

*Ewa Marcinkowska*

**Katedra Towaroznawstwa Przemysłowego**

# Metody i przyrządy pomiarowe stosowane do badań transportu wilgoci w materiałach obuwniczych i odzieżowych

## 1. Wprowadzenie

Problematyka badania i oceny parametrów mikroklimatu warstw przyskórnych w obuwiu i pod odzieżą poruszana jest w wielu publikacjach. Publikacje z tego zakresu zostały przedstawione m.in. w pracach [27, 51]. Jak wynika z ich analizy, a także z analizy aktualnej literatury dotyczącej właściwości użytkowych materiałów włókienniczych oraz skór i tworzyw skóropodobnych, szereg wyspecjalizowanych ośrodków badawczych prowadziło, i nadal prowadzi, badania dotyczące wymiany wilgoci oraz jednoczesnej wymiany wilgoci i ciepła w tych materiałach.

Na uwagę zasługują m.in. badania wykonane pod kierunkiem J. Mecheelsa i K.H. Umbacha [4, 5, 44–46] (Bekleidungsphysiologisches Institut, Hohenstein), W. Diebschläga, W. Nockera [8] i innych [9, 49]. Wiele prac dotyczących komfortu fizjologicznego odzieży opublikowali także pracownicy uniwersytetów i ośrodków badawczych w Stanach Zjednoczonych [7, 15, 16, 21, 41, 47, 52], w Kanadzie [10–12], Australii [13, 24, 25, 37, 38], Chinach [26, 48], Japonii [18, 19, 43, 53], Korei [32], Francji [3] i w Czechach [22, 23, 34–36].

W Polsce, Instytut Włókiennictwa w Łodzi prowadzi prace dotyczące metod badań i oceny właściwości fizjologiczno-higienicznych materiałów odzieżowych, komfortu fizjologicznego odzieży, a także technologii dzianin o wysokim komforcie fizjologicznym [6, 14]. Ocena właściwości biofizycznych odzieży z punktu widzenia bezpieczeństwa i ochrony zdrowia człowieka jest przedmiotem zainteresowań Centralnego Instytutu Ochrony Pracy w Łodzi [2, 20]. Na Wydziale Włókienniczym Politechniki Łódzkiej w Instytucie Me-

trologii, Włóknin i Odzieżownictwa problematyką transportu wilgoci przez wielowarstwowe układy tekstylne, zarówno z punktu widzenia opracowań teoretycznych, jak i oryginalnych metod pomiaru, zajmuje się zespół pod kierunkiem prof. W. Więźlaka. Zespół ten opublikował szereg prac badawczych dotyczących tej problematyki [50, 51, 54, 55].

Kontakt tekstylia – ciało ludzkie, jak pisze W. Więźlak [51], realizuje się w różnorodnych formach w procesie użytkowania odzieży powszechnego użytku oraz specjalnego przeznaczenia. Osiągnięcia nauk technicznych i medycznych oraz nowe technologie przyczyniają się do powstawania nowych zastosowań tekstyliów. Tworzone są nowe rodzaje odzieży i osłon osobistych o nieznanym wcześniej właściwościach. Stąd też coraz częściej zwraca się uwagę na oddziaływania powstające na granicy tych powierzchni, mające wpływ na warunki komfortu użytkowania, m.in. na zapewnienie właściwej temperatury i wilgotności w warstwach przyskórnych. Brak odpowiednich sposobów badania oraz urządzeń pomiarowych stwarza konieczność zajmowania się tymi zagadnieniami.

Celem artykułu jest prezentacja metod i przyrządów pomiarowych stosowanych do badania przenoszenia wilgoci w materiałach odzieżowych obuwniczych, a także zasady działania prototypowego systemu komputerowego „Hy-Tester”, który został zaprojektowany i zbudowany, w ramach projektów badawczych finansowanych przez KBN, przez zespół Katedry Towaroznawstwa Przemysłowego AE w Krakowie we współpracy z pracownikami Instytutu Włókienniczego AT-H w Bielsku-Białej.

## **2. Zasada działania przyrządów pomiarowych, wielkości mierzone**

Jak twierdzą autorzy publikacji [51], istnieją trzy koncepcje przyrządów do badań mikroklimatu, a mianowicie: oparte na układzie płytowym, rurowym lub o kształcie manekina. W rozwiązaniu przyjętym przez W. Więźlaka i zespół [51] wykorzystano koncepcję rurową. Stanowisko badawcze tworzą układy zasilania, pomiarowy oraz rejestrujący i obróbki danych.

Układ pomiarowy składa się z walcowej komory właściwej o średnicy 500 mm i komory izolacyjnej, której zadaniem jest ograniczenie wymiany ciepła między komorą właściwą a otoczeniem. Komora właściwa przedzielona jest na dwie części pakietem badanych materiałów. Temperatura wnętrza komory jest mierzona przez oporowy czujnik. W dolnej części pod pakietem umieszczona jest „począca się” powierzchnia (symulująca skórę), która za pomocą układu kapilarnego zwilżana jest wodą. Wielkość „pocenia” można zmieniać przez nakładanie na „skórę” specjalnych przesłon. Bezpośrednio pod skórą umieszczone jest źródło ciepła, utrzymujące stałą temperaturę na jej powierzchni. Odpowiednią temperaturę uzyskuje się za pomocą termostatu. Temperaturę powierzchni parującej mierzy się czujnikiem oporowym. Do pomiaru ilości od-

parowanej wody zastosowano układ kapilar. W przestrzeni między skórą a pakietem oraz nad pakietem rozmieszczone są czujniki temperatury, wilgotności i ciśnienia, za pomocą których bada się parametry mikroklimatu po obu stronach pakietu. W założeniach budowy przyrządu przyjęto zasadę, że wszystkie parametry będą rejestrowane w czasie prowadzenia eksperymentu w określonych odstępach próbkowania. Rejestrowane parametry pozwolą określić:

- cząstkowe i całkowite gradienty temperatury,
- gradient ciśnienia,
- gradient wilgotności względnej powietrza, prędkość powietrza nad pakietem,
- ilość cieczy dozowanej symulującej pot.

