

TEPELNÝ MANEKÝN – MOŽNOSTI TESTOVANIA OCHRANNÝCH PROSTRIEDKOV

THERMAL MANIKIN – UTILISATION IN PROTECTIVE EQUIPMENT TESTING

Miloš Fojtlín^{a*}, Jan Fišer^a

^a Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 61669, Brno, Česká republika.

*Korešpondující autor; e-mail: milos.fojtlin@vutbr.cz, tel.: +420 54114 3242

Abstrakt

Tepelný manekýn je zariadenie, ktoré bolo pôvodne vyvinuté za účelom testovania tepelne izolačných vlastností odevov. Funkcionalita tejto skupiny zariadení v súčasnosti presahuje svoj pôvodný zámer a je vhodná nie len pre testy odevov, ale i pre vyhodnocovanie tepelného komfortu osôb. Za hlavné výhody tepelných manekýnov sú považované: (a) najpresnejšia aproximácia tepelného správania ľudského tela; (b) opakovateľnosť merania; (c) vylúčenie subjektívnych vplyvov na meranie; (d) využitie i v extrémnych tepelných podmienkach. V príspevku je predstavený tepelný manekýn Newton spolu s možnosťami pracoviska Odboru termomechaniky a techniky prostředí na Vysokém učení technickém v Brně. Newton disponuje 34 individuálne regulovateľnými zónami, z ktorých je možné vyhodnocovať tepelný tok do okolitého prostredia. K doplnkovej výbave manekýna patrí systém dýchania s programovateľným objemom dychu.

Klíčová slova tepelný manekýn, tepelný komfort, osobné ochranné prostriedky

Abstract

Thermal manikins are measurement devices that were primarily designed to test thermal properties of garments. Nowadays, functionality of the manikins has overrun its former purpose. They are suitable not only to test the garments, but also to evaluate human thermal comfort. The main four advantages of the manikins over human test subjects are as follows: (a) the most credible approximation of heat transfer from a human body; (b) measurement repeatability; (c) exclusion of a subjective influence on the measurement; (d) applicability in extreme thermal environments. In this paper, a Newton type thermal manikin is introduced together with a technical background of the environmental laboratories of Department of Thermomechanics and Environmental Engineering, Brno University of Technology. Further, the Newton comprises 34 independently controlled zones, which enable detailed measurement of heat flux to the ambient environment. In addition, it is equipped with a system of artificial breathing with programmable volume and frequency of breath.

Key words: thermal manikin, thermal comfort, personal safety equipment

1 ÚVOD

Zdravé ľudské telo udržuje stálu teplotu jadra na úrovni $36,5 \pm 0,5$ °C mechanizmom vnútornej termoregulácie. Táto teplota je esenciálna pre zachovanie správneho chodu biochemických procesov v ľudskom tele. K silnému narušeniu týchto procesov dochádza už pri relatívne malej odchýlke teploty jadra o ± 1 °C [1]. 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, psychickom stave, hmotnosti človeka a ďalších personálnych faktoroch. Nárast teploty ľudského tela teda súvisí so zvýšenou fyzickou (príp. duševnou) aktivitou počas

aktívnej časti dňa. Na teplotu jadra zásadne vplyva i teplota okolitého prostredia. Za normálnych okolností, počas spánku dosahuje teplota jadra 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 na mechanickú prácu svalov [2].

Jednotka zavedená pre vyjadrenie metabolickej tepelnej produkcie na jednotku telesnej plochy je *met*, definovaný za podmienok sedu v pokoji: 1 met = 58.1 W.m⁻². Zdravý muž má maximálnu metabolickú kapacitu 12 met vo veku 20 rokov, ktorá s vekom postupne klesá až na približne úroveň 7 met vo veku 70 rokov. V prípade trénovaných atlétov je maximum metabolizmu na úrovni 20 met. Ženský metabolizmus je približne o tretinu menší [2]. *Tabuľka 1* ilustruje vybrané aktivity a príslušné metabolické produkcie tepla.

Tabuľka 1 Metabolická produkcia tepla pre vybrané aktivity, [2].

