

Ewa Marcinkowska

Katedra Towaroznawstwa Przemysłowego

Waldemar Żuk

Katedra Towaroznawstwa Przemysłowego

Metodyka badania transportu wilgoci za pomocą komputerowego systemu „Hy-Tester”

1. Wprowadzenie

Odzież i obuwie często wykonane są z układów wielowarstwowych uzyskanych z połączenia kilku pojedynczych materiałów różnymi technikami. Transport wilgoci w materiałach o tak złożonej, niehomogenicznej strukturze jest procesem trudnym do jednoznacznego opisanego, a więc i obiektywnej oceny. Tym bardziej, że w czasie użytkowania odzieży i obuwia na proces wymiany masy w dużym stopniu mają wpływ warunki otoczenia. Ruch wilgoci zachodzi wskutek dodatkowego gradientu stężenia wywołanego gradientem temperatury. W takich warunkach często następuje przekroczenie punktu rosy i materiały stają się niehigieniczne.

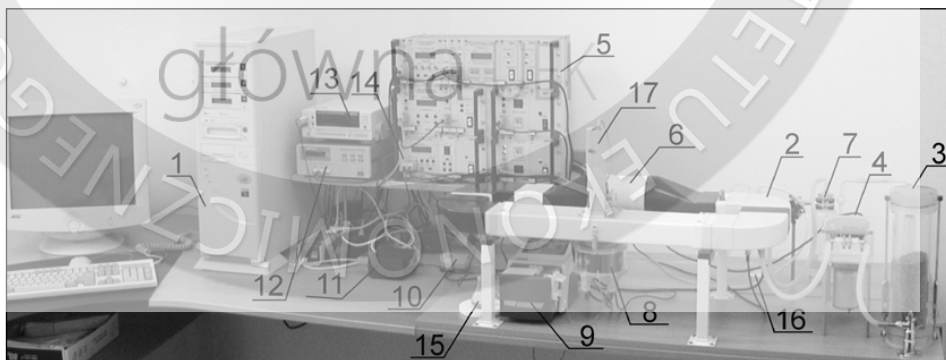
W Katedrze Towaroznawstwa Przemysłowego Akademii Ekonomicznej w Krakowie zespół zajmujący się metrologią wyrobów przemysłu lekkiego, przy współpracy z Instytutem Włókienniczym AT-H w Bielsku-Białej, zbudował komputerowy system do badania właściwości higienicznych „Hy-Tester” [1, 5]. Początkowo system przeznaczony był do badania materiałów o małej pojemności sorpcyjnej. W ramach kolejnych badań [2] urządzenie zostało rozbudowane i przystosowane do badania skór o bardzo dobrych zdolnościach sorpcyjnych.

Celem artykułu jest przedstawienie metodyki pomiaru parametrów opisujących transport wilgoci w materiałach o zróżnicowanych właściwościach hydrofilowych i strukturze, na prototypowym, komputerowym urządzeniu „Hy-Tester”.

2. Opis działania systemu pomiarowego

Konstrukcja komputerowego systemu jest modułowa. Moduł, w którym umieszczana jest próbka, nazwano symulatorem. Symulator pozwala na naśladowanie warunków pojawiających się pod odzieżą i we wnętrzu obuwia poprzez możliwość kontrolowanej emisji pary wodnej i regulacji temperatury. Po założeniu próbki materiału do modułu symulatora następuje faza wstępna (przed właściwym pomiarem), w trakcie której w symulatorze ustala się temperatura pod próbką i wilgotność powietrza w obiegu. W zależności od wilgotności próbki następuje uruchomienie układu nawilżania bądź osuszania powietrza w obiegu zewnętrznym.

Gdy próbka ma wilgotność mniejszą od równowagowej, przy ustalonym w symulatorze gradiencie temperatury, następuje automatyczne nawilżanie powietrza obiegowego. Komputer (1) (rys. 1) za pośrednictwem sterownika (11) uruchamia pompkę nawilżającą (10), która powoduje przepływ powietrza przez płuczkę (16) napełnioną wodą. Nawilżone powietrze poprzez wykrapłacz, który usuwa porwane kropelki wody, trafia do kanału (2), zwiększając wilgotność znajdującego się w nim powietrza. Powietrze w kanale znajduje się w ciągłym ruchu wymuszonym przez wentylator (6) o stabilizowanych obrotach. Umieszczony w kanale (2) czujnik wilgotności, współpracujący z miernikiem (14) wilgotności względnej oraz z wirtualnym regulatorem dwupołożeniowym w komputerze, utrzymuje wilgotność w obiegu na zadanym poziomie.