Wszystkie przedstawione parametry są zapisywane w czasie rzeczywistym, przy użyciu wielokanałowej aparatury rejestrującej.

Przepuszczalność pary wodnej przez pakiet materiałów określono zależnością [55]:

$$\lambda = \int_0^t w_n dt / \int_0^t w_p dt, \quad (1)$$

gdzie:

- $\lambda$  – współczynnik przepuszczalności pary wodnej,
- $w_n$  – wilgotność bezwzględna pod próbką [g/kg],
- $w_p$  – wilgotność bezwzględna przy zapełnianiu wodą cylindra bez próbki [g/kg],
- $t$  – czas obserwacji [min].

Przeprowadzone na omawianym urządzeniu badania wstępne pozwoliły autorom na sformułowanie następujących wniosków [51]:

- przy konstrukcji przyrządu pomiarowego należy dążyć do maksymalnego ograniczenia przestrzeni między „skórą” a pakietem badanych materiałów. Przestrzeń ta powinna być możliwie bliska objętości pakietów;

- jako skórę korzystnie jest stosować spiek szklany, ze względu na stałość właściwości fizycznych w czasie i odpowiednią porowatość umożliwiającą proces kontrolowanego pocenia się;

- proces „pocenia się” najkorzystniej jest realizować drogą układu kapilarnego lub wkrapłania wody na powierzchnię skóry (w zależności od celu eksperymentu). Niekorzystny jest proces niekontrolowanego nawilżania „skóry” do określonej masy, ze względu na niekontrolowany przebieg parowania w początkowej fazie eksperymentu i nieustalony stan równowagi cieplnej układu pomiarowego.

Na koncepcji „płyty” zbudowany został również złożony układ pomiarowy, za pomocą którego autor [12] analizował wpływ kondensacji potu na wielkość strat ciepłych w różnych układach materiałowych.

W Bekleidungsphysiologisches Institut Hohenstein zbudowano zestaw urządzeń laboratoryjnych do pomiaru tzw. fizjologicznych cech materiałów tekstyl-

nych i odzieży [45]. Badania prowadzi się m.in. na modelu skóry ludzkiej, który symuluje wydzielanie ciepła i wilgoci przez ciało człowieka. Izolacyjność cieplną materiałów tekstylnych i ich zdolność do transportu wilgoci mierzy się zarówno w warunkach statycznych, jak i dynamicznych.

W urządzeniu do symulacji wydzielania i odparowywania potu z ludzkiej skóry [44, 45] zastosowano płytkę ze spieków metaloceramicznych. Płytkę tą związana jest z blokiem grzejnym i zaopatrywana w ciepłą wodę przez urządzenie dozujące. Próbkę kładzie się na elementach dystansowych lub bezpośrednio na powierzchni płytki i mocuje za pomocą ramki. Druga strona próbki wystawiona jest na oddziaływanie klimatyzowanego powietrza, o znanych parametrach, które krąży w komorze ze stałą prędkością.

Regulator PID utrzymuje stałą temperaturę płytki. Każdy odpływ ciepła na zewnątrz powoduje odpowiedni dopływ prądu do elementu grzejnego płytki i jest rejestrowany. Najczęściej odparowanie potu ze skór następuje jeszcze w kanałach potowych i tylko w przypadkach ekstremalnych występują krople potu na powierzchni skóry. Zatem aby warunki pomiaru zbliżyć do rzeczywistych, na powierzchnię płytki nakłada się cienką folię, która charakteryzuje się tym, że woda nie przechodzi przez nią, natomiast para wodna napotyka na niewielki opór przenikania. Przedstawiony przyrząd umożliwia również pomiary przenikania ciepła na sucho (przy suchej płytce ceramicznej) oraz prowadzenie pomiarów w warunkach nieustalonych, czyli symulowanie nagłej zmiany temperatury otoczenia albo nagłej zmiany wydzielania potu.

Pomiary w stanie równowagi (statyczne) na przedstawionym urządzeniu „płytkowym” są przedmiotem niemieckiej normy DIN 54101 [9] i jej odpowiednika – międzynarodowej normy ISO 11092 [17]. Dla odzieży wojskowej i ochronnej także wprowadzono badania na tym modelu („NATO-Prüfvorschrift” [5]).

Sposób badania wymiany wilgoci i ciepła w warunkach dynamicznych oraz urządzenia pomiarowe, a także odpowiednie kryteria oceny, jak podają autorzy publikacji [45], są przedmiotem „Standard-Prüfvorschrift” BPI 1.2 i BPI 1.3 [40, 41].

Na podstawie wyników badań przedstawionych w przytoczonych pracach wprowadzono pierwszą normalizowaną metodę badań komfortu odzieży w DIN 54101 i ISO 11092. We wstępie normy podano, że ocena właściwości fizycznych materiałów tekstylnych, które kształtują komfort użytkownika, powiązana jest z różnymi rodzajami (mechanizmami) przepływu ciepła i wilgoci. Każdy z tych rodzajów może występować oddzielnie lub równocześnie, w stanie równowagi lub w warunkach nieustalonych, poza tym mechanizmy te mogą zmieniać się w czasie. Należy podkreślić, że norma dotyczy tylko warunków badania w stanie równowagi. Zaizolowana cieplnie, pocąca się płyta (często określana jako „model skóry”) ma symulować procesy wydzielania ciepła i wilgoci, które występują na skórze ludzkiej. Pomiary opisane w omawianej normie obejmują jeden lub obydwa procesy, które mogą być badane oddzielnie lub równocześnie, w różnych warunkach otoczenia, wynikających z kom-

binacji takich parametrów, jak: temperatura, wilgotność względna i prędkość przepływu powietrza oraz faza gazowa lub ciekła.

