

# VYUŽITÍ TEPELNÉHO MODELU ČLOVĚKA PRO ANALÝZU TEPELNÉ POHODY V BUDOVÁCH

Jana Horváthová, Karel Kabele

Laboratoř vnitřního prostředí, UCEEB, ČVUT, Buštěhrad

## ANOTACE

Tepelný model člověka nebo-li thermal manikin slouží pro výzkum a vývoj nových technologií již více než 70 let. Možnosti jeho využití jsou široce využívané zejména pro analýzu tepelného rozhraní mezi člověkem a jeho okolím. Primárně byl tento model vyvinut pro určování tepelně-technických vlastností oblečení a také pro hodnocení tepelných toků člověka ve složitém prostředí jako je například kabina vozidla nebo letadla. V dnešní době je vývoj těchto tepelných modelů člověka zaměřen na ještě více realističtější simulace lidské tepelné interakce s okolním prostředím díky vývoji dýchání a pocení těchto modelů. Thermal manikin nachází v současnosti uplatnění také v oblasti hodnocení tepelné pohody v budovách. Tento článek je zaměřen na popis možností využití thermal manikina.

## SUMMARY

The thermal model of human body alias thermal manikin is used for research and development of new technologies more than 70 years. The possibilities for its use are widely used especially for analyzing the thermal interface of the human body and its environment. Primarily, this model has been developed for determining the thermal properties of clothing as well as for the evaluation of heat fluxes human body in a complex environment such as the cabin of the vehicle or aircraft. Nowadays, the development of thermal manikins is aimed at even more realistic simulation of human thermal interaction with his environment due to the development of breathing and perspiration these thermal models of human body. Thermal manikin is currently also applied in the field of thermal comfort in buildings. This article is focused to description the possibilities of using thermal manikin.

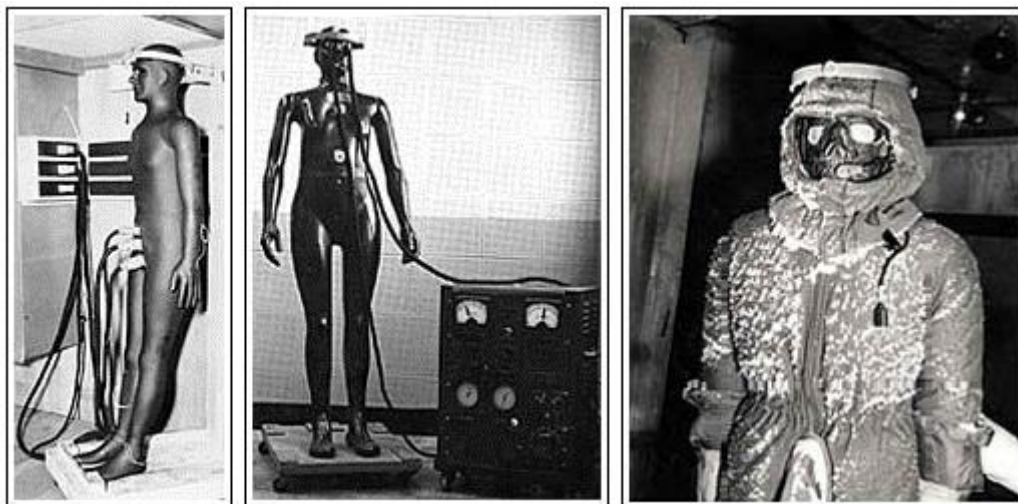
## ÚVOD

Termální manikin byl vyvinut před více než 70 lety za účelem vývoje a výzkumu (analýzy) termálního (teplotního) rozhraní lidského těla a jeho okolního prostředí. V dnešní době je ve výzkumu a vývoji používáno více než 100 „figurín“. [1], [2]