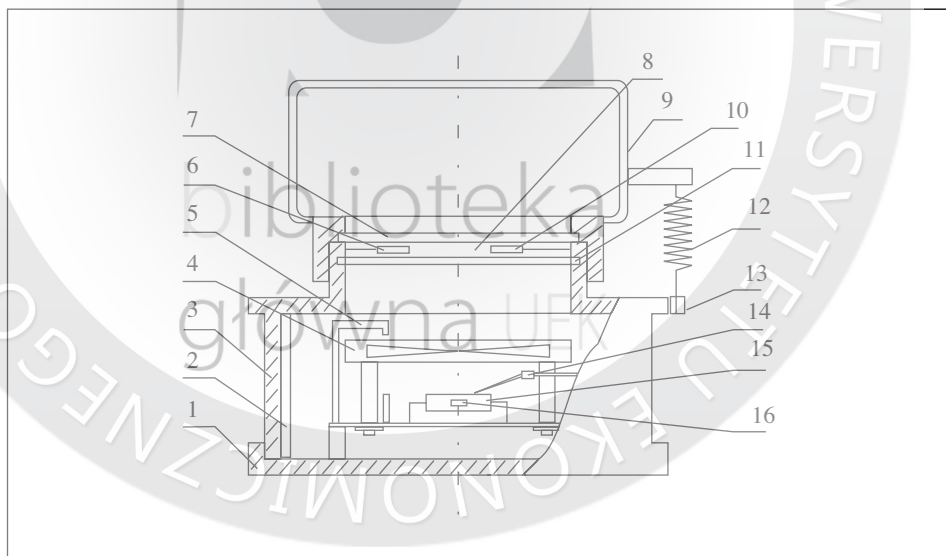
Rys. 1. System komputerowy „Hy-Tester” do badania procesów dyfuzyjnych w materiałach tekstylnych, skórach i tworzywach skóropodobnych

1 – komputer, 2 – kanał obiegu powietrza, 3 – kolumna absorpcyjna, 4 – pompa układu absorpcyjnego, 5 – system regulacji temperatury, 6 – wentylator, 7 – płuczka ze stężonym kwasem siarkowym, 8 – moduł symulatora, 9 – pompa dozująca wodę, 10 – pompka nawilżająca obieg, 11 – sterownik pompki nawilżającej, 12 – zasilacz cyfrowy, 13 – miernik wilgotności względnej w module, 14 – miernik wilgotności względnej w kanale, 15 – pojemnik z wodą, 16 – płuczka z wodą, 17 – termometr bezstykowy

Źródło: opracowanie własne.

Gdy badana próbka ma wilgotność większą od równowagowej, następuje osuszanie próbki, wskutek desorpcji pary wodnej do powietrza obiegowego dzięki uruchomieniu układu sorpcyjnego. Pompa (4) pobiera powietrze z obiegu, przetłaczając je kolejno przez kolumnę absorpcyjną (3), płuczkę z oleum oraz płuczkę ze stężonym kwasem siarkowym (7). Osuszone powietrze zawracane jest do obiegu. Regulator PID wilgotności powietrza obiegowego, za pośrednictwem cyfrowego zasilacza (12), powoduje zmianę obrotów pompy (4), a tym samym zwiększenie lub zmniejszenie pobieranej z obiegu (2) ilości powietrza do osuszenia.

Osiągnięcie równowagi termicznej i sorpcyjnej próbki można ocenić na podstawie przebiegu rejestrowanej temperatury w komorze pomiarowej oraz stanu regulatorów układu nawilżająco-absorpcyjnego. Brak cyklicznego włączania i wyłączania pompy nawilżającej (10) i pompy (4) układu absorpcyjnego świadczy o osiągnięciu przez próbkę stanu równowagi sorpcyjnej.



Rys. 2. Schemat przekroju poprzecznego modułu symulatora

1 – podstawa modułu, 2 – grzałka foliowa, 3 – korpus, 4 – wentylator, 5 – czujnik prędkości obrotowej, 6 – czujnik wilgotności, 7 – próbka, 8 – komora pomiarowa, 9 – kanał powietrza obiegowego, 10 – czujnik temperatury, 11 – siatka dyfuzora, 12 – sprężyna, 13 – zaczep sprężyny, 14 – dozownik, 15 – grzałka parownika, 16 – czujnik temperatury grzałki

Źródło: opracowanie własne.

