

dr ANNA MARSZAŁEK  
Centralny Instytut Ochrony Pracy

## Zastosowanie manekinów termicznych do badania komfortu cieplnego człowieka

Człowiek jako organizm stałociepny utrzymuje stałą temperaturę wewnętrzną ciała ( $37^{\circ}\text{C} \pm 0,5$ ) w szerokim zakresie warunków środowiskowych. Jednakże w środowisku umiarkowanym i zimnym termoregulacja człowieka jest wspomagana przez zastosowanie odzieży chroniącej przed nadmiernymi stratami ciepła. Często odzież jest więc stosowana przez człowieka do ochrony przed różnego typu narażeniami zarówno natury fizycznej, np. niska temperatura powietrza, jak również takimi, jak promieniowanie podczerwone, odpryski płynnego metalu, czynniki chemiczne (aerozole, kurz, pyny, pary i gazy) pochodzące z otoczenia.

W celu zapewnienia człowiekowi komfortu termicznego przy wykonywaniu pracy o określonej ciężkości i przy zastosowaniu odzieży ochronnej, niezbędne jest określenie izolacyjności termicznej tej odzieży. Często, przy zastosowaniu określonego rodzaju odzieży, należy również ograniczyć czas pracy w trudnych warunkach środowiska termicznego.

Poniżej przedstawiono przykłady zastosowania manekinów termicznych, które zostały zaprezentowane na międzynarodowych konferencjach: dotyczących odzieży ochronnej (w 1997 r.) oraz manekinów termicznych (w 1999 i 2001 r.).

### Ocena izolacyjności termicznej odzieży

Określanie izolacyjności odzieży jest znormalizowane. Do takiej oceny stosuje się normę ISO 9920 (1995). Norma ta określa metody oceny charakterystyki termicznej, to znaczy oporu odzieży na suchą utratę ciepła i utratę ciepła w procesie parowania, przeprowadzanej w warunkach równowagi.

Sucha utrata ciepła z ciała człowieka (głównie przez konwekcję i promieniowanie) zachodzi z powierzchni skóry

przez warstwy odzieży do jej powierzchni. Oporność na ten przepływ ciepła jest wyrażony jako  $I_{cl}$ . **Izolacyjność termiczna**, czyli oporność zestawów odzieżowych na suchą utratę ciepła z ciała jest wyrażana jako *podstawowa izolacyjność odzieży* ( $I_{cl}, \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ ), która jest izolacyjnością od skóry do powierzchni odzieży.

Do pomiaru izolacyjności termicznej odzieży często stosowany jest **manekin termiczny**. Bardziej skomplikowana metoda pozwala na ocenę izolacyjności termicznej odzieży bezpośrednio w badaniach z udziałem ludzi. Podstawy obu metod są zaprezentowane w normie ISO 9920:1995 [1] oraz w publikacji K. Sołtyńskiego *Współczesny manekin termiczny – jego konstrukcja i zastosowanie* [2].

Pozycja ciała w odzieży i ruch ciała użytkownika, a także penetracja powietrza przez warstwy odzieży – wynikające z szybkości ruchu powietrza – będą modyfikowały izolacyjność termiczną zestawu odzieżowego. Typ materiału zastosowanego w odzieży ma ograniczony wpływ na izolacyjność termiczną, natomiast wielkość izolacyjności jest zależna głównie od grubości warstw odzieży i wielkości powierzchni ciała przykrytej odzieżą.

**Oporność parowania** ( $R_T$ ) zestawów odzieżowych może być mierzona w badaniach z udziałem człowieka lub z zastosowaniem pocących się manekinów termicznych. Wielkość ta może być również obliczona przy wykorzystaniu izolacyjności odzieży i własności przepuszczalności pary wodnej. Oporność parowania stosowanej odzieży jest zależna od ruchu ciała i przepuszczalności powietrza. Zaleca się

stosowanie współczynników korekcyjnych biorących pod uwagę te czynniki [1].

