

Emilia IRZMAŃSKA

CENTRANY INSTYTUT OCHRONY PRACY – PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY, Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
 ZAKŁAD OCHRON OSOBISTYCH, PRACOWNIA OCHRON RĄK I NÓG, Wierzbowa 48, 90-133 Łódź

Termiczny model stopy – próba aplikacji w badaniach obuwia ochronnego

Dr inż. Emilia IRZMAŃSKA

Adiunkt w Pracowni Ochron Rąk i Nóg w Zakładzie Ochron Osobistych w Łodzi, Centralnego Instytutu Ochrony Pracy - Państwowego Instytutu Badawczego w Warszawie. Specjalizuje się w zagadnieniach dotyczących opracowywania metod i stanowisk do badań rękawic i obuwia ochronnego, zgodnych z wymaganiami norm europejskich oraz Dyrektywą 89/686/EWG, przeznaczonych do stosowania w warunkach występowania czynników szkodliwych i niebezpiecznych.



e-mail: emirz@ciop.lodz.pl

Streszczenie

Artykuł prezentuje opis dotychczas stosowanych metod w ocenie komfortu użytkownika obuwia ochronnego z uwzględnieniem modelu sztucznej stopy. Opisano postęp jaki dokonał się od lat 30-tych 20 wieku w zakresie poziomu technicznego ich konstrukcji na podstawie danych literaturo-owych. Podkreślono zalety wykonywania badań komfortu użytkownika z wykorzystaniem termicznego modelu stopy oraz zwrócono uwagę, że wyniki mogą być szeroko wykorzystywane zarówno w badaniach naukowych jak i przez producentów obuwia do szybkiej jego weryfikacji na etapie projektowania. W publikacji wskazano kierunki technicznego rozwoju modeli i aplikacji badawczych.

Słowa kluczowe: termiczny model stopy, obuwie ochronne, komfort użytkownika.

Thermal foot model – an attempt of applications in studies of protective footwear

Abstract

Description of existing methods in evaluation of protective footwear comfort including the thermal foot model is presented in the paper. The progress made throughout the 30-ties XX century in the technical level of their design on the basis of literature data is described. Starting with the first model developed in Primasens in the 80-ties the models currently under development are overviewed. The paper broadly describes the first study in the protective shoe conducted at Lund University since 1999. Advantages of comfort testing using a thermal foot model of the rate were emphasized and it was noted that the results can be widely used in both research and footwear manufacture to assess fast the microclimate parameters in the shoe at the stage of the design. Future directions in terms of their technical development and research opportunities are also identified in the paper. Seven years lasting the standardization work concerning to attempts to include to the series ISO standards the insulating protective footwear properties study and methods of their determination by means of the thermal foot model are also presented.

Keywords: thermal foot model, protective footwear, usage comfort.

1. Wprowadzenie

W przypadku komfortu termicznego obuwia niezbędne jest scharakteryzowanie mikroklimatu w jego wnętrzu. Mikroklimat w obuwiu mierzony jako funkcja temperatury i wilgotności w trakcie jego użytkowania jest od dawna przedmiotem badań. Jednakże jego obiektywne zmierzenie i ustalenie parametrów optymalnych jest zadaniem wciąż podejmowanym przez wielu naukowców. Problemem jest fakt iż w sensie metrologicznym układ stopa ludzka/obuwie charakteryzuje się znacznymi nieliniowościami, a sam człowiek jest obiektem niestacjonarnym. Dlatego też nadal dużym wyzwaniem są badania nad oceną jego komfortu cieplnego i ustalenie w tym zakresie właściwych wskaźników.

Obuwie noszone przez pracowników stanowi rodzaj bariery na drodze przepływu ciepła i emisji pary wodnej z powierzchni stopy do otoczenia. Należy podkreślić iż obuwie o właściwościach ochronnych cechuje się specjalnymi właściwościami, nieznanymi w obuwiu powszechnego użytku. Obuwie tego typu ma na celu zabezpieczenie stóp i innych części kończyn dolnych przed czynnikami niebezpiecznymi i szkodliwymi, które związane jest z wyposażeniem w dodatkowe elementy ochronne, np.: wewnętrzne ochrony palców stopy tzw. podnoski, chroniące przed uderzeniem i naciskiem (wykonywane ze stali, aluminium lub odpowiedniego tworzywa sztucznego), wkładki odporne na przebicie wmontowywane w spód obuwia, ochrony śródstopia zabezpieczające górną część śródstopia przed zmiężdżeniem i stłuczeniem spadającymi przedmiotami lub skaleczeniem ostrą krawędzią, ochrony kostki stanowiące element amortyzujący uderzenia czy klapy osłaniające śródstopie zapobiegające wpadaniu do wnętrza obuwia piasku i kamieni lub iskier i rozprysków stopionego metalu (obuwie dla spawaczy i hutników). Należy podkreślić iż wymienione ochrony uniemożliwiają w dużym stopniu odprawienie ciepła i potu, które w znacznych ilościach są wytwarzane podczas wysiłku fizycznego pracowników [1-4].

Aktualnie, do oceny właściwości parametrów higienicznych pojedynczych materiałów obuwniczych stosuje się system norm zharmonizowanych z Dyrektywą 89/686/EWG tj.: PN-EN ISO 20345:2007, PN-EN ISO 20345:2007 i PN-EN ISO 20347:2007. Nie wszystkie wskaźniki związane z właściwościami obuwia określającymi komfort użytkownika zostały ujęte w obowiązujących normach. Należy podkreślić, iż badania te nie pozwalają także na syntetyczną ocenę komfortu użytkownika związanego z kształtowaniem się mikroklimatu w obuwiu ochronnym [5]. Z kolei opisywane w literaturze nieznormalizowane metody użytkowe pomiaru mikroklimatu w obuwiu na stanowiskach pracy lub w warunkach laboratoryjnych (przy określonym obciążeniu fizycznym użytkownika oraz stałej temperaturze i wilgotności otoczenia), są kosztowne, pracochłonne i obciążone niską powtarzalnością [6]. Należy podkreślić, że badania bezpośrednio na stanowiskach pracy są trudne od strony organizacyjnej i wymagają dużej grupy osób testujących dla uzyskania statystycznej wiarygodności. Są one zwykle łączone z badaniami ankietowymi, których celem jest uzyskanie informacji na temat bezpośrednich odczuć użytkowników [7]. Z przeglądu literatury przedmiotu wynika, że autorzy zajmujący się badaniem mikroklimatu w obuwiu, stosowali do symulacji obciążenia pracą fizyczną marsz z określoną prędkością i w określonym czasie na ergometrycznej bieżni ruchomej lub na urządzeniach wysiłkowych takich jak ergometr rowerowy lub wielofunkcyjne urządzenie wysiłkowe łączące funkcje bieżni, steppera i roweru treningowego [8 - 11]. W Laboratorium SATRA w Wielkiej Brytanii opracowano podobną metodę oceny komfortu użytkownika obuwia pod nazwą The Satra Comfort Index, w której komfort związany jest z wyznaczeniem trzech cech obuwia tj. łatwości, estetyki stosowania i mikroklimatu wewnątrz obuwia wyznaczanego w trakcie badań użytkowych na bieżni ergometrycznej [8].

