiny, hlava, trup atd.

Cieľom tejto práce je experimentálne stanovenie súčiniteľov prenosu tepla z povrchu tepelného manekýna do okolitého prostredia. V tejto kapitole je spracovaný prehľad metód, ktoré boli využité na iných pracoviskách za účelom stanovenia súčiniteľov prenosu tepla z povrchu ľudského tela alebo tepelného manekýna radiáciou a konvekciou.

Pred porovnávaním výsledkov z jednotlivých experimentálnych prác, je nutné uviesť si, že hodnoty získané zásadne odlišnými metódami nie sú medzi sebou porovnateľné z nasledujúcich objektívnych hľadísk

- reliability (spoľahlivosti),
- významnosti,
- opakovateľnosti,
- presnosti,
- zložitou,
- nákladov,
- dostupnosti [4].

6.1 Snímač tepelného toku

Snímač tepelného toku (Alfamer, Heat flux meter) je zariadenie, ktoré sa umiestňuje na skúmanom povrchu, napríklad nalepením. Alfamer vytvára známy tepelný odpor medzi skúmaným povrchom a okolitým prostredím. Z rozdielu teplôt na protiľahlých plochách snímača je možné pomocou rovníc (10), (11) a (12) stanoviť lokálny súčiniteľ prestupu tepla α v mieste alfameru. Meranie rozdielu teplôt na jednotlivých povrchoch je realizované plochými termočlánkovými spojkami. Znárodnenie alfameru od firmy OMEGA, model HFS-4, ilustruje obr. 6 a schematické znázornenie merania súčiniteľa prestupu tepla ilustruje obr. 7.

Z fyzikálneho hľadiska termočlánok v usporiadaní podľa obr. 6 a 7, kvantifikuje rozdiel teplôt medzi skúmaným povrchom a odvrátenou stranou alfameru. Alfamer je priamo zdrojom termoelektrického napätia U_1 úmerného tepelnému toku \dot{Q} na strane pevnej fázy podľa vzťahu (12). Toto napätie je možné priamo merať mikrovoltmetrom [28].

$$U_1 = k_1 \cdot \dot{Q} \tag{12}$$

Kde:

U_1	termoelektrické napätie 1 (vid' obr. 7)	[V]
k_1	konštanta 1	[-]
\dot{Q}	tepelný tok na strane tuhej fázy	[W]

Termoelektrické napätie U_2 je úmerné rozdielu teploty povrchu t_w a teploty okolitého prostredia t_∞ , vid' rovnica (13) a obr. 7. Konštanty k_1 a k_2 sa určia ciachovaním [28].

$$U_2 = k_2 \cdot S \cdot (t_w - t_\infty) \quad (13)$$

Kde:

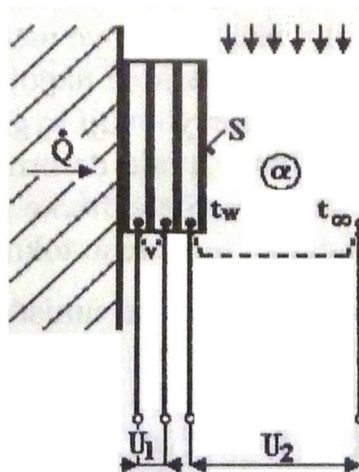
U_2	termoelektrické napätie 2 (vid' obr. 7)	[V]
k_2	konštanta 2	[-]
S	teplozmenná plocha alfametru	[m ²]
t_w	teplota povrchu	[°C]
t_∞	teplota okolitého prostredia	[°C]

Vzt'ah pre výsledný lokálny súčiniteľ prestupu tepla α [W.m⁻².K⁻¹] je daný nasledovne

$$\alpha = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{k_2}{k_1} \quad (14)$$



Obr. 6 Alfameter OMEGA HFS-4 [21]



Obr. 7 Schematické znázornenie merania súčiniteľa prestupu tepla alfametrom [28]

Výhoda použitia alfametrov spočíva v možnosti upevnenia snímača na ľubovoľnom mieste sledovaného objektu. Navyše, svojimi malými rozmermi umožňujú alfametre merania v „pohybe“, teda pri určitej činnosti. Tak je možné dosiahnuť veľmi realistických režimov prúdenia okolo ľudského tela.

Danielsson [18] uvádza za hlavnú nevýhodu použitia alfametrov, pre účely merania súčiniteľov prestupu tepla, že samotný snímač zasahuje do prirodzeného prúdenia okolo skúmaného povrchu a zároveň ovplyvňuje jeho povrchovú teplotu. Navyše, alfametre zaznamenávajú iba lokálne hodnoty súčiniteľov prestupu tepla. Stredné hodnoty súčiniteľov prestupu tepla, na celom povrchu obtekaného telesa, možno stanoviť z viacerých nameraných lokálnych hodnôt ako strednú integrálnu hodnotu. Vypočítaná hodnota je však závislá na počte zmeraných bodov. Navyše týmto spôsobom je stanovená zlúčená (kombinovaná) hodnota prestupu tepla, ktorá zahrňuje i radiačný tepelný tok. Pre oddelenie konvektívnej a radiačnej zložky je možné radiáciu potlačiť povrchom so zníženou emisivitou. Danielsson [18] vo svojej práci potlačal radiáciu z povrchu alfametru hliníkovou fóliou s uvažovanou emisivitou $\epsilon = 0,04$.

Kurazumi a kol. [35] použil vo svojich meraniach súčiniteľov prestupu tepla z povrchu tepelného manekýna odlišný prístup. Alfametre, snímajúce zložené tepelné toky radiáciou a konvekciou, doplnil o snímače radiačného tepelného toku. Z nameraných tepelných tokov z radiačných snímačov určil Kurazumi súčinitele prestupu tepla radiáciou. Konvektívne súčinitele prestupu tepla vypočítal z rozdielu zložených a radiačných súčiniteľov prestupu tepla. Merania prebiehali v uniformnom prostredí s teplotou od 16 do 26°C, so schodom 2 K, a relatívnou vlhkosťou 50%. Teplota povrchu tepelného manekýna so sedemástimi segmentmi bola udržiavaná na teplote 33°C.

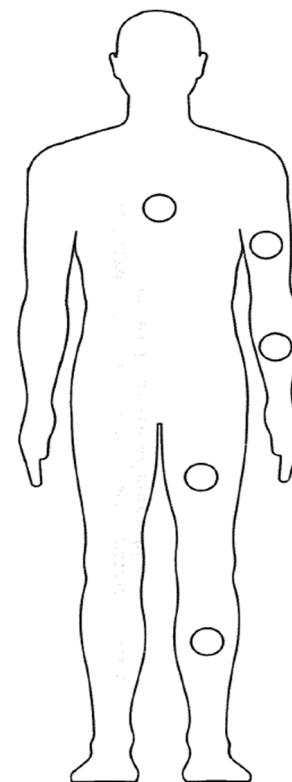
Alfametre sa obvykle vyhotovujú ako telesá kruhového alebo obdĺžnikového tvaru do hrúbky 1,5 mm, názorný príklad ilustruje obr. 6. Pre ich správnu činnosť je potrebné tesné prilnutie k podkladu, napríklad k vyhrievanej figuríne, ktorá generuje tepelný tok. Umiestnenie alfametrov priamo na odev je nevhodné, vzniká tak iba nepatrný teplotný gradient.

6.2 Sublimácia naftalénu

Ďalším spôsobom, ktorým je možné stanoviť mieru konvektívneho toku je využitie sublimácie naftalénu. Táto metóda je spracovaná napríklad v prácach autorov Nishi & Gagge [19] a Chang et al. [20]. Princípom metódy je úvaha, že hmotnosť vysublímovaného naftalénu do atmosféry je prenesená Chilton-Coburnovou analógiou na množstvo tepla konvekciou [6]. Chang pre meranie konvektívneho toku využíval kruhové naftalénové disky prilepené na povrch rôznych častí tela manekýna. Body merania súčiniteľov prestupu tepla konvekciou, z práce Changa ilustruje obr. 8. Manekýn bol pre účely Changovej práce umiestnený do komory s definovaným prúdením, za účelom simulácie pohybu kráčajúceho človeka.

Hlavnou nevýhodou tejto metódy je potreba presného laboratórneho vybavenia pre prípravu a váženie naftalénových diskov. Výsledky merania sú platné pre jeden bod, z praktického hľadiska nie je možné pokrytie celého skúmaného objektu naftalénom [20].

Sublimácia naftalénu predstavovala určitý vývojový stupeň merania súčiniteľov prestupu tepla konvekciou, čo zodpovedá ročníkom zverejnenia prác Nishiho a Changa (r. 1970, r. 1988). V súčasnosti je táto metóda považovaná za neefektívnu a je prakticky vytlačená presnejšími prístupmi. Podrobný popis tejto metódy je možné nájsť v prácach zmieňovaných autorov.



Obr. 8 Body merania súčiniteľov prestupu tepla konvekciou naftalénovou metódou [20]

6.3 Samostatné čidlo s integrovaným zahrievaním

V nasledujúcich podkapitolách sa budú používať pojmy ekvivalentná teplota a smerová ekvivalentná teplota, ktoré sú normou ČSN EN ISO 14505-2 [4] definované nasledovne.

Ekvivalentná teplota t_{eq} poskytuje jednotnú, fyzickú mieru vplyvu klímy na tepelnú výmenu (výmenu suchého tepla) človeka. Na základne skutočnej hodnoty ekvivalentnej teploty a jej zmeny je možné predpovedať podmienky tepelnej rovnováhy v tepelne neutrálnej zóne alebo blízko nej. Stanovenie ekvivalentnej teploty je založené na rovniciach pre konvektívny a radiačný prestup tepla odetej osoby. Tepelná výmena kondukciou sa v porovnaní s radiáciou a konvekciou predpokladá ako malá. Ekvivalentná teplota je daná rovnicou (15).

$$t_{eq} = t_{sk} - \frac{Q}{h_{cal}} \quad (15)$$

Kde:

t_{eq}	ekvivalentná teplota	[°C]
t_{sk}	teplota kože	[°C]
Q	zmeraná tepelná strata radiáciou a konvekciou, reálne podmienky	[W]
h_{cal}	zložený súčiniteľ prenosu tepla*, štandardné podmienky**	[W.m ⁻² .K ⁻¹]

*Súčiniteľ prestupu tepla radiáciou a konvekciou

**Štandardné podmienky sú dané normou „14505-2“ [4], popis v podkapitole 8.1.2.

Smerová ekvivalentná teplota $t_{eq,direct}$ je definovaná obdobne ako ekvivalentná teplota, rozdiel spočíva v podstate merania. Meria sa celkový tepelný tok z povrchu malej rovinatej plochy so známou povrchovou teplotou. Smerová ekvivalentná teplota môže byť popísaná ako normálový vektor k meracej ploche v každom bode, definovaný veľkosťou a smerom. Z teoretického hľadiska sa meria polopriestor pred nekonečne malou plochou. K stanoveniu smerovej ekvivalentnej teploty je možné použiť viacero sond v rôznych miestach za predpokladu, že ich umiestnenie nespôsobuje vzájomné ovplyvnenie.

Vyhrievané čidlá sa používajú v troch základných režimoch regulácie teploty:

1. Vyhrievanie na konštantnú teplotu, obvykle 34°C - teplota môže byť rovnomerná alebo nerovnomerná naprieč telom. Rýchlosť regulácie je vysoká, ale v určitých prípadoch môže byť nestabilná. Povrchová teplota je reálna v akceptovateľnej miere. Pre potreby merania tejto práce sa tento spôsob regulácie javí ako najvhodnejší.
2. Režim konštantného tepelného toku - tepelný tok môže byť rovnomerný alebo nerovnomerný naprieč telom. Regulácia je stabilná, ale pomalšia než regulácia na konštantnú teplotu. Nevýhodou je, že povrchová teplota sa môže značne líšiť od reálnych úrovní.
3. Režim komfortného vyhrievania - teplota povrchu závisí na tepelnom toku a je regulovaná vyrovnávaním. Regulácia je stabilná, ale pomalšia než regulácia na konštantnú teplotu. Povrchová teplota je zo všetkých režimov najreálnejšia.

Popísané možnosti regulácie sa používajú i na prácu s tepelným manekýnom, ktorá bude popísaná v kapitole 6.4.

Využitie samostatných čidiel pre meranie súčiniteľov prestupu tepla konvekciou a radiáciou je možné, ale konkrétne príklady ich využitia z prác iných autorov, na tieto účely, neboli nájdené. Samostatné čidlá budú popísané stručne pre ilustráciu ich potenciálu využitia.

6.3.1 Plošné zahrievané čidlá

Použitie plošných zahrievaných čidiel je vhodné pre stanovenie smerovej ekvivalentnej teploty. Sensory sú vybavené elektricky zahrievaným elementom, obvykle z platiny a povrchom z umelej kože, na ktorej sa meria výsledná povrchová teplota. Plošne zahrievané čidlá merajú zložený tepelný tok, radiáciou a konvekciou [4].

Sensory môžu byť umiestnené priamo na odev človeka alebo na figurínu, ktorá nemusí byť vyhrievaná. Príklad tejto aplikácie znázorňuje obr. 9, kombinácia figuríny a plošných zahrievaných čidiel sa označuje ako manekýn typu „dressman“. Vyhrievanie čidla je regulované počítačom, na základe zvoleného režimu regulácie [4].



Obr. 9 Umiestnenie plošných zahrievaných čidiel na figurínu

6.3.2 Gul'ovité a elipsoidné čidlá

Gul'ovité a elipsoidné senzory sú zahrievané po celom povrchu. Charakteristický priemer gul'ových senzorov je 100 a 150 mm. Elipsoidné čidlá sa vyrábajú s rozmermi: výška 200 mm a šírka 50 mm. Tvar elipsoidu optimálne odpovedá proporciám častí ľudského tela s ohľadom na percento strát radiáciou a konvekciou. Gul'ovitý senzor nadhodnocuje povrch častí tela, hlavne v žiarení „hornej“ a „dolnej“ pologule. Príklad rozmiestnenia senzorov schematicky zobrazuje obr. 10, čidlá sú umiestnené na pomocnej konštrukcii, ktorá napodobňuje vzrast ľudského tela, v jeho rôznych polohách. Takéto usporiadanie sa nazýva manekýn typu „flatman“ [4].

Senzor sa skladá z jednej zóny, čo ho robí necitlivým voči nesymetrickým podmienkam prostredia. Použitie viacerých senzorov spôsobuje ich vzájomné ovplyvnenie. Senzor nie je vhodný pre kontakt so sedadlom a pod. Gul'ové alebo elipsoidné senzory je možné využiť pre stanovenie hodnôt miestnych ekvivalentných teplôt, ale i ekvivalentných teplôt celého tela [4].



Obr. 10 Príklad merania s elipsoidnými sondami - simulácia sediacej postavy [4]

6.4 Tepelný manekýn

Tepelný manekýn (tepelná figurína) je zariadenie ktoré svojimi proporciami kopíruje určitý priemerný vzrast človeka a jeho „tepelné správanie“. Koncept tepelného manekýna slúži pre analýzu tepelného rozhrania ľudského tela a okolitého prostredia viac než 70 rokov. S postupným vývojom manekýnov sa využitie manekýnov rozmáha, dnes sú dostupné pokročilé verzie s detailným rozčlenením tela do zón, so systémom dýchania, potenia apod.

Tepelný manekýn typicky disponuje systémom elektrického vyhrievania, ktoré je vstavané pod jeho povrchovú vrstvu. Z dodaného príkonu sa usudzujú tepelné straty (pre-

važne radiáciou a konvekciou). Elektrické vyhrievacie teleso, typicky z platinového alebo niklového drôtu, zároveň slúži ako odporový teplomer, ktorý udáva relatívne presnú priemernú teplotu danej zóny. Manekýn vyniká v presnosti zachytenia tepelného toku jednotlivými zónami a ich teploty, v porovnaní s metódami, ktoré zaznamenávajú lokálne (bodové) hodnoty.