### Uzasadnienie stosowania manekinów termicznych

Badania wymiany ciepła między ciałem człowieka a otoczeniem najdokładniej można byłoby określić na podstawie testów fizjologicznych z udziałem człowieka, gdyż najlepiej odzwierciedlają one praktyczne zastosowanie odzieży. Jednakże, ze względu na występowanie indywidualnych różnic dotyczących reakcji fizjologicznych, konieczne jest wielokrotne wykonanie badań w celu zapewnienia powtarzalności uzyskanych wyników [3]. Wpływa to na koszty ogólne badań i w związku z tym rutynowe badania izolacyjności termicznej wykonywane są z zastosowaniem manekinów termicznych.

Badania fizjologiczne są natomiast niezbędne do wyjaśnienia reakcji fizjologicznych podczas stosowania różnych typów odzieży w zależności od warunków środowiska pracy.

Manekiny termiczne są złożonymi i kosztownymi narzędziami. Dają możliwość pomiaru utraty ciepła na drodze konwekcji i promieniowania na całej powierzchni odwzorowującej kształt człowieka. Obecnie budowane manekiny mają ponad 30 niezależnie regulowanych segmentów. W wyniku sumowania ważonych wartości odniesionych do określonej powierzchni, można określić utratę ciepła z całej powierzchni.

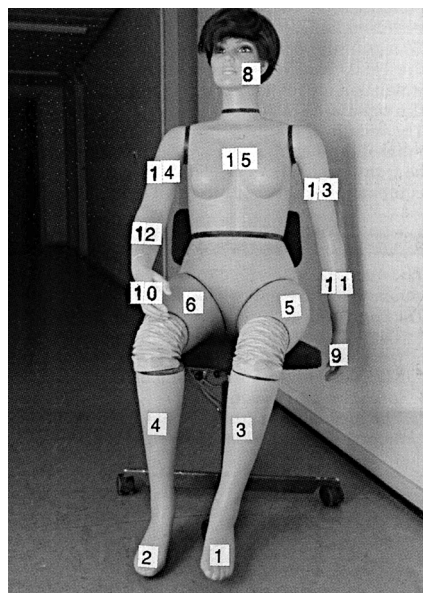
Zalety manekinów termicznych warunkujące ich praktyczne wykorzystanie są następujące [4]:

- symulacja wymiany ciepła z powierzchni ciała człowieka, dotycząca zarówno całej powierzchni ciała, jak i mniejszych obszarów
- trójwymiarowy pomiar wymiany ciepła
- realistyczna integracja strat ciepła
- obiektywny sposób pomiaru izolacyjności cieplnej odzieży
- szybki, dokładny i powtarzalny pomiar
- efektywne narzędzie do pomiarów porównawczych
- możliwość określenia izolacyjności odzieży i oporu parowania oraz strat ciepła.

Ze względu na wysoką dokładność metody pomiaru, uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do wykorzystania w modelowaniu matematycznym i przewidywaniu reakcji fizjologicznych [4]. Coraz więcej norm międzynarodowych zakłada konieczność przeprowadzania testów z zastosowaniem manekinów termicznych. Większość z nich dotyczy określenia izolacyjności termicznej odzieży.

## Rodzaje manekinów termicznych

Manekiny termiczne są bardzo użyteczne do oceny komfortu cieplnego odzieży. Ich zastosowanie rozpoczęło się od jednosegmentowego manekina wykonanego z miedzi dla potrzeb armii amerykańskiej w latach czterdziestych XX w. [4]. Zgodnie z sugestią Fan, Chen i Zhang [3] obecnie funkcjonujące manekiny termiczne można podzielić na trzy generacje. Pierwszą stanowią **manekiny stojące** (bez możliwości poruszania się) i nie pocące się (fot. 1.). Druga to **manekiny**



Fot. 1. Manekin termiczny nie poruszający się, zbudowany z 16 segmentów (Technical University, Dania)

**poruszające się**, ale nie pocące się. Trzecia generacja obecnie jest w trakcie powstawania. **Manekiny z tej grupy będą miały symulację pocenia i wyrafinowany sposób poruszania się.** Konstrukcja typowego manekina pocącego się charakteryzuje się występowaniem na jego powierzchni tkaniny, której zawilgocenie powstaje dzięki zewnętrznemu układowi

dostarczania wody przez system rurek i rozpylaczy. Manekiny termiczne są bardzo kosztowne i dostępne w nielicznych, dobrze wyposażonych laboratoriach.