W zakresie oceny mikroklimatu obuwia prowadzono również badania modelowe przewidywania wartości temperatury i wilgotności powietrza w zależności od warunków otoczenia, parametrów fizycznych zastosowanych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych obuwia [12]. Wyliczone teoretyczne wartości porównywano z wynikami laboratoryjnych pomiarów temperatury i wilgotności wnętrza obuwia, wykonanych za pomocą odpowiednich czujników, potwierdzając prawidłowość modelu matematycznego. W cytowanej publikacji posłużono się wzorami obuwia powszechnego użytku o stosunkowo prostej konstrukcji. Biorąc pod

uwagę liczbę parametrów, które należałoby uwzględnić w obliczeniach w przypadku złożonych konstrukcji obuwia ochronnego, można sądzić, że zaproponowana metoda może być mało przydatna w praktyce [8].

Wciąż rosnący poziom rozwiązań pomiarowych związanych z rozwojem techniki elektronicznej i komputerowej umożliwił powstanie metod symulacyjnych uwzględniających zjawisko odprowadzania potu przez materiały i nieodłączne zjawisko transportu ciepła [13]. Jednym z pierwszych rozwiązań tego typu był przyrząd opracowany w niemieckim Physiologisch Bekleidungs Institut i znany pod nazwą „Haut Model” („Model skóry”). Metoda pomiaru z zastosowaniem tego przyrządu została znormalizowana, ale zakres normy PN-EN ISO 31092 obejmuje wyłącznie badania płaskich wyrobów tekstylnych - tkanin, dzianin, materiałów powlekanych, pianek, skóry oraz układów wielowarstwowych [8]. Za pomocą opisanej metody wyznaczane są dwa parametry: opór cieplny w warunkach suchych oraz przy występowaniu pary wodnej. Jest to metoda przydatna do oceny właściwości higienicznych płaskich materiałów stosowanych w konstrukcji obuwia, ale nie dająca obiektywnych wyników z punktu widzenia oceny całego obuwia.

Od lat 80-tych ubiegłego stulecia do oceny komfortu użytkownika obuwia, zaczęto stosować metody obiektywne - model sztucznej stopy. Okazało się, że badania z jego wykorzystaniem są mniej skomplikowane od strony organizacyjnej i zapewniają przeprowadzenie szerokiego spektrum badań w różnych warunkach użytkowania oraz dla wielu wariantów konstrukcyjnych obuwia [14 - 16]. Ponadto są alternatywą dla badań użytkowych na stanowiskach pracy lub w symulowanych warunkach laboratoryjnych. Otrzymane z wykorzystaniem modelu sztucznej stopy wyniki badań mogą być szeroko wykorzystywane zarówno w badaniach naukowych jak i przez producentów obuwia ochronnego do szybkiej oceny parametrów mikroklimatu w obuwiu już na etapie jego projektowania [17, 18].

2. Postęp techniczny w projektowaniu modeli termicznych

Przyrządy do badań symulacyjnych najnowszych generacji występują w postaci elementów odwzorowujących części ciała człowieka (ręka, głowa, tors, stopa) lub manekinów termicznych, których konstrukcja jest odwzorowaniem całej postaci ciała [19]. Uwzględniają warunki występujące w czasie użytkowania badanych wyrobów, tzn. ruch, parametry mikroklimatu między skórą i odzieżą lub obuwiem, zmienne warunki wydzielania ciepła i potu, itp. [20 - 22]. W celu zwiększenia dokładności pomiarów, coraz częściej stosuje się samodzielne systemy do badania poszczególnych elementów odzieży tzn. model stopy do badania obuwia, model głowy do badania hełmów czy pocący się tułów do oceny komfortu użytkownika kamizelek i kurtek [18].

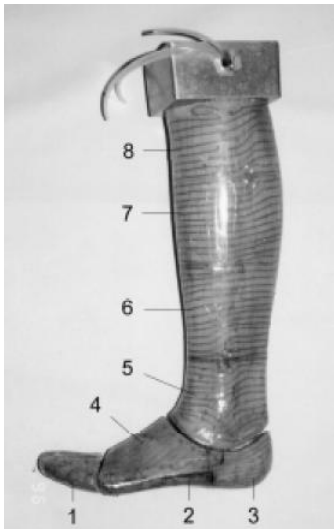
Historia manekinów termicznych odwzorowujących całą postać ciała sięga lat 40-tych XX w. Początkowo były wykorzystywane wyłącznie do oceny właściwości izolacyjnych odzieży. Pierwszy jednosegmentowy wykonany z miedzi model termiczny był skonstruowany na potrzeby armii Stanów Zjednoczonych. Potrzeba uzyskiwania coraz większej ilości danych spowodowała rozwój techniczny tych urządzeń w kierunku zwiększenia liczby segmentów. Następny model, opracowany w 1964 roku w Wielkiej Brytanii, był kilkusegmentowy i wykonany z aluminium [2]. W roku 1972 we Francji skonstruowano manekin ze specjalnym układem chłodzenia do badania odzieży chroniącej przed czynnikami gorącymi [23]. W roku 1988 w Japonii oraz Finlandii zbudowano pierwsze manekiny z funkcją pocenia [24, 25]. Aktualnie można mówić o trzech generacjach projektowanych manekinów termicznych. Pierwsza to manekiny stojące (bez możliwości poruszania się) i nie pocące się, druga to manekiny poruszające się, ale bez funkcji pocenia. Trzecia generacja obecnie jest w trakcie powstawania, a manekiny z tej grupy mają symulację pocenia, wyrafinowany sposób poruszania się, a także zaawansowane funkcje pozwalające na pomiary parametrów fizjologicznych. Manekiny

