

Ocena komfortu i obciążenia cieplnego człowieka z zastosowaniem wirtualnych manekinów termicznych



Fot. Pablo Scapinachis Armstrong/BigStockPhoto

W prognozowaniu obciążenia termicznego oraz modelowaniu izolacyjności cieplnej odzieży stosowanej na danym stanowisku pracy od lat stosowane są rzeczywiste manekiny termiczne umożliwiające odwzorowanie procesów wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem. Wraz z rozwojem technik numerycznego modelowania wymiany ciepła opracowywane są również wirtualne manekiny termiczne, które umożliwiają szybkie określenie ryzyka wystąpienia obciążenia termicznego na danym stanowisku pracy. W artykule przedstawiono informacje na temat konstrukcji pierwszego polskiego wirtualnego manekina termicznego, wyposażonego w moduł umożliwiający symulację również działania układu termofizjologii człowieka.

Evaluation of human' thermal comfort and heat stress using virtual thermal manikin

To predict human' thermal stress and to model thermal insulation of clothing ensemble bowl used for a given station, the real thermal manikins for thermal mapping of the processes of heat exchange between man and the environment are applied. With the development of heat transfer numerical modeling techniques the virtual thermal manikins, that allow to quickly prediction of thermal stress risk at the workplace, are also developed. The article presents information regarding the construction of the first Polish virtual thermal manikin equipped with a module that allows simulating the action of human thermophysiology.

Wstęp

Od wielu lat do badania izolacyjności cieplnej odzieży oraz komfortu cieplnego człowieka stosowane są manekiny termiczne, umożliwiające odwzorowanie wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, z uwzględnieniem odzieży oraz rzeczywistych warunków środowiskowych [1]. Jednocześnie, wraz z tworzeniem kolejnych, coraz doskonalszych manekinów termicznych, opracowywane są wirtualne modele cieplne człowieka, które pozwalają na bardzo szybkie i dokładne określenie stopnia obciążenia cieplnego lub dyskomfortu pracownika. Ponieważ organizm ludzki jest bardzo skomplikowany, prace nad stworzeniem obliczeniowych modeli cieplnych człowieka są nadal prowadzone w celu zwiększenia dokładności otrzymywanych wyników.

W niniejszym artykule przedstawiono przegląd informacji dotyczących tworzenia obliczeniowych modeli cieplnych człowieka, a także dane dotyczące opracowanego w CIOP-PIB pierwszego modelu wirtualnego manekina, który umożliwia odwzorowanie działania układu termofizjologii człowieka.

Działanie układu termoregulacji człowieka

Człowiek należy do organizmów homeotermicznych utrzymujących stałą temperaturę wewnętrzną, w zakresie $37 \pm 0,3$ °C [2]. W praktyce, w organizmie człowieka występują dynamiczne zmiany, będące reakcją na czynniki wewnętrzne (np. w trakcie ćwiczeń, ciężkiej pracy fizycznej) oraz zewnętrzne (np. przebywanie w gorącym lub zimnym środowisku, zmiana odzieży).

W celu utrzymania stałej wartości temperatury wewnętrznej, w organizmie człowieka dochodzi do produkcji ciepła, które przemieszcza się z organów wewnętrznych na zewnątrz organizmu w procesach przenikania, przewodzenia oraz z transportem płynów między komórkami (np. z krwią). Z powierzchni skóry ciepło oddawane jest do otoczenia w procesach: konwekcji, promieniowania oraz odparowania wilgoci przenikającej poprzez skórę (rys. 1.). Ponadto, z wnętrza organizmu ciepło oddawane jest wraz z wydychanym powietrzem w procesie konwekcji i odparowywania wilgoci pokrywającej drogi oddechowe.