Ciekawe rozwiązanie konstrukcyjne manekina termicznego zostało opracowane przez chińskich naukowców w Instytucie Materiałów i Odzieży w Hongkongu [3]. Celem tej pracy było uzyskanie manekina termicznego znacznie mniej kosztownego niż obecnie istniejący. Opracowano manekin pocący się w realny sposób, w którym źródłem płynu do pocenia jest wnętrze manekina a uwalnianie płynu następuje na powierzchni przez zastosowanie „oddychającego” materiału. Rozkład temperatur na powierzchni manekina regulowany jest przez pompowanie ogrzewanej wody we wnętrzu manekina, co symuluje krążenie krwi w organizmie człowieka w celu przenoszenia ciepła. Dodatkową zaletą nowo opracowanego manekina jest możliwość poruszania się.

W celu zmniejszenia kosztów wynikających z budowy całego manekina, a także po to, aby zwiększyć dokładność pomiarów, ostatnio coraz częściej stosuje się samodzielne systemy do badania poszczególnych elementów odzieży:

- model stopy do badania obuwia [3,4]
- model głowy do badania hełmów [5]
- pocący się tułów do badania własności higienicznych materiałów i kurtek [5].

Ze względu na uzyskanie niezbędnych danych normalizacyjnych, aktualnie prowadzi się badania międzylaboratoryjne mające na celu porównanie wyników badań z zastosowaniem różnych rodzajów manekinów termicznych i porównanie ich z wynikami uzyskanymi w badaniach eksperymentalnych z udziałem ludzi [3]. Innym przykładem mogą być międzylaboratoryjne badania z wykorzystaniem modelu stopy [3].

## Przykładowe zastosowania manekinów termicznych

### Zastosowanie w sporcie i rekreacji

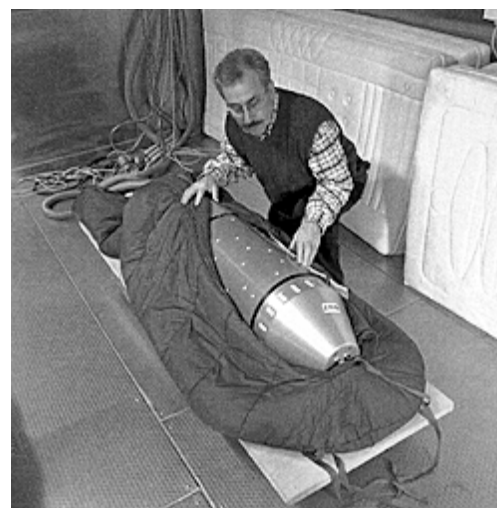
Wymagania sportowców dotyczące odzieży są związane z zapewnieniem odpowiedniej izolacyjności termicznej i możliwości odparowania potu. Te same wymagania dotyczą takich akcesoriów sportowych, jak: kaski rowerowe, namioty, śpiwory [4]. Najlepszą drogą do testowania wymienionego sprzętu sportowego, w celu zapewnienia mu wymaganych właściwości cieplnych, są badania na

manekinie termicznej. W takich badaniach mogą być sprawdzane możliwości usuwania potu przez systemy wentylacyjne odzieży, oddychające komponenty materiałowe lub ich własności związane z absorpcją wilgoci.

Do badań odzieży i sprzętu sportowego stosuje się następujące wymagania dotyczące manekinów termicznych [4]:

- ruchomy manekin – do oceny własności cieplnych materiałów i odzieży
- pocący się manekin – do oceny izolacyjności termicznej i przenoszenia pary wodnej zestawów odzieżowych i śpiworów (fot. 2.)