termiczne są urządzeniami kosztownymi i dlatego dostępnymi tylko w nielicznych, dobrze wyposażonych laboratoriach [18, 26]. Niemniej jednak, aktualnie obserwuje się tendencję do stosowania, w dużych firmach odzieżowych, wersji mniej zaawansowanych do szybkiej weryfikacji projektowanych wzorów odzieży pod względem właściwości użytkowych [27, 28]. Aktualnie poziom technicznego wyrafinowania konstrukcji modeli sztucznej stopy jest różnicowany. Począwszy od statycznych, przystosowanych do zachowania jednej pozycji i badania suchej (konwekcyjnej i radiacyjnej) wymiany ciepła, do ruchomych i wielosekcyjnych z symulacją pocenia i zaawansowanego chodu [17]. W manekinach termicznych stosowane są także różne systemy potliwosci. Meinander [29] w swoich badaniach stosowała manekin termiczny Coppelius zawierający porowatą membranę przepuszczającą wodę wyłącznie w postaci pary. Liu i Holmer [30] stosowali bawełnianą powłokę na powierzchni manekina, rozpraszając wodę na jego powierzchni i odparowując ją z tkaniny lub dalej transportując przez włókna. Dzięki temu możliwa była symulacja procesu pocenia na manekinach, w których zostały wprowadzone przewody rurowe do transportu wody oraz materiał imitujący skórę do dystrybucji wody, jak w manekinie stosowanym przez Mahmoud [31]. Giblo i współpracownicy stosują modele z podgrzewaną konstrukcją rurową wraz z porowatą, metalizowaną powłoką imitującą skórę [32].

Pionierem w zakresie badań obuwia na modelu sztucznej stopy był instytut niemiecki Test and Research Institute Primasens. W latach 80-tych ubiegłego stulecia do badań symulacyjnych komfortu użytkownika obuwia, zastosowano specjalnie skonstruowane statyczne kopyto, na którym oceniano temperaturę wewnątrz obuwia w korelacji z temperaturą w okolicy śródstopia oraz przepuszczalność pary wodnej [33].

Rozwiązaniem, któremu warto poświęcić więcej uwagi jest termiczny model stopy opracowany w 1999 roku w Lund University w Szwecji [34 - 36]. Model stopy, w którym zastosowano symulację pocenia się stopy umożliwiał ocenę spadku izolacyjności obuwia spowodowanego zawilgoceniem i utratą ciepła pobranego na odparowanie potu. Zaproponowana metoda umożliwia badanie izolacyjności obuwia przy różnych szybkościach wydzielania się potu, czasu użytkowania obuwia i przy możliwości poruszania się stopy. Model stopy podzielony jest na osiem stref: palce, środkowa część podeszwy, pięta, górna część stopy, kostka, dolna część łydki, środkowa część łydki oraz ogrzewana część ochronna. Model posiada dwa połączenia ruchome zarówno w miejscu palców oraz kostki, umożliwiające zginanie stopy oraz łatwiejsze zakładanie i zdejmowanie obuwia. Funkcja pocenia zrealizowana była poprzez wbudowanie trzech „gruczołów potowych” – emiterów wilgoci w górnej powierzchni strefy palców, pod podeszwą na granicy strefy pięty i środkowej części podeszwy oraz na przysiódkowej stronie strefy kostki. Woda do modelu stopy jest dostarczana z szybkością od 0,05 cm³/min do 40 cm³/min za pomocą pompy perystaltycznej i rozprowadzana za pośrednictwem cienkiej skarpety o wadze 20 g, wykonanej z przędz z włókien bawełny (70%) i poliamidowych (30%). Pompa jest odpowiednio wykalibrowana, tak aby do każdego emitera wilgoci mogła być dostarczana tylko określona, jednakowa ilość wody. Rurki wykonane z PVC doprowadzające wodę od pompy do modelu były izolowane i odpowiednio ogrzewane, dzięki czemu woda miała taką samą temperaturę co stopa. Temperatura powierzchni i moc dostarczana do każdej strefy są sterowane oddzielnie za pomocą programu komputerowego, który pozwala na wybór dowolnej, stałej temperatury powierzchni modelu stopy. Zalecana i najczęściej stosowana wartość temperatury w badaniach wynosiła 34°C. Badania wykonywane są w komorze klimatyzowanej w stałych warunkach temperatury, wilgotności względnej i prędkości powietrza. Testy przeprowadzane są przy obciążeniu (35 ± 2) kg (łączna masa samego modelu stopy), co symuluje ciśnienie jakie wywiera na stopę człowiek o masie około 70 kg. Podczas badania model stopy wraz z nałożoną półparą obuwia ustawiany jest w pozycji pionowej na płycie ze stopu miedź/cynk. Model stopy wyposażony jest w dodatkowe oprzyrządowanie,

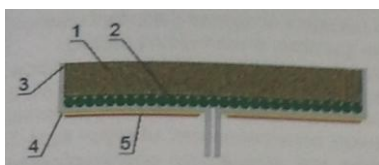
umożliwiający symulację ruchu podczas chodzenia. Obliczenia matematyczne mogą być wykonywane oddzielnie dla każdej strefy, wspólnie dla kilku stref i/lub całego modelu stopy. Model sztucznej stopy z 8 strefami pomiarowymi opracowany w Lund University przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Model sztucznej stopy bez funkcji ruchu z 8 strefami pomiarowymi wykorzystywany w badaniach przez naukowców z Lund University [36]

Fig. 1. Thermal foot model without movement function with 8 measurement zones used in the study by researchers at Lund University [36]

W 2000 roku w Instytucie Przemysłu Skórzanego opracowano model sztucznej stopy III generacji – z funkcją ruchu i pocenia [33]. Model do kostki jest 6 strefowy, wyposażony w 600 niezależnych emiterów wilgoci i 400 grzałek emitujących ciepło. Posiada dodatkowo 6 czujników wilgotności względnej oraz 16 temperatury do oceny mikroklimatu w przestrzeni pomiędzy obuwem, a stopą. Urządzenie wyposażone jest w możliwość kontrolowanego wydzielania ciepła i wody w różnych warunkach użytkowania obuwia - zdolność emisji wody od 2 do 80 $\mu\text{l}/(\text{cm}^2 \times \text{h})$ oraz ciepła od 3,5 do 21 W. Opisany model posiada ciekawe rozwiązanie funkcji ruchu. Napęd jest złożony z czterech podzespołów: mechanizmu mimośrodowego (napęd), symulatora z butem, dźwigni i siłownika pneumatycznego z dwoma zbiornikami ciśnieniowymi, symulacja ruchu powietrza wokół stopy jest realizowana przez dwa niezależne wentylatory o określonej wydajności [33]. Ujęcie schematyczne elementu „grzejąco – pocącego” modelu sztucznej stopy II generacji, wykorzystywanego w badaniach polskich naukowców, przedstawiono na rys. 2.