W omawianej normie opisano metody pomiaru oporu cieplnego i oporu pary wodnej, w warunkach wymiany ustalonej m.in. płaskich wyrobów tekstylnych, skóry oraz wielowarstwowych układów stosowanych w odzieży i w innych wyrobach włókienniczych. Technika pomiarowa zastosowana w normie ogranicza się do wyznaczenia maksymalnego oporu cieplnego i oporu pary wodnej, parametry te zależą od wymiarów i konstrukcji przyrządu.

Opór cieplny zdefiniowano jako iloraz różnicy temperatury między dwoma stronami materiału i wynikającej z tej różnicy wielkości przepływu strumienia ciepła przez jednostkę powierzchni w kierunku zgodnym z gradientem temperatury. „Suchy” strumień ciepła może składać się z jednego lub więcej rodzajów ruchu ciepła: unoszenia, przewodzenia i promieniowania. Opór cieplny jest wielkością charakterystyczną dla materiałów lub układów włókienniczych, określającą przepływ suchego strumienia ciepła przez daną powierzchnię w wyniku utrzymania stałej różnicy temperatury.

Opór pary wodnej zdefiniowano jako iloraz różnicy ciśnienia pary wodnej między dwoma stronami materiału i wynikającej z tej różnicy wielkości przepływu strumienia ciepła parowania przez jednostkę powierzchni w kierunku zgodnym z gradientem ciśnienia. Strumień ciepła parowania może składać się z dyfuzji i unoszenia. Opór pary wodnej jest wielkością charakterystyczną dla materiałów lub układów włókienniczych, określającą „utajony” strumień ciepła parowania przepływający przez daną powierzchnię w wyniku utrzymania stałej różnicy ciśnienia pary wodnej.

Norma podaje ponadto definicję wskaźnika przenikania pary wodnej (wielkość bezwymiarowa) oraz przepuszczalności pary wodnej (w gramach na metr kwadratowy razy godzina razy pascal). Wskaźnik przenikania pary wodnej jest to iloraz oporu cieplnego i oporu pary wodnej, zgodnie z odpowiednim równaniem, natomiast przepuszczalność pary wodnej to odwrotność ilorazu oporu pary wodnej i „utajonego” ciepła parowania wody w temperaturze płyty pomiarowej.

Na podstawie omawianej międzynarodowej normy ISO 11092 wprowadzono normę europejską EN 31092:1993, która w 1998 r. uzyskała status polskiej normy PN-EN 31092:1998. „Tekstylika. Wyznaczanie właściwości fizjologicznych. Pomiar oporu cieplnego i oporu pary wodnej w warunkach stanu ustalonego” [33].

Szereg prac badawczych w tej dziedzinie zostało wykonanych przez Japończyków. S. Kawabata [19] skonstruował urządzenie nazwane jego imieniem (Kawabata Termolabo) i opracował metody badań materiałów tekstylnych związanych z wymianą ciepła i wilgoci. Podstawowym elementem systemu Kawabaty jest również „począca się”, gorąca płyta. Przyrząd TERMO-LABO II B charakteryzuje się stałą prędkością przepływu powietrza w zakresie małych prędkości przepływu rzędu 10 cm/s (pozwala to na uzyskanie dokładniejszych wyników pomiarów), ulepszoną płytą grzewczą (zminimalizowano straty ciepła

i wody) oraz znormalizowanym położeniem próbki w przyrządzie. W czasie pomiarów można porównać dwa równocześnie występujące zjawiska: transport wody i ciepła przez próbkę.

Urządzenie TERMO LABO II służy do pomiaru wyłącznie właściwości cieplnych płaskich wyrobów włókienniczych; składa się z trzech odrębnych części oraz odpowiednich systemów kontrolnych: czujnika temperatury, płyty grzewczej z regulowaną temperaturą i pojemnika z wodą o stałej temperaturze. Mierzy się trzy parametry: odczucie „ciepło-zimno” [ $\rho \max$ ] w czasie 1 minuty, przewodność i dyfuzję ciepłą w czasie 2–3 minut oraz zdolność utrzymywania ciepła w czasie 2–5 minut.

Obszerne badania skutków modyfikacji powierzchni włókien oraz wpływu rodzaju włókna (poliester, akryl, wełna, bawełna) na dynamikę transportu pary wodnej i ciepła wykonali wspólnie pracownicy uniwersytetów w Stanach Zjednoczonych i Japonii [52, 53]. Badaniami transportu pary wodnej i ciepła zajmowali się również J.H. Wang i H. Yasuda [47, 52]. Skonstruowali oni urządzenie [47] do pomiaru przepływu przez materiały wielowarstwowe strumienia wilgoci w warunkach dynamicznych z udziałem gradientu temperatury. Do badania transportu pary wodnej i wody zastosowali dwie niezależne metody, a mianowicie metodę pary wodnej oraz metodę kropli, symulując różne warunki użytkowania. W obu metodach zastosowano tę samą komorę dyfuzyjną, w której tylko pierwsza, dolna warstwa, ulegała zmianie:

- w metodzie pary wodnej, aby symulować odpowiedni przepływ pary wodnej, zastosowano sześć warstw Gore-Texu,
- w metodzie „kropli” zastosowano jedną warstwę folii aluminiowej, na której umieszczono kroplę wody symulującą pot (kropla wody styka się z badanym materiałem).