- ruchoma ręka i stopa – do badań własności wentylacyjnych rękawic i obuwia
- pocąca się ręka i stopa – do oceny izolacyjności termicznej i przenoszenia pary wodnej przez rękawice (fot. 3.) oraz obuwie



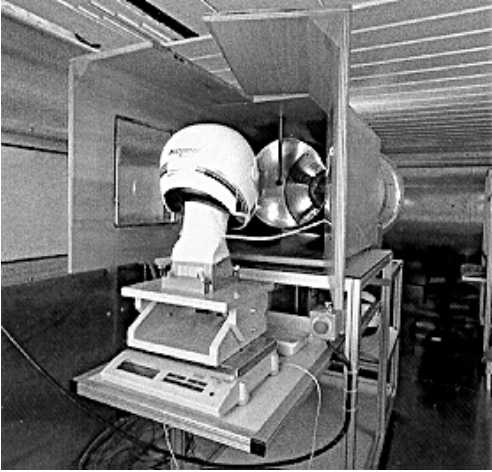
Fot. 2. Pocący się tułów do badań przepływu ciepła i wilgoci w śpiworach (EMPA - Szwajcarskie Laboratoria Federalne do Badań i Testowania Materiałów)



Fot. 3. Model ręki do badania izolacyjności termicznej rękawic (EMPA, Szwajcaria)

– pocąca się głowa – do równoczesnych pomiarów izolacyjności termicznej i przenoszenia pary wodnej podczas wentylacji kasku (fot. 4.).

W Regionalnym Instytucie Zdrowia Zawodowego w Oulu do badań związanych z testowaniem śpiworów zastosowano manekin termiczny [3], w celu stworzenia użytkownikowi odpowiednich warunków do dobrego wypoczynku w różnych warunkach otoczenia. Autorzy badań przyjęli założenie, że podczas snu



Fot. 4. Pocąca się głowa do badania kasków (EMPA, Szwajcaria)

w śpiworze na otwartej przestrzeni lub w namiocie współistnieje wiele czynników zakłócających zarówno sen, jak i komfort termiczny. Wykonano testy dla użytkowników i producentów. Podstawowa ocena dotyczyła określenia wartości całkowitej i lokalnej izolacyjności produktu, izolacyjności na jednostkę masy, znaczenia warstw znajdujących się pod śpiworem, wpływu typu modelu oraz objętości śpiwora itp. Z zastosowaniem manekina termicznego badano wpływ wilgoci i szybkości przepływu powietrza. Stwierdzono, że manekin termiczny jest bardzo użytecznym i czułym narzędziem do oceny izolacyjności termicznej śpiworów oraz określania kierunków ich doskonalenia dla wygody użytkowników.

W innych badaniach z zastosowaniem manekina termicznego oraz badaniach z udziałem ludzi określone były również minimalne temperatury komfortowego snu w śpiworach [4].

#### *Zastosowanie do oceny klimatu w pomieszczeniach*

Przeprowadzono badania nad sposobem przewidywania i wizualizacji odczuwanego klimatu w pomieszczeniu na stanowisku pracy [3]. Stwierdzono, że oce-

na klimatu może być dokonana wówczas, gdy wyniki pomiarów są połączone z badaniami odczuć cieplnych. W badaniach wykorzystano dwa manekiny termiczne i grupę osób do zbadania ocen subiektywnych przy testowaniu 30 rodzajów warunków środowiskowych. Celem badań było zastosowanie i rozwinięcie komputerowych metod do wizualizacji, analizy, oceny oraz poprawienia klimatu i warunków wentylacji w pomieszczeniu pracy. Autorzy stwierdzili, że symulacje komputerowe powinny stanowić uzupełnienie trudnych, czasochłonnych i drogich badań eksperymentalnych zmierzających do oceny komfortu cieplnego. Zastosowanie takich metod jest użyteczne w celu stworzenia systemu, który prowadziłby do poprawienia wentylacji i warunków klimatu pomieszczeń w takich specyficznych środowiskach, jak szkoły, biura, szpitale, pojazdy.