Ďalšou výhodou použitia tepelného manekýna je možnosť regulácie teploty povrchu jednotlivých zón na potrebnú teplotu, a to individuálne. Regulácia je v súčasnosti realizovaná prostredníctvom počítača, s možnosťou výberu z troch režimov, podľa kapitoly 6.3.

6.4.1 História tepelných manekýnov

Hlavným zdrojom nasledujúceho historického prehľadu je rešeršná práca Holméra [33].

Tab.1 poskytuje súpis mílnikov vo vývoji tepelných manekýnov. Každý príklad predstavuje značné vylepšenie predchádzajúcej verzie alebo prístupu k problematike. Tabuľka uvádza krajinu a rok vzniku novej technológie s popisom daného manekýna, je nutné dodať, že príklady v tabuľke nemusia vždy reprezentovať prvý prototyp z daného vývojového stupňa. Počet aktívne využívaných tepelných manekýnov sa odhaduje na sto kusov, celosvetovo.

Prvý tepelný manekýn bol zhotovený z medi počas štyridsiatych rokov minulého storočia, pre armádu USA, a obsahoval iba jednu zónu, ktorá reprezentovala celý povrch tela. Manekýnov tohto typu bolo vyrobených niekoľko kusov a niekoľko z nich je stále v prevádzke. Potreba detailnejších informácií o prenose tepla z jednotlivých častí tela viedla k zostrojeniu manekýna s viacerými nezávisle riadenými zónami (viď tab. 1, r. 2 až 14, okrem r. 8). Súčasne vyrábané konštrukcie manekýnov operujú štandardne s 16 a viac zónami.

Ďalší značný pokrok prinieslo zavedenie digitálnych regulačných systémov, začiatkom deväťdesiatych rokov. Prínosy tejto metódy priniesli flexibilnejšie procedúry merania a presnejšie výsledky meraní, v porovnaní s analógovou reguláciou.

Manekýn francúzskeho pôvodu (tab. 1, r. 3) bol skonštruovaný so systémom chladenia, ktorý umožňoval merať tepelné zisky figuríny. Manekýn bol zostrojený pre potreby vývoja ochranných odevov proti žiaru. S podobným zameraním bol vyrobený pasívny manekýn „Thermoman“ osadený senzormi teploty na povrchu (tab. 1, r. 8).

Statickosť figuríny, bez alternatívy pohybu končatín, poskytuje možnosť využitia manekýna v skúmanom prostredí len v jednej polohe. To viedlo k podnetu vytvoriť manekýna s pohyblivými kĺbmi. Pohyblivé kĺby umožňujú nastaviť manekýna do konkrétnej polohy, podľa potreby merania. S pomocou špeciálneho príslušenstva je možné uviesť končatiny manekýna do pohybu (typicky chôdza, šľapanie na ergometri), viď tab 1, r. 4 až 6 a 11 až 17. Hovoríme tak o artikulovanom manekýnovi, nevýhodou sú rozmery a cena tohto zariadenia.

Viacere nové konštrukcie manekýnov sú schopné simulovať potenie, čím poskytujú cenné informácie o prenose tepla vyparovaním z povrchu ľudského tela, viď tab. 1, r. 10. Ďalším vývojovým stupňom bolo zostrojenie prvého manekýna, ktorý proporčne zodpovedá ženskému telu, z roku 1989 (tab. 1, r. 11). Postupné zvyšovanie záujmu o výskum mikroklímy s ohľadom na plynné a tuhé škodliviny vyústilo do konštrukcie prvých manekýnov so systémom dýchania, viď tab. 1 r. 12.

V súčasnosti je dostupná široká paleta komerčne vyrábaných tepelných manekýnov, rovnako sú známe i vlastné konštrukcie. Rozoznávajú sa dva hlavné trendy vo vývoji tepel-

ných manekýnov. Jeden prúd smeruje k vývoju komplexných, sofistikovaných, multifunkčných figurín pre pokročilé metódy testovania. Jedným z reprezentantov tohto smerovania je švajčiarsky manekýn „SAM“, ktorý je schopný potenia sa a realistického pohybu chôdze, vid' tab 1. r 13. Ďalším príkladom je americký manekýn „ADAM“, ktorý je primárne určený k výskumu mikroklímy dopravných prostriedkov, tab. 1 riadok 14. Manekýn „ADAM“ je sebestačný, napájaný batériami, vybavený zásobníkom vody pre potenie a systémom pre zber dát.

Druhá vetva vo vývoji tepelných manekýnov smeruje k jednoduchým, ale presným a spoľahlivým systémom merania. Ďalším atribútom týchto zariadení je ich nízka cena. To ich predurčuje k využitiu v prostredí menších, napr. odevných spoločností. Manekýn toho typu je schopný poskytnúť iba jednu hodnotu tepelného odporu, platnú pre celé telo.

Tanabe so svojím tímom [34] vytvoril, na základe CFD, program pre vyhodnotenie tepelného stavu, ktorý je aplikovateľný na výskum interiéru vozidiel. Tento výskum pokračuje na viacerých svetových pracoviskách, za účelom vytvorenia virtuálneho manekýna, pre „desktopové“ simulácie a analýzy [33].

Tab. 1 Prehľad historického vývoja tepelných manekýnov [33]

r.	Typ manekýna	Materiál	Typ regulácie	Pohyblivosť	Krajina a rok
1	jeden segment	meď	analógová	nie	USA 1945
2	multi-segment	hliník	analógová	nie	UK 1964
3	radiačný	hliník	analógová	nie	Francúzsko 1972
4	multi-segment	plast	analógová	áno	Dánsko 1973
5	multi-segment	plast	analógová	áno	Nemecko 1978
6	multi-segment	plast	digitálna	áno	Švédsko 1980
7	multi-segment	plast	digitálna	áno	Švédsko 1984
8	„požiarny manekýn“	hliník	digitálna	nie	USA
9	pre ponorenie do vody	hliník	digitálna	áno	Kanada 1988
10	so systémom potenia	hliník	digitálna	nie	Japonsko 1988
11	ženský manekýn	plast	digitálna, komfortná rovnica	áno	Dánsko 1989
12	so systémom dýchania	plast	digitálna, komfortná rovnica	áno systém dýchania	Dánsko 1996
13	so systémom potenia	plast	digitálna, 30 suchých, 125 zón na potenie	realistické pohyby	Švajčiarsko 2001
14	sebestačný s potením	kov	digitálna, 126 zón na potenie	artikulovaný	USA 2003
15	virtuálny	numerický model	simulácia prenosu tepla a hmoty	artikulovaný	Čína 2000 UK 2001
16	jeden segment, s potením	priedušná látka	digitálna, vodou vyhrievaný	áno	Čína 2001
17	jeden segment	nepriedušná látka	digitálna, vzduchom vyhrievaný	áno	USA 2003

6.4.2 Využitie tepelného manekýna pre meranie súčiniteľov prestupu tepla

Tepelný manekýn je primárne určený k meraniu tepelných strát a určeniu ekvivalentnej teploty. Problém s priamym využitím tepelného manekýna pri meraní súčiniteľov prestupu tepla spočíva v zloženom (kombinovanom) prenose tepelného toku z povrchu manekýna, teda radiáciou a konvekciou. Tieto tepelné toky je potrebné oddeliť vhodnou metódou. Vedenie tepla sa uvažuje len v prípade dotyku s inými plochami, v ostatných prípadoch sa zanedbáva.

De Dear pri meraní súčiniteľov prestupu tepla [6] využil tepelného manekýna „Monika“, ktorý anatomicky reprezentuje ženské telo a disponuje s šestnástimi nezávisle riadenými segmentmi. Pre oddelenie radiačnej zložky z celkového tepelného toku využil tesne priliehajúci poťah z hliníkovej fólie, ktorý má nízku emisivitu. Pre fixáciu fólie na povrchu manekýna aplikoval tenký film lepidla na zubné protézy. De Dear predpokladal minimálne navýšenie tepelného odporu na povrchu manekýna, vzhľadom na odstránenie vzduchových bublín pod poťahom a veľmi tenkou vrstvou lepidla. Výsledný tepelný tok z povrchu manekýna bol potom majoritne realizovaný konvekciou. Radiačný tok zisťoval nepriamo. Od celkového tepelného toku, zmeraného pomocou nahého manekýna, sa odčítal tepelný tok konvekciou, zmeraný manekýnom so zníženou emisivitou povrchu. Výsledok predstavuje tepelný tok radiáciou. Príslušné súčinitele prestupu tepla De Dear vypočítal so známych tepelných tokov, teplôt povrchu manekýna a okolia, aplikáciou Newtonova ochadzovacieho zákona. De Dear skúmal súčinitele prestupu tepla v závislosti na uhle ofukovania manekýna a rýchlosti prúdenia vzduchu.

Silva zvolil vo svojich experimentoch [8] prístup využitia tepelného manekýna odlišným spôsobom. Merania prebiehali na nahej tepelnej figuríne „Maria“, ktorá mala obdobné parametre ako manekýn „Monika“. Manekýn bol umiestnený do testovacej komory, v ktorej bol vystavený prúdeniu vzduchu spredu, zozadu a zo strany. Testovacia komora s rozmermi $2 \times 2 \times 2$ m bola tepelne izolovaná, aby bola dosiahnutá uniformná teplota povrchu stien. Silva meral celkový tepelný tok z povrchu nahého manekýna, pre rôzne rýchlosti prúdenia vzduchu v rozsahu $0,1$ až $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Výpočtom podľa vzťahu (16) určil súčiniteľ prestupu tepla radiáciou a následne príslušný radiačný tepelný tok, daný okolitými podmienkami. Odčítaním radiačného toku od celkového tepelného toku, získal hodnotu konvektívneho tepelného toku a príslušný súčiniteľ prestupu tepla.

$$h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{A_r}{A_D} \cdot \left[273,2 + \frac{T_{cl} + T_r}{2} \right]^3 \quad (16)$$

Kde:

h_r	súčiniteľ prestupu tepla radiáciou	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
ε	priemerná emisivita povrchu manekýna	$[-]$
σ	Stefan-Boltzmanova konštanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$
A_r	efektívna plocha vyžarovania ľudského tela	$[\text{m}^2]$
A_D	plocha tela podľa Du-Boisa	$[\text{m}^2]$
T_{cl}	priemerná teplota odevu, resp. kože v prípade bez odevu	$[\text{K}]$
T_r	stredná radiačná teplota prostredia	$[\text{K}]$

Ďalším spôsobom využitia tepelných manekýnov pre meranie súčiniteľov prestupu tepla, je meranie s potlačenou konvekciou. Tohto stavu je možné dosiahnuť rovnosťou teploty

vzduchu a povrchu manekýna. Nevzniká tak teplotný gradient medzi povrchom a okolím. Prenos tepla je tak realizovaný výlučne radiáciou. Metóda je použiteľná za predpokladu, že teplota stien prostredia má uniformnú radičnú teplotu, nižšiu ako teplota vzduchu. Tento postup realizoval Ichihara a kol. vo svojej práci [37] s artikulovaným manekýnom, ktorý simuloval chôdzu. Experiment prebiehal pri teplote manekýna, resp. vzduchu 34°C a strednej radičnej teplote 27 a 28,1°C. Ichihara týmto spôsobom zmeral súčinitele prestupu tepla radiáciou pre 16 segmentov tepelného manekýna.

Analogicky možno realizovať elimináciu radiácie vyrovnaním strednej radičnej teploty stien a povrchu manekýna. Ak je teplota vzduchu udržiavaná na inej úrovni než stredná radičná teplota stien, prenos tepla sa realizuje výlučne konvekciou. Príklady aplikácie tohto postupu neboli nájdené. Popísané dva spôsoby eliminácie radiácie a konvekcie sú problematicky realizovateľné. Vyžadujú zariadenie s možnosťou udržiavať konštantnú teplotu stien a zároveň vzduchu.

6.5 Voľba experimentálnej metódy

Pri výbere vhodnej experimentálnej metódy sú zohľadnené nasledovné priority

1. dostupnosť experimentálneho vybavenia,
2. reprodukovateľnosť a presnosť merania,
3. časová náročnosť,
4. praktická skúsenosť práce s experimentálnym vybavením na pracovisku OTTP.

Zoznam relevantného vybavenia k predmetu tejto práce, dostupného na OTTP

- tepelný manekýn Newton,
- alfametre OMEGA,
- elipsoidné sondy (malý počet pre potreby merania),
- klimatická komora,
- kalorimetrická komora.

Z pohľadu rebríčku priorít plne vyhovuje všetkým bodom použitie tepelného manekýna a klimatickej komory. Pre potlačenie radiácie sa využije metóda, ktorú vo svojej práci popísal De Dear [6]. Meranie s odevom sa vykoná prostredníctvom obleku so zníženou emisivitou.

Výhodou metódy De Deara [6] je skutočnosť, že meranie sa v najvyššej dosiahnuteľnej miere približuje reálnemu stavu prenosu tepla z povrchu človeka. Hodnoty zložených tepelných tokov a tokov s potlačenou radiáciou sú stanovené experimentálne, nie výpočtom. Radičný tok sa určí z nameraných hodnôt. Detailný popis experimentálnej metódy a úplného experimentálneho vybavenia je uvedený v nasledujúcej kapitole.

7 POPIS RIEŠENIA PRÁCE

Táto kapitola obsahuje detailný popis zvoleného prístupu riešenia tejto práce. Metodika sa riadi normou ČSN EN ISO 14505-2 [4], v kombinácii s poznatkami z práce HO. Nilsson [7]. Metodika práce je prispôsobená možnostiam pracoviska OTTP VUT v Brne.

7.1 Metodika práce

7.1.1 Postup experimentálneho riešenia

1. Zhotovenie kalibračného boxu a jeho umiestnenie do klimatickej komory.
2. Umiestnenie tepelného manekýna do kalibračného boxu zavesením za fixačný hák, na hlave manekýna. Manekýn sa umiestňuje do geometrického stredu boxu (viď obr. 18).
3. Umiestnenie snímačov teploty vo výške chodidiel, brucha a hlavy (výška sa mení podľa polohy manekýna, sed/stoj), v kalibračnom boxe za manekýnom. Kontrola teploty vzduchu v klimatickej komore sa vykoná snímačmi teploty, na ľavej a pravej strane komory, výška cca 1,4 m nad podlahou komory (viď obr. 11).
4. Umiestnenie anemometra a sondy teploty do kalibračného boxu cca 80 cm pred hrud' figuríny, s čidlami teploty a vlhkosti vo výške 15 a 60 cm nad podlahou boxu (obr. 19).
5. Vytvorenie homogénneho prostredia podľa normy ČSN EN ISO 14505-2 [4]. Kalibrácia alebo stanovenie súčiniteľov prestupu tepla sa má vykonávať v špeciálnom boxe alebo komore za týchto podmienok:

$$t_a = t_r = 24^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}, v_a = 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta t_{0,1-1,1 \text{ m}} < 0,4^{\circ}\text{C}.$$

Kde:

t_a	teplota okolitého prostredia	[$^{\circ}\text{C}$]
t_r	radiačná teplota okolitých plôch	[$^{\circ}\text{C}$]
v_a	rýchlosť prúdenia okolitého vzduchu	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
$\Delta t_{0,1-1,1 \text{ m}}$	rozdiel teplôt vo výške 0,1 - 1,1 m nad podlahou boxu	[$^{\circ}\text{C}$]

Pre meranie stacionárnych tepelných tokov z povrchu manekýna a pre dosiahnutie homogénneho prostredia je nevyhnutné zaistiť rovnovážny stav v priestore merania. Zo skúseností konzultanta a autora tejto práce bol stanovený čas ustálenia teploty podľa normy „14505-2“ [4] na 2 až 3 hodiny po spustení klimatickej komory, s nastavenou teplotou vzduchu 24°C , v závislosti na počiatočných podmienkach v komore.

