

mgr inż. MAGDALENA MŁYNARCZYK

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: mazwo@ciop.pl

Manekiny termiczne jako narzędzie do badania izolacyjności cieplnej oraz oporu pary wodnej zestawów odzieży

Izolacyjność cieplna czy opór pary wodnej odzieży są bardzo ważnymi parametrami w ocenie wystąpienia obciążenia cieplnego w każdym środowisku termicznym. Badania tych parametrów wykonuje się wykorzystując do badań manekiny termiczne pozwalające na pomiar wymiany ciepła bez, jak i z uwzględnieniem pocenia.

W artykule przedstawiono historię rozwoju manekinów termicznych. Przedstawiono manekiny termiczne znajdujące się na wyposażeniu CIOP-PIB oraz zamieszczono podstawowe informacje na temat pomiaru całkowitej izolacyjności cieplnej zestawu odzieży i oporu pary wodnej.

Słowa kluczowe: manekin termiczny, izolacyjność cieplna, opór pary wodnej

Thermal manikins as a tool for measuring thermal insulation and evaporative resistance of clothing

Thermal insulation and evaporative resistance of clothing are very important parameters in evaluating thermal load in each thermal environment. Those parameters are studied with the use of thermal manikins for measuring thermal heat transfer with and without the sweating function. This article presents a brief history of thermal manikins, a short description of thermal manikins in CIOP-PIB's laboratory and also basic information on measuring total thermal insulation and evaporative resistance of clothing.

Keywords: thermal manikin, thermal insulation, evaporative resistance



Fot. Archiwum CIOP-PIB

Wstęp

Izolacyjność cieplna i opór pary wodnej zestawów odzieży są bardzo ważnymi parametrami w ocenie wystąpienia obciążenia cieplnego w każdym środowisku termicznym: zarówno zimnym, gorącym jak i umiarkowanym. Odpowiedni dobór odzieży ochronnej nie dopuszcza do nadmiernego wyziębienia bądź przegrzania organizmu [1], zapewnia poczucie komfortu cieplnego, co przekłada się na zmniejszenie liczby popełnianych błędów przy pracy [2].

W celu określenia wartości izolacyjności cieplnej, jak również oporu pary wodnej zestawów odzieży wykorzystuje się manekiny termiczne. W artykule przedstawiono krótko historię manekinów termicznych, ze szczegółowym opisem tych, które znajdują się na wyposażeniu CIOP-PIB, a także zamieszczono podstawowe informacje na temat pomiaru całkowitej izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieży.

Historia rozwoju manekinów termicznych

Manekiny termiczne umożliwiają symulację jawnej wymiany ciepła pomiędzy organizmem a otoczeniem poprzez konwekcję, przewodzenie

i promieniowanie. Stosuje się je głównie do pomiaru właściwości termicznych odzieży [3]. Ocenę izolacyjności cieplnej zestawu odzieży do środowiska zimnego dokonuje się wg PN-EN ISO 15831 [4] oraz PN-EN 342 [5].

Na świecie istnieje ponad 100 różnych manekinów termicznych [3]. Pierwszy jednosegmentowy manekin został skonstruowany z miedzi we wczesnych latach 40. XX wieku dla ówczesnej armii Stanów Zjednoczonych. Zawierał wewnętrzne ogrzewanie oraz wentylator służący do rozprzeczania ciepła [3]. W 1942 r. Belding wraz z inżynierami z General Electric Company opracował manekin, który został wykonany z galwanicznej miedzi z obwodami elektrycznymi, równomiernie ogrzewającymi jego powierzchnię [6].

Następnie rozwój nauki pozwolił na stworzenie bardziej dokładnych, wielosegmentowych modeli, coraz lepiej symulujących wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem. Modele te wykonywane były z aluminium lub plastiku [3, 6]. W 1964 r. w Wielkiej Brytanii zbudowano 11-segmentowy manekin, wykonany z aluminium [3]. Dziewięć lat później w 1973 r. w Danii zbudowano manekin z plastiku, który wyposażony był w funkcję poruszania się [3]. Również w Danii, w 1989 r., powstał pierwszy

żeński manekin, wyposażony nie tylko w funkcję poruszania się, lecz także w funkcję symulacji odczuwania komfortu cieplnego [3]. Następnym krokiem w rozwoju manekinów termicznych to wyposażenie ich w dodatkowe możliwości, takie jak oddychanie (Dania, 1996 r.) czy pocenie się (Japonia, 1988 r.), [3]. W kolejnych latach powstawały też manekiny pozwalające na badanie zarówno suchej (bez pocenia), jak i mokrej wymiany ciepła, a ponadto symulowały poruszanie się. Charakterystycznymi przykładami są: manekin termiczny SAM (Szwajcaria, 2001 r.) [7], jak również amerykański ADAM, zbudowany ze 126 segmentów (USA, 2003 r.), [3, 8]. Ten ostatni jest praktycznie kompletny, gdyż w swej konstrukcji zawiera cały niezbędny asortyment, wraz z pojemnikiem na wodę, zasilaniem (bateriami) dla każdego segmentu oraz wszelkie elektryczne obwody umożliwiające regulację parametrów na poszczególnych segmentach, jak również gromadzenie danych.