Właściwy pomiar rozpoczyna się z chwilą uruchomienia przez prowadzącego badanie pompy (9), która podaje wodę do modułu (8). Pompa (9) pobiera wodę z pojemnika (15) (rys. 1) i podaje ją poprzez dozownik (14) (rys. 2) na

grzałkę (15) wytwornicy pary, która znajduje się w dolnej części korpusu (3) modułu (rys. 2). Następuje natychmiastowe odparowanie wody, a umieszczony nad grzałką (15) (rys. 2) wentylator (4) rozprowadza równomiernie parę wodną w module. Wytworzona w ten sposób różnica prężności pary wodnej i temperatury powoduje przepływ części pary wodnej z komory pomiarowej (8) (przestrzeni pod próbką), poprzez badany materiał (7), do kanału (9) obiegu zewnętrznego, zwiększając wilgotność zawartego w nim powietrza. Część pary sorbowana jest przez próbkę, a pozostała część powoduje zwiększenie wilgotności powietrza w module. Opisane zjawisko ma charakter dynamiczny i w związku z tym podział pary na części: sorbowana, przepuszczana i pozostająca w module, ma tylko charakter formalny.

Ilość pary wodnej, która przechodzi przez próbkę (7) (rys. 2), jest równa ilości absorbowanej wody w układzie absorpcyjnym, a ta z kolei szacowana jest na podstawie obrotów pompy (4) (rys. 1) i zawartości pary wodnej w powietrzu obiegowym. Ilość pary wodnej, która pozostaje w module (8), jest obliczana na podstawie mierzonej i rejestrowanej na bieżąco wilgotności względnej zawartego w nim powietrza. Różnica pomiędzy ilością wody wprowadzoną do modułu (8) przez pompę (9) a sumą pary wodnej, która przechodzi przez próbkę i pozostaje w module, stanowi wartość sorpcji próbki badanego materiału. Komputer (1) posiada oprogramowanie, które umożliwia rejestrowanie wszystkich wymienionych parametrów oraz obserwowanie na ekranie monitora ich wartości i zmiany w czasie.

3. Przygotowanie do pomiaru oraz kalibracja urządzeń systemu

Okresowo wykonuje się szereg czynności związanych z przeglądem stanu urządzeń i elementów wchodzących w skład systemu pomiarowego, a mianowicie:

1. Okresowo napełnia się:

- zasobnik wody (15) (rys. 1) – wodą destylowaną,
- kolumnę osuszającą (3) do 2/3 wysokości – odpowiednio wysuszonym żelalem krzemionkowym,
- pierwszą płuczkę – 20% oleum do 2/3 jej wysokości,
- drugą płuczkę (7) – stężonym kwasem siarkowym do połowy jej wysokości,
- trzecią płuczkę (16) – wodą destylowaną do 1/3 wysokości.

2. W wypadku zmiany węży należy wykonać kalibrację pompy. Pompę (9) (rys. 1) Watson-Marlow kalibruje się grawimetrycznie, podając wodę do naczynka wagowego w określonym czasie, stosując kolejno różne prędkości obrotowe wału pompy. Uzyskaną w ten sposób krzywą kalibracyjną wprowadza się do oprogramowania sterującego pracą urządzenia. Podobnie postępuje się w wypadku pompy (4), która kieruje część powietrza do bloku osuszającego, z tą różnicą, że do kalibracji stosuje się gazomierz laboratoryjny. Kalibrację pomp przeprowadza się co dwa tygodnie w celu sprawdzenia precyzji przepływów.

3. Do pozostałych czynności wykonywanych okresowo należy kalibrowanie mierników temperatury oraz wilgotności względnej, które wykonuje się nie częściej niż jeden raz w roku:

– kalibrację mierników temperatury przeprowadza się na podstawie temperatury przemiany fazowej wody: temperatury topnienia lodu – 0°C , temperatury wrzenia wody – 100°C ,

– kalibrację mierników wilgotności wykonuje się przy wykorzystaniu powszechnie stosowanych wzorców wilgotności, zachowujących stałą wilgotność względną w danej temperaturze.

Wybrano trzy wzorce, które pokrywają cały zakres mierzonej wilgotności względnej, tj. LiCl (wilgotność względna 11,2%), $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ (54%) oraz $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ (95%).

Większość czujników jest mało odporna na zroszenie wodą i mimo ich późniejszego osuszenia zmienia trwale swoją pojemność elektryczną. W skrajnym przypadku czujniki te ulegają uszkodzeniu (przebiciu), dlatego pożądana jest okresowa kontrola ich stanu.

Przygotowując system do pracy, wykonuje się czynności związane z ustawieniem parametrów pomiaru, które dotyczą określonej serii badań, np.:

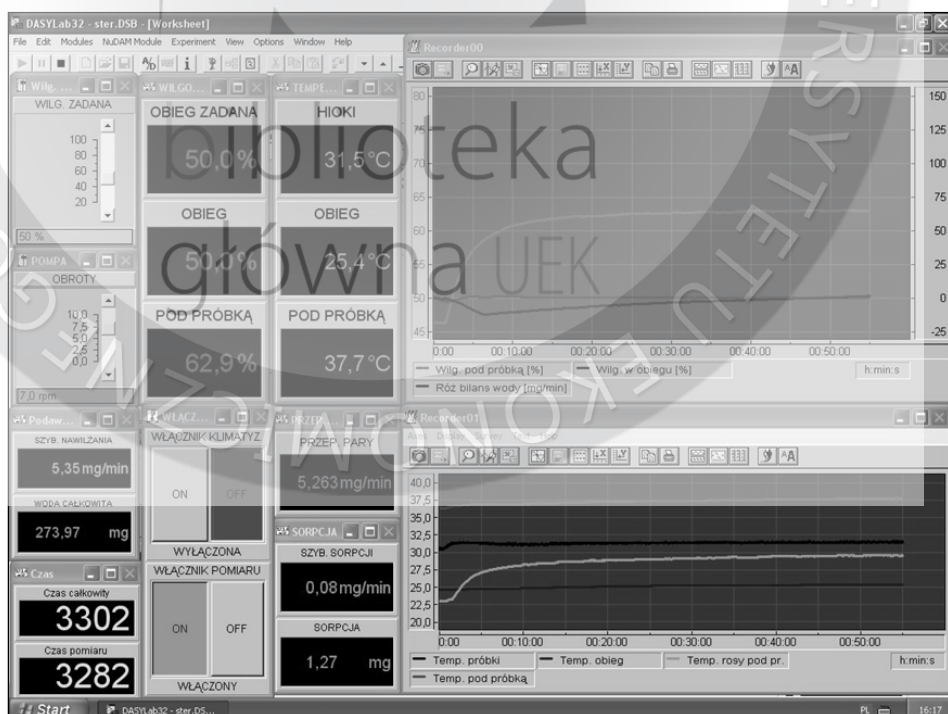
- temperatury w komorze pomiarowej (8) (rys. 2) (35°C),
- temperatury grzałki (15) (rys. 2) emitera pary (105°C),
- prędkości obrotowej pompy (9) (rys. 1) Watson-Marlow (12 rpm),
- prędkości obrotowej wentylatora (4) (rys. 2) w module (1500 obr./min),
- prędkości obrotowej wentylatora (6) (rys. 1) w obiegu (1500 obr./min).

4. Metodyka badania

Przyrząd powinien pracować w pomieszczeniu klimatyzowanym, w którym utrzymywana jest temperatura $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotność względna powietrza $50 \pm 2\%$. W celu uruchomienia systemu pomiarowego należy wykonać następujące czynności:

- umieścić klimatyzowaną próbkę materiału w gnieździe modułu i zapiąć zaczepty sprężynowe,
- sprawdzić szczelność połączeń,
- włączyć komputer,
- włączyć zasilacz przetwornika wilgotności względnej powietrza w kanale obiegu zewnętrznego,
- włączyć miernik wilgotności powietrza w obiegu,
- włączyć zasilacz regulatora obrotów pompy przetłaczającej powietrze przez blok osuszający,
- włączyć system pomiaru i regulacji temperatury (bez włączenia grzałek),
- włączyć miernik wilgotności powietrza pod próbką,
- włączyć sterownik pompy Watson-Marlow,
- włączyć pompę Watson-Marlow (w stan oczekiwania),

- włączyć regulator prędkości obrotowej w kanale obiegu zewnętrznego,
- włączyć regulator prędkości obrotowej wentylatora w module,
- włączyć termometr bezstykowy Hioki (temperatury powierzchni próbek),
- wykonać czynności kalibrujące termometr Hioki,
- zapiąć zaczepty unieruchamiające wąż w pompie Watson-Marlow,
- umieścić wąż w pompie regulatora wilgotności powietrza w obiegu,
- zablokować wąż w pompie,
- otworzyć zawór odcinający, umieszczony przy kolumnie osuszającej,
- włączyć sterowanie grzałek w systemie regulacji temperatury,
- uruchomić oprogramowanie sterujące pracą urządzenia,
- włączyć pompę Watson-Marlow w stan aktywny za pomocą sterownika pompy,
- odczekać, aż woda zacznie wypływać z dozownika wody na grzałkę (obserwowany wzrost wilgotności w module),
- przełączyć pompę Watson-Marlow w stan oczekiwania,
- ustawić żadaną prędkość obrotową pompy Watson-Marlow.



Rys. 3. Widok ekranu monitora w czasie pomiaru

Źródło: opracowanie własne.