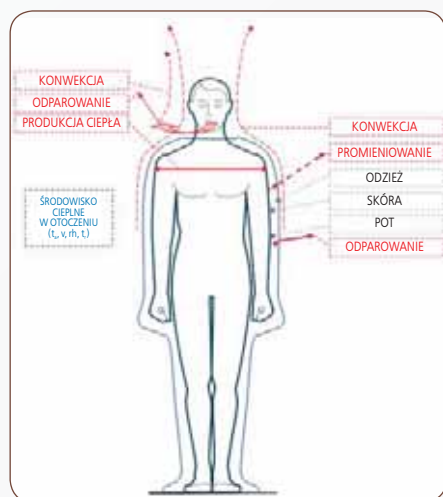
Za regulację temperatury ciała odpowiada ośrodek termoregulacji, który jest zlokalizowany w podwzgórzku mózgu i składa się z 3 elementów [3]:

1. Termoreceptorów i termodetektorów – receptorów wrażliwych na zmianę temperatury otoczenia i wnętrza ciała.
2. Ośrodka termoregulacji – struktury działającej na zasadzie termostatu, przetwarzającej sygnały z receptorów i przekazującej odpowiednie informacje do efektorów układu termoregulacji.
3. Efektorów układu termoregulacji (głównie mięśni) – receptorów przetwarzających i realizujących odpowiedzi układu nerwowego.

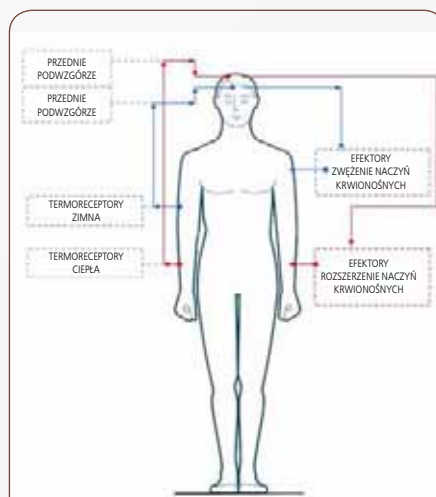
Schemat działania układu termoregulacji przedstawiono na rys. 2.

Jak przedstawiono na rys. 2., podczas ekspozycji człowieka na środowisko gorące rosnąca temperatura wewnętrzna powoduje rozszerzenie naczyń krwionośnych i zwiększenie podskórnego przepływu krwi. W efekcie na zewnątrz ciała odprowadzany jest nadmiar ciepła, a jednocześnie zwiększa się współczynnik przewodzenia ciepła przez skórę [5]. W tym samym momencie zwiększony przepływ krwi uruchamia gruczoły potowe, odprowadzające cieplejszy płyn z organizmu i powoduje odparowanie ciepła z powierzchni skóry.

W środowisku umiarkowanym, w którym ilość ciepła produkowanego przez organizm jest równoważona ilością ciepła odbieraną przez otoczenie, nie dochodzi do żadnych dodatkowych reakcji układu termoregulacji.



Rys. 1. Procesy oddawania ciepła z organizmu do otoczenia
Fig. 1. The processes of heat dissipation from the body to the environment



Rys. 2. Schemat działania układu termoregulacji [4]
Fig. 2. Schematics of the thermoregulatory system [4]

W środowisku zimnym, przy obniżeniu się temperatury wewnętrznej dochodzi do zwężenia naczyń krwionośnych, co redukuje ilość ciepła oddawanego do obwodowych części ciała wraz z krwią, przy jednoczesnym zmniejszeniu współczynnika przewodzenia ciepła przez tkanki podskórne i skórę [5], oraz pobudza mięśnie do drżenia, co powoduje produkcję dodatkowej ilości ciepła w organizmie. W rezultacie obniża się temperatura powierzchni skóry i maleje utrata ciepła.

Wynikiem działania układu termoregulacji jest wartość temperatury skóry na poszczególnych częściach ciała, zmieniająca się w zależności od ilości ciepła oddawanego z organizmu do otoczenia, oraz wartość temperatury wewnętrznej.

Zestawienie reakcji organizmu w zależności od warunków otaczającego środowiska przedstawiono w tabeli.

Ocena obciążenia cieplnego za pomocą modeli obliczeniowych

Ze względu na opisane wyżej różnice w reakcjach organizmu na środowisko gorące, umiarkowane i zimne, dotychczasowe podejście do tworzenia obliczeniowych modeli cieplnych człowieka

Tabela. Reakcje organizmu w zależności od warunków otaczającego środowiska (↑ – wzrost, ↓ – spadek, -- – bez zmian)
Table. The reactions of the body depending on the surrounding environment (↑ – increase, ↓ – decrease, - - no change)

Środowisko	Reakcje organizmu
Gorące	↑ przepływ krwi pod skórą ↑ częstość skurczów serca ↑ pocenie ↑ zawilgocenie skóry ↑ temperatura ciała ↑ metabolizm
Umiarkowane	-- zmiana wszystkich parametrów w granicach ±5%
Zimne	↓ przepływ krwi pod skórą ↓ drżenie mięśni ↓ temperatura ciała ↓ metabolizm

opierało się na rozgraniczeniu modeli służących do oceny komfortu cieplnego od bardziej zaawansowanych modeli wykorzystywanych do oceny obciążenia cieplnego (rys. 3.)