Na podstawie badań stwierdzono, że zakłócenia klimatu lokalnego zarejestrowane przy zastosowaniu manekinów termicznych dobrze korelują z odczuciami cieplnymi doświadczanymi przez osoby ekspozowane na takie same warunki środowiskowe, jak manekiny. Różnice dotyczące kształtu, konstrukcji manekina i warunków testowania oraz osób pozwoliły na uzyskanie linii obrazujących strefy komfortu. Kształt tych linii w odniesieniu do osób i manekinów jest taki sam. Na podstawie badań opracowano bardziej ogólny profil stref komfortu, możliwy do zastosowania w odniesieniu do innych rodzajów manekinów i sytuacji związanych ze stosowaniem różnych typów odzieży. Jest to krok w kierunku nowego podejścia do oceny i wizualizacji różnych sytuacji termicznych w nowoczesnych miejscach pracy.

#### *Zastosowanie do oceny asymetrii termicznej*

Lokalne temperatury skóry różnią się na powierzchni ciała człowieka. Ich odchylenia od temperatur optymalnych mało wpływają na odczucia komfortu. Jak stwierdził Fanger [6] ryzyko dyskomfortu w warunkach jednorodnego klimatu jest zależne jedynie od amplitudy zmian klimatycznych w kierunku ciepła bądź zimna. Z kolei niejednorodność klimatu będzie sprawiać, że lokalne utraty ciepła mogą się znacznie różnić od tych, które charakteryzują warunki jednorodne. Candas [4] stwierdził, że **zastosowanie manekina termicznego jest nie tylko przydatne, lecz absolutnie niezbędne do oceny efektów środowiskowych w wa-**

#### **runkach niejednorodności klimatu.**

Autor uważa, że nawet gdy lokalne pomiary mogą być dokonane bez użycia manekina termicznego, ich wykonanie będzie czasochłonne, kosztowne i niezbyt dokładne, ponieważ:

- nie będą odzwierciedlać rzeczywistej sytuacji, bowiem człowiek współdziała ze środowiskiem
- nie jest możliwe uzyskanie wszystkich wyników w tym samym czasie
- nie będzie możliwe uzyskanie efektu ogólnego odnoszącego się do całego ciała.

Candas [4] uważa, że zastosowanie manekina termicznego pozwoli na dobrą ocenę zarówno lokalnych, jak i ogólnych skutków utraty ciepła w wyniku zróżnicowanych wpływów termicznych. Stwierdza również, że ponieważ manekin termiczny ma kształt człowieka, pewne specyficzne efekty mogą być ocenione w bardziej odpowiedni sposób z zastosowaniem manekina niż za pomocą innych środków, głównie dotyczy to wpływu promieniowania i konwekcji wynikającej z prędkości ruchu powietrza.

#### *Zastosowanie do oceny klimatu w pojazdach*

Ostatnio wzrosło zainteresowanie systemami kontroli klimatu w pojazdach, ponieważ systemy te są przeznaczone do funkcjonowania w wyznaczonym czasie. Prace nad wysoko zawansowaną techniką kontroli klimatu prowadzili Burke i McGuffin [3]. Krajowe Laboratorium Energii Odnawialnej (NREL) w Golden (USA) opracowuje system do testowania klimatu w pojazdach, który składa się z trzech narzędzi do oceny i przewidywania komfortu cieplnego człowieka w przejściowych warunkach niejednorodności środowiska termicznego. W ich skład wchodzi model elementów skończonych układu termoregulacji człowieka, model psychologiczny, który przewiduje zarówno lokalny, jak i ogólny komfort cieplny oraz pocący się manekin termiczny z wysoką rozdzielczością przestrzenną pomiaru temperatur. Za pomocą manekina, do modelu elementów skończonych przekazywane są informacje o temperaturach na jego powierzchni. Model elementów skończonych wykorzystuje je następnie jako informację do przewidywania lokalnego wytwarzania ciepła i szybkości pocenia. Te wielkości są przekazywane do manekina, który dostosowuje ogrzewanie i system pocenia na podstawie sprzężenia zwrotnego układu. Takie rozwiązanie umożliwia uzyskanie pra-