Po uruchomieniu systemu pomiarowego należy odczekać do momentu osiągnięcia stanu równowagi, zarówno wilgotności względnej, jak i temperatury powietrza pod próbką i w obiegu zewnętrznym. Czas ustalania się równowagi jest różny i w dużej mierze zależy od właściwości badanego materiału. Zauważono, że im materiał ma mniejszą przepuszczalność pary wodnej i jednocześnie dużą pojemność sorpcyjną, tym czas ustalania się stanu równowagi w urządzeniu jest dłuższy. O ustaleniu się stanu równowagi świadczy pojawienie się płaskich wykresów (rys. 3), rejestrowanych wartości wilgotności i temperatury (równoległych do osi OX). Można wówczas rozpocząć pomiar. W tym celu wybiera się za pomocą myszy opcję „ON” włącznika pomiaru; równocześnie następuje wyłączenie pompy podającej nawilżone powietrze do obiegu zewnętrznego przez automatyczne skasowanie opcji „ON” włącznika klimatyzacji. Czynność ta powoduje jednocześnie włączenie pompy podającej wodę na grzałkę wytwornicy pary i uruchomienie zegara podstawy czasu oraz przesłanie przez komputer odpowiednich kodów sterujących do urządzeń pomiarowych.

W trakcie trwania pomiaru pompa podaje wodę do modułu, gdzie zostaje ona natychmiast odparowana, zwiększając wilgotność w przestrzeni pod próbką materiału. Wzrost wilgotności w czasie jest tym większy, im badany materiał wykazuje mniejszą przepuszczalność i sorpcję pary wodnej. Część pary wodnej zostaje zaabsorbowana, a część przepuszczona. Zaabsorbowana, wykroplona para wodna powoduje zmianę właściwości cieplnych próbki badanego materiału, która objawia się niewielkim wzrostem temperatury zewnętrznej powierzchni próbki. Pomiar zmiany temperatury dokonywany jest za pomocą bezstykowego termometru i rejestrowany w komputerze. Para wodna, która przechodzi przez materiał, powoduje wzrost wilgotności w obiegu zewnętrznym, co natychmiast rejestruje regulator wilgotności, współpracujący z czujnikiem znajdującym się w obiegu. Działanie regulatora polega na tym, że przeciwdziała on wzrostowi wilgotności w obiegu poprzez uruchomienie pompy, która przetłacza powietrze przez blok osuszający z taką prędkością obrotową, aby wilgotność w obiegu zewnętrznym była stała. W rezultacie ilość pary wodnej, która przechodzi przez próbkę, musi być równa ilości pary wodnej zaabsorbowanej w bloku osuszającym, ta zaś jest związana z prędkością obrotową pompy prostą zależnością matematyczną. Tak więc, mierząc prędkość obrotową pompy można obliczyć strumień pary wodnej, która przepływa przez materiał. Za pomocą oprogramowania wyliczany jest chwilowy strumień pary wodnej podawanej do modułu oraz strumień, który przepływa przez próbkę. Całkując po czasie, oblicza się sumaryczną ilość wilgoci podaną do modułu i przechodzącą przez próbkę. Dane te są na bieżąco zapisywane w pamięci komputera oraz wyświetlane na ekranie monitora (rys. 3) wraz z ważniejszymi parametrami opisującymi warunki pomiaru, takimi jak: czas, temperatura powietrza w obiegu, temperatura zewnętrznej powierzchni próbki, temperatura pod próbką, rzeczywista wilgotność względna w obiegu oraz wilgotność względna pod próbką.

5. Wielkości mierzone i sposób obliczania wyników

Na podstawie zarejestrowanych danych można wyznaczyć szereg wielkości opisujących transport wilgoci, m.in.:

- chwilową przepuszczalność pary wodnej G ,
- przepuszczalność pary wodnej w stanie równowagi P ,
- szybkość sorpcji pary wodnej,
- krzywą nawilżania przestrzeni pod próbką (symuluje nawilżanie warstw przyskórnych),
- temperaturę punktu rosy dla określonej wilgotności i temperatury pod próbką.

Przepuszczalność pary wodnej jest jedną z wielkości zaproponowanych do oceny właściwości higienicznych materiałów. Jest to wielkość charakterystyczna dla założonych w badaniach warunków nieizotermicznych. Istnieją dwa sposoby jej wyznaczenia i wyrażenia [1, 2]. Pierwszy polega na pomiarze ilości pary wodnej przechodzącej w jednostce czasu przez badaną próbkę [2], która jest równa ilości pary wodnej usuwanej z obiegu, w celu utrzymania stałej wilgotności znajdującego się w nim powietrza. Komputer na bieżąco oblicza chwilową przepuszczalność pary wodnej na podstawie obrotów pompy perystaltycznej (pompa pobiera część wilgotnego powietrza z obiegu) oraz zawartości pary wodnej w pobieranym powietrzu. Wyraża się ją jako gęstość strumienia pary wodnej.

Gęstość strumienia pary wodnej jest to ilość pary wodnej przenoszona przez jednostkę powierzchni próbki w jednostce czasu (prostopadle do zdefiniowanych równoległych powierzchni) w określonych warunkach temperatury i wilgotności każdej z powierzchni, wyważona w $g/(m^2 \cdot s)$.

$$G_1 = \frac{K\omega_1}{F}, \quad (1)$$

gdzie:

- G_1 – przepuszczalność pary wodnej (gęstość strumienia) [$g/(m^2 \cdot s)$],
- K – stała (masa pary wodnej na 1 obrót pompy) [g],
- F – pole powierzchni próbki [m^2],
- ω_1 – prędkość obrotowa pompy bloku sorpcyjnego [1/s].