6. Zahriatie tepelného manekýna na pracovnú povrchovú teplotu 34°C , ustálenie tepelného toku z povrchu manekýna do okolitého prostredia. Tento stav je možné dosiahnuť približne do dvoch hodín od momentu uvedenia manekýna do prevádzky. Výhodné je simultánne spustenie klimatickej komory a nahrievanie manekýna.
7. Po tepelnom ustálení oboch sústav (manekýn/box/komora) sa spustí logovanie dát po dobu jednej hodiny. Zapisovanie prebieha každú sekundu. Meranie s potlačenou radiáciou sa vykoná s pot'ahom alebo oblekom so zníženou emisivitou.
8. Vypnutie sústavy manekýn - komora, vyvetranie komory a kalibračného boxu vonkajším vzduchom po dobu minimálne jednej hodiny.
9. Meranie každého stavu (napr. sed s potlačenou radiáciou) zopakovať 3x.

7.1.2 Výpočet súčiniteľov prestupu tepla z nameraných dát

Pomocou tepelného manekýna nie je možné priame meranie súčiniteľov prestupu tepla. Manekýn je však schopný zaznamenávať tepelný tok z jeho jednotlivých zón kombinovane, radiáciou a konvekciou. Kondukcia sa vzhľadom na umiestnenie manekýna bez majoritného kontaktu s okolitými plochami neuvažuje. V prípade malého rozdielu teplôt sústavy manekýn - okolie je možné rovnice (17) a (18), popisujúce prenos tepla linearizovať [6]

$$Q_0 = Q_k + Q_r \quad (17)$$

$$Q_0 = h_k \cdot (T_{sk} - T_a) + h_r \cdot (T_{sk} - T_r) \quad (18)$$

Kde:

Q_0	zložený tepelný tok z povrchu manekýna	[W.m ⁻²]
Q_k	tepelný tok konvekciou z povrchu manekýna	[W.m ⁻²]
Q_r	tepelný tok radiáciou z povrchu manekýna	[W.m ⁻²]
h_k	súčiniteľ prestupu tepla konvekciou	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
h_r	súčiniteľ prestupu tepla radiáciou	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
T_{sk}	teplota povrchu manekýna, $T_{sk} = 34^\circ\text{C}$	[°C]
T_a	teplota okolitého vzduchu	[°C]
T_r	radiačná teplota okolitých plôch	[°C]

Myšlienka postupu určenia jednotlivých súčiniteľov vychádza z predpokladu, že znížením emisivity povrchu manekýna ε , sa podľa Stefan-Bolzmannovho zákona radiačná zložka tepelného toku minimalizuje a prenášaný tepelný tok z povrchu manekýna do okolia je realizovaný prevažne konvektívnou zložkou. Z takto nameraného tepelného toku je možné pomocou Newtonova ochladzovacieho zákona vypočítať súčiniteľ prestupu tepla konvekciou h_k , viď rovnice (19) a (20).

$$Q_0 = h_k \cdot (T_{sk} - T_a) + h_r \cdot (T_{sk} - T_r)$$

$$\varepsilon \rightarrow 0 \Rightarrow h_r \rightarrow 0$$

$$Q_0 = h_k \cdot (T_{sk} - T_a) \quad (19)$$

$$h_k = \frac{Q_0}{(T_{sk} - T_a)} \quad (20)$$

Rozdielom zloženého a konvektívneho tepelného toku získame radiačnú zložku tepelného toku, a úpravou rovnice (18) príslušný súčiniteľ prestupu tepla, viď rovnica (21).

$$h_r = \frac{Q_0}{(T_{sk} - T_r)} - \frac{h_k \cdot (T_{sk} - T_a)}{(T_{sk} - T_r)} \quad (21)$$

Za predpokladu, že $T_a = T_r$ môžeme rovnicu (21) zjednodušiť na tvar (22)

$$h_r = \frac{Q_0}{(T_{sk} - T_a)} - h_k \quad (22)$$

Vyrovnanie teploty vzduchu a radiačnej teploty je možné dosiahnuť spôsobom popísaným v podkapitolách 7.2.1 a 7.2.2, klimatickou komorou a kalibračným boxom.

Dáta všetkých tepelných tokov a teplôt sa zaznamenávajú s periódou jedna sekunda. Popísaný výpočet sa vykoná z aritmetického priemeru hodnôt skúmanej veličiny, logovanej po dobu jednej hodiny, po dosiahnutí rovnovážneho stavu sústavy manekýn - kalibračný box.

7.2 Popis experimentálneho vybavenia

7.2.1 Klimatická komora

Klimatická komora je zariadenie, ktoré dokáže simulovať zvolené klimatické podmienky. Technické parametre sa môžu líšiť v závislosti na konkrétnom type komory. V tejto práci sa použila klimatická komora, v ktorej je možné nastaviť nasledovné veličiny:

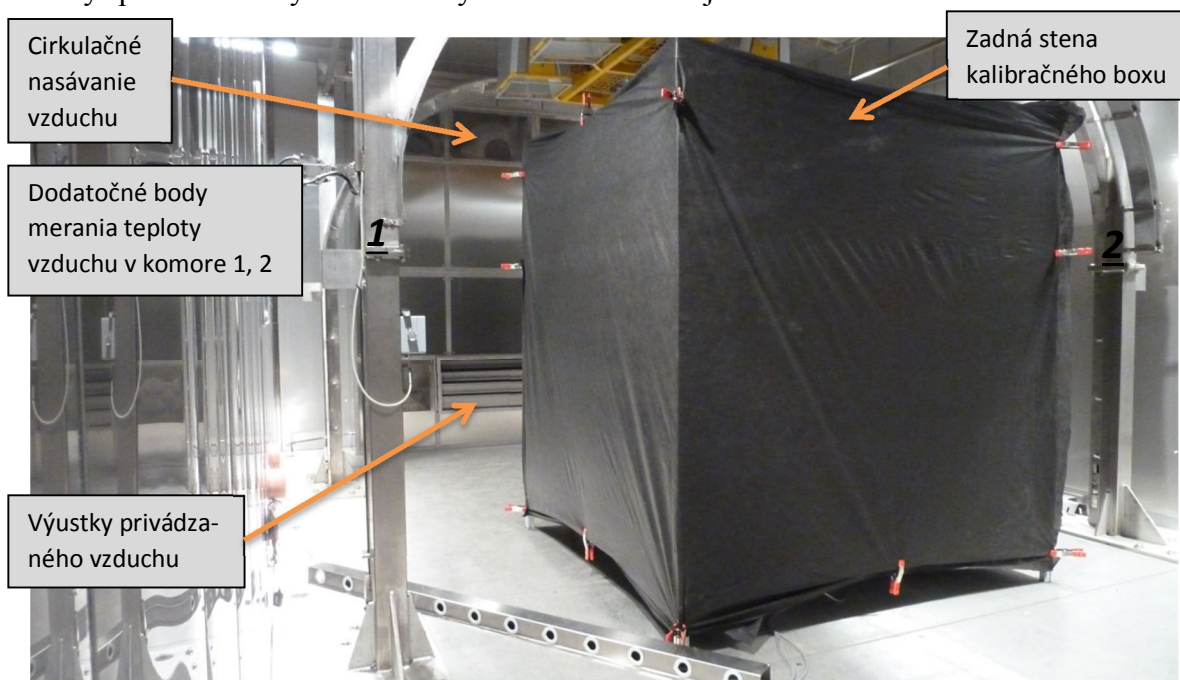
- teplota vzduchu v rozsahu -40 až 85°C ,
- relatívna vlhkosť vzduchu, cca 10-80%,
- solárne zisky do výkonu 10 kW.

V komore nie je možné nastaviť:

- teplotu stien komory,
- rýchlosť prúdenia vzduchu.

Klimatická komora je ovládaná prostredníctvom PC, so softvérom od dodávateľskej spoločnosti. Ten umožňuje nastavovať vyššie uvedené parametre prostredia. Rozmery komory (d $8 \times$ š $5 \times$ v $3,8$ m) umožňujú spolu so systémom odvodu spalín poňať i relatívne veľké objekty a motorové vozidlá. Teplota vzduchu v komore je regulovaná pomocou systému výparníka s priamym vstrekom chladiva a priameho elektrického ohrevu vzduchu. Nútenou cirkuláciou vzduchu v komore (rýchlosť prúdenia cca 3 až $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, polohu výustiek vzduchu ilustruje obr. 11) je možné zaistiť nastavenie teploty vzduchu s presnosťou $\pm 1^{\circ}\text{C}$, v celom objeme komory [29].

Využitie klimatickej komory pre riešenie tejto práce je výhodné z pohľadu možnosti nastavenia teploty vzduchu, napriek tomu, že pre potreby normy „14505-2“ [4] je táto presnosť nastavenia teploty nedostatočná, vhodnou konštrukciou kalibračného boxu, vloženého do komory, je možné dosiahnuť uspokojivé výsledky homogenity teplôt. Vnútro klimatickej komory spolu s vloženým kalibračným boxom zobrazuje obr. 11.



Obr. 11 - Vnútro klimatickej komory s vloženým kalibračným boxom

Poznámky z meraní:

Komora je vybavená meraním a reguláciou teploty vzduchu prostredníctvom jednej kalibrovannej sondy. Pri snahe nastaviť teplotu vzduchu vo veľmi špecifickom rozmedzí, $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, kontrolný systém často vykonáva nevhodné regulačné zásahy, ako odozvu na nastavenú teplotu. Toto správanie viedlo k potrebe umiestnenia dodatočných sond teploty vzduchu vo voľnom priestore komory (obr. 11), za účelom kontroly teploty vzduchu, vyhodnotenej systémom klimatickej komory. Dodatočné informácie o teplote vzduchu v priestore komory pomohli obsluhu presnejšie nastaviť požadovanú teplotu v kalibračnom boxe, ktorý reaguje na malé zmeny teploty s veľkou časovou konštantou (rádovo 15 min). Vo väčšine praktických aplikácií komory sa táto vlastnosť neprejaví ako nedostatok.

Všetky merania prebiehali bez osvetlenia priestoru komory, aby nedošlo k skresleniu výsledkov dodatočným zdrojom žiarenia.

7.2.2 Kalibračný box

Autorom idei kalibračného boxu (ďalej len box) je HO. Nilsson, ktorý vo svojej dizertačnej práci popísal metódu stanovenia ekvivalentnej teploty pre hodnotenie tepelného stavu prostredia [7]. Kalibračný box má za úlohu vytvárať homogénne prostredie, ktoré je popísané v kapitole 7.1.1 podľa normy ČSN EN ISO 14505-2 [4]. Nosnú konštrukciu boxu zostrojeného pre účely tejto práce ilustruje obr. 12.



Obr. 12 - Nosná konštrukcia kalibračného boxu



Obr. 13 - Vetrací otvor v stropnej časti boxu a pohľad na lanový záves pre manekýna

Nosná konštrukcia boxu je zhotovená z hliníkových profilov so štvorcovým prierezom 45×45 mm. Kvôli lepšej manipulovateľnosti je box navrhnutý ako rozoberateľný. Spoje sú skrutkové, realizované prostredníctvom montážnych trojuholníkov, matica sa fixuje do drážky nosného profilu. Vnútorne rozmery boxu sú $2 \times 2 \times 2$ m, podlaha boxu je umiestnená 20 cm nad úrovňou skutočnej podlahy. Plášť komory je zhotovený z tmavej netkanej textílie s plošnou hmotnosťou 50 g/m^2 . Textília sa na konštrukciu boxu upevňuje pružinovými svorkami s dostatočným predpätím. V strede podlahy boxu je vložený drevený štvorec s plochou 1 m^2 ,

ktorý slúži ako oporný bod pri manipulácii s manekýnom, vid' obr. 12. Pre potreby uchytenia manekýna (zavesením) sú v stropnej časti boxu natiahnuté krížne oceľové lanká, vid' obr. 13.

Uvedená konštrukcia boxu v súčinnosti s klimatickou komorou zaisťuje splnenie všetkých požiadaviek normy „14505-2“ [4]. Rovnosť teploty vzduchu a radiačnej teploty stien boxu je zabezpečená stenou boxu z čiernej netkanej textílie. Textília má veľmi malú plošnú hmotnosť (50 g/m^2) a tepelnú kapacitu, čím je možné potlačiť jav akumulácie tepla do steny a jej následne zvýšenie teploty. Uzavretý priestor boxu sa z fyzikálneho hľadiska správa podobne ako dokonale čierne teleso, tepelný tok radiáciou je maximalizovaný. Merania preukázali, že teplotná stratifikácia vo výške 0,1 až 1,1 m nad podlahou boxu je menšia než $0,4^\circ\text{C}$. Norma taktiež požaduje rýchlosť prúdenia vzduchu okolo manekýna na úrovni $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Definovaná rýchlosť prúdenia vzduchu v boxe je zabezpečená parciálne prirodzeným konvektívnym prúdením okolo vyhrievaného manekýna a priedušnosťou steny boxu z netkanej textílie, ktorá brzdí a homogenizuje prúdenie prenikajúce do vnútra boxu z klimatickej komory.

Poznámky z meraní:

Zhotovený kalibračný box bol umiestnený do geometrického stredu klimatickej komory. Vzduch privádzaný do komory vyúsťuje žalúziiovými lamelami a obdĺžnikovými otvormi, odkiaľ smeruje na prednú stenu boxu, vid' obr. 11. Prvé skúšky boxu odhalili problém s relatívne vysokou rýchlosťou prúdenia v priestore okolo manekýna. Zaznamenaná bola i pomerne vysoká fluktuácia rýchlosti, spôsobená vzdúvaním sa textílie. Tieto nedostatky boli upravené doplnením dodatočnej vrstvy netkanej textílie na prednú stenu boxu. Tým sa docielilo zníženie priedušnosti prednej steny a zníženie rýchlosti prúdenia v boxe na hodnoty $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ďalšie zmiernenie fluktuácie bolo dosiahnuté lepším napnutím textílie na konštrukciu boxu a jej uchytenie vo viacerých bodoch. Pre lepšie vetranie boxu a posilnenie konvektívneho prúdenia bol v strope boxu nad manekýnom zhotovený štvorcový vetrací otvor s rozmermi približne $0,5 \times 0,5 \text{ m}$, vid' obr. 13. Týmto opatreniami je možné dosiahnuť normou predpísanú rýchlosť prúdenia, cirká $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

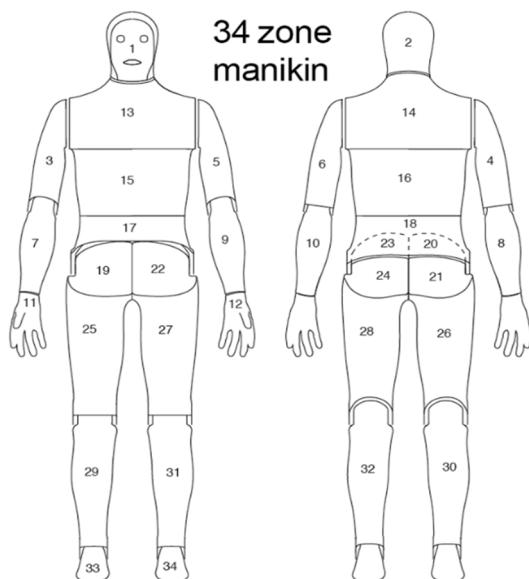
Prvé skúšobné merania sa realizovali bez podlahy boxu, ukázalo sa, že táto konfigurácia je nevhodná, hlavne z pohľadu teplotnej stratifikácie a rýchlosti prúdenia vzduchu. Podlaha bola vyhotovená z rovnakého materiálu ako steny boxu, teda čiernej netkanej textílie. Zachovaná bola i stredová štvorcová časť z dreva.