Ponadto, na początku XXI wieku powstały 1-segmentowe manekiny pocące się (wypełnione wodą), wykonane z oddychającego materiału (Hongkong, 2001 r.) lub wypełnione powietrzem, wykonane z materiału odpornego na wiatr (USA, 2003 r.), [3]. Obecnie produkowane są już manekiny termiczne

umożliwiająca badanie suchej i mokrej wymiany ciepła, jak również symulujące ruch oraz oddech.

Zastosowanie manekina termicznego pozwala na szybkie i powtarzalne oraz znormalizowane przeprowadzenie badań izolacyjności cieplnej zestawów odzieży.

W swej pracy M. Konarska (i in.) wykazała, że badania prowadzone z wykorzystaniem manekina termicznego obarczone są o wiele mniejszym błędem, niż te, które realizowane są z udziałem ochotników [11].

Procedurę badawczą pomiaru izolacyjności cieplnej oraz oporu pary wodnej zestawów odzieży z wykorzystaniem manekina termicznego można znaleźć m.in. w normach: EN-ISO 15831 [4] i EN 342 [5] oraz ASTM F2371-10 [16], a informacje na temat wartości izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej pośrednio m.in. w dokumentach takich jak: ISO 7730 [13], ISO 11079 [1], ISO 9920 [14] czy ISO 7933 [15].

Manekiny termiczne w CIOP-PIB

Na wyposażeniu Laboratorium Obciążeń Termicznych CIOP-PIB znajdują się obecnie żeński oraz męski manekin termiczny.

Żeński manekin termiczny DIANA (fot. 1.)

Diana to żeński manekin termiczny TM 3.2/R110 projektu PT Technik (Dania), (fot. 1.).

Korpus manekina został wykonany z wysokiej jakości włókna szklanego i wyposażony w aluminiowe pierścienie, na których zamontowane są ruchome stawy. Powierzchnia manekina składa się z nawiniętego bardzo ściśle drutu niklowego, osadzonego na polistrze dobrze przewodzącym ciepło.

Diana składa się z 16 niezależnie sterowalnych segmentów. Każdy z nich wyposażony jest w unikalny system, który oblicza temperaturę całej powierzchni przez pomiar oporu drutu niklowego i steruje przełącznikiem mocy ogrzewania [11, 12].

Manekin termiczny Diana pozwala na pracę w 3 trybach wymiany ciepła:

- z utrzymaniem stałej temperatury t_s powierzchni manekina
- z utrzymaniem stałego strumienia ciepła H_c emitowanego z powierzchni manekina oraz
- ze spełnieniem warunków tzw. komfortu termicznego opisanego zależnością:

$$P = \frac{T_{bd} - T}{R_i}$$

gdzie:

P – moc (W)

T_{bd} – temperatura wnętrza manekina [°C]

T – temperatura powłoki manekina [°C]

R_i – opór cieplny manekina (0,054 m²°C/W).

Męski manekin termiczny NEWTON (fot. 2.)

34-segmentowy manekin termiczny NEWTON to produkt firmy Measurement Technology Northwest (manekin o męskim kształcie ciała), (fot. 2.).

NEWTON wykonany jest z miedzi, pokryty węglowo-epoksydową skorupą z wbudowanymi elementami grzejnymi oraz z systemem sterującym mocą ogrzewania. Manekin może pracować w zakresie temperatury otoczenia -20 °C ÷ +50 °C oraz w wilgotności względnej od 0 do 100%. Maksymalna moc podawana na segmenty manekina wynosi 700 W/m².



Fot. 1. Żeński manekin termiczny DIANA (fot. Archiwum CIOP-PIB)

Photo 1. Diana: a female thermal manikin

Wymiana ciepła między powierzchnią skóry człowieka a otoczeniem ma złożony i niejednorodny charakter. W celu uwiarygodnienia odwzorowania tego zjawiska, powierzchnia manekina termicznego podzielona jest na niezależne części (segmenty). Każda z nich posiada własny system grzewczy kontrolowany przez indywidualny układ sterowania. W dążeniu do doskonalszego symulowania procesu wymiany ciepła z powierzchni ciała człowieka z otoczeniem, powłoki współczesnych manekinów termicznych podzielone są zwykle na kilkanaście lub kilkadziesiąt segmentów. Z każdego segmentu uzyskiwana jest informacja o lokalnej wymianie ciepła z otoczeniem, w postaci wartości temperatury powierzchni segmentu (t_s) i wartości wydzielanego ciepła (H_c).