Aktivita	M (W.m ⁻²)	met
Spánok	40	0,7
Ľahká chôdza	100	1,7
Vedenie vozidla	60 až 115	1,0 až 2,0
Manipulácia s 50 kg záťažou	235	4,0

Za účelom stabilizácie teploty jadra ľudského tela je potrebné dosiahnuť stavu tepelnej rovnováhy človeka s okolím. Táto rovnováha je daná podmienkou popísanou v rovnici (1). Hustota metabolického tepelného toku vyprodukovaná človekom M (W.m⁻²) mínus intenzita mechanickej práce W (W.m⁻²), je rovná teplu odvedenému do okolia konvekciou C (W.m⁻²), radiáciou R (W.m⁻²) a vyparovaním E_{sk} (W.m⁻²). Tieto tri zložky majú majoritný podiel na tepelnej výmene. Ďalej možno vyjadriť tepelné straty dýchaním prostredníctvom konvekcie C_{res} a vyparovania E_{res} (W.m⁻²). Posledné dva členy rovnice (1) predstavujú hustotu tepelných tokov akumulovaných do pokožky S_{sk} a jadra S_C (W.m⁻²). Posledné dva členy sa môžu zanedbať v tepelne neutrálnych podmienkach, akumulácia tepla sa obvykle považuje za patologický jav.

$$M - W = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_{sk} + S_C) \quad (1)$$

Ako indikátor podchladzovania alebo prehrievania organizmu sú v podkoží a jadre človeka umiestnené termoreceptory, ktoré reagujú na zmenu teploty [3]. Výsledkom je zmyslový vnem, pocit chladu alebo tepla, ktorý je subjektívny. Navyše bolo zistené, že neutrálny tepelný vnem sa spája so stavom tepelnej rovnováhy tela a okolitého prostredia [4], [5]. To znamená, že tepelná rovnováha predstavuje nevyhnutnosť z pohľadu stability metabolických procesov, ale je i prvou podmienkou pre dosiahnutie tepelnej pohody (komfortu), teda stavu, ktorý subjektívne naplňuje pocit spokojnosti s tepelným prostredím [5]. Napriek relatívnej jednoduchosti podmienky rovnováhy je podstatné, akým spôsobom sa dosahuje. V prípade, že termoregulačné mechanizmy sú nútené zasahovať vo vysokej miere, napríklad vylučovaním veľkého množstva potu, nie je možné hovoriť o stavoch blízky tepelnému komfortu. Práve osobné ochranné prostriedky často predstavujú bariéru pri prenose tepla a látky, čo spôsobuje pocit diskomfortu alebo znemožňuje ich dlhodobé využitie.

Ďalším vedľajším produktom ľudskeho metabolizmu je oxid uhľičitý a vodná para. Tieto dva plyny vznikajú v množstve úmernom metabolickej záťaži človeka a je potrebné ich efektívne odvádzať z priestoru pobytu človeka. Uvedené skutočnosti je možné hodnoverne simulovať v reálnych podmienkach tepelnou figurínou – tepelným manekýnom, ktorý je detailne popísaný v ďalšej časti textu.

2 APLIKÁCIE TEPELNÉHO MANEKÝNA

Telesné proporcie tepelných manekýnov kopírujú vzrast priemerného človeka typického pre danú geografickú oblasť. Ich povrch je tvorený jednou alebo viacerými zónami, do ktorých je dodávané teplo, dnes obvykle elektrickým vyhrievaním. V každej zóne je sledovaná teplota povrchu a množstvo dodaného tepla. Takto je možné detailne analyzovať komplexné tepelné prostredia a získať dáta pre vyhodnotenie tepelnej záťaže osôb vystavených danému prostrediu. V súčasnosti sú dostupné viaceré verzie manekýnov a možno ich deliť podľa nasledovných základných kritérií:

- **Anatómia:** ženská, mužská, detská;
- **Počet vyhrievaných zón:** 1 až 126 [6];
- **Pohyblivosť:** bez pohyblivých častí, s možnosťou nastavenia do určitej polohy, artikulovaný manekýn s externým zariadením pre pohyb;
- **Konštrukčný materiál:** plast, kompozit, kov (obvykle meď alebo hliník);
- **Spôsob vyhrievania:** elektricky, vodou, vzduchom [6];
- **Prevádzkové podmienky:** izbové podmienky, žiarové testy, testy vo vode;
- **Doplňková výbava:** systém potenia, systém dýchania.