První typ byl vyvinut pro americkou armádu v roce 1941 (jako tvůrce je označován Dr. Harwood Belding), tento termální manikin byl pouze jedno-segmentální a jeho tělo bylo z mědi. Bylo vyrobeno několik takovýchto typů a v současnosti jsou některé stále ještě funkční. Tyto „figuríny“ byly vyvinuty pro potřeby vývoje tepelného ochranného oděvu. Z důvodu potřeby detailnějších informací o tepelných tocích mezi člověkem a okolním prostředím se začaly vyvíjet více-segmentální „figuríny“. Jednotlivé segmenty jsou na sobě funkčně nezávislé (teplotní čidla jsou umístěna v jednotlivých segmentech). Tento typ „pasivní figuríny“ umožňoval přesnější měření, thermal manikin byl vybaven čidly pro detekci povrchových teplot v průběhu vystavení figuríny konvekčnímu a/nebo sálavému tepelnému toku. [3]

I přes tento pokrok ve vývoji statické stojící figuríny poskytovali pouze omezené možnosti a výsledky v porovnání s reálnými podmínkami (simulace versus realita). Další vývoj byl tedy zaměřen na možnosti pohybu figurín. Byly vyvinuty figuríny s „hlavními“ klouby (ramena, kolena, kyčle), které umožňovaly posazení figuríny nebo její nepřetržitý pohyb (simulace chůze nebo jízdy na kole). [4] Dalším krokem ve vývoji termálního manikína byla možnost simulovat pocení člověka, díky čemuž lze získat cenné informace o výměně tepla mezi člověkem a okolím vlivem odpařování. [5] Z důvodu pokračujících výzkumů v rozdílu mezi bazálním metabolismem muže a ženy byla na základě výsledků v roce 1989 vytvořena figurína ženy (do této doby měla figurína vždy podobu muže). [6] Vlivem rostoucího zájmu o využití figurín pro hodnocení vnitřního mikroklimatu byl poslední vývoj zaměřen na simulaci dýchání.

Postupem času se vývoj termálního manikína rozdělil do dvou základních směrů. Jeden je zaměřen na vývoj komplexní multifunkční figurínu pro výzkum a pokročilé testování zejména v oblasti výzkumu oblečení do extrémních podmínek nebo pro hodnocení vnitřního prostředí ve složitých a náročných provozech. Tato figurína je zcela soběstačná, dokáže simulovat chůzi (za pomoci speciálního chodícího zařízení) a ve svém těle má zabudováno veškeré potřebné vybavení, jako je vytápěcí systém, potní žlázy, systém dýchání a všechny obvody potřebné k regulaci a získávání dat (např. teplotní čidla). Druhý směr je zcela obrácený a je zaměřený na jednoduchost a přesnost figurín. Oproti prvnímu směru jsou tyto figuríny levné a jsou používány pro hodnocení tepelných vlastností běžného oblečení. Tyto figuríny jsou omezeny v poskytování informací o tepelných tocích (jsou většinou jedno-segmentální) a udávají jednotnou - celotělovou informaci o tepelné izolaci (ve většině případů nejsou vybaveny dýchacím a potícím se systémem pro komplexní hodnocení). [4]



**Obr. 1** První modely Thermal Manikína - USA [7]

Vlivem rozvoje CFD simulací se začaly vyvíjet numerické modely pro simulaci termálního manikína a jeho interakci s okolním prostředím, které se porovnávají s reálnými stavy. Toto je důležité pro vývoj tzv. virtuálního manikína (CFD simulace), kterého lze použít pro počítačové dynamické simulace a analýzy. [8]

## POPIS NEWTON THERMAL MANIKINA

Thermal manikin je složitý a drahý nástroj, což je však vyváženo jeho pokročilými funkcemi a možnostmi použití. Byl vyvinut pro přesné a opakovatelné měření za ustálených podmínek