Konstrukcja manekina umożliwia wymianę ciepła z otoczeniem poprzez konwekcję i promieniowanie, a także pocenie (po dodatkowym oprzyrządowaniu). Umożliwia również symulację chodu.

Manekin termiczny NEWTON pozwala nie tylko na wyznaczenie suchej wymiany ciepła, lecz również wyposażony jest w system pocenia. Jego zastosowanie pozwala na doprowadzenie wody na powierzchnię każdego segmentu, ponieważ pory rozmieszczone są jednorodnie na jego całej powierzchni. Podczas korzystania z funkcji pocenia, na manekin termiczny zakładana jest specjalistyczna tkanina imitująca skórę, pozwalająca na równomierne rozmieszczenie wilgoci na całej jej powierzchni. Za pomocą programu komputerowego możliwe jest także sterowanie przepływem wody w poszczególnych segmentach (w dowolnym czasie w trakcie trwania badania).

Manekin wyposażony jest w automatyczny system grzewczy, którego zadaniem jest generowanie ciepła z powierzchni manekina z możliwością spełnienia trzech niezależnych warunków:

- wymiany ciepła z utrzymaniem stałej temperatury t_s powierzchni manekina



Fot. 2. Męski manekin termiczny NEWTON (fot. Archiwum CIOP-PIB)

Photo 2. Newton: a male thermal manikin

- wymiany ciepła z utrzymaniem stałego strumienia ciepła H_c emitowanego z powierzchni manekina

- wymiany ciepła ze spełnieniem warunków tzw. komfortu termicznego:

$$H_c = \frac{T_{core} - T_{skin}}{R_{core}} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

gdzie:

T_{core} – temperatura wewnętrzna manekina [37 °C]

T_{skin} – temperatura powierzchni danego segmentu manekina

R_{core} – opór cieplny manekina [0,055 m²°C/W].

Pomiar izolacyjności cieplnej odzieży wg PN-EN ISO 15831 [4] i PN-EN 342 [5]

Badania izolacyjności cieplnej odzieży w CIOP-PIB przeprowadza się w komorze klimatycznej z wykorzystaniem manekina termicznego. Do pomiaru, zgodnie z PN-EN ISO 15831 [4] oraz PN-EN 342 [5], wykorzystuje się w manekinie termicznym tryb wymiany ciepła z utrzymaniem stałej temperatury powierzchni manekina równej 34 °C, przy zmiennej mocy dostarczanej do każdego segmentu manekina, w zależności od zastosowanego zestawu odzieży. Temperatura otoczenia w komorze klimatycznej powinna być dobrana tak, by na poszczególnych segmentach gęstość strumienia ciepła nie była mniejsza niż 20 W/m² lub różnica pomiędzy temperaturą otoczenia a powierzchnią manekina powinna być mniejsza niż 12 °C. Zatem nie jest to zawsze taka sama wartość – jest ona zależna od badanego zestawu odzieży.

Pomiaru izolacyjności cieplnej dokonuje się w stanie ustalonym zarówno pod względem warunków mikroklimatu (wartości parametrów w komorze klimatycznej), jak i manekina termicznego (wartości temperatury powierzchni manekina oraz gęstości strumienia ciepła na poszczególnych segmentach).

Pomiar oporu pary wodnej zestawów odzieży (R_{et}) wg ASTM F2370-10 [16]

Dzięki manekinom termicznym z funkcją pocenia, możliwe jest wyznaczenie oporu pary wodnej zestawów odzieży (R_{et}). Jednak na chwilę obecną nie istnieje żadna europejska norma opisująca metodę badania oporu pary wodnej zestawów odzieży przy wykorzystaniu manekina termicznego z funkcją pocenia. Istnieje natomiast norma amerykańska ASTM F2370-10, opisująca wymagania i sposób prowadzenia badań tych wartości [16].

Zgodnie z ASTM F2370-10, badania oporu pary wodnej zestawów odzieży (R_{et}) w statycznych warunkach mogą być prowadzone w dwojaki sposób: albo poprzez wyznaczanie strat ciepła, albo poprzez wyznaczanie strat masy w czasie trwania badania.