7.2.3 Tepelný manekýn Newton

Pracovisko OTTP je vybavené „state-of-the-art“ tepelným manekýnom od spoločnosti Measurements Technology Northwest, súčasťou dodávky je i riadiaci soft ThermDAC8. Pre účely tejto práce je manekýn využitý v režime regulácie s konštantnou teplotou povrchu 34°C . Zaznamenávaná je tepelná strata jednotlivých zón manekýna a ich povrchová teplota.

Zóny manekýna logicky reprezentujú časti ľudského tela. Manekýn disponuje 34 nezávisle vyhrievanými a riadenými zónami, ktoré simulujú produkciu metabolického tepla a jeho odvod do okolitého prostredia. Prehľad jednotlivých zón, znázorňuje obr. 14 (pohľad spredu a zozadu). Tab. 2. poskytuje popis jednotlivých zón, s ich príslušnou plochou. Manekýn je pre zlepšenie polohovateľnosti a manipulácie opatrený kĺbmi s nastaviteľnou tuhosťou chodu. Kĺby zaisťujú pohyblivosť chodidiel, kolien, bedier, lakt'ov a ramien.

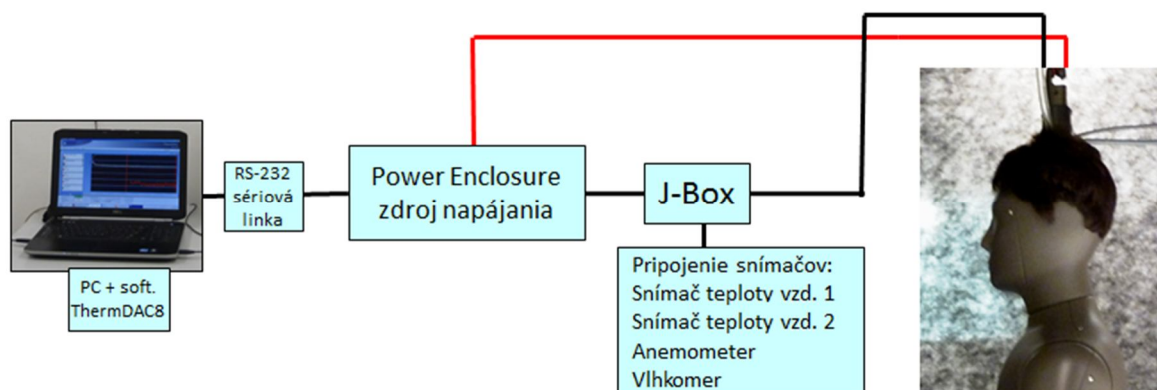
„Newton“ je vyhotovený z tepelne vodivého uhlíkového kompozitu, s medeným plnivom. Pod povrchovou vrstvou každého segmentu je vnorený systém elektrického odporového vyhrievania, ktorý zároveň slúži ako systém merania povrchovej teploty. Zmienená konfigurácia zaručuje výbornú distribúciu tepla v rámci jednotlivých zón. Systém vyhrievania, resp. merania teploty, je napojený na modulárny systém napájania a riadenia teploty, pre zjednodušenú schému zapojenia vid' obr. 15. Systém je tak primárne riadený počítačom pomocou softvéru ThermDAC8. Počítač riadi, prostredníctvom sériového portu, napájací zdroj manekýna (Power Enclosure), ktorý reguluje dodávaný tepelný výkon do manekýna. Spätná väzba z manekýna (J-Box) zbiera údaje o teplote, vlhkosti a rýchlosti prúdenia vzduchu [38].



Tab. 2 Zóny a príslušné plochy, manekýn Newton [38]

č.	ZÓNA	S [m ²]	č.	ZÓNA	S [m ²]
1	Face	0.0436	18	Lower Back	0.0503
2	Head	0.0939	19	R Up Thigh Fr	0.0487
3	R Up Arm Fr	0.0519	20	R Up Thigh Grd	0.0309
4	R Up Arm Bk	0.0317	21	R Up Thigh Bk	0.0274
5	L Up Arm Fr	0.0519	22	L Up Thigh Fr	0.0487
6	L Up Arm Bk	0.0317	23	L Up Thigh Grd	0.0309
7	R Forearm Fr	0.0384	24	L Up Thigh Bk	0.0274
8	R Forearm Bk	0.0264	25	R Lwr Thigh Fr	0.1032
9	L Forearm Fr	0.0384	26	R Lwr Thigh Bk	0.0488
10	L Forearm Bk	0.0264	27	L Lwr Thigh Fr	0.1032
11	R Hand	0.0461	28	L Lwr Thigh Bk	0.0488
12	L Hand	0.0461	29	R Calf Fr	0.0823
13	Upper Chest	0.092	30	R Calf Bk	0.0528
14	Shoulders	0.0793	31	L Calf Fr	0.0823
15	Stomach	0.1019	32	L Calf Bk	0.0528
16	Mid Back	0.0634	33	R Foot	0.0596
17	Waist	0.0468	34	L Foot	0.0596

Obr. 14 Prehľad zón, manekýn Newton [38]



Obr. 15 Schéma zapojenia tepelného manekýna Newton, základný okruh bez dýchania

Podrobný technický popis tepelného manekýna Newton a jeho systémov, je spracovaný v tab. 3. Manekýn Newton sa dodáva s početným príplatkovým príslušenstvom, ktoré zahŕňa systémy umožňujúce simuláciu dýchania, potenia či artikulovanej chôdze manekýna. Tieto systémy nachádzajú uplatnenie pri komplexnom výskume tepelného komfortu, avšak pre potreby tejto práce nie sú využité.

Tab. 3 Technické špecifikácie, tepelný manekýn Newton

Technické špecifikácie - tepelný manekýn Newton

- Pracovný rozsah: teplota: 20 až 50°C, relatívna vlhkosť: 0 až 100%
tepelný výkon manekýna: 0 až 700 W/m²
frekvencia dychu: 5 až 20 min⁻¹, dychový objem 0,1 až 2 l
- Vzrast a hmotnosť: výška 178,5 cm, muž, konfekčná veľkosť M
hmotnosť 30 kg
- Presnosť merania: ± 0,1°C, nastavenie povrchovej teploty a meranie teploty zón
- Režimy regulácie: regulácia na danú povrchovú teplotu, každá zóna individuálne
regulácia na konštantný tepelný tok (stratu)
regulácia podľa rovnice tepelného komfortu
- Príslušenstvo: Power Enclosure - zdroj systému, zabezpečenie komunikácie s PC
J-Box - rozhranie pre snímače teploty, vlhkosti a rýchlosti vzduchu
kompletná kabeláž, robustná voči elektromagnetickému rušeniu
2x odporové čidlo teploty vzduchu, typ PT100
1x čidlo relatívnej vlhkosti, neznámy typ
1x anemometer, žhavená guľôčka, zn. Value Tester - model 8475
ovládacie a záznamový software ThermDAC8
respiračný systém
- Nadstavbové systémy: systém umelého potenia, regulácia 0 - 1000 ml/h potu
stand pre artikulovanú simuláciu chôdze

Potlačenie radiačného tepelného toku

Poťah na povrchu manekýna s nízkou emisivitou bol zhotovený z kuchynskej hliníkovej fólie, upevnený nalepením (zdôvodnenie využitia tejto metódy bolo podrobne popísané v predchádzajúcich kapitolách). Hliníková fólia sa z pohľadu emisivity, tepelnej vodivosti a dostupnosti javí ako najvhodnejšie riešenie pre potlačenie radiácie. V praktickej aplikácii je však jej veľkým nedostatkom absolútny nedostatok elasticity. Pokrývaním zakrivených povrchov tak často dochádza k zvrásneniu fólie a pretrhnutiam. Pri práci sa preto osvedčilo polepovanie menšími plochami fólie, ktoré lepšie kopírujú povrch manekýna v danom mieste. Tento prístup však zvyšuje časovú náročnosť vyhotovenia. Navyše, za účelom minimalizácie nárastu tepelného odporu pridanej vrstvy je pri aplikácii fólie nutné vytlačiť vzduchové bubliny a prebytočné lepidlo uviaznuté medzi povrchom manekýna a fóliou. Uvedený postup vyžadoval lepidlo s nasledujúcimi vlastnosťami:

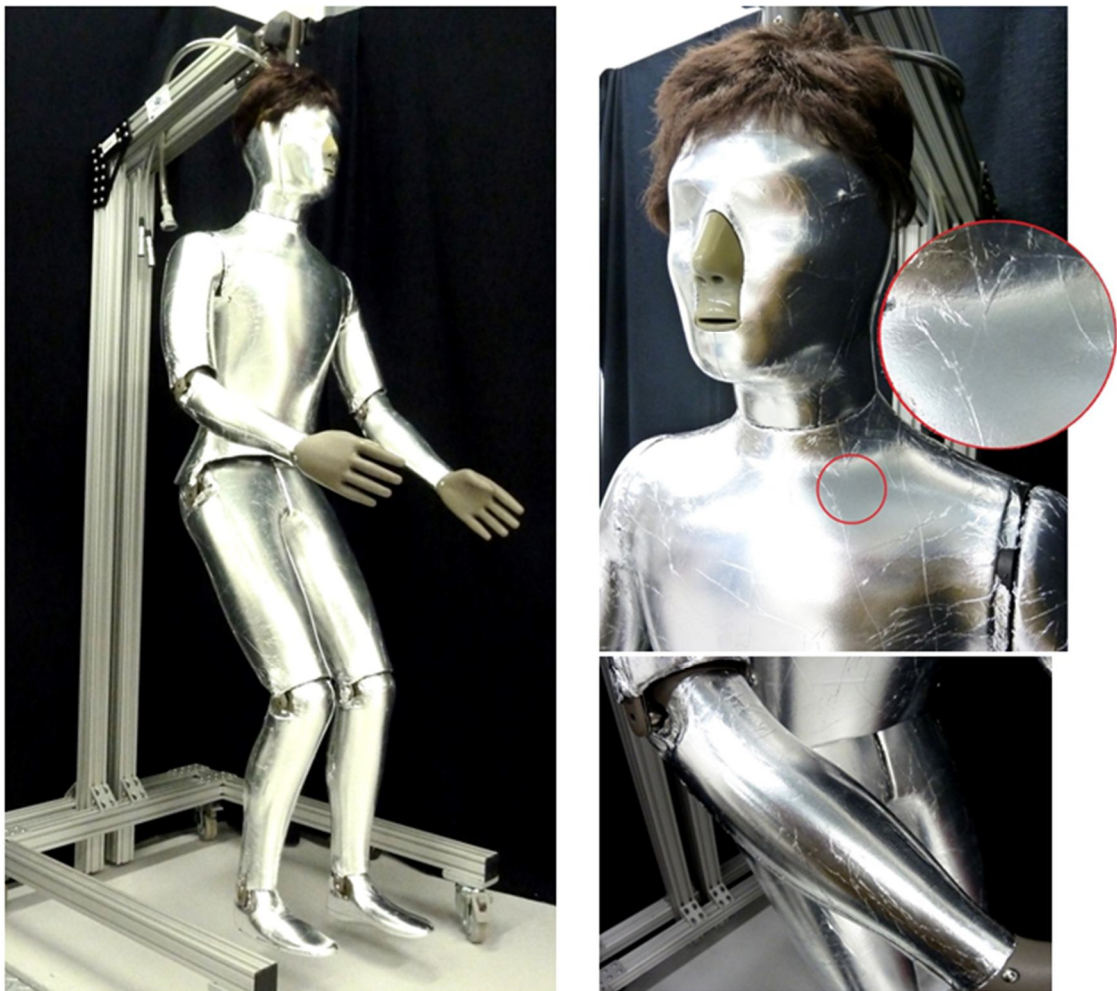
- dostupnosť,
- nízka viskozita lepidla (možnosť nanášať vo veľmi tenkých vrstvách),
- pomalé schnutie lepidla,
- odstrániteľnosť a chemická pasivita voči povrchu manekýna a hliníkovej fólii.

Z širokej palety dostupných adhezív bol vybraný fixačný prášok, lepidlo na zubné protézy (100% alginát sodný), ktoré splňuje všetky uvedené podmienky. Lepidlo je vodou riediteľné a je možné pripraviť lepiacu zmes s rôznou viskozitou, podľa množstva pridaného prášku. Pri práci sa spotrebovalo menej ako 7 g lepidla. Po namiešaní riedkej zmesi lepidla je možné systematickým vyhladzovaním fólie, od stredu nalepovaného miesta, vytlačiť takmer

všetko prebytočné lepidlo a vzduch. To sa potvrdilo i pri odlepovaní fólie, na povrchu manekýna ostal len nepatrný film lepidla, ktorý bol jednoducho odstrániteľný zotretím handričkou.

Opakovaným vyhladzovaním fólie bavlnenou handričkou je možné dosiahnuť jemnú štruktúru povrchu, ktorá je na podklade, teda povrchu manekýna. Na určitých veľmi zakrivených partiách (krk, podpažie atď.) nie je možné úplne eliminovať zvrásnenie fólie, ktoré vzniká jej navrstvením v mieste ohybu (dôsledok nedostatku elasticity). Z praktického pohľadu by tieto lokálne nedokonalosti nemali predstavovať zdroj hrubých chýb metodiky práce (vrásky sú veľmi tenké a tesne priliehajú k povrchu). Výsledné vyhotovenie polepu znázorňuje obr. 16.

Ruky (zóny 11 Right Hand a 12 Left Hand) sa z dôvodu tvarovej členitosti nepoťahovali. Nos a ústa nie sú vyhrievané, a teda ani pokryté fóliou. Časová náročnosť pokrývania jednotlivých partií sa pri dôslednej práci jednej osoby pohybuje v rozmedzí do: 4 h dolná končatina, 3 h horná končatina, 4 h trup, 2 h hlava.



Obr. 16 Potah s nízkou emisivitou, detailný pohľad, tepelný manekýn Newton

Potlačenie radiácie odevu je realizované dvojdielnym oblekom s nízkou emisivitou. Strih obleku je prevzatý zo štandardných dlhých nohavíc a trička s dlhým rukávom. Oblek je zhotovený zo záchranárskej plastovej fólie. Vyhotovenie obleku je zrejmé z obr. 17.