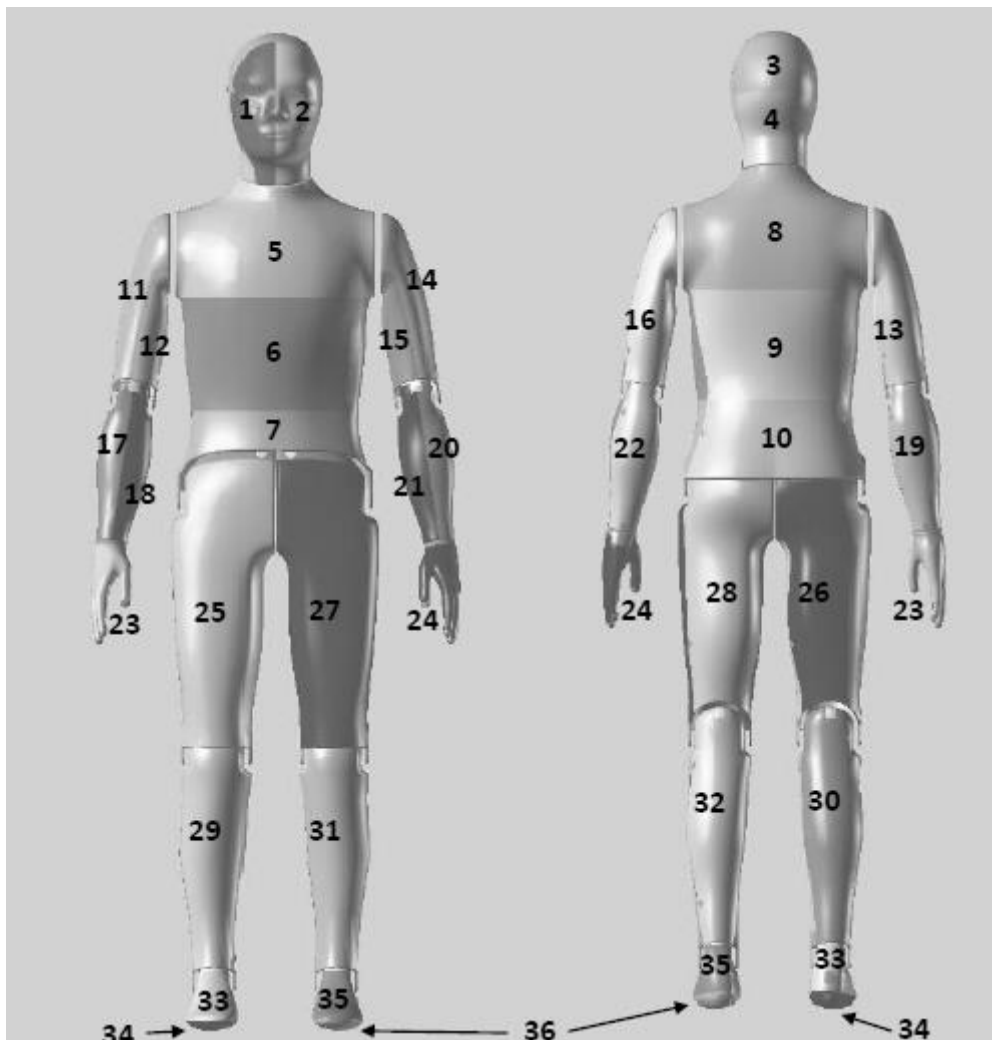
(kolísání teploty vzduchu by nemělo přesáhnout  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Newton Thermal Manikin je plně integrovaný systém - kombinace tepelné figuríny a přenosného počítače s řídicím systémem. Tato figurína typově odpovídá muži průměrné postavy. U dané figuríny je možnost různých poloh končetin, je tedy pohyblivá v ramenou, loktech, kolenou a kotnících a také lze provádět pohyby hlavou (dopředu a dozadu).

Hlavní oblasti využití thermal manikina:

- Stanovení tepelné izolace oděvu;
- Posouzení vlivu tepelného prostředí na lidské tělo.