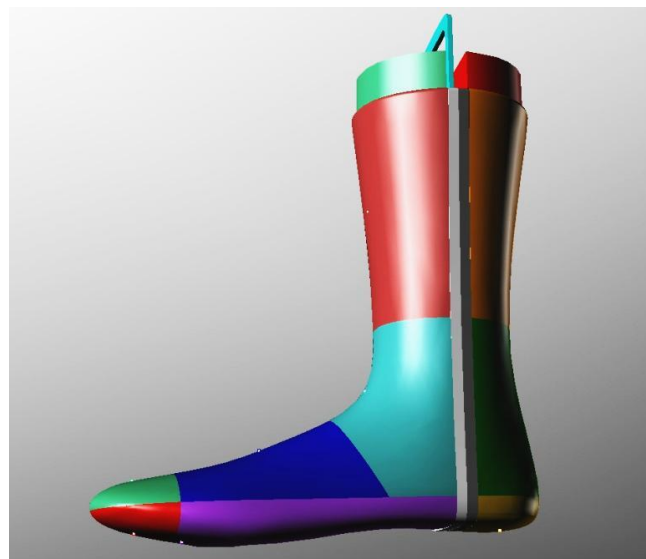
Rys. 2. Ujęcie schematyczne elementu „grzejąco – pocącego” modelu sztucznej stopy II generacji wykorzystywanego w badaniach polskich naukowców [33]:

1 - warstwa porowata o określonej porowatości i współczynniku promieniowania ciepła; 2 - warstwa pośrednicząca o dużej porowatości lub system kanalików i wsporników wykonanych w warstwie porowatej lub obudowie, umożliwiającą swobodny przepływ wody do wszystkich punktów warstwy 1 oraz przepływ ciepła z grzałki 5; 3 - obudowa z przyłączem wody; 4 - przekładka izolacyjna; 5 - rezystor grzejny

Fig. 2. The schematic of the “LE - perspiring” artificial foot model second-generation used by Polish scientists in studies [33]:

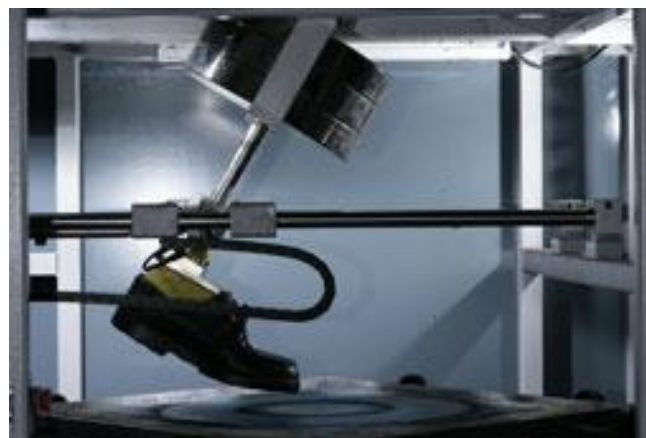
1 - porous layer of a certain porosity and coefficient of heat radiation, 2 - intermediate layer of high porosity or tubular system and brackets made of a porous layer or casing and allowing the free flow of water to all points of layer 1 and the flow of heat from the heater 5, 3 - casing with connection of water, 4 - insulating spacer, 5 - heating resistor

Amerykańska firma Measurement Technology Northwest opracowała dwa komercyjne modele sztucznej stopy różniące się ilością stref cieplnych - 7 stref pomiarowych (do oceny obuwia do kostki) i drugi - 9 stref pomiarowych (do oceny obuwia z cholewką) [37]. Model do kostki posiada następujące niezależne strefy: dolną część łydki (przód i tył), kostkę (przód i tył), piętę, podbicie (górną i dolną) i palce stopy (górną i dolną), a model do łydki: niezależne strefy nad kostką, kostkę (przód i tył), piętę wraz z podeszwą, podbicie (górną) i palce stopy (górną i dolną). Dodatkowo wariant „za kostkę” posiada rozwiązanie ułatwiające zdejmowanie i zakładanie obuwia do badań: dwuelementowy zespół rozkładający się pionowo na przednią i tylną łydkę. Obydwa modele zbudowane są z włókna węglowego. Umożliwiają wykonanie pomiarów „suchych” nie tylko w zakresie izolacyjności ale także „mokrych” uwzględniających symulację procesu pocenia. System potliwości wykorzystuje matrycę porów pokrywających powierzchnię czynną manekina, zgodnie z zasadą wykorzystywaną w metodzie według normy PN-EN ISO 31092 (model „sztucznej skóry”). Trójwymiarową wizualizację modelu sztucznej stopy z zaznaczonymi 9 strefami termicznymi przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Trójwymiarowa wizualizacja modelu sztucznej stopy z zaznaczonymi 9 strefami termicznymi, zaprojektowanego przez naukowców amerykańskich [37]

Fig. 3. Three-dimensional visualization model of the artificial foot with marked nine thermal zones, designed by American scientists [37]



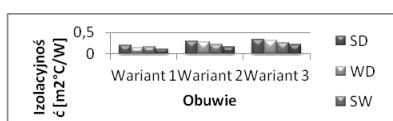
Rys. 4. Model sztucznej stopy II generacji z zaawansowaną funkcją chodzenia wykorzystywany w badaniach w Laboratorium SATRA w Wielkiej Brytanii [38]

Fig. 4. Model of artificial foot of second generation with an advanced feature of walking used in the Laboratory of Satra in the UK [38]