Badanymi parametrami były temperatura i ciśnienie pary wodnej w poszczególnych komorach kolumny dyfuzyjnej. Na podstawie analizy otrzymanych wyników autorzy sformułowali szereg wniosków. Z punktu widzenia niniejszej pracy ważny jest wniosek, że „badane materiały z włókien syntetycznych poddane wstępnej obróbce hydrofilowej bądź hydrofobowej wykazywały znaczne różnice przy pomiarze ciśnienia pary wodnej”. Stwierdzenie to wskazuje, że czułym wskaźnikiem, którym można posługiwać się w badaniach właściwości przepływowych tekstyliów, jest prężność pary wodnej, która kształtuje się pod badanym materiałem.

W Instytucie Włókiennictwa w Łodzi [14] opracowano metodykę badań odzieży powszechnego użytku na człowieku, w różnych warunkach otoczenia oraz obciążenia fizycznego. Stwierdzono, że wskaźnikiem o największej czułości jest wilgotność mikroklimatu pod odzieżą.

K. Hong i N.R. Hollies (Uniwersytet Meryland) [16] stwierdzili również, że podstawowym parametrem określającym właściwości higieniczne materiałów odzieżowych jest ilość wilgoci zgromadzonej w warstwie materiału znajdującej się przy skórze. Jednak, ich zdaniem, komfortu cieplnego nie można przewidywać na podstawie badań w stanie równowagi. Prowadzili oni badania tzw.

wilgotności powierzchniowej przed osiągnięciem równowagi wymiany masy. Symulowali stan stresu termicznego i następujące po nim szybkie wydzielanie potu. Wydzielanie wilgoci ze skóry rośnie wtedy w sposób ciągły, aż osiągnie wartość stałą. Następuje to wówczas, gdy skóra jest całkowicie wilgotna. Strumień wilgoci przenikającej przez materiał rośnie według pewnej krzywej, aż osiągnie wartość stałą, ponieważ potrzebny jest pewien czas, aby nawilżyć powietrze (nasyć mikroklimat) pod badanym materiałem i materiałem. Odpowiednia powierzchnia na wykresie krzywej przenikania wilgoci przez materiał włókienniczy wskazuje sumę wilgoci zgromadzonej w przestrzeni przyskórnej, w warstwach powierzchniowych materiału i w materiale. Począca się skóra była imitowana przez wilgotną irchę podgrzewaną do temperatury ciała przez gorącą płytę. W celce pomiarowej umieszczono próbkę, a po jej obu stronach miniatury czujniki wilgotności i temperatury.

W wyniku badań otrzymano krzywe ilustrujące zmiany wilgotności wewnętrznej i zewnętrznej warstwy materiału. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy [16] stwierdzili, że występują duże różnice „w dynamice wilgotności powierzchniowej” w zależności od składu badanego materiału. Tkaniny bawełniane wykazały najniższe wartości ciśnienia pary wodnej w zewnętrznej i wewnętrznej warstwie powierzchniowej materiału. Również szybkość wzrostu ciśnienia pary wodnej w tych materiałach była najniższa. Największe wartości ciśnienia pary wodnej odnotowano dla tkanin poliestrowych. Krzywa wzrostu ciśnienia przebiega też dla tych tkanin najbardziej stromo. Uzyskane wyniki pozwalają wytłumaczyć, dlaczego wyroby bawełniane uważane są przez użytkowników za lepsze od poliestrowych:

- człowiek odczuwa komfort cieplny, jeżeli ciśnienie pary wodnej w wewnętrznej warstwie materiału jest niskie,
- mniejsza prędkość wzrostu ciśnienia pary wodnej w wewnętrznej warstwie powierzchniowej w czasie stresu cieplnego pozwala łatwiej dostosować się do zmian temperatury.

G.E. Lamb [21] zaproponował adaptację przyrządu stosowanego w badaniach przepływu ciepła w warunkach tunelu powietrznego, do pomiarów wskaźnika dyfuzji pary wodnej. Autor zamierza również podjąć, na podstawie wyników tej pracy, badania dotyczące komfortu użytkowania materiałów tekstylnych, z uwzględnieniem wpływu na ten komfort warunków środowiska, z zastosowaniem teorii M. Take-Uchi [43] zarówno do badania przepływu ciepła, jak i dyfuzji pary wodnej.

W pracy [13] zamieszczone są wyniki badań przewodnictwa cieplnego czterech materiałów tekstylnych (wełny, bawełny oraz tkanin z polipropylenu i akrylu) o różnej zawartości wilgoci. Autorzy – pracownicy Laboratorium Wełny w Sydney i Uniwersytetu w Nowej Południowej Walii – wykorzystali do pomiarów wymiany ciepła w stanie nieustalonym przyrząd płytowy. Stwierdzili, że na zjawisko przepływu ciepła i masy w wilgotnych materiałach istotny wpływ mają ich zdolności sorpcyjne.

### 3. Prototyp komputerowego systemu pomiarowego. Zasada działania

Zrealizowany w latach 1995–1997 projekt badawczy pt. „Badania transportu wilgoci w materiałach odzieżowych i obuwniczych z wykorzystaniem nowych metod i przyrządów pomiarowych” [1] oraz projekt wykonany w latach 2000–2002 pt. „Symulacja fizyczna w badaniach procesów wymiany masy w tekstyliach i w materiałach skóropodobnych” [42] pozwoliły na zbudowanie urządzenia do badania właściwości higienicznych materiałów stosowanych w obuwiu. Założenia metodyczne sposobu badania transportu wilgoci [28, 31] były całkowicie odmienne od założeń przyjętych w analizowanych powyżej pracach. Podstawowe różnice dotyczyły bilansowania ilości dostarczanej i odprowadzanej pary wodnej oraz warunków badania procesu.