### Teplotní zóny

Thermal manikin měří konvekční, kondukční a radiční tepelné ztráty ve všech směrech buď celého povrchu nebo ve zvolených zónách v závislosti na počtu segmentů thermal manikina. Daný typ thermal manikina je složen z 36 samostatně řízených teplotních zón (segmentů), jejichž rozložení je patrné z obr. 2.



**Obr. 2** Rozdělení Newton Thermal Manikina na jednotlivé zóny.

Všechny teplotní zóny jsou vybaveny topným tělesem (ohříváčem) pro simulaci metabolického tepla vydávaného člověkem a také teplotním čidlem pro měření teploty kůže.

Mikroprocesory uvnitř figuríny hlídají nastavenou teplotu a v případě překročení této hodnoty vypínají ohřívání zón manikina a to i v případě, dojde-li ke ztrátě kontaktu mezi manikinem a PC.

### **Dýchání a vlhčení vdechovaného a vydechovaného vzduchu**

Newton thermal manikin je vybaven externím dýchacím systémem. Tento systém se skládá z pneumatických válců, které simulují lidské dýchání (cykly dechu a jejich četnost). Systém uvnitř thermal manikina umožňuje dýchání nosem a ústy (lze zvolit libovolnou kombinaci). Četnost dýchání lze nastavit v rozmezí 5 - 20 dechů za minutu a dechový objem lze nastavit v rozmezí 0,1 - 2,5 litru.

Zvlhčovací systém dýchání slouží k přesnější simulaci vlhkosti a teploty lidského dechu. Lze nastavit požadovanou teplotu a vlhkost vdechovaného a vydechovaného vzduchu.

### **Hodnocení vlivu tepelného prostředí na lidské tělo**

Termální manikin je vhodný k měření tepelného prostředí (tepelná pohoda / nepohoda). Mimo tepelných senzorů umístěných uvnitř figuríny, jsou s řídicím systémem propojena čidla pro měření prostředí v okolí manikina (2 čidla pro měření teploty vzduchu, kulový teploměr pro měření globe teploty, čidlo pro měření vlhkosti vzduchu a čidlo pro měření rychlosti proudění vzduchu). Pomocí softwaru ThermDAC8 lze stanovit tepelnou pohodu / nepohodu pro každou zónu zvlášť nebo jako celkový tělesný průměr. Ke stanovení tepelné pohody je použito indexu PMV (Predicted Mean Vote Index - nebo-li střední tepelný pocit člověka) a a indexu PPD (Predicted Percentage Dissatisfied - nebo-li předpokládané procento nespokojených osob). Tyto indexy se stanovují dle normy ČSN EN ISO 7730 - *Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*.

#### **ThermDAC8 Control Software**

ThermDAC8 je řídicí software, který zaznamenává naměřená data, hodnotí tepelnou pohodu a především slouží k nastavení a řízení termálního manikina.

Měřené, sledované a zaznamenávané veličiny:

- Povrchové teploty jednotlivých zón;
- Tepelné toky jednotlivých zón;
- Vážená průměrná teplota celku;
- Vážený tepelný tok celku;
- Vážený tepelný odpor celku;
- Teplota okolního prostředí, rychlost proudění vzduchu, globe teplota, relativní vlhkost;
- Tepelná pohoda - PMV a PPD indexy.