W Laboratorium SATRA w Wielkiej Brytanii opracowano dwa różne modele sztucznej stopy II generacji. Pierwszy z nich Pedatron posiada zaawansowaną funkcję chodzenia tj. oprócz symulowanego kroku na wprost pozwala również na skręcanie. Za pomocą tego urządzenia można mierzyć dodatkowo współczynnik tarcia charakteryzujący interakcję między obuwem, a podłożem. Dodatkowo możliwość zmiany szybkości kroku pozwala na badanie mikroklimatu w obuwiu zarówno podczas spaceru, szybkiego kroku czy nawet biegu [38]. Drugi model Breathing Foot posiada funkcję pocenia się, bez możliwości poruszania. Posiada elementy grzejne i system kanalików rozprowadzający wodę przez pory na zewnątrz. Z jego użyciem można mierzyć izolacyjność cieplną, efektywność odprowadzania wilgoci, a także absorpcję i desorpcję wody „do” i „z” wnętrza obuwia. Obuwie ochronne z wykorzystaniem tego modelu może być badane w komorze klimatycznej symulującej zarówno gorące jak i zimne środowisko pracy [38]. Model sztucznej stopy z zaawansowaną funkcją chodzenia wykorzystywany w Laboratorium SATRA przedstawiono na rys. 4.

3. Przykłady aplikacji modelu sztucznej stopy w badaniach

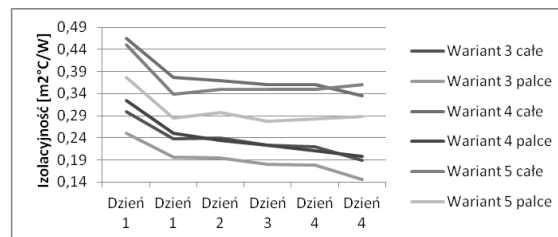
Model sztucznej stopy stosowany jest głównie w badaniach izolacyjności cieplnej obuwia ochronnego [36, 39- 48]. Pierwsze prace dotyczą oceny wpływu wewnętrznych ochron palców stopy (metalowych podnosków) na szybkość utraty ciepła. Różnice statystycznie istotne stwierdzono dla modeli ze skóry impregnowanej z wyściółką poliamidową „z” i „bez” stalowych ochron na palce, a wyższą izolacyjność uzyskano dla modeli bez elementów ochronnych [36, 39]. W innych badaniach oceniano wpływ symulowanego procesu pocenia na izolacyjność obuwia. Testy przeprowadzono w atmosferze standardowej w laboratorium na modelu bez funkcji ruchu dla następujących wariantów: suche obuwie bez obciążenia/skarpety, obuwie suche z obciążeniem 35 kg/grube skarpety, obuwie suche bez obciążenia/cienkie skarpety, obuwie suche z obciążeniem 35 kg/cienkie skarpety, obuwie mokre bez obciążenia/cienkie skarpety oraz obuwie mokre z obciążeniem 35 kg/cienkie skarpety. Stwierdzono, że strefy okolicy palców dla obuwia skórzanego wyposażonego w stalowe podnoski miały wyższą izolacyjność aniżeli obuwie bez ochron zarówno w warunkach suchych jak i mokrych [36, 40]. Na modelu sztucznej stopy bez funkcji ruchu oceniano zmianę izolacyjności obuwia ochronnego przy zmiennym procesie symulowanego pocenia. Stwierdzono, że po 3 godzinach użytkowania obuwie całogumowe i skórzane odzyskało właściwości izolacyjne w porównaniu do innych modeli obuwia. Zastosowano w tym celu test w temperaturze 34 °C, który pozwolił na ocenę strat ciepła poprzez parowanie wilgoci z obuwia [36, 41]. Inne badania dotyczyły oceny spadku izolacyjności cieplnej podczas symulowanego procesu chodzenia w warunkach suchych oraz podczas pocenia. Dla obuwia z impregnowanej skóry z podnoskami (wariant 3), izolacyjność wzrosła podczas chodzenia. Na początku badania podobny efekt wykazało też obuwie skórzane z podnoskami (wariant 2) oraz obuwie całogumowe bez podnosków (wariant 1). Według autorów efekt ten mógł być spowodowany działaniem sił tarcia pomiędzy podeszwą a stopą, w wyniku którego wydziela się dodatkowe ciepło [36]. Wyniki badań opisanego eksperymentu przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Ocena izolacyjności obuwia ochronnego w różnych warunkach użytkowania z zastosowaniem modelu sztucznej stopy. Warunki badania: SD – bez ruchu, suchy; WD – chód, suchy; SW – bez ruchu, mokry; WW – chód, mokry [36]

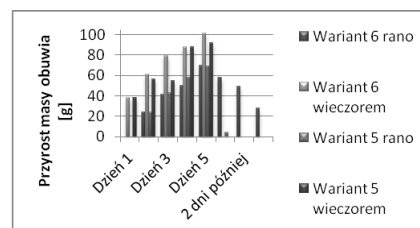
Fig. 5. Evaluation of safety footwear insulation at various operating conditions using an artificial model of foot. Conditions: SD – still, dry, WD – walking, dry, SW – still, wet, WW – walking, wet [36]

Na modelu sztucznej stopy oceniano także zmiany izolacyjności obuwia podczas testu tygodniowego. Podczas całego badania w skarpecie referencyjnej utrzymywano stałą masę wilgoci, od 1 do 3 gramów. Izolacyjność cieplna obuwia zmniejszyła się przez okres 5 dni, a jej największy spadek nastąpił w ciągu kilku godzin pierwszego dnia eksperymentu. Podobną tendencję obserwowano na początku każdego dnia. Brak różnic statystycznych zaobserwowano dla obuwia z impregnowanej skóry. Podczas testów nie występowało zjawisko parowania ze względu na niskie temperatury otoczenia, a zasadnicze straty ciepła były według autorów związane ze zwiększoną przewodnością cieplną mokrego obuwia [36,42]. Wyniki badań opisywanego testu przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Ocena izolacyjności obuwia ochronnego w teście kilkudniowym z zastosowaniem modelu sztucznej stopy [36]

Fig. 6. Insulation rating of protective footwear in few days test with a thermal foot model [36]



Rys. 7. Przyrost masy obuwia ochronnego w teście kilkudniowym z zastosowaniem modelu sztucznej stopy z funkcją pocenia [36]