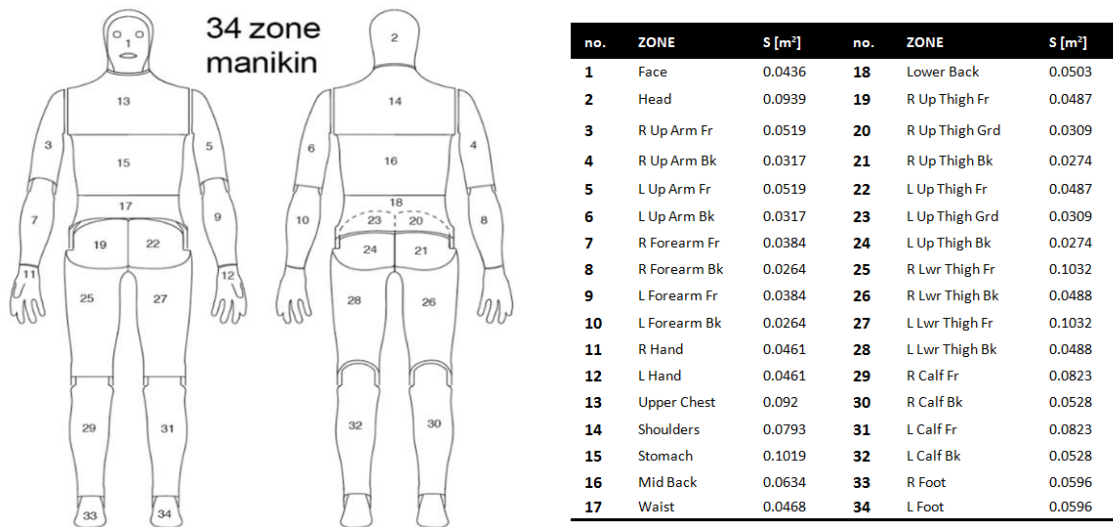
2.1. Popis tepelného manekýna typu Newton

Konštrukcia tepelného manekýna zodpovedá norme ČSN EN 15831:2004. Telesné proporcie *Newtona* sú odvodené z päťdesiateho percentilu muža západného typu, čo odpovedá približne konfekčnej veľkosti L, výška 178 cm. Manekýn disponuje samonosnou tepelne vodivou kompozitovou konštrukciou s kĺbmi (chodidlá, kolená, bedrá, lakty, ramená), ktoré zabezpečujú dobrú polohovateľnosť figuríny. Pod povrchom manekýna je vnorený systém elektrického odporového vyhrievania a merania povrchovej teploty. Systém obsluhuje 34 nezávisle riadených zón simulujúcich metabolickú produkciu tepla (*Obr. 1*). Zariadenie je využiteľné v teplotách do 50 °C pri relatívnej vlhkosti do 95 %. Maximálna hustota tepelného toku vyhrievania je obmedzená na 700 W.m⁻² (12 met).

Regulácia tepelného správania figuríny je možná v troch základných režimoch:

1. Vyhrievanie na konštantnú povrchovú teplotu, obvykle na 34 ± 0,1°C pre celý povrch manekýna – možné je predpisovať ľubovoľné teploty. Tento prístup podáva realistické výstupy v tepelne neutrálnych podmienkach, kedy zvolená teplota vyhrievania je v zhode (± 2 °C) s teplotou pokožky človeka. Výhodou tohto prístupu je veľmi rýchla odozva na zmenu okolitých podmienok [7], [8].
2. Vyhrievanie na konštantný tepelný tok predstavuje najjednoduchší spôsob regulácie, kedy je do figuríny dodávané stabilné množstvo tepelného výkonu a nie je potrebná spätná väzba teploty. V prípade malého odvodu tepla z povrchu manekýna dochádza k nerealistickému nárastu teploty pokožky vysoko nad 34 °C.
3. Vyhrievanie podľa rovnice komfortu umožňuje priebežné nastavovanie povrchovej teploty manekýna v závislosti na okolitých podmienkach. Tento regulačný režim

podáva najpresnejšie výstupy, ale iba v blízkosti platných podmienok predpisovaného algoritmu. Za nevýhodu je považovaná pomalšia odozva regulácie.