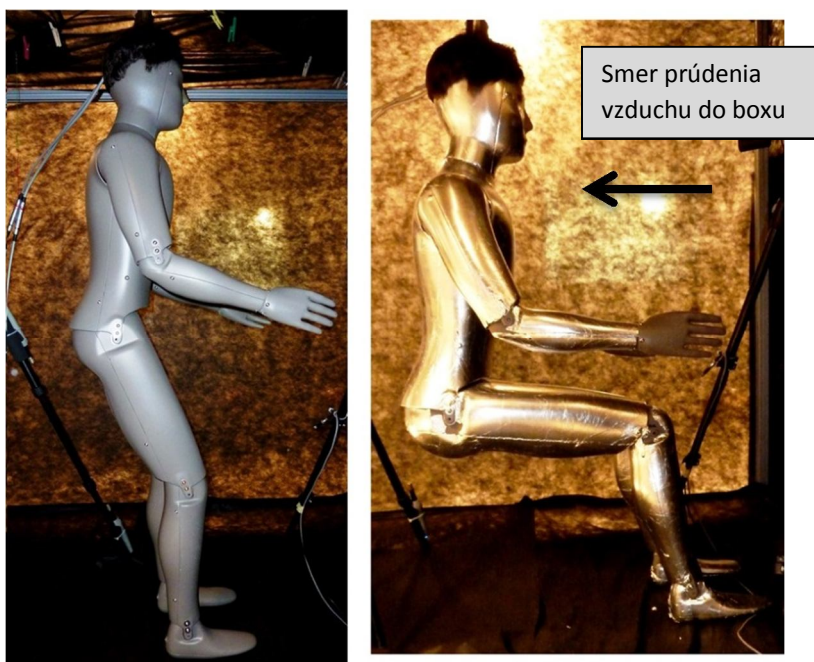
Poznámky z meraní:

Manekýn bol v boxe upevnený zavesením na montážny hák v hlave manekýna. Polohy manekýna, sed a stoj s pripaženými rukami a predlaktiami vo vodorovnej polohe, znázorňuje obr. 18. V týchto polohách sa merali všetky hodnoty, pre nahého a manekýna s poťahom, respektíve oblekom. Manekýn bol v boxe orientovaný tvárou vpred, k výstkam vzduchu klimatizovanej komory. Manekýn sa počas meraní opieral chodidlami (zóny 33 a 34, Right a Left Foot) o drevenú podlahu kalibračného boxu, čím bola zaistená stabilita jeho polohy počas meraní, samotný záves v jednom bode dostatočnú stabilitu neposkytoval.

Počas meraní v sede sa predné časti stehien (zóny 19 R Up Thigh Fr a 22 L Up Thigh Fr) zasunú do tela manekýna a vysunie sa horná časť zadku manekýna (zóny 20 R Up Thigh Grd a 23 L Up Thigh Grd). Pri meraní v polohe „stoj“ sa situácia mení na opačnú. V oboch prípadoch sa zasunuté zóny spravidla deaktivujú a ich povrchová teplota a tepelné toky sa ďalej neskúmajú, i keď ich teplota sa zaznamenáva počítačom.



Obr. 17 Tepelný manekýn Newton s oblekom so zníženou emisivitou

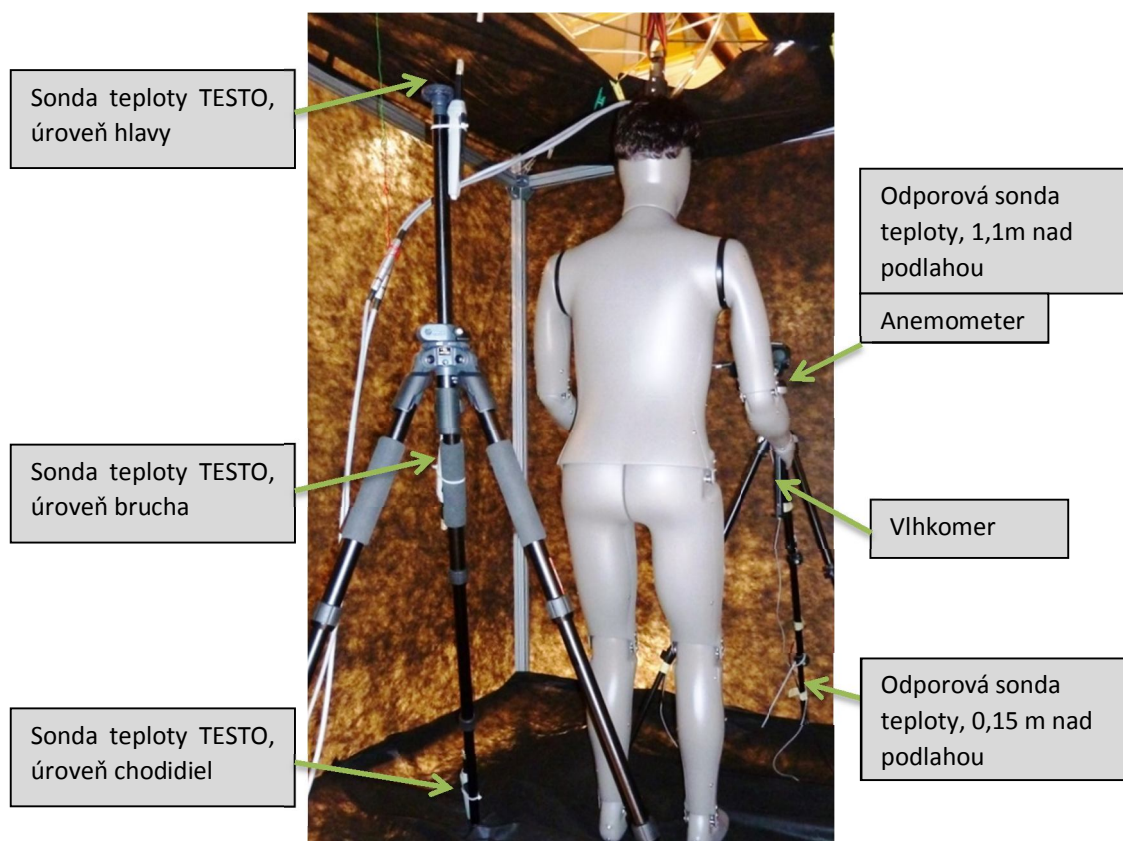


Obr. 18 Polohy manekýna pri meraní, v polohe stoj, je manekýn pred sklopením predlaktí k telu

Časová náročnosť jedného úplného merania sa pohybuje na úrovni piatich hodín. Vzhľadom na časovú vyťaženosť klimateckej komory bolo možné zopakovať každý scenár merania (napr. meranie sed, bez potlačenej radiácie) maximálne trikrát.

7.2.4 Meranie teploty, rýchlosti a vlhkosti vzduchu

Teplota vzduchu je zaznamenávaná tromi nezávislými systémami. Logovanie dát prebieha v perióde jedna sekunda. Obdobne sa zaznamenávajú dáta o vlhkosti a rýchlosti prúdení vzduchu. Úplný prehľad meracích systémov znázorňuje tab. 4 spolu s obr. 19.



Obr. 19 Prehľad umiestnenia sond v kalibračnom boxe

Tab. 4 Meranie teploty rýchlosti a vlhkosti vzduchu, úplný prehľad sond*

Typ sondy	Počet	Presnosť	Rozsah	Umiestnenie
Odporová sonda Pt100 TM Newton	2x	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$	-30 až 80°C	80 cm pred hrud'ou manekýna, 15 a 60 cm nad podlahou boxu
Bezdrôtová sonda TESTO 435-2/-4	3x	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$	-20 až 70°C	Za manekýnom vo výške chodidiel, hrude a hlavy manekýna, v boxe
Bezdrôtová sonda TESTO 435-2/-4	2x	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$	-20 až 70°C	Na ľavej a pravej strane klimateckej komory vo výške 1,4 m
Anemometer - žhavená guľôčka, Value Tester - model 8475	1x	$\pm 1\%$	$0,05$ až $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	80 cm pred hrud'ou manekýna, 80 cm nad podlahou boxu
Sonda relatívnej vlhkosti vzduchu, TN Newton	1x	$\pm 3\%$	0 až 100%	80 cm pred hrud'ou manekýna, 80 cm nad podlahou boxu

*Údaje o sondách sú prebrané z kalibračných listov od výrobcov jednotlivých zariadení.

Poznámky z meraní

Teplota zaznamenaná všetkými teplotnými sondami sa pohybovala v rozmedzí 0,5 K. Z toho možno usudzovať, že teplotná homogenita daná normou ČSN EN ISO 14505-2 [4] je dodržaná. Rýchlosť prúdenia je meraná anemometrickou sondou so žhavenou guľôčkou a pohybuje sa na úrovni 0,05 až 0,1 m.s⁻¹. Meranie vlhkosti má len orientačný charakter, jej úroveň norma neuvádza. Nepredpokladá sa zásadné ovplyvnenie merania pôsobením zmeny relatívnej vlhkosti. Relatívna vlhkosť počas meraní bola nízka, v rozmedzí hodnôt 20 až 30%.

8 SPRACOVANIE DÁT A VÝSLEDKY Z MERANÍ

V tejto kapitole sú zhrnuté spracované dáta z meraní. Každý scenár merania je popísaný zvlášť v príslušnej podkapitole. Pozornosť je venovaná i výpočtu neistôt meraní, ktoré boli spracované na základe odporúčaní konzultanta tejto práce.

8.1 Rozbor neistôt meraní

Rozbor neistôt nameraných hodnôt slúži k zhodnoteniu spoľahlivosti meraní a je nutné ho vykonať spolu s vyhodnotením postupu spracovania nameraných výsledkov. Neistota charakterizuje rozsah hodnôt, v ktorom sa s danou pravdepodobnosťou meraná veličina nachádza a je pridelená ku každému výsledku. Stanovenie tohto parametru je možné dosiahnuť nasledujúcimi dvomi spôsobmi [23]:

- neistota typu A - u_{Ay} - reprezentuje štatistické spracovanie zmeraných údajov
- neistota typu B - u_{By} - predstavuje iné než štatistické spracovanie zmeraných údajov

Interpretáciou článkov Palenčára a kol. [23, 24, 25], tak možno povedať, že neistoty typu A popisujú náhodné „chyby“, ktoré vznikli v priebehu meraní kolísaním nameraných údajov. Naopak neistoty typu B „postihujú chyby“ meracieho reťazca, prameniace z nedosiahnuteľnosti absolútne presných merní. Pre potreby tejto práce je potrebné stanoviť oba typy neistôt, A a B, teda celkovú neistotu merania. Výpočet celkovej neistoty merania sa realizuje podľa nasledovnej rovnice:

$$u_{Cy} = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2} \quad (23)$$

Celková neistota daná rovnicou (23) je označovaná ako základná neistota. Základná neistota reprezentuje interval, v ktorom sa s pravdepodobnosťou cirka 68% nachádza daná veličina. Toto tvrdenie platí iba v prípade normálneho rozdelenia meraných (vypočítaných veličín). Predpokladá sa, že nami zmerané dáta majú povahu normálneho rozdelenia [26].

V prípade, že je potrebné zaistiť vyššiu pravdepodobnosť pokrytia danej veličiny, je potrebné základnú neistotu rozšíriť koeficientom rozšírenia k_r , jeho význam je zhodný s významom kvantilov Gaussovho rozdelenia [23]. Rozšírenie na 95% pravdepodobnosť vyžaduje $k_r = 2$, ďalšie rozšírenie na 99,7% pravdepodobnosť pokrýva $k_r = 3$. Táto práca bude ďalej počítať s $k_r = 2$, teda s 95% pravdepodobnosťou. Rozšírená neistota je daná vzťahom:

$$U = k_r \cdot u_{Cy} \quad (24)$$

Vyjadrenie neistoty typu A sa obvykle používa vzorec (25). Výsledná hodnota neistoty typu A je, okrem výberovej smerodajnej odchýlky aritmetického priemeru danej veličiny, závislá i na počte opakovaní meraní. Ak je zrealizovaných menej ako 10 meraní je nutné aplikovať bezpečnostný faktor k_{uA} . Prehľad hodnôt bezpečnostného faktoru v závislosti na počte opakovaní merania n udáva tab. 5 [27].

Tab. 5 Hodnoty bezpečnostného faktoru k_{uA} , v závislosti na počte meraní n [27]

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_{uA}	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

$$u_{Ay} = k_{uA} \cdot \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (25)$$

Kde:

u_{Ay} výsledná neistota typu A, veličiny y

k_{uA} bezpečnostný faktor, vid' tab. 5

n počet opakovaní meraní veličiny y

y_i hodnota i -tej zmeranej veličiny y

\bar{y} aritmetický priemer z počtu i zmeraných veličín y

Počet meraní bol limitovaný časovou vyťaženosťou klimatickej komory. Boli uskutočnené 3 merania z každého prípadu. Táto práca operuje s bezpečnostným faktorom $k_{uA} = 2,3$.

Vyjadrenie neistoty typu B je relatívne zložité. Ak nie je dostupný kalibračný list s uvedenou neistotou, je nutné neistotu určiť fundovaným odhadom, podložený skúsenosťami s danými meracími zariadeniami. Vzhľadom na zložitosť meracieho reťazca, použitého pre potreby tejto práce, sa neistota typu B neurčuje.

Určenie neistoty typu B je detailne popísané napr. v článkoch Palenčára [23, 24, 25].

Neistoty nepriamych meraní

Neistoty nepriamych meraní boli vyhodnotené za predpokladu, že výsledky meraní nie sú vzájomne korelované, k meraniu každej veličiny sa používajú individuálne snímače. Hoci sú analógové dáta prevedené do digitálnej formy zariadením od jedného výrobcu, mieru korelácie nie je možné bližšie analyzovať.

Odchýlky či neistoty nepriamych meraní nezávislých veličín sú funkciou odchýlok či neistôt jednotlivých veličín, z ktorých sa výsledná veličina počíta. Ak je výsledná veličina y funkciou veličín $a, b, c \dots$, možno z teórie chýb určiť odchýlku (neistotu) u_y , veličiny y , vid' nasledovné rovnice (26) a (27) [28].

$$y = f(a, b, c \dots) \quad (26)$$

$$u_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} u_a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} u_b\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} u_c\right)^2 + \dots} \quad (27)$$

Systematické chyby

Systematické chyby sú spôsobené zvolenou meracou metódou, chybnou aparatórou alebo neznalosťou či nedostatočnými schopnosťami obsluhy apod. Chybné výsledky možno odhaliť porovnaním nameraných hodnôt s výsledkami meraní inou metódou, rozborom zvolenej metódy merania atd. Systematické chyby možno korigovať [28].

Zvolený postup riešenia má isté obmedzenia v presnosti a zanesení systematických chýb do výsledkov merania. Nasledovné odstavce sa venujú ich rozboru.

Potlačenie radiácie sa vykonalo hliníkovou a plastovou reflexnou fóliou. Dlhovlnná emisivita týchto povrchov sa pohybuje podľa zdrojov [6, 18, 36] v rozmedzí 0,02 až 0,1.

Z toho plynie, že aplikácia týchto povrchov radiačný tok z povrchu manekýna zníži, ale neeliminuje na nulu. „Zostatkový“ radiačný tok sa pohybuje rádovo v jednotkách wattov. Presné určenie tohto toku je problematické, hlavne z dôvodu obtiažneho výpočtu uhlových faktorov. Predpokladá sa, že „zostatkový“ radiačný tok nemá zásadný vplyv na výsledky merania.

Určité ovplyvnenie výsledkov, pridanou vrstvou materiálu s nízkou emisivitou, možno očakávať vo forme navýšenia tepelného odporu na povrchu manekýna a ovplyvnenia konvekcie zmenou štruktúry povrchu. Predpokladá sa, že tieto vplyvy sú z praktického uplatnenia výsledkov práce zanedbateľné. Výsledky práce sa nekorigujú na systematické chyby merania.

8.2 Manekýn bez odevu

Merania v polohe „sed“ a „stoj“ znázorňuje obr. 18. Manekýn zaujíma postoj s predlaktami rovnobežnými s rovinou podlahy iba v sede. Táto poloha bola zvolená pre meranie, pretože reprezentuje typické usporiadanie tela pri kancelárskej práci alebo pri vedení motorového vozidla. Obr. 18 znázorňuje polohu manekýna v stoji pred sklopením rúk k telu. Polohy korešponujú s ďalším využitím výsledkov, pre výskum tepelného komfortu kabín dopravných prostriedkov, na pracovisku OTTP.