Fig. 7. Assessment of increase of moisture in the footwear in few days test with a thermal foot model [36]

W 2003 roku przeprowadzono pierwsze międzylaboratoryjne badania w siedmiu różnych laboratoriach na całym świecie. W porównaniach wzięły udział następujące jednostki: National Institute of Working Life (Sweden), Measurement Technology NW (USA), Oulu Regional Institute of Occupational Health (Finland), Quartermasters Research Institute (China), US Army Research Institute of Environmental Medicine (USA), Technial Research Centre of Finland (Finland), Bundeswehr Institute for Materials, Explosives, Fuels and Lubricants (Germany) [43]. Rozmiary modeli stóp które brały udział w badaniu mieściły się w przedziale od 254 do 275 mm, stanowiąc odpowiedniki dla rozmiarów od 41 do 44. Testy z odpowiednikiem „gołej” stopy jak i stopy w skarpecie były przeprowadzane w temperaturze +20°C i przy wilgotności względnej 50%. Badane zimowe obuwie ochronne (całogumowe i skórzane) badano w temperaturze +5°C i wilgotności względnej 85%. Aklimatyzację próbek przeprowadzano w temperaturze (22±2)°C, wilgotności względnej (35±5)% i prędkości powietrza na niskim poziomie (< 0,2 m/s). Testy z funkcją pocenia realizowano poprzez doprowadzanie wody do imitującej skórę warstwy modelu stopy w ilości 5 g/godz. Wyniki badań nie były zadowalające gdyż otrzymano stosunkowo duże rozbieżności dla uczestniczących laboratoriów. Różnice były mniejsze w odniesieniu do całkowitej wartości izolacyjności obuwia, ale w przypadku wybranych stref przekraczały nawet 30%. Stwierdzono, że istnieje potrzeba przeprowadzenia większej liczby badań porównawczych w różnych warunkach użytkowania oraz dla większej liczby typów obuwia. Wyjaśnienia wymagają także sposoby pomiaru i obliczeń wykonywanych podczas testów

z funkcją pocenia. Według autorów duże różnice zależały od różnych warunków prowadzenia badania (ruch powietrza w komorach), rozwiązań technicznych modeli oraz rodzaju i umiejscowienia czujników temperatury i wilgotności [43].

Ponieważ izolacja cieplna obuwia jest najważniejszym czynnikiem ochrony przed zimmem, ośrodki badawcze czynią starania o włączenie do serii norm EN ISO, dotyczących obuwia o cechach ochronnych, wymagań w jej zakresie oraz metody jej wyznaczania za pomocą termicznego modelu stopy [49]. Aktualnie, według norm zharmonizowanych z Dyrektywą 89/686/EWG ocenia się jedynie właściwości izolacyjne spodu obuwia, przy czym kryterium oceny nie jest rzeczywista wartość izolacyjności cieplnej spodu, a jedynie stwierdzenie, czy obuwie spełnia czy nie spełnia wymagania, aby spadek temperatury na podpodeszwie nie przekraczał wartości 10°C po czasie 30 minut od umieszczenia w komorze klimatycznej, przy zmianie temperatury otoczenia z (23±2)°C na (-17±2)°C. Jest to zatem metoda kontrowersyjna ponieważ izolacyjność mierzona w jednym punkcie nie jest miarodajna – w przypadku obuwia powszechnego użytku typu sandał z grubą podszewką możemy zarejestrować wysoką izolacyjność mierzona wewnątrz, przy górnej części podpodeszwy, zgodnie z opisaną metodyką opisaną w normie EN ISO 20344. Badanie z wykorzystaniem modelu termicznego daje możliwość określenia izolacyjności całego obuwia, a także wydzielonych w nim stref. W przypadku tej metody o izolacyjności całego układu, jakim jest obuwie, decyduje jego „najchłodniejszy” element, w związku z czym nie jest wskazane zwiększanie np. ciepłochronności spodu jeśli elementem o najniższej ciepłochronności jest cholewka. Kuklane proponuje, aby kryteria oceny obuwia użytkowanego w mikroklimacie zimnym obejmowały, w zakresie odporności cieplnej, cztery wskaźniki, a mianowicie: ogólną izolacyjność cieplną, izolacyjność spodu obuwia, ogólną izolacyjność obuwia określaną podczas badań symulujących wydzielania potu oraz odporność na działanie wody. Według autora, izolacyjność obuwia powinna być w przyszłości wyznaczana wyłącznie za pomocą termicznego modelu stopy, a pojedyncze materiały obuwnicze pod względem oporu cieplnego wyznaczonego na modelu „sztucznej stopy” według normy PN-EN ISO 31092 [28].

Tab. 1. Porównanie danych technicznych modeli sztucznej stopy zastosowanych w badaniu międzylaboratoryjnym [43]

Tab. 1. Comparison technical data of foot models used in the interlaboratory studies [43]

	MTNW	NIWL	ORIOH	QRI	USARIE M	VTT	WIWEB
Material	Miedz	Tworzywo sztuczne	Aluminium	Aluminium	Miedz	Tworzywo sztuczne	Brak danych
Strona	Lewa	Lewa	Prawa	Prawa	Prawa	Lewa	Prawa
Liczba stref	17	8	Brak danych	12	30	9	Brak danych
Możliwość dodatkowego obciążenia	Brak danych	Możliwe	Możliwe	Brak danych	Niedostępne	Niedostępne	Brak danych
Funkcja ruchu	Brak danych	Pneumatyczny	Brak danych	Nie dostępne	Nie dostępne	Brak danych	Brak danych
Mechanizm pocenia	Woda dostarczana przez mikrootwory w metalu	Pompa perystaltyczna, przenikanie wody przez skarpetę	Brak danych	Pompa perystaltyczna	Nie dostępny	Para wodna dostarczana przez porowatą membranę	Brak danych
Dostarczana postać wody	Ciecz	Ciecz	Ciecz	Ciecz	Brak	Para	Brak danych
Ilość emiterów wilgoci	Powierzchnia porowata	5	Brak danych	8	Brak	24	Brak danych
Waga modelu, g	Brak danych	1631	Brak danych	5500	5360	2610	Brak danych
Wysokość modelu, mm	192	410	Brak danych	410	395	440	Brak danych
Długość stopy, mm	264	254	256	257	265	264	275
Szerokość stopy, mm	Brak danych	86	78	92	101	97	100
Wysokość stopy, mm	Brak danych	71	Brak danych	Brak danych	66	Brak danych	Brak danych
Obwód stopy w najszerszym miejscu, mm	Brak danych	220	Brak danych	Brak danych	210	233	Brak danych
Obwód powyżej pięty i grzbietu stopy, mm	Brak danych	310	Brak danych	Brak danych	325	361	Brak danych
Minimalny obwód, mm	Brak danych	231	Brak danych	262	221	235	Brak danych
Maksymalny obwód [mm]	Brak danych	357	Brak danych	392	309	377	Brak danych
A, (stopa i kostka), cm	912,4	653,7	Brak danych	557,0	1009,2 (calość)	820,0	Brak danych
Używany rozmiar buta 2	42	41	41	42	43	43	44
Używany rozmiar buta 3	41	41	41	41	42	42	44