Prototypowy system pomiarowy „Hy-Tester” składa się z następujących podstawowych urządzeń:

- komputera wraz z dodatkowym osprzętem, w skład którego wchodzi: barometr cyfrowy, przepływomierz powietrza i mikromanometr,
- bloku symulatora,
- bloku absorpcyjno-nawilżającego,
- bloku sterująco-pomiarowego.

Założenia dotyczące zasady działania prototypowego systemu pomiarowego przedstawiono w postaci schematu na rys. 1. Próbkę badanego materiału (1) stanowi przegrodę pomiędzy ośrodkiem (2) pod próbką a obiegiem powietrza (3) nad próbką. Obieg (3) jest połączony poprzez trójdrożny element regulacyjny (4) z kolumną osuszającą (5) i nawilżającą (6).

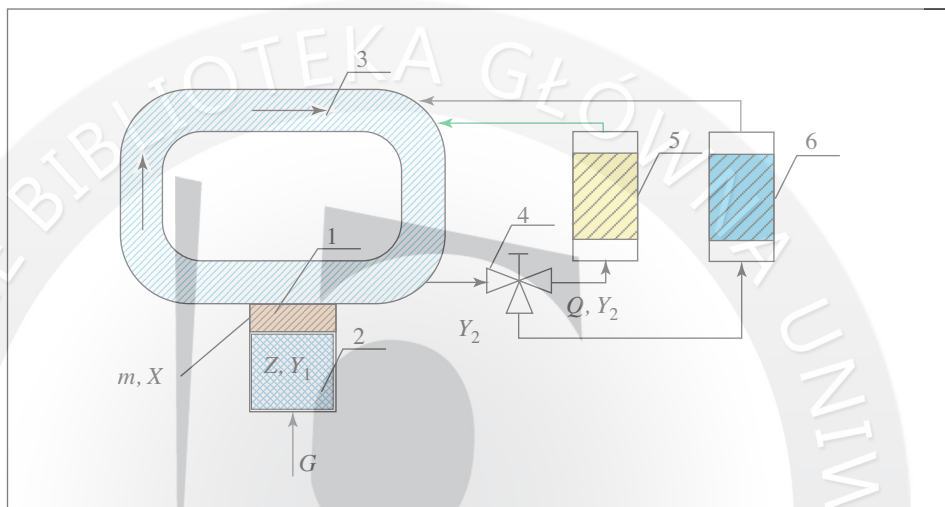
Zasada działania urządzenia oparta jest na różniczkowym bilansie materiałowym równanie (2) wody dostarczanej do ośrodka pod próbką i usuwanej w sposób kontrolowany z obiegu powietrza nad próbką.

$$G = \frac{dY_1}{d\tau} + \frac{dX}{d\tau} + Y_2Q, \quad (2)$$

gdzie:

- $G$  – strumień masy wody dostarczanej pod próbkę [g/s],
- $Y_1$  – wilgotność bezwzględna powietrza pod próbką [g wody/g suchego powietrza],
- $X$  – średnia wilgotność bezwzględna próbki [g wody/g suchej próbki],
- $Y_2$  – wilgotność bezwzględna powietrza w obiegu [g wody/g suchego powietrza],
- $Q$  – strumień powietrza suchego przepływający przez kolumnę osuszającą [g/s],
- $Y_3$  – wilgotność bezwzględna powietrza za kolumną osuszającą [g wody/g suchego powietrza].





Rys. 1. Schemat działania prototypowego systemu pomiarowego „Hy-Tester”

1 – próbka materiału, 2 – osrodek pod próbką, 3 – obieg powietrza nad próbką, 4 – element regulacyjny, 5 – kolumna osuszająca, 6 – kolumna nawilżająca

Źródło: opracowanie własne.

Aby system działał poprawnie, ilość wody znajdującej się w obiegu (3) musi być stała oraz wilgotność powietrza opuszczającego kolumnę osuszającą (5) musi być zerowa. Uzyskuje się to przez zastosowanie elementu regulacyjnego (4), który w przypadku wzrostu wilgotności w obiegu (3) ponad zadaną wartość, przepuszcza część powietrza zawartego w obiegu (3) przez kolumnę (5), osuszając je całkowicie i zwracając do obiegu (3). Tym samym utrzymuje w nim wilgotność na stałym, zadanym poziomie. Kolumna nawilżająca (6) służy do nawilżania powietrza w obiegu wówczas, gdy przed pomiarem wilgotność ta różni się od założonej.

Prawa strona bilansu materiałowego (2) składa się z trzech członów. Pierwszy z nich obrazuje wzrost ilości pary wodnej zawartej w osrodku pod próbką badanego materiału. Podawanie z zewnątrz pary wodnej do zamkniętego osrodka (2) powoduje wzrost wilgotności  $Y_1$  w tym osrodku. Tym samym powstaje gradient ciśnienia cząstkowego pary wodnej na grubości próbki. Wzrost wilgotności jest tym większy, im większy jest strumień pary wodnej  $G$  podawany do osrodka (2). Decydujący wpływ na wilgotność bezwzględną powietrza  $Y_1$  w osrodku (2) ma badany materiał. Część pary wodnej zostaje zaabsorbowana przez próbkę (1), natomiast pozostała jej część przechodzi przez nią do zewnętrznego obiegu 3.