wie naturalnej reakcji, jaka wystąpiłaby u człowieka. Informacje o temperaturach – powierzchni i wewnętrznej są dalej przekazywane w czasie rzeczywistym do psychologicznego modelu komfortu, który generuje końcowy efekt w postaci lokalnego i ogólnego wrażenia komfortu cieplnego. We wspomnianym Laboratorium zbudowano obecnie prototyp powierzchni manekina, który jest na etapie testowania. Skonstruowano również model zintegrowanego, pocącego się tułowia. Całość konstrukcji będzie gotowa w 2002 roku, a następnie będzie poddana walidacji.

Nilsson [4] zastosował manekin termiczny oraz mierniki komfortu do badań warunków klimatu w środkach transportu (ciężarówka, wagony metra) w różnych miejscach Europy (Hiszpania, Szwecja, Francja), porównując warunki w zimnej i ciepłej porze roku. Wskaźniki klimatyczne otoczenia oraz wnętrza kabiny kierowcy w czasie przejazdu rejestrowano korzystając z różnych metod pomiarowych.

W badaniach testowano sprawność różnych systemów wentylacyjnych i ich wpływ na komfort cieplny kierowcy. Wykonano mało badań związanych z siedziskami wentylowanymi, gdyż zastosowany manekin nie miał wystarczająco dużej mocy do przeprowadzenia pomiarów. Wykazano, że szczególnie w momencie wchodzenia do kabiny z zimnego otoczenia bardzo nieprzyjemne było korzystanie z wentylowanych siedzisk w suchych warunkach zimowych. Autor stwierdza, że zgodnie z doświadczeniem kierowców wentylowane siedziska mogą być stosowane podczas krótkich okresów na długiej trasie. W momencie wsiadania do kabiny przy temperaturze zewnętrznej  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  siła chłodząca wentylowanych siedzisk bardzo szybko staje się niemożliwa do zaakceptowania. Autor przedstawia propozycje modyfikacji systemu wentylacji polegające na regulacji szybkości napływu powietrza z wentylatora i ogrzewaniu siedziska przez zastosowanie w nim czujnika temperatury.

#### Zastosowanie do badania palności odzieży ochronnej

Technologia budowy manekinów termicznych rozwinęła się do tego stopnia, że możliwa jest ocena działania ochronnego materiałów i odzieży w rzeczywistych sytuacjach ekspozycji na otwarty ogień [5]. W Centrum Badań Własności Ochronnych Materiałów w Karolinie Północnej przeprowadzono badania palności materiałów w testach z bezpośrednim zastosowaniem płomienia. W badaniach

zastosowano manekin termiczny o kształcie dorosłego mężczyzny, pokryty poliestrem, odporny na działanie wysokiej temperatury i wyposażony w 122 czujniki przepływu ciepła rozłożone jednolicie na przedniej i tylnej stronie powierzchni ciała, z których każdy reprezentował 0,82% powierzchni ciała. Każdy z czujników zawiera termoparę umieszczoną poniżej powierzchni manekina na znanej głębokości. Zestaw do zbierania danych rejestrował temperaturę każdego czujnika co sekundę. Do oceny przepływu ciepła (na powierzchni manekina przez czujnik w funkcji czasu), wykorzystywano odczyt zmierzonych temperatur w połączeniu z jednowymiarowym modelem chwilowego przewodzenia ciepła. Obliczony przepływ ciepła porównywano z fizycznymi własnościami skóry człowieka i oceniano jej tolerancję na intensywne ciepło, aby przewidzieć ewentualne uszkodzenia ciała wywołane oparzeniem.