Pomiędzy przeprowadzonymi pomiarami wartości oporu pary wodnej jednego zestawu odzieży, norma dopuszcza błąd rzędu 10%. Badania mogą być prowadzone w warunkach tzw. izotermicznych (*isothermal condition*: $t_s = t_a = 35^\circ\text{C}$) – gdy temperatura skóry manekina jest równa temperaturze otoczenia, bądź w warunkach nieizotermicznych (*non-isothermal condition*: $t_s \neq t_a$) – przy takich samych założeniach jak przy pomiarze izolacyjności cieplnej wg norm PN-EN ISO 15831 [4] oraz PN-EN 342 [5].

W normie ASTM F2370-10 [16] nie ma m.in. bliższych informacji nt. przeprowadzenia badań (kolejności wykonywanych czynności, protokołu badań), preferowanej metody wykonywania obliczeń czy założonej intensywności pocenia na segmentach manekina. W związku z tymi problemami oraz brakiem europejskiej normy na wyznaczenie oporu pary wodnej zestawów odzieży z wykorzystaniem manekina termicznego, w Europie od początku XXI wieku są podejmowane próby opracowania metodyki pozwalającej na wyznaczenie wartości oporu pary wodnej zestawów odzieży (m.in.: Wang [21, 22], Richards [23], Meinander [24]).

Badania z wykorzystaniem manekinów termicznych a zastosowanie wyników w praktyce

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Socjalnej w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy [20] oraz Kodeksem Pracy [19], pracodawca jest zobowiązany dostarczyć pracownikom przebywającym w środowisku zimnym odpowiednią odzież ciepłochronną. Odzież stosowana w środowisku pracy w temperaturze poniżej -5°C , musi spełniać wymagania m.in. normy PN-EN 342 [5]. Zgodnie z tą normą, wartość wynikowej efektywnej izolacyjności cieplnej (I_{cler}) dla odzieży ciepłochronnej nie powinna być niższa niż $0,310\text{ m}^2\text{K/W}$. Dzięki badaniom przeprowadzonym na manekinie termicznym jesteśmy w stanie określić wartość izolacyjności cieplnej, a zatem ciepłochronność danego zestawu odzieży.

Wartość oporu pary wodnej zestawów odzieży (R_{et}) można badać m.in. za pomocą manekinów termicznych z funkcją pocenia. Wartość R_{et} wpływa bezpośrednio na komfort użytkownika danego zestawu odzieży. Im niższa wartość oporu pary

wodnej, tym lepsze odparowanie wydzielanego przez pracownika potu, czyli poprawa jego poczucia komfortu cieplnego. W PN-EN 343 [18] wprowadzono klasy materiałów w zależności od wartości oporu pary wodnej (tabela). Zgodnie z tą normą najlepszym rozwiązaniem jest tzw. klasa 3 materiałów, a pracownik ubrany w odzież z nich wykonaną (pod względem odparowania potu) będzie odczuwał najwyższy poziom komfortu cieplnego.

Tabela. Klasy materiałów wg PN-EN 343 [18]
Table. Class of materials in accordance to PN-EN 343 [18]

Klasa materiałów	Wartość oporu pary wodnej R_{et} [$\text{m}^2\text{Pa/W}$]
1	$R_{et} > 40$
2	$20 < R_{et} \leq 40$
3	$R_{et} \leq 20$

Podsumowanie

Budowa manekinów termicznych bardzo zmieniła się od pierwszej połowy XX wieku. Można było zaobserwować ewolucję w tej dziedzinie: od prostej jednosegmentowej konstrukcji do wielosegmentowego manekina wyposażonego nie tylko w system symulacji suchej wymiany ciepła, lecz także w funkcje symulujące pocenie, chodzenie oraz oddychanie.

Na podstawie wielu badań prowadzonych przez niezależne ośrodki badawcze powstały dokumenty normatywne opisujące sposób badania suchej wymiany ciepła, natomiast trwają prace nad wykorzystywaniem funkcji pocenia manekinów termicznych, pozwalającej na pomiar oporu pary wodnej zestawów odzieży.

Badania prowadzone z wykorzystaniem manekinów termicznych służą także do udoskonalania istniejących już zestawów odzieży ochronnej. Produkcenci odzieży specjalistycznej cały czas pracują nad nowymi, lepszymi rozwiązaniami, a badania prowadzone na manekinie termicznym mogą wskazać słabe punkty konstrukcji odzieży ochronnej, nad którymi należy się szczególnie zastanowić.

Dziedzina związana z konstrukcją manekinów termicznych zapewne nadal będzie się rozwijać, zostaną wprowadzane coraz to nowe rozwiązania techniczne prowadzące do doskonalenia manekinów termicznych w takim kierunku, by jak najlepiej symulowały zachowanie człowieka.