Z tej perspektywy przyjęto umowny podział prac nad modelowaniem przepływu ciepła z organizmem człowieka [4]:

- Modelowanie **systemu aktywnego** (zwanego inaczej **modelem termofizjologii**) – określa model dystrybucji ciepła w organizmie

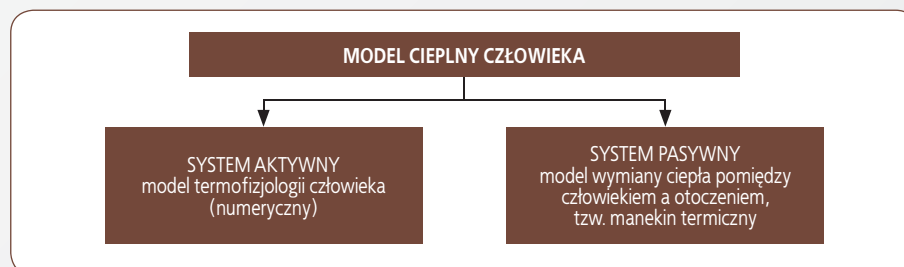
człowieka, z uwzględnieniem: struktury poszczególnych warstw ludzkiego ciała (np. skóra, tkanka tłuszczowa, mięśnie), elementów produkujących ciepło i regulujących odpowiedzi układu termoregulacji (serce, wątroba, mózg), ewentualnie innych narządów wewnętrznych (np. płuca) oraz procesów wynikających z działania układu termoregulacji (pocenie się, drżenie, zmiana współczynnika przewodzenia tkanek).

• Modelowanie **systemu pasywnego** (zwanego inaczej **manekinem termicznym**) – określa model fizyczny procesów wymiany ciepła zachodzących pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, ujmujący oddawanie ciepła wyłącznie z powierzchni skóry. Realizację tego rodzaju modeli prowadzi się tworząc tzw. manekiny wirtualne.

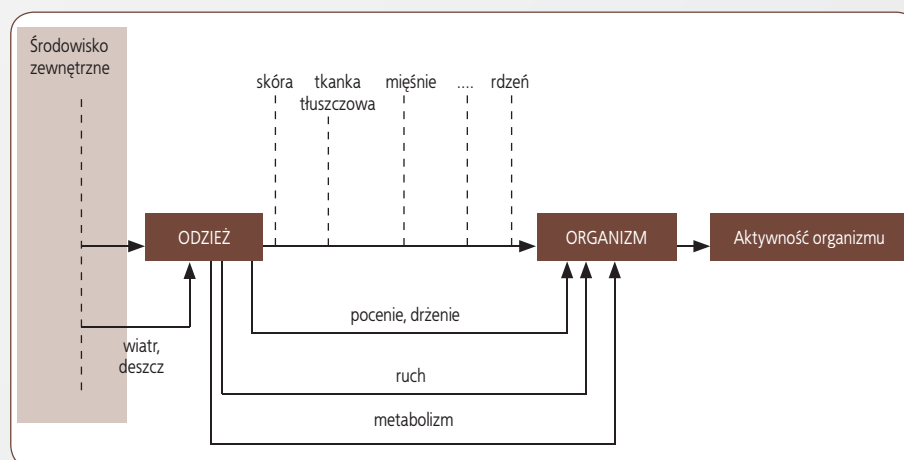
System aktywny

W modelu termofizjologii oprócz wymiany ciepła pomiędzy ciałem człowieka a otoczeniem wprowadzone jest odwzorowanie działania układu termoregulacji (rys. 4.). Z tego powodu modele te są stosowane głównie do oceny obciążenia cieplnego człowieka znajdującego się w środowisku zimnym lub gorącym, symulowania ciężkiej pracy fizycznej itp. System aktywny umożliwia odwzorowanie średniej temperatury skóry, zmiany wartości temperatury wewnętrznej, ilości ciepła produkowanego w wyniku drżenia oraz ilości wilgoci utraconej na drodze pocenia.