Dáta z meraní boli spracované pre jednotlivé zóny manekýna a segmenty (s výnimkou rúk, zóny R Hand a L Hand). Podľa názvoslovia normy „14505-2“ [4] je segmentom mienená senzorová časť figuríny, obvykle odpovedajúca skutočnej časti tela, pozostávajúca z jednej alebo viacerých celých zón, vid' tab. 6. Za predpokladu, že zóny jedného segmentu majú rovnakú povrchovú teplotu, je možné pomocou váženého priemeru tepelných tokov jednotlivými zónami stanoviť výsledný tepelný tok jedným segmentom. Váhami pre výpočet váženého priemeru sú plochy jednotlivých zón.

Tab. 6 je vytvorená autorom tejto práce, skladba segmentov, hlavne v oblasti chrbta, sa môže líšiť od spracovania iných autorov.

Segmenty poskytujú globálnejší pohľad na problematiku prestupu tepla z jednotlivých častí tela, než jednotlivé zóny. Naopak, pre potreby detailného popisu prenosu tepla z povrchu ľudského tela je možné využiť komplexný prehľad všetkých zón.

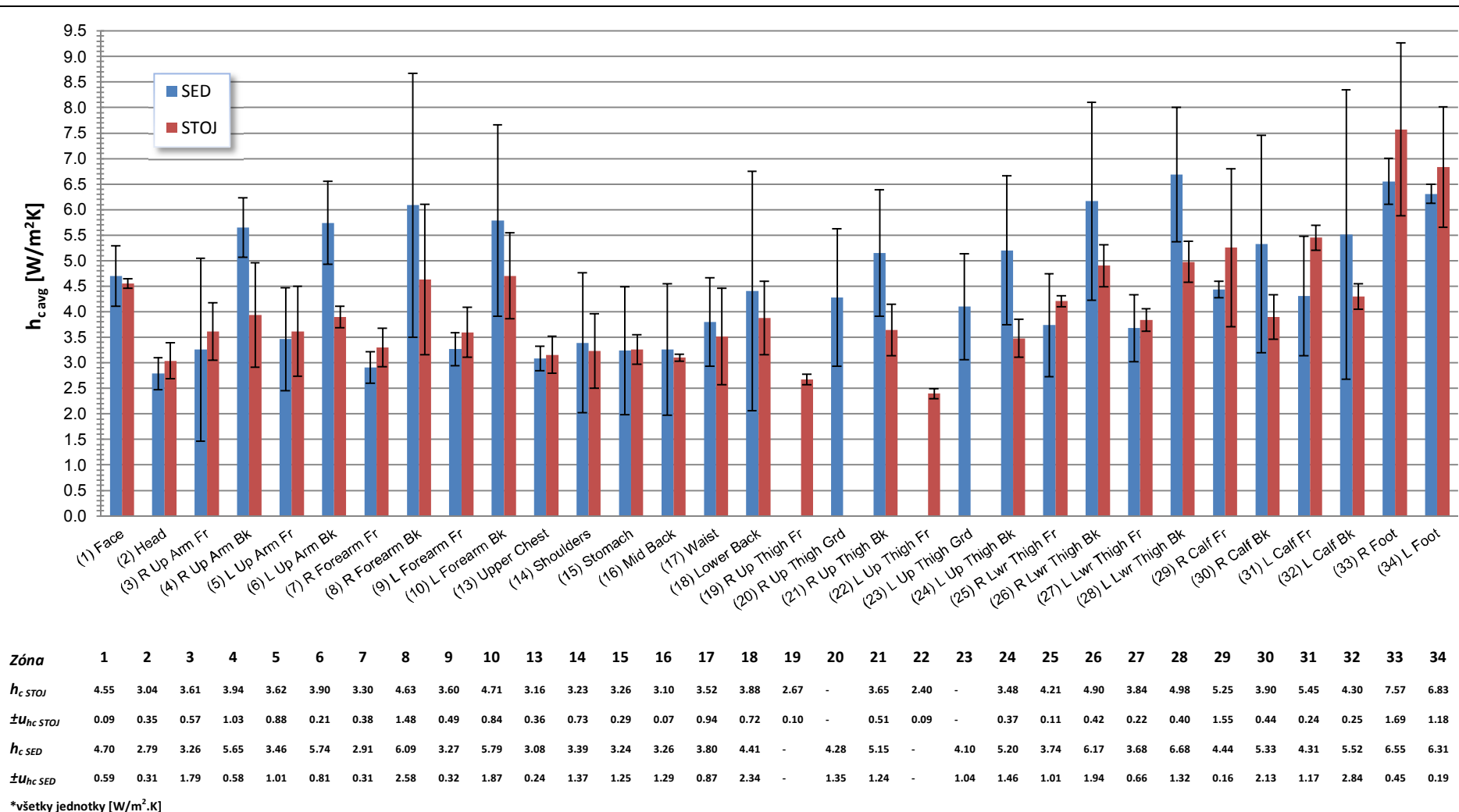
Pre prehľadnosť sa párové časti tela v tab. 6 uvádzajú len pre pravú časť tela, ľavé párové časti sú definované analogicky. V polohe sed a stoj sa segmenty „Seat“ a „Thigh“ odlišujú v skladbe zón, vid' poznámky z meraní, kapitola 7.2.3.

Tab. 6 Prehľad segmentov a ich skladba

Segment	Zóny
Face (Tvár)	Face
Head (Hlava)	Head
R Up Arm	R Up Arm Fr
(P paža)	R Arm Bk
R Forearm	R Forearm Fr
(P predlaktie)	R Forearm Bk
Chest comb.	Up Chest
(Hrud')	Stomach
Up back comb.	Shoulders
(Chrbát horný)	Mid Back
Low back comb.	Waist
(Chrbát spodný)	Lower Back
R Thigh - SED	R Lwr Thigh Fr
(P stehno)	R Lwr Thigh Bk
R Thigh - STOJ	R Up Thigh Fr
(P stehno)	R Lwr Thigh Fr & Bk
Seat - SED	L & R Up Thigh Grd
(Zadok)	L & R Up Thigh Bk
Seat - STOJ	R Up Thigh Bk
(Zadok)	L Up Thigh Bk
R Calf	R Calf Fr
(P lýtko)	R Calf Bk
R Foot	
(P chodidlo)	R Foot

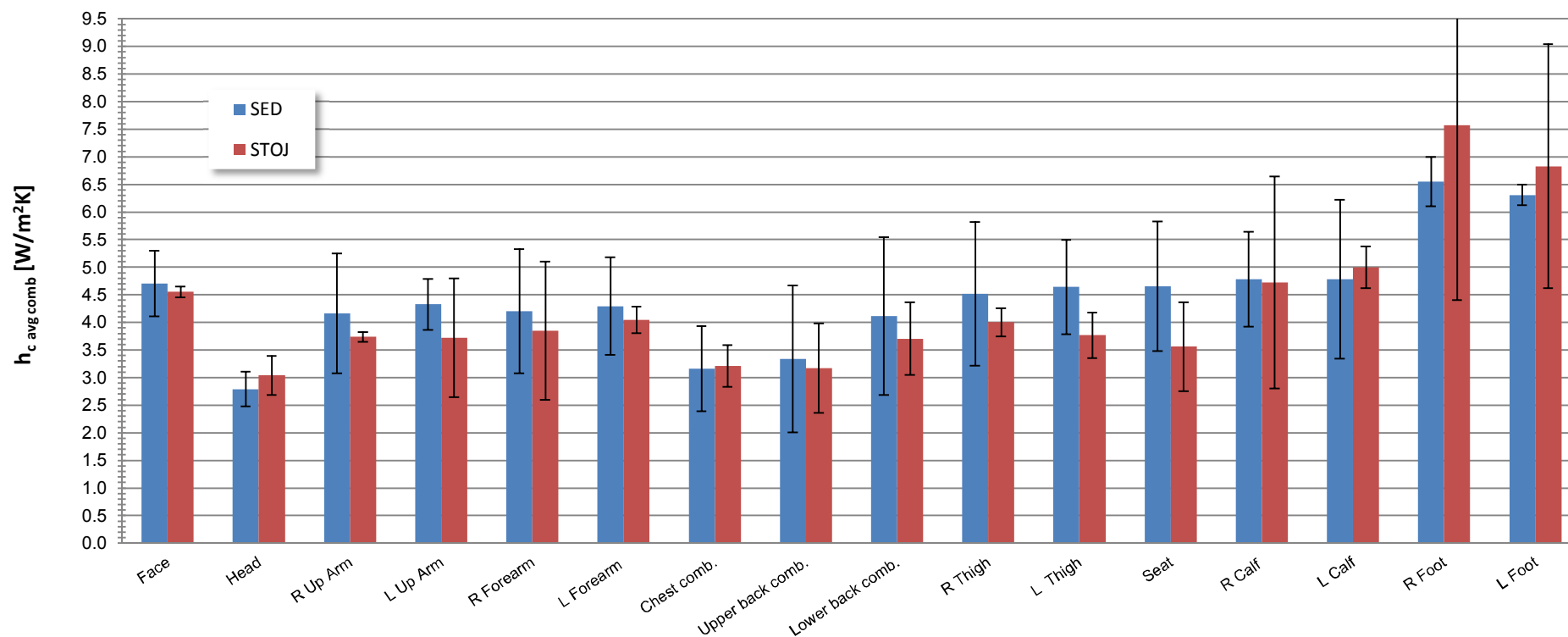
8.2.1 Súčinitele prestupu tepla konevkciov, úplný prehľad jednotlivých zón

Tab. 7 Súčinitele prestupu tepla konvekciou, priemerné hodnoty - úplný prehľad jednotlivých zón, poloha sed a stoj, zobrazenie chybových úsečiek rozšírených neistôt typu A



8.2.2 Súčinitele prestupu tepla konevkciov, prehľad jednotlivých segmentov

Tab. 8 Súčinitele prestupu tepla konvekciou, priemerné hodnoty - prehľad jednotlivých segmentov, poloha sed a stoj, zobrazenie chybových úsečiek rozšírených neistôt typu A

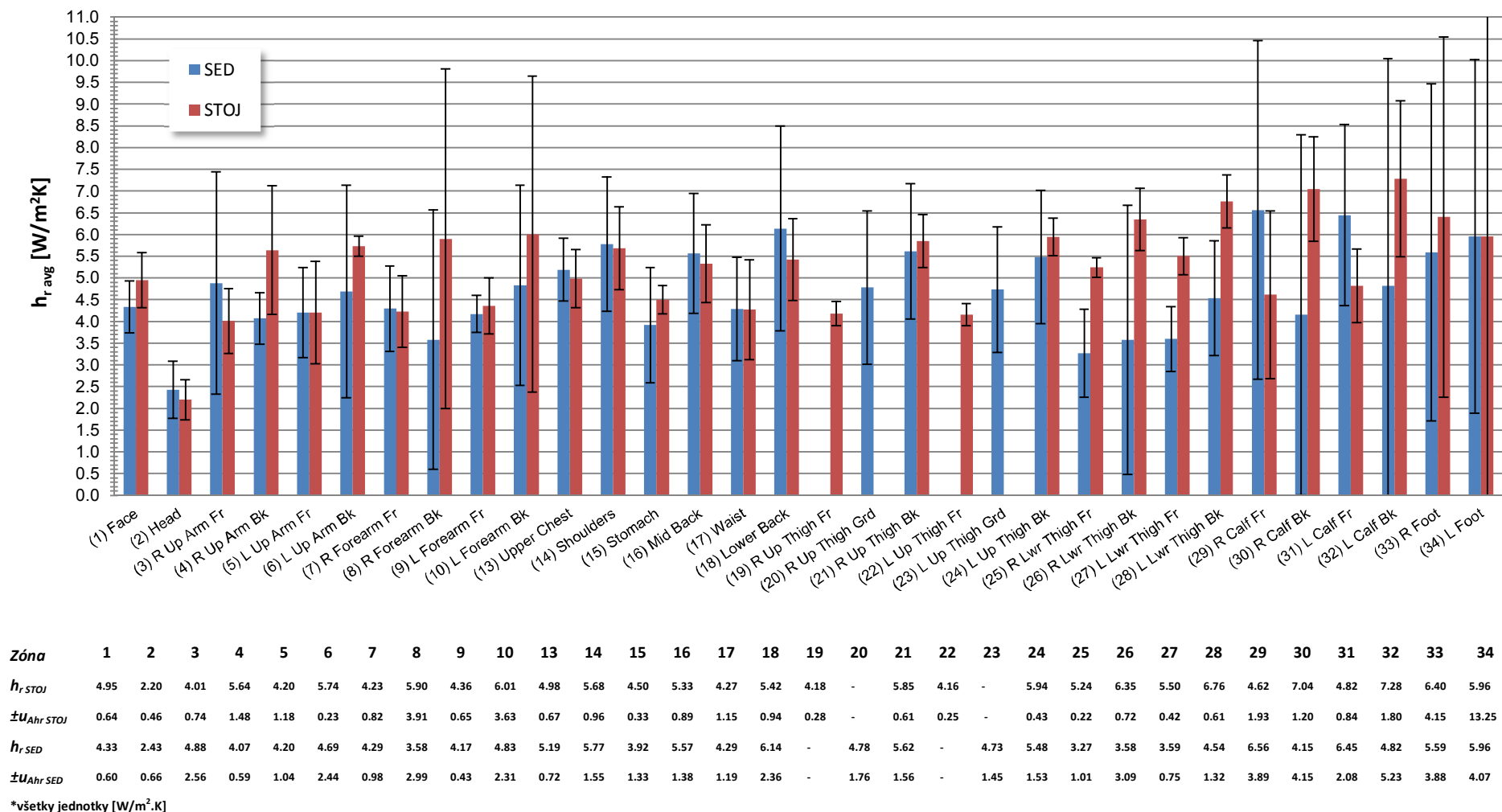


Segment	Face	Head	R Up Arm	L Up Arm	R Forearm	L Forearm	Chest comb.	Up back comb.	Low back comb.	R Thigh	L Thigh	Seat	R Calf	L Calf	R Foot	L Foot
$h_{c\ STOJ}$	4.55	3.04	3.74	3.72	3.85	4.05	3.21	3.17	3.70	4.00	3.77	3.56	4.72	5.00	7.57	6.83
$\pm u_{h_{c\ STOJ}}$	0.09	0.35	0.09	1.08	1.25	0.24	0.38	0.81	0.66	0.25	0.41	0.81	1.92	0.38	3.17	2.21
$h_{c\ SED}$	4.70	2.79	4.16	4.33	4.20	4.29	3.16	3.33	4.11	4.52	4.64	4.65	4.79	4.78	6.55	6.31
$\pm u_{h_{c\ SED}}$	0.59	0.31	1.08	0.46	1.12	0.89	0.77	1.33	1.43	1.30	0.86	1.17	0.86	1.44	0.45	0.19

*všetky jednotky [W/m².K]