Drugi człon bilansu (2) związany jest z właściwościami sorpcyjnymi materiału. Stworzony gradient ciśnienia pary wodnej powoduje intensyfikację procesów sorpcyjnych i związany z tym wzrost średniej zawartości wody  $X$  w ba-

danej próbce. Przepływająca przez próbkę para wodna zwiększa wilgotność bezwzględną  $Y_2$  w obiegu (3). Układ regulacyjny (4) przeciwdziała temu wzrostowi w ten sposób, że przepuszcza ściśle określoną część powietrza z obiegu (3) przez kolumnę osuszającą (5). Zawartość pary wodnej w powietrzu po opuszczeniu kolumny osuszającej (5) jest zerowa, w związku z czym na podstawie ilości powietrza przepuszczonego przez kolumnę osuszającą można wnioskować o ilości zaabsorbowanej przez sorbent wilgoci:

$$G_A = Y_2 Q, \quad (3)$$

gdzie:  $G_A$  – strumień masy (ilość wody zaabsorbowana w jednostce czasu przez sorbent) [g/s].

Strumień pary wodnej  $G_A$  przepuszczonej przez kolumnę osuszającą i zaabsorbowanej przez sorbent, odniesiony do powierzchni roboczej próbki, jest równoważny z gęstością strumienia pary wodnej, czyli masą pary wodnej przenoszoną przez jednostkę powierzchni próbki w jednostce czasu, wyrażoną w  $g/(m^2 \cdot s)$ .

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone studia literaturowe oraz zrealizowane własne projekty badawcze umożliwiły zaprojektowanie, budowę i dalszą rozbudowę komputerowego systemu pomiarowego „Hy-Tester”, który służy do pomiaru szeregu wielkości opisujących transport wilgoci w skórkach, tworzywach skóropodobnych i materiałach tekstylnych. Zasada działania urządzenia została oparta na bilansie materiałowym wody dostarczanej do ośrodka z jednej strony próbki i usuwanej z ośrodka nad jej drugą powierzchnią.

Konstrukcja urządzenia jest modułowa i podzielona na bloki: symulatora, absorpcyjno-nawilżający i sterująco-pomiarowy. Pomiar sterowany jest przez komputer, z którym połączone są wszystkie urządzenia i mierniki. Symulator pozwala na naśladowanie warunków pojawiających się we wnętrzu obuwia oraz w warstwach przyskórnych pod odzieżą poprzez możliwość kontrolowanej emisji pary wodnej i regulacji temperatury. Zadaniem bloku absorpcyjno-nawilżającego jest utrzymywanie założonej, stałej wartości wilgotności powietrza nad powierzchnią próbki. Skuteczność układu osuszającego, który warunkuje precyzyjny pomiar wilgoci usuwanej przez ten układ, została starannie przeanalizowana. Wybrano złożony układ z osuszaniem wstępnym przez żel krzemionkowy i końcowym przez oleum. Blok sterująco-pomiarowy zapewnia kontrolę i precyzję pomiarów poprzez realizację i analizę sygnałów mierników wilgotności względnej, temperatury i prędkości przepływów.

Efektem prowadzonych badań było uzyskanie w styczniu 2001 r. patentu, oznaczonego numerem P. 318224, na wynalazek pt. „Urządzenie do badania właściwości higienicznych materiałów kapilarno-porowatych” [30] oraz opra-

cowanie w lutym 1998 r. zgłoszenia patentowego P. 325000 „Sposób badania przepuszczalności pary wodnej materiałów kapilarno-porowatych” [29].

## Literatura

- [1] *Badania transportu wilgoci w materiałach odzieżowych i obuwniczych z wykorzystaniem nowych metod i przyrządów pomiarowych*, E. Marcinkowska, E. Nycz, W. Żuk, Projekt badawczy KBN 7 T08 019 09, Politechnika Łódzka, Instytut Włókienniczy, Filia w Bielsku-Białej, 1997.
- [2] Bartkowiak G., *O pewnych problemach oceny właściwości biofizycznych odzieży*, cz. I, II, „Przegląd Włókienniczy” 1995, nr 1, 2.
- [3] Boulanger J.P., Bony M., Querio M., *Le confort de la chaussure: Une notion mesurable? Materiaux a dessus et doublures: les propriétés hygiéniques et le confort*, „Technicuir” 1976, nr 5.
- [4] Caps R., *Konstruktionsprinzipien für wärmeisolierende Textilschichten mit gutem Feuchttransportvermögen in Abhängigkeit von den Tragebedingungen von Kleidung für niedrige Temperaturen*, Schlussbericht zum AIF-Forschungsvorhaben, 1989, 6647 [w:] R. Caps, K. Umbach, *Optimierung der Wärmeisolation von Polyester-Vliesstoffen*, „Melliand Textilberichte” 1990, nr 6.
- [5] *Clothing, NATO publication 1984* [w:] K.H. Umbach, *Messmethoden zur Prüfung physiologischer Anforderungsprofile an Zivil-, Arbeits- und Schutzbekleidung sowie Uniformen*, „Melliand Textilberichte” 1987, nr 11.
- [6] Czaplicki Z., Ceglarska L., Grabowska B., *Dzianiny warstwowe przeznaczone na wyroby opatrunkowe*, „Przegląd Włókienniczy” 1992, nr 12.
- [7] Dent R.W., *Transient Comfort Phenomena Due to Sweating*, „Textile Research Journal” 2001, nr 9.
- [8] Diebschlag W., Nocker W., *A Comparative Analysis of the Comfort of Leather and Substitute Materials, Especially for Footwear*, „Journal American Leather Chemists Association” 1978, nr 7.
- [9] DIN 54101 T1 (E). *Bestimmung bekleidungsphysiologischer Eigenschaften*, 1984.
- [10] Farnworth B., *Mechanisms of Heat Flow through Clothing Insulation*, „Textile Research Journal” 1983, nr 12.
- [11] Farnworth B.A., *Numerical Model of Combined Diffusion of Heat and Water Vapor through Clothing*, „Textile Research Journal” 1986, nr 56.
- [12] Farnworth B., Dalhan P., *An Apparatus to Measure the Water Vapour Resistance of Textiles*, „Journal Textile Institut” 1984, nr 2.
- [13] Fohr J.P., Couton D., Treguier G., *Dynamic Heat and Water Transfer through Layered Fabrics*, „Textile Research Journal” 2002, nr 1.
- [14] Grabowska B., *Badania komfortu fizjologicznego odzieży powszechnego użytku*, „Odzież” 1988, nr 9.
- [15] Hatch K.L., Woo S.S., Barker R.L., Radhakrishnaiah P., *In Vivo Cutaneous and Perceived Comfort Response to Fabric, Part I: Thermophysiological Comfort Determinations for Three Experimental Knit Fabrics*, „Textile Research Journal” 1990, nr 7.
- [16] Hong K., Hollies N.R., *Dynamic Moisture Vapor Transfer through Textiles*, „Textile Research Journal” 1988, nr 12.
- [17] ISO 11092. *Textiles-physiological effects-measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test)*.