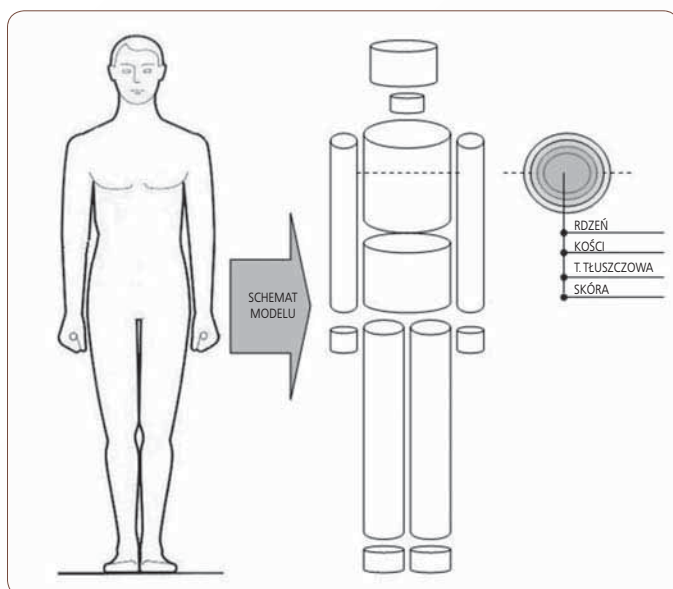
Opracowane dotychczas modele termofizjologii różnią się stopniem skomplikowania, jednak



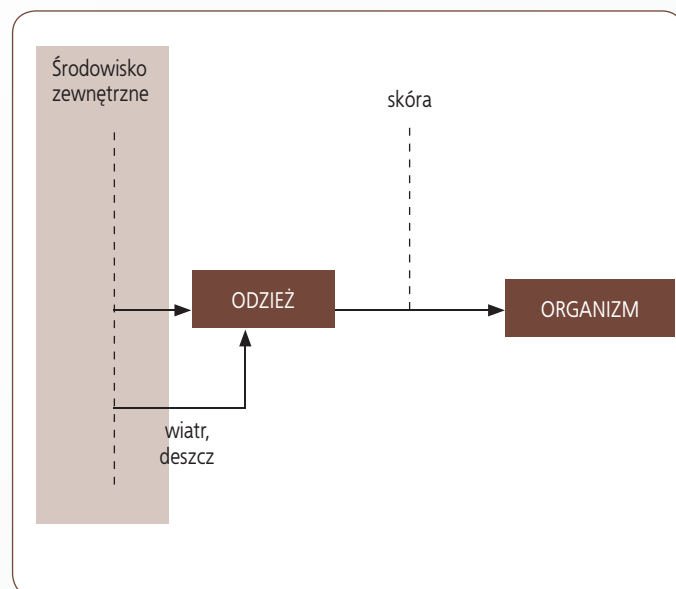
Rys. 3. Podział metod modelowania interakcji cieplnych pomiędzy człowiekiem a otoczeniem [4]
Fig. 3. Division of modeling methods of thermal interaction between human and environment [4]



Rys. 4. Schemat przesyłu informacji w systemie aktywnym [6]
Fig. 4. Scheme of information transmission in the active system [6]



Rys. 5. Przykładowy schemat konstrukcji modelu termofizjologii
 Fig. 5. Example scheme of thermalphysiology model construction



Rys. 6. Schemat przesyłu informacji w systemie pasywnym [6]
 Fig. 6. Scheme of information transmission in the passive system [6]

ogólna przyjęta zasada konstrukcji tego rodzaju modeli jest jednakowa i wynika z kompromisu pomiędzy szczegółowością odwzorowania organizmu ludzkiego i zachodzących w nim reakcji a wymaganą dokładnością uzyskiwanych wyników. Modele te zazwyczaj zbudowane są z cylindrów (segmentów) reprezentujących poszczególne części organizmu człowieka (rys. 5.), przy czym każdy cylinder podzielony jest dodatkowo na warstwy reprezentujące powierzchnie ciała, np. skórę, tkankę tłuszczową, kości itp. Dodatkowe warstwy tworzą zazwyczaj organy wewnętrzne człowieka, np. mózg, serce itp. Połączenia pomiędzy poszczególnymi warstwami/segmentami stanowią węzły przekazywania informacji, stąd klasyfikacja stopnia skomplikowania modeli opiera się na liczbie wprowadzonych węzłów.