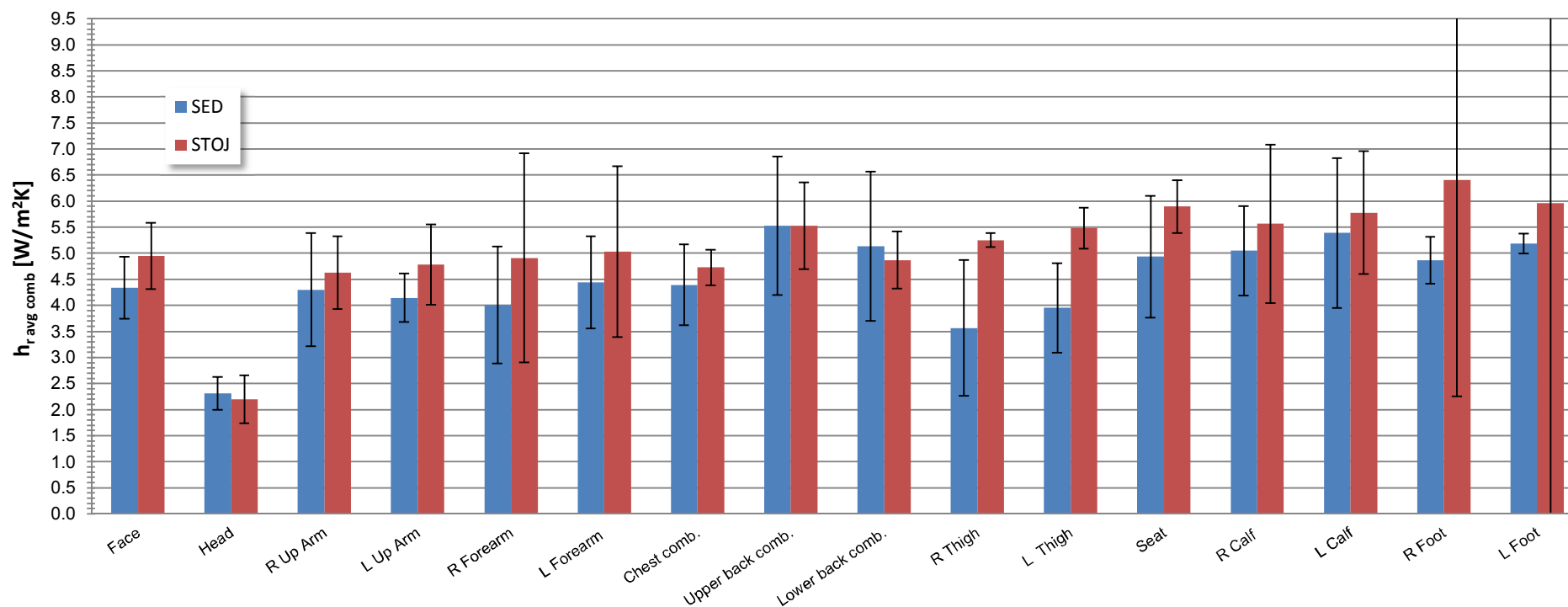
8.2.3 Súčinitele prestupu radiáciou, úplný prehľad jednotlivých zón

Tab. 9 Súčinitele prestupu tepla radiáciou, priemerné hodnoty - úplný prehľad jednotlivých zón, poloha sed a stoj, zobrazenie chybových úsečiek nepriamych neistôt



8.2.4 Súčinitele prestupu tepla radiáciou, prehľad jednotlivých segmentov

Tab. 10 Súčinitele prestupu tepla radiáciou, priemerné hodnoty - prehľad jednotlivých segmentov, poloha sed a stoj, zobrazenie chybových úsečiek nepriamych neistôt



Segment	Face	Head	R Up Arm	L Up Arm	R Forearm	L Forearm	Chest comb.	Up. back comb.	Low. back comb.	R Thigh	L Thigh	Seat	R Calf	L Calf	R Foot	L Foot
$h_{r,STOJ}$	4.95	2.20	4.63	4.78	4.91	5.03	4.73	5.52	4.87	5.25	5.48	5.90	5.57	5.78	6.40	5.96
$\pm u_{Ahr,STOJ}$	0.64	0.46	0.70	0.77	2.01	1.64	0.34	0.83	0.55	0.14	0.39	0.51	1.52	1.18	4.15	13.25
$h_{r,SED}$	4.34	2.31	4.30	4.15	4.01	4.44	4.39	5.53	5.13	3.56	3.95	4.93	5.05	5.39	4.86	5.19
$\pm u_{Ahr,SED}$	0.60	0.66	1.56	1.07	1.13	0.97	0.95	1.47	1.52	1.52	0.89	1.45	3.82	3.10	3.88	4.07

*všetky jednotky [W/m².K]

8.3 Manekýn s odevom

Z času vyhradeného na túto prácu, sa meranie s oblekom s nízkou emisivitou nepodarilo úspešne vyriešiť. Počas riešenia tejto úlohy došlo k nasledujúcim problémom

1. Oblek s nízkou emisivitou vytvára dodatočný tepelný odpor. Samotný tepelný odpor materiálu obleku je možné korigovať. Sťaženie prináša nedokonalé priľnutie obleku k oblečeniu manekýna, kde vznikajú vzduchové vrstvy s premenlivou hrúbkou, vid' obr. 20. Vzniknuté vzduchové medzery navyšujú tepelný odpor v miere, ktorú nie sme schopný dostatočne presne definovať, čo kompromituje opakovateľnosť merania.
2. Fólia, z ktorej je oblek zostrojený, má povrch s nízkou emisivitou z oboch strán. Vo výsledku to znamená, že dochádza k spätnému odrazu žiarenia na povrch manekýna.
3. Fólia je nepriehľadná. Napriek tomu, že sa skúmajú „suché“ tepelné straty manekýna (bez potenia), je možné predpokladať určité ovplyvnenie konvekcie a vzniku konvektívnych prúdov.



Obr. 20 Detail obleku s nízkou emisivitou

Odstránenie týchto nedostatkov, by mohlo byť v budúcnosti realizované špeciálnym nástrekom s nízkou emisivitou, priamo na odev manekýna. Riešenie tejto úlohy je možné i prístupom s potlačenou konvekciou, vyrovnaním teplôt povrchu manekýna a vzduchu, pri súčasnej regulácii strednej radiačnej teploty okolitého prostredia. Potrebné technické zázemie pre vytvorenie takýchto podmienok nie je dostupné.

9 DISKUSIA

Diskusia sa zaoberá súčiniteľmi prestupu tepla z povrchu manekýna bez odevu. Zhodnotené sú súčinitele prestupu tepla radiáciou a konvekciou, v polohe manekýna sed a stoj.

9.1 Súčinitele prestupu tepla konvekciou

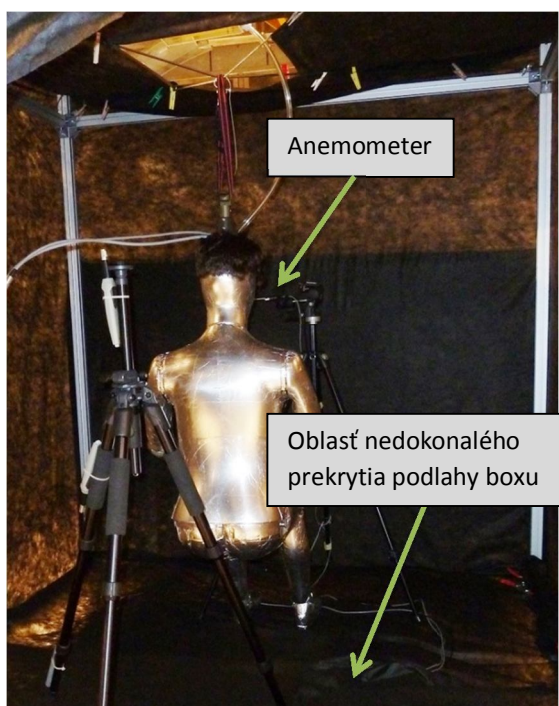
Pre interpretáciu výsledkov merania, je nutné porozumieť dejom prebiehajúcim pri prenose tepla konvekciou. V podmienkach prirodzenej konvekcie, v kludnom vzduchu, je pohyb tekutiny spôsobený rozdielom jej hustôt a dá sa predpokladať, že rôzne časti tela budú ochladzované rôzne, v závislosti na ich polohe voči konvektívnemu prúdu. V prípade tejto práce, prúd vzduchu vstupuje cez stenu kalibračného boxu a smeruje na prednú (tvárovú) časť manekýna. Súčasne v okolí manekýna vzniká stúpacý konvektívny prúd, ktorý má vplyv na výsledný smer prúdenia vzduchu. Vzhľadom na nízku rýchlosť prúdenia vzduchu môžeme usudzovať, že sa jedná o prípad na pomedzí prirodzenej a nútenej konvekcie. Problematické je i určenie režimu prúdenia, ktoré je možné stanoviť Reynoldsovým číslom. Reynoldsovo číslo udáva pomer zotrvačných a viskózných síl, pre jeho vyčíslenie je potrebné poznať rýchlosť prúdenia tekutiny. Rýchlosť vzduchu bola meraná len v jednom bode boxu, čo udáva nedostatočnú informáciu o priestorovom rozložení rýchlostí v boxe.

Výsledky meraní súčiniteľov prestupu tepla konvekciou ukazujú, že náveterná (tvárová) strana manekýna vykazuje najlepšiu zhodu výsledkov opakovaných meraní. Tento jav reflektuje relatívne malý rozptyl zmeraných hodnôt. Tieto tvrdenia dokazuje tab. 7, 8 zóny (1) tvár, (7, 9) predlaktia predné, (13) hrud', atd. Ako možným vysvetlením sa javí rovnomerné prúdenie, ktoré rovnomerne odvádza teplo z povrchu týchto zón, resp. segmentov.

Opačný jav nastáva na záveternej strane manekýna, kde sa predpokladá vznik úplavov, vírenia, ktoré má negatívny vplyv na stabilitu prenosu tepla konvekciou. Prejavom je zvýšená fluktuácia prúdenia a zároveň tepelného toku, čo dokazuje veľký rozptyl hodnôt. Tento jav je možné pozorovať napr. v oblasti chrbta manekýna, zadných stehien apod. Fluktuáciu tepelných tokov na záveternej strane pozoroval pri svojich experimentoch i De Dear [6].

Vznik stúpacého konvektívneho prúdu sa prejavuje zvýšenou mierou prenosu tepla na predlaktiach manekýna v polohe sed. Predlaktia v sede sú nastavené vo vodorovnej polohe, čím dochádza k intenzívnejšiemu prúdeniu vzduchu, v porovnaní s manekýnom v stoj, kedy sú predlaktia pri tele. Podobný jav v sede nastáva i na segmentoch stehien a zadku manekýna, ktorý je rovnako zasiahnutý vznikajúcim stúpacým prúdom od lýtok.

Veľmi malý rozdiel hodnôt súčiniteľov prestupu tepla párových častí manekýna naznačuje vytvorenie symetrických podmienok mera-



Obr. 21 Dokumentácia vzniku hrubej chyby merania v oblasti lýtok a chodidiel

nia a potvrdzuje opakovateľnosť merania s tepelným manekýnom.

Výrazne vysoký rozptyl hodnôt meraní na lýtkach a chodidlách, ukazujú na hrubé chyby merania. Analýzou fotodokumentov z meraní, bolo zistené, že došlo k nedokonalému prekrytiu podlahy, ktorá pozostáva z dvoch dielov netkanej textílie, vid' obr. 21, v mieste vedenia kabeľáže k sondám. Vplyvom relatívne intenzívneho prúdenia vzduchu v klimatickej komore, došlo pravdepodobne k vzdúvaniu podlahy a priamemu lokálnemu ofukovaniu v oblasti lýtok a chodidiel. Prúd vzduchu nebol zachytený anemometrom, lebo je umiestnený pred hrudníkom manekýna.

V tab. 11 sú porovnané priemerné hodnoty merania súčiniteľov prestupu tepla konvekciou s meraniami De Deara [6]. Dostupné sú hodnoty pre 16 segmentov, členenie segmentov sa čiastočne líši od členenia tejto práce. Napriek tomu sa toto porovnanie výsledkov javí ako najvhodnejšie z pohľadu rovnakej metodiky oboch prác. Manekýn Newton sa od manekýna „Monika“, použitého vo výskume De Deara, líši mierne vzrastom (predstavuje ženské telo). Určitý rozdiel vo výsledkoch je zreteľný na hlave, ktorú má „Newton“ pokrytú umelými vlasmi. Manekýn „Monika“ vlasovú pokrývku nemá.

Tab. 11 Porovnanie hodnôt súčiniteľov prestupu tepla konvekciou s De Dearom [6], sed a stoj

SEGMENT	$h_{c \text{ avg STOI}}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	$h_{c \text{ avg SED}}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	SEGMENT De Dear	$h_{c \text{ STOI De Dear}}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	$h_{c \text{ SED De Dear}}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]
Face	4,55	4,70	Head	3,6	3,7
Head	3,04	2,79	Upper arm L&R	2,9	3,4
R Up Arm	3,74	4,16	Forearm L&R	3,7	3,8
L Up Arm	3,72	4,33	Chest	3,0	3,0
R Forearm	3,85	4,20	Back	2,9	2,6
L Forearm	4,05	4,29	Thigh L&R	4,1	3,7
Chest comb.	3,21	3,16	Pelvis	3,4	2,8
Upper back comb.	3,17	3,33	Lower leg L&R	4,1	4,0
Lower back comb.	3,70	4,11	Foot L&R	5,1	4,2
R Thigh	4,00	4,52			
L Thigh	3,77	4,46			
Seat	3,56	4,65			
R Calf	4,72	4,79			
L Calf	5,00	4,78			
R Foot	7,57	6,55			
L Foot	6,83	6,31			

Výsledky tejto práce a práce De Deara sa čiastočne líšia, ale je v nich možné pozorovať podobný trend nameraných hodnôt. Najvyššie hodnoty súčiniteľov prestupu tepla konvekciou sú zistené na tvári a končatinách. Naopak, trup vykazuje najnižšie hodnoty.

De Dear [6] vo svojej práci neuvádza počet opakovaní jednotlivých meraní, ani hodnoty neistôt meraní.

9.2 Súčinitele prestupu tepla radiáciou

Súčinitele prestupu tepla radiáciou sú zhrnuté v tab. 9 a 10. Súčinitele sú dopočítané z rozdielu zloženého a konvektívneho tepelného toku. Výsledky sú tak zaťažené súčtom štvorcov neistôt oboch meraní, čo sa prejavilo zväčšením jednotlivých neistôt meraní súčiniteľov prestupu tepla radiáciou.

Výsledky merní potvrdzujú predpoklad, že manekýn v stoji vyžaruje väčšie množstvo energie než v sede. V sede má manekýn menšiu efektívnu radiačnú plochu. To korešponduje s teóriou uhlových faktorov, telo manekýna „lepšie vidí“ okolie v stoji než v sede.

Výsledky meraní súčiniteľov prestupu tepla z lýtok a chodidiel sú zaťažené hrubou chybou merania a nie je ich možné považovať za platné hodnoty.

Tab. 12 Porovnanie hodnôt súčiniteľov prestupu tepla radiáciou, sed a stoj, s De Dearom [6]

SEGMENT	$h_{r, \text{avg}}^{\text{STOJ}}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	$h_{r, \text{avg}}^{\text{SED}}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	SEGMENT De Dear	$h_{r, \text{STOJ}}^{\text{De Dear}}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]	$h_{r, \text{SED}}^{\text{De Dear}}$ [W.m ⁻² .K ⁻¹]
Face	4,95	4,34	Head	4,1	3,9
Head	2,20	2,31			
R Up Arm	4,63	4,40	Upper arm L&R	5,2	4,8
L Up Arm	4,78	4,15			
R Forearm	4,91	4,01	Forearm L&R	4,9	5,2
L Forearm	5,03	4,44			
Chest comb.	4,73	4,39	Chest	4,5	3,4
Upper back comb.	5,25	5,53	Back	4,4	4,6
Lower back comb.	4,87	5,13			
R Thigh	5,25	3,56	Thigh L&R	4,3	4,6
L Thigh	5,48	3,95			
Seat	5,90	4,93	Pelvis	4,2	4,8
R Calf	5,57	5,05	Lower leg L&R	5,3	5,4
L Calf	5,78	5,39			
R Foot	6,40	4,86	Foot L&R	3,9	4,2
L Foot	5,96	5,19			

Rozdiely medzi výsledkami De Deara [6] a tejto práce sú opäť ovplyvnené rozdielmi v geometrii manekýnov, polohou končatín, ich rozstupom atd. Napriek tomu možno konštatovať reprodukovateľnosť merania. Rovnako možno konštatovať zhodu výsledkov, ktoré sa pohybujú v rozmedzí do 1 W/m².K, na segmente L & R Thigh. V ostatných prípadoch sa hodnoty odlišujú do 0,5 W/m².K.