- [18] Kawabata S., *The Standardization and Analysis of Hand Evaluation*, The Textile Machinery Society of Osaka Japan, 1984, nr 37 [w:] G.P. Pontrelli, *Tragekomfort durch Textilgestaltung*, „Melliand Textilberichte” 1989, nr 12.
- [19] Kawabata S., Niwa M., Sakaguchi H., *Application of the New Thermal Tester „Thermolabo” to the Evaluation of Clothing Comfort*, The Textile Machinery Society of Japan, Osaka Japan, 1985 [w:] K.L. Hatch, S.S. Woo, R.L. Barker, P. Radhakrishnaiah, *In Vivo Cutaneous and Perceived Comfort Response to Fabric, Part I: Thermo-physiological Comfort Determinations for Three Experimental Knit Fabrics*, „Textile Research Journal” 1990, nr 7.
- [20] Kowalczyk H., *Wybrane aspekty komfortu użytkowania odzieży ochronnej dla personelu medycznego*, „Przegląd Włókienniczy” 1999, nr 12.
- [21] Lamb G.R., *Heat and Water Vapour Transport in Fabrics Under Ventilated Conditions*, „Textile Research Journal” 1992, nr 7.
- [22] Langmaier F., Mládek M., *Hygienické parametry kožedělných materiálů a jejich vztah ke komfortu, respektive ke zdravotní nezávadnosti obuvi*, „Kožařství” 1979, nr 3.
- [23] Langmaier F., Mládek M., *Studie mikroklimatu obuvi*, „Kožařství” 1973, nr 4.
- [24] Li Y., Holcombe B.V., *A Two-stage Sorption Model of the Coupled Diffusion of Moisture and Heat in Wool Fabrics*, „Textile Research Journal” 1992, nr 4.
- [25] Li Y., Holcombe B.V., Aparc F., *Moisture Buffering Behavior of Hygroscopic Fabric during Wear*, „Textile Research Journal” 1992, nr 11.
- [26] Li Y., Zhu Q., Yeung K.W., *Influence of Thickness and Porosity on Coupled Heat and Liquid Moisture Transfer in Porous Textiles*, „Textile Research Journal” 2002, nr 5.
- [27] Marcinkowska E., *Symulacja procesów wymiany ciepła i wilgoci w badaniach i ocenie jakości materiałów*, Seria specjalna: Monografie, nr 116, Akademia Ekonomiczna w Krakowie, Kraków 1993.
- [28] Marcinkowska E., Żuk W., *„Hy-Tester” An Instrument for Testing Comfort Properties of Leather and Leatherlike Materials*, „Journal of the American Leather Chemists Association” 2000, vol. 95, nr 9.
- [29] Marcinkowska E., Żuk W., *Sposób badania przepuszczalności pary wodnej materiałów kapilarno-porowatych*, Zgłoszenie patentowe P. 325000, 1998.
- [30] Marcinkowska E., Żuk W., *Urządzenie do badania właściwości higienicznych materiałów kapilarno-porowatych*, Patent P. 318224, 1997.
- [31] Marcinkowska E., Żuk W., *Water Vapor Permeability Measurement with the „Hy-Tester” Physical Simulator*, „Journal of the American Leather Chemists Association” 2001, vol. 96.
- [32] Park S.I., Baik D.H., *Heat and Mass Transfer Analysis of Fabric in the Tenter Frame*, „Textile Research Journal” 1997, nr 5.
- [33] PN-EN 31092. Tekstylia. Wyznaczanie właściwości fizjologicznych. Pomiar oporu cieplnego i oporu pary wodnej w warunkach stanu ustalonego, 1998.
- [34] Sára A., Langmaier F., *The Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Leather*, „Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists” 1984, vol. 67, nr 2.
- [35] Sára A., Langmaier F., *Vliv sorpčního tepla na měření transportních parametrů. I. Difúzní koeficient ze sorpčních měření – volné tělísko*, „Kožařství” 1987, nr 3.
- [36] Sára A., Langmaier F., *Vliv sorpčního tepla na měření transportních parametrů. III. Difúzní koeficient z měření propustnosti pro vodní páru*, „Kožařství” 1986, nr 5.
- [37] Schneider A.M., Holcombe B.V., *Properties Influencing Coolness to the Touch of Fabrics*, „Textile Research Journal” 1991, nr 8.
- [38] Schneider A.M., Hoschke B.N., Goldschmidt H.J., *Heat Transfer through Moist Fabrics*, „Textile Research Journal” 1992, nr 2.