#### **Souhrn - technické parametry Newton Thermal Manikin Systému**

- Termální figurína - thermal manikin:
  - Výška - 175 cm;
  - Hmotnost - 30 kg;
  - Měření v rozsahu okolních teplot - 20 °C až + 50 °C;
  - Rozsah maximální a minimální relativní vlhkosti vzduchu 0 - 100 %;
  - 36 nezávisle regulovatelných a měřitelných (povrchová teplota, tepelný tok) tepelných zón;
  - Maximální tepelný výkon - 800 W/m<sup>2</sup>;

- Zvlhčovač dýchaného vzduchu;
- Dýchací systém:
  - Dechová frekvence - 5 až 20 dechů za minutu;
  - Dechový objem - 0,1 až 2,5 litru;
  - Maximální průtok - 50 l/min;
- Měření okolního prostředí:
  - 2x čidlo teploty vzduchu;
  - 1x čidlo pro měření relativní vlhkosti vzduchu;
  - 1x čidlo pro měření rychlosti proudění vzduchu;
  - 1x kulový teploměr pro měření globe teploty;
- Počítač s řídicím softwarem ThermDAC8.

Kalibrace čidel - maximální odchylky:

- Teplotní čidla  $\pm 0,1$  °C;
- Čidlo relativní vlhkosti  $\pm 3$  %;
- Tepelný tok  $\pm 1$  %.

## ZÁVĚR

Termální manikin je vhodný k měření tepelného komfortu a to jak ve specifických prostorech jako jsou kabiny automobilů a letadel, tak i ve vnitřních prostorech budov. Díky 36 nezávisle měřitelným zónám a velmi přesné predikci tepelných pocitů člověka dokáže určit místo na těle, na kterém dochází k tepelnému diskomfortu nebo k obtěžování průvanem. Díky těmto hodnotám lze dále optimalizovat a modelovat větrací, klimatizační a vytápěcí zařízení pro zvolený typ provozu. V neposlední řadě lze tepelného manikyna uplatnit pro měření tepelně izolačních vlastností oděvů nebo vybavení pro sportovní a pracovní aktivity.

Newton Thermal Manikin systém poskytuje plně automatizované testování, ale vždy je třeba ověřit soulad testování s požadavky norem pro dané prostředí či odvětví.

## LITERATURA

- [1] Wyon, D. *Use of thermal manikins in environmental ergonomics*. Scand J Work Environ Health, 1989, 15 [Suppl 1]: 84 – 94.
- [2] Holmér, I. *Thermal manikins in research and standards*. In: Nilsson H, Holmér, I. (eds) Thermal manikin testing. National Institute for Working Life, 2000, Stockholm, pp 4–9.
- [3] Behnke, WP., Geshury, AJ., Barker, RL. *“Thermo-man“: Full scale tests of the thermal protective performance of heat resistant fabrics*. Proceedings of the 4th international conference on environmental ergonomics, September 1990, Austin, Texas, pp 70 - 71.
- [4] Holmér, I. *Thermal manikin history and applications*. European Journal of Applied Physiology. September 2004, Volume 92, Issue 6, pp 614-618.
- [5] Dozen Y, Adachi K, Ohthuki S, Aratani Y, Nishizakura K, Saitoh T, Mizutani T, Thuchida K, Kawashima S, Nagai Y, Yamaguchi S, Harada K, Takenishi S. *Studies of the heat and moisture transfer through clothing using a sweating thermal manikin*. In: Mercer JB (ed) Thermal physiology 1989. Excerpta Medica, Amsterdam, pp 519–524.
- [6] Madsen, TL. *A new generation of thermal manikins*. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 1989.

- [7] Thomas L. Endrusick, B.Sc., Leander A. Stroschein, B.Sc., Richard R. Gonzalez, Ph.D. *Thermal manikin history*. U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine. Biophysics and Biomedical Modeling Division. 2015, Dostupné z:<<http://www.thermetrics.com/solutions/manikin-history>>.
- [8] Nilsson, HO, Holmér, I. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models. 2003, *Indoor Air* 13:28–37.
- [9] Thermetrics - Advanced Thermal Measurement Technology. *Operator's Manual for Newton 36-Zone Thermal Manikin System*. August 2014, USA- Seattle.

## **PODĚKOVÁNÍ**

*Tento příspěvek vznikl za podpory Evropské unie, projektu OP VaVpl č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 - Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.*