Značné odchýlky stanovených hodnôt súčiniteľov prestupu tepla radiáciou a konvekciou popisujú i iní autori, ktorí využili rôzne prístupy meraní [6, 8, 34].

10 ZÁVER

Cieľom predloženej práce je stanovenie súčiniteľov prestupu tepla radiáciou a konvekciou z povrchu tepelného manekýna. Ťažisko problematiky leží v separovaní tepelných tokov, radiácie a konvekcie, z povrchu tepelného manekýna.

V prvej časti práce bola popísaná problematika vzniku metabolického tepla. Táto téma sa viaže na popis distribúcie tepla v rámci ľudského tela a z jeho povrchu do okolia (pasívny systém). Načrtnutý bol i princíp termoregulácie človeka, aktívny systém riadenia teploty tela.

Ďalšia časť práce sa zaoberá rešeršou metód pre stanovenie súčiniteľov prestupu tepla radiáciou a konvekciou. Boli zistené tri hlavné smerovania výskumu prenosu tepla z povrchu (človeka) manekýna, využívajúce: alfametre, sublimáciu naftalénu a vyhrievaného manekýna. Samostatné čidlá s integrovaným zahrievaním rovnako predstavujú možnosť riešenia tejto úlohy, v dostupnej literatúre však neboli zistené príklady takéhoto využitia. Pozornosť bola venovaná popisu jednotlivých metód a histórii aplikácie tepelných manekýnov. Na základe teoretických poznatkov z rešerše bolo navrhnuté konkrétne riešenie práce. Výber zohľadňoval dostupnosť, presnosť a opakovateľnosť zvolenej metódy. Pre riešenie úlohy bol zvolený tepelný manekýn Newton, potlačenie radiačného tepelného toku prebiehalo formou potažhu so zníženou emisivitou. Prínosom k presnosti a opakovateľnosti je fakt, že pracovisko OTTP má niekoľkoročné praktické skúsenosti s prácou s manekýnom Newton. Podmienky experimentálnej práce sa riadili normou ČSN EN ISO 14505-2 [4], v kombinácii s poznatkami z práce HO. Nilssona [7]. Pre splnenie podmienok merania uvedených zdrojov [4, 7], bol zhotovený kalibračný box, vložený do klimatickej komory, čím bolo dosiahnuté dostatočné priblíženie k požadovaným hodnotám teplôt a rýchlosti prúdenia vzduchu. Detailnému popisu experimentálnej metódy a potrebného vybavenia sa venuje samostatná kapitola.

Spracovaním nameraných dát sa zaoberá kapitola 8. Popísaný je rozbor neistôt merania, kde bol zvolený koeficient rozšírenia $k_r = 2$, teda s 95% pokrytím pravdepodobnosti. Spracované dáta boli vynesené do grafov a zaznamenané do tabuliek. V čase, vyhradenom na túto prácu, sa nepodarilo odstrániť nedostatky metódy, využívajúcej pre potlačenie radiácie oblek so zníženou emisivitou. Riešením do budúcnosti by mohla byť aplikácia určitého reflexného nástreku priamo na odev manekýna alebo použitie iného prístupu.

Diskusii sa venuje samostatná kapitola. Merania potvrdili teoretické predpoklady prenosu tepla radiáciou a konvekciou. Dáta boli porovnané s výskumom De Deara [6], ktorý využíval obdobnú metodiku práce, avšak iný typ manekýna. Boli zistené analogické trendy vývoju dát. Číselné hodnoty sa pohybujú v rozmedzí $\pm 0,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, s extrémom $\pm 1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Vzhľadom na rozdiely použitého experimentálneho vybavenia možno konštatovať reprodukovateľnosť merania a platnosť výsledkov. Na základe vysokého rozptylu hodnôt, v oblasti lýtok a chodidiel, boli identifikované nekorektné hodnoty súčiniteľov prestupu tepla. Tieto hodnoty nie je možné považovať za platné.

Vyťaženie klimatickej komory umožňovalo meranie každého prípadu maximálne 3x. Tento fakt sa podpísal na relatívne vysokých hodnotách neistôt meraní. Optimálne by bolo meranie každého prípadu aspoň 5x. Rovnako, použitá metóda vnáša do výsledkov meraní systematické chyby (navýšenie tepelného odporu, nenulové emisivity atď.), ktoré by mohli byť eliminované, napríklad aplikáciou prístupu potlačenej konvekcie. Tento prístup však vyžaduje zariadenie, ktoré v súčasnosti nie je dostupné na pracovisku OTTP.

11 LITERÁRNE ZDROJE

- [1] OFFICE FOR OFFICIAL PUBLICATIONS OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. *How Europeans spend their time*. Luxemburg: European Communities, 2004. 132 s. ISBN 92-894-7235-9.
- [2] ORMANDY David, Veronique Ezratty. *Health and thermal comfort: From WHO guidance to housing strategies*. University of Warwick, UK, 2011.
- [3] CHEN Ailu, victor W.-C. Chang. *Human health and thermal comfort of Office workers in Singapore*. Volume 58, December 2012, Pages 172–178.
- [4] ČSN EN ISO 14505-2 *Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech - Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty*. Český normalizační institut, srpen 2007.
- [5] ČSN EN ISO 7730 *Mírné tepelné prostředí - Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody*. Český normalizační institut, 1997.
- [6] De DEAR, R.J., et al. *Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments*. In: Int J Biometeorol 40:141–156, ISB 1997
- [7] NILSSON, H. O. *Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*. Ph.D. Thesis, University of Gävle, 2004.
- [8] SILVA, M.C.G & COELHO, J.A. *Convection Coefficients for the Human Body Parts Determined with a Thermal Mannequin*. In: 8th International Conference on air distribution in rooms. Copenhagen, Denmark, pp. 277-280, 2002.
- [9] JANOTKOVÁ E. *Technika prostředí*. Brno: Skripta VUT Brno, 1991.
- [10] FIŠER, Jan. *Optimalizace mikroklimatu v kabinách malých dopravních letadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2011. 162 s. 7 příloh, Disertační práce. Vedoucí práce prof. Ing. MIROSLAV JÍCHA, CSc.
- [11] PARSON, K. C. *Human Thermal Environments*. Taylor & Francis, 2003.
- [12] POKORNÝ, Jan. *Svázání fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, EÚ, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2012. Disertační práce 164 s., 3 přílohy. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav JÍCHA, CSc.
- [13] PAVELEK, M. a kol. *Termomechanika*. Skripta, FSI, VUT Brno, 2003.

- [14] FIALA, D. *Dynamic simulation of human heat transfer and thermal comfort*. Ph.D. Thesis, Institute of Energy and Sustainable Development. Leicester, De Montfort University, 1998.
- [15] Human Arteries and Veins. In: *BIOLOGYCORNER* [online]. [vid. 4.3.2014]. Dostupné z: http://www.biologycorner.com/anatomy/circulatory/vessels_labtest.html
- [16] MARTINÍK K. *Termoregulace*. In: profmartinik.cz [online]. [vid. 6.5.2014]. Dostupné z: www.profmartinik.cz/wp-content/soubory/termoregulace.pdf
- [17] Staněk, J., Kubíčková M.: *Oděvní materiály*, skriptum VŠST Liberec, 1986.
- [18] DANIELSSON U. *Convection coefficients in clothing air layers*. Thesis, Royal institute of technology, Stockholm, 1993.
- [19] NISHI Y., GAGGE AP. *Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation*. ASHRAE Trans 88:120-130, 1970.
- [20] CHANG SWK et al., *Determination of the effect of walking on the forced convective heat transfer coefficient using an articulated manikin*. ASHRAE Trans 94:71-81, 1988.
- [21] ROPOG J, *Konstrukce snímačů typu umělá kůže*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2013. 68 s., Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Daniel Zuth Ph.D.
- [22] TROJAN, S. *Lékařská fyziologie*, nakladatelstvo Garda Publishing, a.s. 2008. 772s. ISBN 80-247-0512-5.
- [23] PALENČÁR R., VDOLEČEK F. a HALAJ M. *Nejistoty v měření I: vyjadřování*. In: Automa. Brno: 2001. - 7-8. - stránky 50-54.
- [24] PALENČÁR R., VDOLEČEK F. a HALAJ M. *Nejistoty v měření II: nejistoty*. In: Automa. Brno: 2001. - 10. - stránky 52-56.
- [25] PALENČÁR R., VDOLEČEK F. a HALAJ M. *Nejistoty v měření III: nejistoty*. In: Automa. Brno: 2001. - 12. - stránky 28-33.
- [26] Konzultácia: Ing. Jan Fišer, Ph.D. [12.5.2014]
- [27] NĚMEČEK P. *Nejistoty měření*. Praha: Česká společnost pro jakost, o.s., 2008

- [28] PAVELEK M., ŠTĚTINA J. *Experimentální metody v technice prostředí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2007. ISBN 978-214-3426-4.
- [29] Manuály klimatická komora
- [30] PENNES, H. H. *Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperatures in the Resting Human Forearm*. Journal of Applied Physiology, 1 (2), 93-122, 1948.
- [31] STOLWIJK, J. A. a HARDY, J. D. *Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients*. Journal of Applied Physiology, 21 (3), 967-977, 1966.
- [32] FIALA, D., et. al. *UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation*. Int J Biometeorol, 56 (3), 429-441, 2012.
- [33] Holmér I. *Thermal manikin history and applications*. Europ J Appl Physiol 92:614-61, 2004.
- [34] Ozeki Y, Hiramatsu T, Konishi M, Nakano J, Tanabe S. *Convective heat transfer coefficient at skin surface of thermal manikin under solar radiation*. Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering 2002; 555:29-36.
- [35] Kurazumi Y, et. al. *Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection*. Elsevier Ltd.: Building and Environment 43 (2008); 2142-2153.
- [36] NEWPORT ELECTRONICS, s.r.o.. *Kovy*. In: newport.cz [online]. [vid. 16.5.2014]. Dostupné z: <http://newport.cz/techinfo/emiskovy.html>
- [37] Ichihara M, et. al, *Measurement of convective heat transfer coefficient and radiative heat transfer coefficient of standing human body by using thermal manikin*. Proceedings of the Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan, pp 379–380, 1995
- [38] Manuál tepelný manekýn Newton, *Measurements Technology Northwest*, 2010

12 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratky

OTTP	Odbor termomechaniky a techniky prostredí, VUT Brno
PC	Personal Computer, osobný počítač
SBS	Sick Building Syndrome, syndróm „nezdravých“ budov

Symboly

\bar{y}	aritmetický priemer z počtu i zmeraných veličín y	[dané veličinou]
y_i	hodnota i -tej zmeranej veličiny y	[dané veličinou]
n	počet opakovaní meraní veličiny y	[-]
\dot{Q}_d	tepelný tok odvedený dýchaním	[W]
\dot{Q}_k	tepelný tok odvedený konvekciou	[W]
\dot{Q}_r	tepelný tok odvedený radiáciou	[W]
\dot{Q}_v	tepelný tok odvedený vyparovaním	[W]
\dot{Q}_{ved}	tepelný tok odvedený vedením	[W]
p_a''	parciálny tlak nasýtených vodných pár vo vzduchu	[Pa]
\dot{q}_{w1}	merný tepelný tok suchým vyparovaním	[W.m ⁻²]
\bar{t}_s	stredná teplota pokožky	[°C]
h_{cal}	zložený súčiniteľ prenosu tepla, štandardné podmienky	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
h_k	súčiniteľ prestupu tepla konvekciou	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
h_r	súčiniteľ prestupu tepla radiáciou	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
A_D	plocha tela podľa Du-Boisa	[m ²]
A_r	efektívna plocha vyžarovania ľudského tela	[m ²]
$F_{1 \rightarrow 2}$	uhlový faktor medzi telesom (1) a (2)	[-]
\dot{Q}	celkový metabolický tepelný tok	[W]
\dot{Q}	tepelný tok na strane tuhej fázy	[W]
Q_0	zložený tepelný tok z povrchu manekýna	[W.m ⁻²]
Q_k	tepelný tok konvekciou z povrchu manekýna	[W.m ⁻²]
Q_r	tepelný tok radiáciou z povrchu manekýna	[W.m ⁻²]
R_{cl}	tepelný odpor odevu	[m ² .K.W ⁻¹]
R_e	súčiniteľ tepelného odporu vyparovaním	[m ² .Pa.W ⁻¹]
S_1	plocha telesa (1)	[m ²]
T_1	teplota povrchu telesa (1)	[°C]
T_a	teplota okolitého vzduchu	[°C]
T_{cl}	priemerná teplota odevu, resp. kože v prípade bez odevu	[K]
T_r	radiačná teplota okolitých plôch	[°C]
T_r	stredná radiačná teplota prostredia	[K]
T_{sk}	teplota povrchu manekýna, $T_{sk} = 34^\circ\text{C}$	[°C]
U_1	termoelektrické napätie 1	[V]

U_2	termoelektrické napätie 2	[V]
$\frac{dT}{dx}$	teplotný gradient, os x značí smer šírenia tepla	[K. m ⁻¹]
f_{cl}	stupeň pokrytia tela odevom (plochy oblečený/nahý)	[-]
k_1	konštanta 1	[-]
k_2	konštanta 2	[-]
k_r	koeficient rozšírenia	[-]
p_a	parciálny tlak vodných pár v okolitom vzduchu	[Pa]
p_a	parciálny tlak vodných pár vo vzduchu	[Pa]
t_∞	teplota okolitého prostredia	[°C]
t_a	teplota okolitého prostredia	[°C]
t_a	teplota okolitého vzduchu	[°C]
t_{eq}	ekvivalentná teplota	[°C]
t_r	radiačná teplota okolitých plôch	[°C]
t_r	stredná radiačná teplota	[°C]
t_{sk}	teplota kože	[°C]
t_{st}	teplota povrchu steny daného telesa	[K]
t_t	teplota tekutiny v dostatočnej vzdialenosti od telesa	[K]
t_w	teplota povrchu	[°C]
u_{Ay}	neistota typu A	[dané veličinou]
u_{By}	neistota typu B	[dané veličinou]
u_{Cy}	celková neistota	[dané veličinou]
v_a	rýchlosť prúdenia okolitého vzduchu	[m.s ⁻¹]
a	absorptivita	[-]
k_{uA}	bezpečnostný faktor	[-]
r	reflexivita	[-]
S	plocha prenosu tepla	[m ²]
t	čas	[s]
t	transmisivita	[-]
T, V	hrúbka vrstvy: T - textília, V - vzduch	[m]
Q	zmeraná tepelná strata radiáciou a konvekciou, reálne podmienky	[W]
R	tepelný odpor odevu	[m ² .K.W ⁻¹]
S	teplozmená plocha alfamtru	[m ²]
T	termodynamická teplota čierneho telesa	[K]
U	rozšírená neistota	[daná veličinou]
m	hmotnosť vody na povrchu telesa	[kg]
w	rýchlosť prúdenia vzduchu	[m.s ⁻¹]
ε_1	emisivita telesa (1)	[-]
ε	emisivita	[-]
α	súčiniteľ prestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
λ	súčiniteľ tepelnej vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
φ	relatívna vlhkosť	[%]
$\Delta t_{0,1-1,1 m}$	rozdiel teplôt vo výške 0,1 - 1,1 m nad podlahou boxu	[°C]