Odmienne wyznacza się przepuszczalność pary wodnej w stanie równowagi [1]. W tym celu nawilża się w sposób kontrolowany zamkniętą przestrzeń pod próbką materiału i rejestruje zmiany wilgotności względnej powietrza w tej przestrzeni. Metodą najmniejszych kwadratów wyznacza się parametry zweryfikowanego, empirycznego równania (2), które obrazuje zmiany wilgotności względnej w zależności od czasu w symulatorze:

$$RH\% = A + Be^{\frac{-c}{t}}, \quad (2)$$

gdzie:

$RH\%$ – wilgotność względna pod próbką (w komorze pomiarowej symulatora),

A, B, C – parametry równania,

t – czas.

Następnie oblicza się asymptotę otrzymanego równania, która jest charakterystyczna dla badanego materiału oraz ilości wody podawanej do symulatora. Jest to wilgotność względna w stanie równowagi dynamicznej wymiany masy w komorze pomiarowej.

W celu sporządzenia wykresów zależności gęstości strumienia przepływającej przez próbkę pary wodnej od różnicy ciśnienia cząstkowego pary wodnej po obu stronach próbki, wyznacza się co najmniej cztery asymptoty dla czterech różnych ilości podawanej do modułu wody, a więc czterech różnych szybkości obrotów pompy (rpm). Gdy otrzymana zależność ma charakter liniowy, oblicza się pochodną funkcji, która jest poszukiwaną wartością współczynnika przepuszczalności pary wodnej. Krzywoliniowy przebieg tej funkcji świadczy o zbyt dużej ilości podawanej wody do modułu, która wykrapla się i tym samym nie stanowi tej ilości pary wodnej, którą przepuszcza materiał. W tym przypadku należy zmniejszyć ilość podawanej wody i wówczas uzyskuje się przebieg prostoliniowy funkcji.

Definiując przepuszczalność pary wodnej przez płaski materiał jako stosunek gęstości strumienia masy do modułu napędowego procesu, tj. różnicy ciśnień cząstkowych pary wodnej po obu stronach próbki badanego materiału, uzyskujemy równanie na współczynnik przepuszczalności pary wodnej P (3):

$$P = \frac{G}{p_w - p_z}, \quad (3)$$

gdzie:

P – współczynnik przepuszczalności pary wodnej [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s Pa})$],

G – gęstość strumienia pary wodnej [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],

p_w – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu pod próbką [Pa],

p_z – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu nad próbką [Pa].

W symulatorze w trakcie badań prowadzone są automatycznie pomiary wilgotności względnej oraz temperatury. W związku z tym wartość ciśnienia cząstkowego pary wodnej P_w i P_z (dla danej temperatury) można wyliczyć zgodnie z równaniami (4) i (5):

$$p_w = \frac{\varphi_w}{100} p_{ws}, \quad (4)$$

$$p_z = \frac{\varphi_z}{100} p_{zs}, \quad (5)$$

gdzie:

φ_w – wilgotność względna powietrza wewnątrz komory pomiarowej symulatora [%],

φ_z – wilgotność względna powietrza na zewnątrz komory pomiarowej symulatora [%],

p_{ws}, p_{zs} – ciśnienie pary wodnej nasyconej w powietrzu odpowiednio od wewnętrznej i od zewnętrznej strony próbki w danej temperaturze [Pa].

Gęstość strumienia pary wodnej wyznacza się na podstawie pomiaru prędkości obrotowej pompy według równania (6):

$$G = \frac{V\omega\rho}{60F}, \quad (6)$$

gdzie:

V – objętość węża na długości bieżni pompy Watson-Marlow [cm³],

ω – prędkość obrotowa pompy [min⁻¹],

ρ – gęstość wody [g/cm³].