Obrázok 1 Segmentácia tepelného manekýna na 34 zón a príslušné plochy jednotlivých zón.

Newton je vybavený doplnkovým systémom externého respiračného zariadenia. Dych je možné programovať v rozsahu 5 až 25 výmen za minútu s objemom dychu 0,1 až 2 l. Tento rozsah pokrýva takmer celé spektrum respirácie človeka v závislosti na intenzite fyzickej aktivity. Pre potreby realistického zavádzania škodliviny z dychu do prostredia (napr. CO₂) je možné dávkovanie plynu alebo aerosólu do výdychu manekýna.

2.2. Príklady aplikácii pre testovanie ochranných prostriedkov

Pre dosiahnutie opakovateľnosti výsledkov meraní sa tepelný manekýn umiestňuje do presne definovaného prostredia. Na Vysokom učení technickom v Brne je k týmto účelom dostupná klimatická komora s nasledovnými parametrami:

- rozmery: d 8 × š 5 × v 3,8 m,
- teplota vzduchu: -40 až 85 °C,
- relatívna vlhkosť vzduchu: 10 až 95 %,
- solárne zisky: do 1000 W.m⁻².

V komore je možné vykonávať i skúšky celých automobilov, častí kabín alebo priemyselných výrobkov. Komora spĺňa predpoklady pre testy podľa noriem: ČSN ISO 10263, DIN 75220, IEC 68, US-SFTP, MIL-STD 810.

Testovanie vplyvu radiačných telies na tepelný komfort

Účel testu: experimentálne overenie vplyvu sálavých telies na tepelný komfort.

Metodika: prevzatá z normy ČSN EN ISO 14505:2006 *Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech*. Vyhodnotenie komfortu na základe konceptu ekvivalentnej teploty, ktorý je vhodný pre tepelne asymetrické prostredia.

Poznámky: testovanie prebiehalo v kalibračnej komore s definovanou teplotou stien, podlahy a vzduchu (Obr. 2.1, snímka z termokamery).

Overenie chladivého efektu odevov s PCM

Účel testu: experimentálne overenie množstva akumulovanej energie do vesty s PCM vložkami (Phase-change material) a stanovenie dĺžky chladiaceho účinku.

Metodika: vlastná, testovanie v dvoch režimoch regulácie povrchovej teploty: (a) konštantná povrchová teplota 34 °C, (b) konštantný tepelný tok 100 W.m⁻².

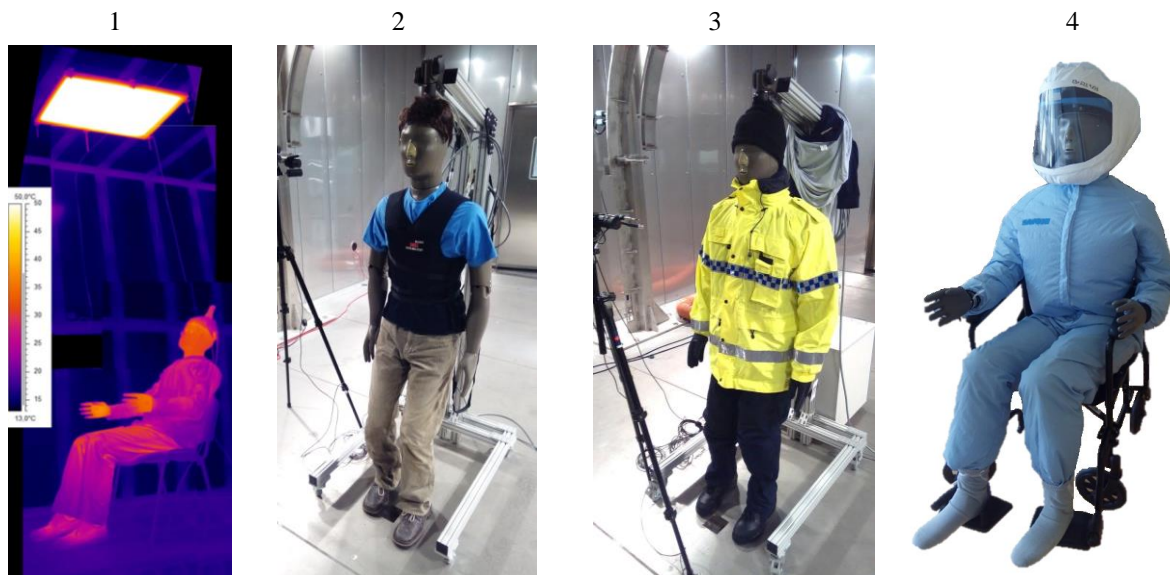
Poznámky: v prípade regulácie na konštantný tepelný tok je potreba pevnej fixácie odevu na telo manekýna. V opačnom prípade dochádza k nerealistickému nárastu povrchovej teploty (Obr.2.2).