4. Podsumowanie

Dotychczas stosowane metody laboratoryjne oraz badania komfortu użytkownika obuwia ochronnego, pomimo iż dostarczają wielu cennych informacji, nie są wystarczające wobec potrzeby badania coraz bardziej nowoczesnych modeli obuwia oraz funkcjonalnych rozwiązań i materiałów stosowanych do jego produkcji. Metody badań parametrów stanowiących kryteria oceny komfortu użytkownika obuwia powinny być przede wszystkim adekwatne do warunków jego użytkowania. Aktualnie, postęp w zaawansowanych technikach pomiarowych umożliwi tworzenie coraz to bardziej zaawansowanych metod symulacyjnych. Projektowanie i wykonanie takich urządzeń do badań symulujących wydzielanie ciepła i potu podczas użytkowania obuwia ochronnego, wymaga wiedzy z zakresu współczesnej metrologii technicznej i biomedycznej, najnowszych metod i sposobów przetwarzania sygnałów, technik informacyjnych oraz inteligentnych czujników pomiarowych. Nowoczesne symulatory stopy ludzkiej imitujące wydzielanie ciepła, potu i nacisk stopy w czasie chodzenia, umożliwiają obiektywny pomiar mikroklimatu i termoizolacyjności w obuwiu zarówno tradycyjnym posiadającym elementy ochronne, jak i zawierającym inteligentne systemy monitorowania parametrów środowiska pracy lub aktywne materiały (model taki jest aktualnie opracowywany w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym).

Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

5. Literatura

- [1] Koradecka D.: Nauka o pracy-bezpieczeństwo, higiena, ergonomia. Czynniki fizjologiczne 4, CIOP, Warszawa, 2000.
- [2] Holmer I.: Thermal manikin history and applications. European Journal Applied Physiology, No 92, p. 614-618, 2004.
- [3] Heus. R., Schols E.: Water vapour transport as a determinant of comfort in evaluating shoes. Elsevier Ergonomics Book Series, vol. 3, p. 445-448, 2005.
- [4] Harnish i in.: Comparison of microclimat between breathable and non-breathable shoes. Materials of Local Organizing Committee of the 4th European Conference on Protective Clothing (ECPC) Holandia, 2009.
- [5] Irzmańska E.: Mikroklimat w obuwiu o właściwościach ochronnych. Przegląd - WOS, 5, 35-37, 2011.
- [6] Mekjavic I.B. i in.: Static and dynamic evaluation of biophysical properties of footwear: The Jozef Stefan Institute sweating thermal foot manikin system. Eleventh Int. Conf. on Environmental Ergonomics, May 22nd-26th, Pp. 290-292, Ystad, Sweden, 2005.
- [7] Olejniczak Z.: Ocena zmian komfortu obuwia w warunkach symulowanych. Zeszyty Naukowe nr 1, Politechnika Radomska, 2007.
- [8] Irzmanska E.: Analiza metod obiektywnej oceny oddziaływania obuwia ochronnego na zdrowie użytkowników. Mat. V Konferencji Naukowo - Technicznej ORTO-SHOES pt.: Obuwie i wkładki profilaktyczne oraz ortopedyczne, Kraków 2010.
- [9] Ueno S. i in.: Thermal resistance of footwear used in Japan. Local Organizing Committee of the 18th Int. Congress on Biometeorology, Tokyo/Japan, 2008.
- [10] Olejniczak Z.: Nowe podejście do oceny jakości obuwia. Zeszyty Naukowe nr 2, Politechnika Radomska 2006.
- [11] Havenith G. I in.: Final technical report. THERMPROTECT, Assessment of Thermal Properties of Protective Clothing and Their Use. EU-project, contract G6RD-CT-2002-00846, 2006.
- [12] Olejniczak Z.: Wpływ dzianin wielowarstwowych na mikroklimat w obuwiu. Praca doktorska; Politechnika Łódzka, 2009.