Za odwzorowujący najdokładniej działanie układu termoregulacji przyjmuje się model Fiali [7], który opracował program obliczeniowy przeznaczony do prognozowania komfortu/obciążenia cieplnego organizmu. Model ten został przystosowany do prowadzenia obliczeń w dwóch układach: pasywnym (symulacja samej wymiany ciepła) i aktywnym (symulacja wymiany ciepła z uwzględnieniem układu termoregulacji). Model Fiali składa się z następujących części: głowa, twarz, szyja, ramiona, ręce, dłonie, klatka piersiowa, brzuch, nogi i stopy. Poza podziałem na części ciała model złożony jest z warstw i elementów (o odpowiednich własnościach cieplnych): mózgu, płuc, kości, mięśni, układu krwionośnego, tkanki tłuszczowej i 2. warstwy skóry. Model ten był weryfikowany przez Fiałę na podstawie danych fizjologicznych określonych w badaniach z udziałem ochotników.

System pasywny

W tym modelu nie uwzględnia się reakcji fizjologicznych organizmu, a wyłącznie fizyczną wymianę ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem (rys. 6.).

W celu symulacji wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem tworzone są za pomocą programów CFD (*Computational Fluid Dynamics*) wirtualne manekiny, wykorzystywane do: badania przepływu powietrza w pomieszczeniach, oceny komfortu cieplnego, analizy wartości temperatury ekwiwalentnej, a następnie – na podstawie porównania wartości temperatury ekwiwalentnej z odczuciami cieplnymi człowieka – do testowania urządzeń służących do klimatyzacji pomieszczeń [8, 9]. Dotychczas nie opracowano wirtualnego manekina, w którym zaimplementowane byłyby procesy termoregulacji człowieka, a zatem takiego, który byłby jednocześnie modelem służącym do oceny komfortu i obciążenia cieplnego człowieka.

Zintegrowany manekin wirtualny

W CIOP-PIB w latach 2008-2010 realizowany był projekt, którego celem było właśnie stworzenie wirtualnego manekina, umożliwiającego prowadzenie m.in. obliczeń i oceny obciążenia cieplnego. Efektem tych prac było opracowanie modelu, który pozwala prowadzić symulację wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem.

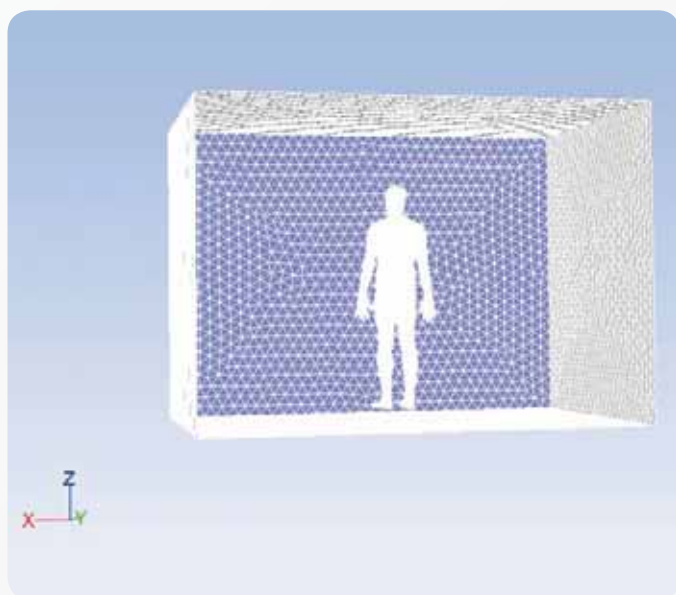
Ze względu na wpływ zastosowanej geometrii powierzchni manekina na dokładność prowadzonych obliczeń zdecydowano się na implementację rzeczywistego kształtu człowieka. Za powierzchnię zewnętrzną manekina przyjęto skan dorosłego mężczyzny o wzroście 1,85 m i masie ciała 82 kg. Powierzchnia ciała mężczyzny została wprowadzona następnie do programu

FLUENT (rys. 7.) w którym przeprowadzono implementację odpowiedniej liczby warstw i 23 segmentów – części ciała człowieka. Manekina wpisano w przestrzeń pomieszczenia – szczyt ścian o wymiarach 2,5 x 3,5 x 2,5 m (długość, szerokość, wysokość), (rys. 8.).