Skúšky tepelne izolačných vlastností pracovných odevov

Účel testu: zmeranie tepelného odporu viacerých variant pracovných odevov.

Metodika: prevzatá z normy ČSN EN ISO 15831:2004.

Poznámky: testovanie pri rýchlostiach prúdenia vzduchu do 2 m.s⁻¹ (Obr. 2.3).



Obrázok 2 Ukážky aplikácii tepelného manekýna pri testovaní ochranných prostriedkov.

Stanovenie koncentrácie CO₂ v helme pre prácu v čistých priestoroch

Účel testu: overenie účinnosti odvetrávania škodliviny z ochrannej helmy.

Metodika: požiadavky na skúšobné vybavenie prevzaté z ČSN EN 12941.

Poznámky: pri testovaní bol využitý systém dýchania, pričom do výdychu bolo dávkované presné množstvo škodliviny úmerné požadovanej fyzickej aktivite.

3 ZÁVER

V súčasnosti je na trhu široká ponuka tepelných manekýnov. Ich cena je úmerná k stupňu výbavy a počtu nezávisle vyhrievaných zón. Napriek relatívne vysokej cene týchto zariadení sa jedná o rentabilný nástroj, hlavne z týchto dôvodov: (a) najpresnejšia aproximácia tepelného správania ľudského tela – presné meranie tepelných tokov a teplôt na povrchu, (b) opakovateľnosť merania, (c) vylúčenie subjektívnych vplyvov na meranie, (d) využitie i v extrémnych tepelných podmienkach, (e) minimalizácia potreby testovacích osôb a tým i časová a finančná úspora pri testoch. V opozícii stoja i určité negatíva spojené s prevádzkou tepelných manekýnov: (a) obstarávacia cena (avšak je vyvážená úsporami pri testovaní), (b) obmedzené množstvo štandardizovaných metodických postupov, (c) nepoddajný povrch tela (obťažná výmena odevov pri testoch, nedokonalý kontakt so sedadlom a pod.).

Pod'akovanie

Práca uvedená v príspevku vznikla na základe podpory z projektu r. číslo FSI-S-14-2355 VUT v Brne.

Použitá literatúra

- 1 TROJAN, S. *Lékařská fyziologie*. Grada Publishing a.s., 2003. 772 s. ISBN 80-247-0512-5
- 2 ASHRAE. *ASHRAE Fundamentals Handbook*. SI. Atlanta: Amer Soc of Heating, Refrigerating & A-C Engineers, 200. 921 s. ISBN 978-1883413880.
- 3 HUIZENGA, C., HUI, Z., ARENS, E. *A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments*. Build. Environ., 2001, vol. 36, no. 6, pp. 691–699.
- 4 FANGER, P.O. *Thermal Comfort*. Malabar, FL: Robert E. Krieger Publishing Company, 1982. 244 s. ISBN 978-0-89874-446-0.
- 5 NILSSON, H.O. *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models*. University of Gavale. Dizertačná práca, 2004. 212 s.
- 6 HOLMÉR, I. *Thermal manikin history and applications*. Eur. J. Appl. Physiol., 2004. vol. 92, no. 6, pp. 614–618.
- 7 FODA, E., SIREN, K. *A thermal manikin with human thermoregulatory control: Implementation and validation*. Int. J. Biometeorol., 2012. vol. 56, no. 5, pp. 959–971.
- 8 Garcia-Souto, M. D. P., Dabnichki, P. *Core and local skin temperature: 3–24 months old toddlers and comparison to adults*. Build. Environ., 2016. vol. 104, pp. 286–295.