- [13] Taylor N.A.S., i in.: The distribution of thermal sweating on the foot., Second Int. Meeting on the Physiology and Pharmacology of Temperature Regulation, P. 71, Phoenix, Arizona, U.S.A. March 3rd-6th, 2006.
- [14] Covill Z. i in.: Development of thermal models of footwear using finite element analysis. Proc. IMech E Vol. 224 Part H: J. Engeneering in Medicine, 2010.
- [15] Kuklane K. i in.: Inter-laboratory tests on thermal foot models. Environmental Ergonomics by Yutaka Tochihara, Elsevier Ergonomics Book Series, Vol 3, p. 449-457, 2005.
- [16] Woźniak B., Kowalski K., Olejniczak Z.: Sztuczna stopa w badaniach obuwia. Rozdział w Monografii MatEcoShoes – Obuwie Badania i Innowacyjne Technologie Wytwarzania pod red. Tadeusza Sadowskiego, Monografia, Instytut Przemysłu Skórzanego w Krakowie ISBN 978-83-932150-0-3, 2010.
- [17] Sołtyński K.: Współczesny manekin termiczny – jego konstrukcja i zastosowanie. Bezpieczeństwo pracy nauka i praktyka, 1, 16-20, 2000.
- [18] Marszałek A.: Zastosowanie manekinów termicznych do badania komfortu cieplnego człowieka. Bezpieczeństwo pracy, 10, 26-29, 2002.
- [19] Psikuta A.: Single-sector thermophysiological human simulator. Physiological Measurement, vol 29, p. 181-192, 2008.
- [20] Kuklane K. i in.: Physiological responses at 10 and 25 °C in wet and dry underwear in permeable and impermeable coveralls. Environmental Ergonomics XII, Proc. of the 12th Int. Conf. on Environmental Ergonomics ICEE 2007, August 19-24, Piran, Slovenia, 2007.
- [21] Machado-Moriera C.A. i in.: Regional differences in torso sweating. In: Mekjavic, I.B., Kounalakis, S.N., and Taylor, N.A.S. (Editors). Environmental Ergonomics XII, p. 293-296. Biomed d.o.o., Ljubljana, Slovenia, 2007.
- [22] Gao C., Kuklane K, Holmér I.: Cooling effect of a PCM veston a thermal manikin and on humans exposed to heat. The 12th Int. Conf. on Environmental Ergonomics, Mekjavic IB, Kounalakis SN and Taylor NAS (Eds.), 146-9, Biomed d.o.o., Ljubljana, Piran, Slovenia 2007.
- [23] Aubertin G., Cornu J. C. Methode de mesure de l'efficacite de tissus et materiaux composites souples destines a la confection des vetements de protection contre le rayonnement infrarouge. Institut National de Recherche et de Securite, Nancy, 1977.
- [24] 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. Thermal physiology. Excerpta Medica, p 519 – 524, Amsterdam, 1989.
- [25] Meinander H.: Coppelius – a sweating thermal manikins the assessment of functional clothing. Proc. of NOKOBETEF IV: quality and usage of protective clothing, p 157 – 161, 5-7 February 1992, Kittilä, Finland.
- [26] Bendkowska W. i in.: Badania skuteczności kamizelek chłodzących zawierających materiały przemiany fazowej za pomocą manekina termicznego. Polski Przegląd Medycyny Lotniczej, nr 4, tom 14, str 371-382, 2008.
- [27] Dukes – Dobos F., Reischl U.: A simple and inexpensive thermomanikin – development of a prototype. Proc. of the 2nd European Conf. on Protective Clothing (ECPC) and NOKOBETEF 7, Montreux, Switzerland, May 2003.
- [28] Fan J., Chen Y., Zhang W.: A perspiring fabric thermal manikin: its development and use. Proc. of 4th int. meeting on thermal manikins, St. Gallen, Switzerland, September 2001.
- [29] Meinander H.: Coppelius - a sweating thermal manikin for the assessment of functional clothing. Paper presented at the Nokobetef IV: Quality and usage of protective clothing, Kittilä, Finland, 1992.
- [30] Liu X. & Holmér I.: Evaluation of evaporative heat transfer characteristics of helmets. Applied Human Science , no 16, p. 107-113, 1997.
- [31] Mahmoud M.A.: The effect of wet clothing in heat transfer. Thesis: M.Sc. Project Report, Luleå University of Technology, Luleå, 1997.
- [32] Giblo J.W., Wajda E., Avellini B. & Burke R.A.: The next generation sweating thermal manikin test system. Paper presented at the The 8th Int. Conf. on Environmental Ergonomics, San Diego, California, USA, October 18-23, 1998.
- [33] Woźniak: Funkcjonalność dzianin w układzie stopa – obuwie oceniana na modelu sztucznej stopy z funkcją ruchu i wydzielania wilgoci. Praca doktorska, Pol. Łódzka, Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów, Łódź 2011.
- [34] Kuklane K. i in.: Testing Cold Protection According to EN ISO 20344: Is There Any Professional Footwear that Does Not Pass? Annals of Occupational Hygiene, vol. 53, No.1, p 63-68, 2009.
- [35] Kuklane K., “Protection of Feet in Cold Exposure”, Industrial Health Vol.47, p. 214-225, 2009.
- [36] Kuklane K.: Footwear for cold environments - thermal properties, performance and testing. Doctoral thesis, Institutionen för Arbetsvetenskap Avdelningen för Industriell ergonomie, 1999:36 • ISSN: 1402-1544 • ISRN: LTU-DT--99/36—SE, 1999.
- [37] <http://www.mtnw-usa.com/> , 2012
- [38] <http://satratechnology.com/index.php> , 2012
- [39] Kuklane K., Geng Q., Holmér I.: Thermal effects of steel toe caps in footwear. Int. Journal of Industrial Ergonomics, no 23(5-6), p. 431-438, 1999.
- [40] Kuklane K.: Effect of sweating on insulation of footwear. Int. Journal of Occupational Safety and Ergonomics, Vol. 4, No. 2, p. 137-152, 1998.
- [41] Kuklane K., Holmér I., Giesbrecht G.: Change of footwear insulation at various sweating rates. Applied Human Science, no. 18(5), p. 161-168, 1999.
- [42] Kuklane K.: One week sweating simulation test with a thermal foot model Proc. of the Third Int. Meeting on Thermal Manikin Testing 3IMM at the National Institute for Working Life October, p. 12–13, 1999.
- [43] Kuklane K., Holmér I., Anttonen H., Burke R., Doughty P., Endrusick T., Hellsten M., Shen Y., Uedelhoven W.: Interlaboratory tests on thermal foot models. Thermal Environment Laboratory, EAT report 2003:01, 2003.
- [44] Kuklane K.: A comparison of two methods of determining thermal properties of footwear. Int. Journal of Occupational Safety and Ergonomic, vol. 5, No. 4, p. 477-484, 1999.
- [45] Kuklane K., Ueno S., Sawada S., Holmér I.: Are standard tests of cold protection by footwear relevant and valid? 7th Int. Thermal Manikin and Modelling Meeting - University of Coimbra, September 2008.
- [46] Endrusick T. L.: Effects of prolonged water contact on the thermal insulation of cold weather footwear. Proc. of the Fifth Int. Conf. on Environmental Ergonomics, Lotens WA and Havenith G (Eds.), p. 188–189, Maastricht, 1992.
- [47] Bergquist K., Holmér I.: A method for dynamic measurement of the resistance to dry heat exchange by footwear. Appl. Ergon. no 28, p. 383–388, 1997.
- [48] Kuklane K.: Footwear for cold weather conditions. Textiles for cold weather apparel, Williams J (Ed.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009.
- [49] Projekt Normy Europejskiej opracowany przez Kuklane K. i in.: Test method for measuring the thermal insulation of footwear using a heated foot model”, 2009.