- [39] Standard-Prüfvorschrift BPI 1.2: *Bestimmung der Pufferwirkung von Textilien mit dem Thermoregulationsmodell der menschlichen Haut (Hautmodell)*, Bekleidungsphysiologisches Institut Hohenstein e.V., 1985 [w:] K.H. Umbach, *Messmethoden zur Prüfung physiologischer Anforderungsprofile an Zivil-, Arbeits- und Schutzbekleidung sowie Uniformen*, „Melliand Textilberichte” 1987, nr 11.
- [40] Standard-Prüfvorschrift BPI 1.3: *Bestimmung der Wärmeisolation eines feuchten Textils mit dem Thermoregulationsmodell der menschlichen Haut (Hautmodell)*, Bekleidungsphysiologisches Institut Hohenstein e.V., 1985 [w:] K.H. Umbach, *Messmethoden zur Prüfung physiologischer Anforderungsprofile an Zivil-, Arbeits- und Schutzbekleidung sowie Uniformen*, „Melliand Textilberichte” 1987, nr 12.
- [41] Sweeney M.M., Branson D.H., *Sensorial Comfort, Part I: A Psychophysical Method for Assessing Moisture Sensation in Clothing*, „Textile Research Journal” 1990, nr 7.
- [42] *Symulacja fizyczna w badaniach procesów wymiany masy w tekstyliach i materiałach skóropodobnych*, E. Marcinkowska, K. Kobiela-Mendrek, E. Nycz, W. Żuk, Projekt badawczy KBN 7 T08E 067 16, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Instytut Włókienniczy, Bielsko-Biała, 2002.
- [43] Take-Uchi M., *Analysis of Wind Effect on the Thermal Resistance of Clothing with the Aid of Darcy's Law and Heat Transfer Equation*, Sen-i Gakkaishi 1983, 39, T-95 [w:] G.R. Lamb, *Heat and Water Vapour Transport in Fabrics Under Ventilated Conditions*, „Textile Research Journal” 1992, nr 7.
- [44] Umbach K.H., *Feuchtetransport und Tragekomfort in Mikrofaser-Textilien*, „Melliand Textilberichte” 1993, nr 2.
- [45] Umbach K.H., *Messmethoden zur Prüfung physiologischer Anforderungsprofile an Zivil-, Arbeits- und Schutzbekleidung sowie Uniformen*, „Melliand Textilberichte” 1987, nr 11.
- [46] Umbach K.H., *Veränderung des Tragekomforts von Kleidung durch Gebrauchs- und Pflegeeinflüsse*, „Melliand Textilberichte” 1989, nr 7.
- [47] Wang J.H., Yasuda H., *Dynamic Water Vapour and Heat Transport through Layered Fabrics, Part I: Effect of Surface Modification*, „Textile Research Journal” 1991, nr 1.
- [48] Wang Z., Li Y., Kowk Y.L., *Mathematical Simulation of the Perception of Fabric Thermal and Moisture Sensation*, „Textile Research Journal” 2002, nr 4.
- [49] Werkstoffkartei, 10002, *Bekleidungshygiene. Schuhwerkstoffe*, Feuchte-Kennwerte, 1983.
- [50] Więźlak W., Kobza W., Zieliński J., *The Modeling of the Microclimate Formed by a Single-layer Clothing Material Pack*, „Fibres & Textiles in Eastern Europe” 1996, nr 2-4.
- [51] Więźlak W., Zieliński J., Szymańska Z., *Układ pomiarowy do oceny transportu potu w pakietach tekstyliów*, „Przegląd Włókienniczy” 1994, nr 10, 12.
- [52] Yasuda T., Miyama M., Yasuda H., *Dynamic Water Vapor and Heat Transport through Layered Fabrics, Part II: Effect of the Chemical Nature of Fibres*, „Textile Research Journal” 1992, nr 4.
- [53] Yoneda M., Kawabata S., *Theoretical Consideration on the Objective Measurement of Fabric Warm/Cool Feeling*, Textile Machinery Society of Japan, Osaka 1982 [w:] A. Schneider, B.V. Holcombe, *Properties Influencing Coolness to the Touch of Fabrics*, „Textile Research Journal” 1991, nr 8.
- [54] Zieliński J., *Możliwości rejestracji i oceny transportu wilgoci przez wielowarstwowe pakiety tekstyliów*, „Przegląd Włókienniczy” 1997, nr 4.
- [55] Zieliński J., *Transport pary wodnej i wody przez pakiety materiałów odzieżowych*, „Przegląd Włókienniczy” 2002, nr 4.

### **Methods and Measuring Instruments Used for Testing the Migration of Humidity in Footwear and Clothing Materials**

A review of apparatuses for testing the hygienic properties of textiles, leathers and leather-like materials as well as the methods for testing the migration of steam is presented. Also the first standardized method for evaluating the comfort of clothes contained in DIN and ISO as well as in PN-EN is given. Against this background the principle of operation of a computer measuring system, developed as a result of the realized personal research projects, is presented. The principle of operation of the prototype system has been based on the material balance of water delivered to the medium from one side of a sample and removed from the medium over its other surface. The structure of the apparatus is modular and divided into simulator, absorptive-moistening and controlling-measuring blocks. The simulator makes it possible to simulate the conditions occurring in the layers near the skin, under clothes and inside shoes, due to controlled emission of steam and regulation of temperature. The measurement is controlled by a computer, to which all the devices and measuring instruments are connected.

biblioteka  
główna UEK