Podstawiając równania (4), (5) i (6) do równania (3), uzyskujemy równanie (7), które pozwala na obliczenie współczynnika przepuszczalności pary wodnej P :

$$P = \frac{V\omega\rho}{0,6(\varphi_w p_{ws} - \varphi_z p_{zs})F}. \quad (7)$$

Szybkość sorpcji pary wodnej S przez próbkę badanego materiału oblicza się jako różnicę pomiędzy strumieniem podawanej wody W oraz sumą strumienia pary wodnej przechodzącego przez próbkę G_A i szybkości nawilżania wnętrza modułu M :

$$S = W - (G_A + M), \quad (8)$$

$$W = V\varphi\rho, \quad (9)$$

$$G_A = 60K\omega_1, \quad (10)$$

$$M = \frac{d(0,622 \frac{\varphi_w p_{ws}}{P - \varphi_w p_{ws}})}{dt}, \quad (11)$$

gdzie:

S – szybkość sorpcji pary wodnej [g/min],

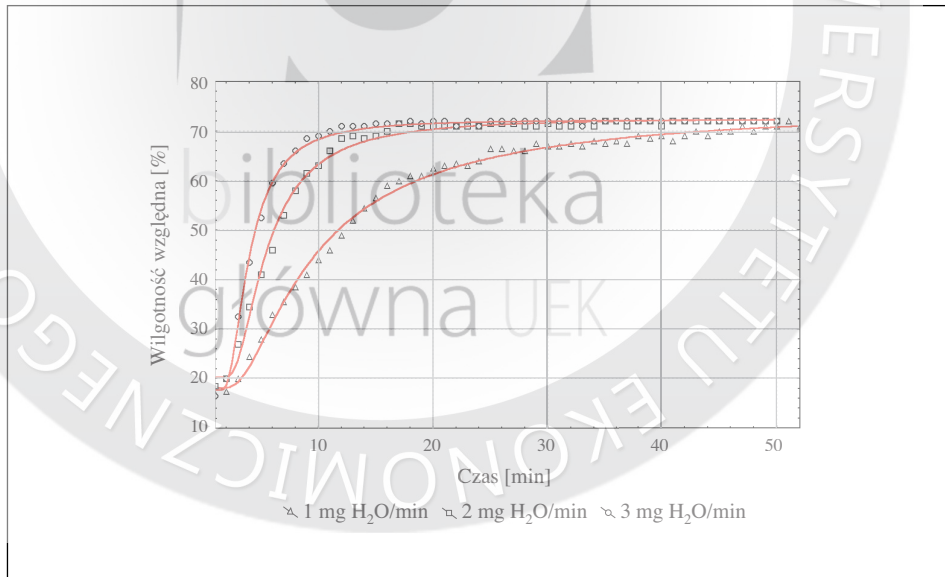
W – strumień wody podawanej do modułu [g/min],

G_A – strumień pary przechodzącej przez próbkę [g/min],

M – szybkość nawilżania wnętrza modułu [g/min],

P – ciśnienie całkowite w module [Pa].

W badanych materiałach nieprzepuszczalnych dla pary wodnej i powietrza wilgotność względna powietrza wewnątrz komory pomiarowej, pomimo ciągłego podawania wody, nie osiąga, jak można by się spodziewać, wartości 100% [2, 5]. Przykładowo, bez względu na ilość podawanej wody: 1, 2 lub 3 mg/min (rys. 4), w komorze stosunkowo szybko ustala się wilgotność względna na poziomie równym 72%. Szybkość osiągnięcia tego stanu zależy od ilości dostarczanej wody, a także od wymiarów przestrzeni pod próbką. Towarzyszy temu stwierdzone doświadczalnie, rośnienie się dolnej (od strony wnętrza komory pomiarowej) powierzchni próbki. Zjawisko to jest związane z przekroczeniem temperatury punktu rosy. Im niższa jest temperatura wewnętrznej powierzchni próbki, tym wilgoć wykrapla się przy niższej wartości wilgotności względnej powietrza pod próbką. Szybkość wykrapłania wody jest dużo większa niż szybkość parowania skroplonej wody, w związku z czym ustala się stan równowagi dynamicznej pomiędzy procesem parowania i skraplania na niższym poziomie wilgotności względnej niż 100%.



Rys. 4. Zależność wilgotności względnej od czasu dla różnych (małych) ilości podawanej wody (próbka nie przepuszcza pary wodnej)

Źródło: opracowanie własne.

Pomiary wykonywane są w warunkach nieizotermicznych. W trakcie ich trwania ustala się na próbce badanego materiału gradient temperatury. Zmiany temperatury powierzchni próbki pociągają za sobą, ściśle z nią związane, zmiany wilgotności względnej powietrza. Przykładowo, dla powietrza o wilgotności względnej 50% zmiana temperatury w warstwie przy powierzchni próbki

z temperatury 40°C do 30°C powoduje wzrost wilgotności względnej tego powietrza w warstwie przyściennej do około 90%. Obniżenie temperatury o kolejne 2°C powoduje przekroczenie temperatury punktu rosy i wykroplenie się pary wodnej [2, 5].