Badania przeprowadzone na pełnowymiarowym manekinie termicznym stanowią znaczący postęp w kierunku oceny odzieży chroniącej przed płomieniem i mogą być pomocne w przewidywaniu oddziaływania ekspozycji użytkownika odzieży na płomień. Do tej pory niewiele laboratoriów jest wyposażonych w takie oprzyrządowanie.

#### Zastosowanie do badania jakości powietrza

Przez wiele lat manekiny termiczne były stosowane do pomiaru izolacyjności odzieży i oceny środowiska termicznego. W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie możliwością oceny niektórych parametrów jakości powietrza przy zastosowaniu manekinów termicznych [4]. W tym przypadku ocena dotyczyła wdychania dymu tytoniowego.

Siedząca osoba tworzy wokół siebie specyficzną przestrzeń, w której temperatura powietrza jest modyfikowana przez temperaturę powierzchni jej ciała, zależnie od ruchu powietrza wokół niej. Ruch powietrza może transportować zanieczyszczenia z dolnej części pomieszczenia do strefy oddychania.

Zależnie od systemu wentylacji bierne palenie w niektórych miejscach pomieszczenia może mieć większe nasilenie, a jego poziom może być nie do zaakceptowania. Z takich przesłanek wynikała potrzeba pomiaru jakości powietrza, szczególnie w strefie oddychania [4].

W celu sprostania takim potrzebom manekin został połączony ze sztucznymi płucami, które posiadają normalną funk-

cję oddechową przez nos i usta. Intensywność oddychania zawiera się w przedziale 5-30 litrów na minutę, a częstość oddechów może zmieniać się w zakresie od 6 do 30 razy na minutę. Powietrze zainhalowane przez nos lub usta może być przetransportowane do miernika analizującego jakość powietrza w rzeczywistej sytuacji, dokładnie w strefie oddychania. W celu uzyskania bardziej realnych symulacji wydychanego powietrza, sztuczne płuca zostały wyposażone w małą jednostkę nawilżającą i ogrzewającą, aby wydychane powietrze opuszczające manekin miało odpowiednią temperaturę i wilgotność.

\* \* \*

Z przeprowadzonego powyżej przeglądu prac badawczych różnych ośrodków wynika, że manekiny termiczne mają szerokie zastosowanie i ciągle powstają nowe możliwości ich zastosowań, a tym samym stanowią bardzo ważne narzędzie badania komfortu cieplnego człowieka.

W wyniku obserwacji kierunku rozwoju manekinów termicznych można zauważyć, że rozwiązania konstrukcyjne nowoczesnych manekinów charakteryzują się coraz większą liczbą segmentów, co daje szansę uzyskiwania większej dokładności pomiarów. Można także stwierdzić, że badania skupiają się na poszczególnych partiach odziewających części ciała człowieka (stopa, głowa, tułów). Wyniki badań uzyskanych w eksperymentach z udziałem ludzi, zwłaszcza dotyczące subiektywnych odczuć cieplnych oraz badań na manekinach termicznych są podstawą do matematycznego modelowania komfortu człowieka w zależności od warunków środowiska termicznego i zastosowanej odzieży [3].

#### PIŚMIENNICTWO

- [1] International Standard ISO 9920:1995 *Ergonomics of the thermal environment – Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble*
- [2] Sołtyński K.: *Współczesny manekin termiczny – jego konstrukcja i zastosowanie*. Bezpieczeństwo Pracy 1 (342), 2000, s. 16-20
- [3] Proceedings of the Fourth International Meeting on Thermal Manikins, EMPA, Switzerland, 27-28 September, 2001
- [4] Proceedings of the Third International Meeting on Thermal Manikin Testing 3IMM. 2000. National Institute for Working Life, October 12-13, 1999
- [5] Fifth Scandinavian Symposium on Protective Clothing May 5-8, Elsinore, Denmark, 1997
- [6] Fanger P.O. *Thermal comfort*. Danish Technical Press, Copenhagen. Wyd. McGraw-Hill Book Company, New York, 1970