BIBLIOGRAFIA

[1] PN-EN ISO 11079 *Ergonomia środowiska termicznego – Wyznaczenie i interpretacja stresu zimna z uwzględnieniem wymaganej izolacyjności cieplnej odzieży (IREQ) oraz wpływu wychłodzenia miejscowego*
 [2] Chojnacka A., Sudot-Szopińska I. *Komfort termiczny w pomieszczeniach biurowych w aspekcie norm*. Bezpieczeństwo Pracy 2007, 6:429, 16-19
 [3] Holmer I. *Thermal manikin history and application*. „European Journal of Applied Physiology” 2004, 92, 614-618
 [4] PN-EN ISO 15831 *Odzież – Właściwości fizjologiczne – Pomiar izolacyjności cieplnej z zastosowaniem manekina termicznego*
 [5] PN-EN 342 *Odzież ochronna – Zestawy odzieży i wyroby odzieżowe chroniące przed zimnem*
 [6] Nilsson H.O. *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models*. Marklund S. (ed.). National Institute for Working Life Stockholm, Szwecja, 2004. ISBN 91-7045-703-4; ISBN 91-7283-693-8; ISSN 0346-7821

[7] Richards M., Mattle M. *Development of a sweating agile thermal manikin – SAM*. Proceedings of the 4th International Meeting on Thermal Manikin, St. Gallen, Szwajcaria 2001

[8] Burke R., McGuffin R. *Development of an advanced thermal manikin for vehicle climate evaluation*. Proceedings of the 4th International Meeting on Thermal Manikin, St. Gallen, Szwajcaria 2001

[9] Leonard J. *Thermal insulation of protective clothing against cold: comparison between serial, parallel and global models*. Bartkowiak G., Frydrych I., Pawłowa M. (ed.). Proceeding of the conference CLOTECH, Innovations in textile materials & protective clothing. Warszawa 2012

[10] Kuklane K., Gao Ch., Wang F., Holmer I. *Parallel and serial methods of calculating thermal insulation on European manikin standards*. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) 2012, 18:2, 171-179

[11] Konarska M., Sołtynski K., Sudot-Szopińska I., Chojnacka A. *Comparative Evaluation of Clothing Thermal Insulation Measured on a Thermal Manikin and on Volunteers*. Fibres & Textiles in Eastern Europe April / June 2007, 15, 2:61, 73-79

[12] Konarska M., Sołtynski K., Sudot-Szopińska I., Młodziński D., Chojnacka A. *Aspects of Standardisation in Measuring Thermal Clothing Insulation on a Thermal Manikin*. Fibres & Textiles in Eastern Europe October / December 2006, 14, 4:58, 58-63

[13] PN-EN ISO 7730 *Ergonomia środowiska termicznego – Analizyzy wyznaczenie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego*

[14] PN-EN ISO 9920 *Ergonomia środowiska termicznego – Szacowanie izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieży*

[15] PN-EN ISO 7933 *Ergonomia środowiska termicznego – Analizyzy wyznaczenie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczeń przewidywanego obciążenia termicznego*

[16] ASTM F2371-10 *Standard Test Method for Measuring the Heat Removal Rate of Personal Cooling System Using a Sweating Heated Manikin*

[17] McCullough E., *Interlaboratory study of sweating manikins*. Proceedings of the 4th International Meeting on Thermal Manikin, St. Gallen, Szwajcaria 2001

[18] PN-EN 343:2007: *Odzież ochronna – Ochrona przed deszczem*

[19] Kodeks Pracy – Dział X. Bezpieczeństwo i Higiena Pracy

[20] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z 26.09.1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (DzU 03.169.1650 wraz z późniejszymi zmianami)

[21] Wang F., Gao C., Kuklane K. *Determination of clothing evaporative resistance on a sweating thermal manikin in an isothermal condition: heat loss method or mass loss method?* Ann. Occup. Hyg., 2011, vol. 55, 7, 775-783

[22] Wang F., Psikuta A., et al. *Effects of body motion and wind on thermal comfort properties evaluated using a manikin with realistic gait patterns*. Proceedings of the 93m, Tokyo 2012

[23] Richards M., Rossi R., Meinander H., et al. *Dry and wet heat transfer through clothing dependent on the clothing properties under cold conditions*. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) 2008, 14, 1, 69-76

[24] Meinander H., Hellsten M. *The influence of sweating on the heat transmission properties of cold protective clothing studied with a sweating thermal manikin*. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) 2004, 10, 3, 263-269

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.