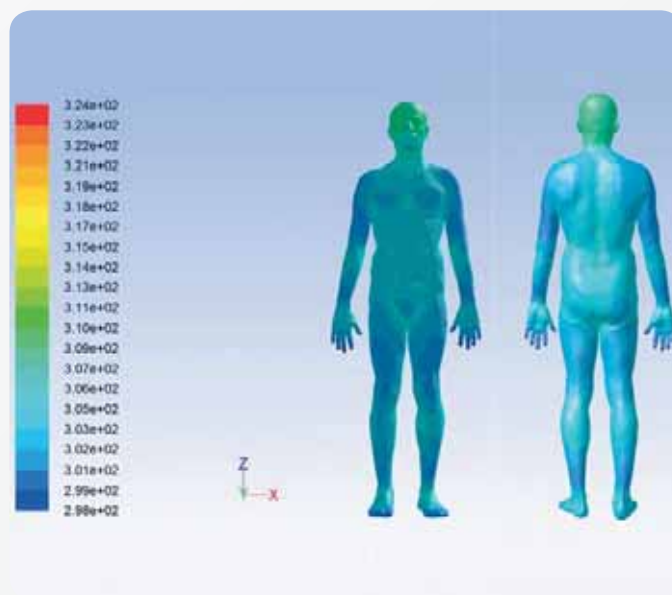
Następnie zdefiniowano parametry poszczególnych elementów (tj. warstw i segmentów manekina), umożliwiające prowadzenie obliczeń, i przeprowadzono obliczenia numeryczne, prowadzące do określenia temperatury na powierzchni zewnętrznej nagiego manekina. Wyniki obliczeń prowadzonych na manekinie porównano z wynikami badań prowadzonych z udziałem ochotników. W modelach termofizjologii obliczenia można



Rys. 7. Powierzchnia zewnętrzna wirtualnego manekina
 Fig. 7. The outer surface of a virtual manikin



Rys. 8. Manekin wpisany w pomieszczenie
Fig. 8. Manikin located in the room



Rys. 9. Rozkład temperatury na powierzchni manekina – temperatura otoczenia 25 °C
Fig. 9. The temperature distribution on the manikin surface – an ambient temperature equal to 25 °C

uznać za dokładne, jeżeli różnica pomiędzy uzyskanymi rezultatami (model – ochotnicy) jest mniejsza niż 5% [10]. W obliczeniach rozkładu temperatury na powierzchni nagiego manekina dążono zatem do uzyskania podobnej dokładności.

Weryfikacja nagiego manekina odbywała się na podstawie wyników badań dotyczących rozkładu temperatury na powierzchni skóry ochotników, eksponowanych na ciepło w zakresie 15-35 °C [11]. Na rys. 9. przedstawiono rozkład temperatury na powierzchni manekina znajdującego się w środowisku o temperaturze powietrza równej 25 °C.

Wyniki obliczeń przy zastosowaniu wirtualnego manekina (określone w 14 punktach pomiarowych zgodnie z PN-EN ISO 9886:2005 [12]) zestawiono z wynikami badań przeprowadzonych z udziałem ochotników, następnie przeprowadzono analizę statystyczną, mającą na celu porównanie wartości uzyskanych podczas badań z udziałem ochotników oraz wygenerowanych za pomocą manekina. Na tej podstawie określono, że największa zgodność została uzyskana w wartościach temperatury otoczenia wynoszących 15, 20, 25 i 30 °C. W tych wartościach temperatury otoczenia uzyskano zgodność statystyczną w 6-9 punktach pomiarowych, przy czym w pozostałych punktach niezgodność wynosiła poniżej 5%. W temperaturze otoczenia równej 15 °C uzyskano brak istotnych statystycznie różnic w 9 punktach pomiarowych, jednocześnie występujący w pozostałych przypadkach błąd był mniejszy niż 5%. W temperaturze otoczenia równej 35 °C brak statystycznie istotnych różnic zaobserwowano w 4 punktach pomiarowych, natomiast w pozostałych punktach niezgodność wynosiła poniżej 5%. Na tej podstawie można wnioskować, że manekin jest dostosowany do prognozowania rozkładu temperatury skóry człowieka, jaki występuje w zadanych warunkach otaczającego środowiska.