W zbudowanym systemie pomiarowym ma miejsce bezstykowy, ciągły pomiar temperatury zewnętrznej powierzchni próbki. Porównując ją z temperaturą punktu rosy obliczoną dla wilgotności powietrza panującej pod próbką można stwierdzić, czy w obrębie badanego materiału nastąpiło wykroplenie pary wodnej. Ma to dwojakie znaczenie:

- po pierwsze, przy wyznaczaniu przepuszczalności pary wodnej konieczna jest selekcja pomiarów. Pomiar, w wypadku których stwierdzono, że temperatura zewnętrznej powierzchni próbki jest niższa lub równa temperaturze punktu rosy, należy odrzucić, ponieważ ilość podawanej w stanie równowagi pary wodnej nie jest równa ilości przechodzącej przez materiał (część pary ulega wykropleniu). W związku z tym przebieg zależności gęstości strumienia masy od różnicy prężności cząstkowej pary wodnej będzie nieliniowy;
- po drugie, wykrycie zjawiska wykrapalania pary wodnej w strukturze próbki ma duże znaczenie przy ocenie właściwości higienicznych i ciepłochronnych badanego materiału.

5. Podsumowanie

W związku z bardzo dużym zróżnicowaniem właściwości przepływowo-dyfuzyjnych skór, tworzyw skóropodobnych i materiałów tekstylnych wykorzystywanych do produkcji obuwia i odzieży, istnieje konieczność stosowania wariantowej procedury pomiaru wielkości opisujących transport wilgoci przystosowanej do badania poszczególnych grup materiałowych, które różnią się pojemnością sorpcyjną, przepuszczalnością i oporem cieplnym.

Opracowując metodykę pomiaru, materiały stosowane w obuwiu i w odzieży podzielono na grupy różniące się:

- przepuszczalnością powietrza i pary wodnej (dobrze przepuszczalne dla pary wodnej i powietrza, słabo przepuszczalne dla pary wodnej i powietrza oraz dobrze przepuszczające parę wodną, a słabo powietrze, i odwrotnie),
- powinowactwem do wody (hydrofilowe i hydrofobowe),
- ciepłochronnością (wydzielono materiały ciepłe o małym współczynniku przewodzenia ciepła).

W metodyce przyjęto, że będą prowadzone pomiary nie tylko ustalających się stanów równowagi dynamicznej wymiany masy w różnych warunkach gradientu temperatury, prężności pary wodnej oraz ciśnienia całkowitego gazu, ale również kinetyki procesu. Opracowano więc dwie metody pomiaru przepuszczalności i sorpcji pary wodnej w warunkach nieizotermicznych, oparte na:

- analizie stanów równowagi dynamicznej, które są osiągane przy różnych gęstościach strumienia w warunkach ustalonego przepływu pary wodnej,

– pomiarze chwilowego strumienia przepuszczonej pary wodnej równemu co do wartości strumieniowi absorbowanej wody (w absorberze).

Wariantowa metodyka badań, wprowadzone zmiany sprzętowe oraz zmiany w oprogramowaniu systemu powinny zostać zweryfikowane poprzez określenie niepewności pomiarowych materiałów reprezentujących poszczególne grupy o zróżnicowanych właściwościach.

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 7 T08 019 09, Politechnika Łódzka, Instytut Włókienniczy, Filia w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 1997.
- [2] Marcinkowska E., Żuk W., *Badania właściwości higienicznych materiałów z wykorzystaniem komputerowego systemu „Hy-Tester”*. Etap I. *Metodyka pomiaru transportu wilgoci*, Sprawozdanie z badań statutowych Akademii Ekonomicznej w Krakowie, 10/KTP/2/2003/S, Kraków 2003.
- [3] 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.
- [4] Marcinkowska E., Żuk W., *Water Vapor Permeability Measurement with the „Hy-Tester” Physical Simulator*, „Journal of the American Leather Chemists Association” 2001, vol. 96.
- [5] *Symulacja fizyczna w badaniach procesów wymiany masy w tekstyliach i materiałach skóropodobnych*, E. Marcinkowska, K. Kobiela-Mendrek, E. Nycz, W. Żuk, Sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu badawczego KBN 7 T08E 067 16, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Instytut Włókienniczy, Bielsko-Biała 2002.

Methodology for Testing the Migration of Humidity Using the Computer System “Hy-Tester”

Detailed procedures for operating the “Hy-Tester” system and a method for measuring a number of quantities describing the migration of humidity in a group of materials used for footwear and clothing are presented. An operator is able to determine the moment of achieving the thermal and sorptive equilibriums and then to start the measurement proper. The process is of a dynamic character, and the measuring system makes it possible to follow temperatures and relative humidities in the media on both sides of the tested sample and to analyse changes in them in the function of time. On the basis of the registered data various quantities describing the migration of humidity are determined. Two methods for determining steam permeability, as the instantaneous permeability and in the state of equilibrium, are described. Also a method for determining the sorption of steam by the tested material is described. The problem of outdropping of humidity, a phenomenon that is important for the evaluation of the hygienic properties of a material, is analysed.