Podsumowanie

Opracowany manekin wirtualny może być stosowany przede wszystkim do oceny obciążenia cieplnego występującego w danym środowisku, a także projektowania warunków do osiągnięcia komfortu cieplnego przy zastosowaniu odpowiednich urządzeń i rozwiązań dotyczących klimatyzacji. Na manekinie można również zaimplementować odzież, zatem może on być także używany do modelowania izolacyjności cieplnej i projektowania nowych rozwiązań odzieży stosowanej w środowisku zimnym i gorącym.

Dodatkowo za pomocą manekina można również badać interakcje cieplne oraz przepływ powietrza wydychanego przez wiele osób znajdujących się w jednym pomieszczeniu. Aspekt ten jest szczególnie istotny nie tylko ze względu na komfort cieplny użytkowników, ale również w kontekście tworzenia zdrowego środowiska wewnętrznego, w którym nie będzie występowało przemieszczanie się zanieczyszczeń generowanych przez organizm człowieka w strefę oddychania innej osoby. Jak wykazały badania [13], zwiększanie ilości powietrza dostarczanego do pomieszczenia nie przekłada się na jego jakość i zapobieganie migracji zanieczyszczeń pomiędzy osobami znajdującymi się w tym samym pomieszczeniu.

PIŚMIENNICTWO

- [1] A. Marszałek *Zastosowanie manekinów termicznych do badania komfortu cieplnego człowieka*. „Bezpieczeństwo Pracy” 10 (375)2002, s. 26-29
- [2] W. F. Grether *Human performance at elevated environmental temperature*. „Aerospace Med.” 44/1973, s. 747-55
- [3] H. Kaciuba-Uściłko *Termoregulacja*. W: *Fizjologia człowieka z elementami fizjologii klinicznej i stosowanej*. Red.: W.Z. Traczyk, A. Trzebski. PZWL, Warszawa 2004

- [4] A. Bogdan *Numeryczne modele człowieka stosowane w symulacjach układów wentylacji i klimatyzacji*. „Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja” 9/2009, s. 31-33

- [5] W. Z. Traczyk, A. Trzebski *Fizjologia człowieka z elementami fizjologii klinicznej i stosowanej*. PZWL, Warszawa 2004

- [6] W.A. Lotens *Comparison of Thermal Predictive Models for Clothed Humans* “ASHRAE Transactions” 16,1988: 1321-1340

- [7] D. Fiala *Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort*, rozprawa doktorska, Institute of Energy and Sustainable Development De Montfort University Leicester and Joseph-von-Egle Institut für angewandte Forschung FH Stuttgart – Hochschule für Technik, 1998

- [8] A. C. Buxton, G. Michel, W. Zang, H. A. M. Daanen *Recent developments to the virtual manikin*. *Proceedings of the fourth international meeting on thermal manikins*. EMPA Switzerland 2001, 27-28 Sept.

- [9] H. O. Nilsson, I. Holmer *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models*. “Indoor Air” 13 2003: 28-37

- [10] A. Psikuta, M. Richrds, D. Fiala *Single-sector thermophysiological human simulator* “Physiol. Meas.” 29/2008: 181-192

- [11] A. Bogdan *Zmiana temperatury skóry jako parametry określający komfort cieplny człowieka*. „Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja” 3/2010, s.107-109

- [12] PN-EN ISO 8996:2005 *Ergonomia środowiska termicznego. Określenie tempa metabolizmu (oryg.)*

- [13] A. Melikov, Z. Bolashikov, W. Kierat, Z. Popiolek, M. Brand *Does Increased Ventilation Help Reduce Cross-Infection in Isolation Hospital Wards?* Materiały konferencyjne, Clima 2010, Antalya, Turcja

Publikacja opracowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach I etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” dofinansowywanego w latach 2008-2010 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.