

WIOLETTA SYBILSKA

**Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów
Politechnika Łódzka**

MODELOWANIE PRZEPŁYWU CIEPŁA I MASY PRZEZ WYROBY WIELOWARSTWOWE Z MEMBRANAMI PÓLPRZEPUSZCZALNYMI

Promotor: **dr hab. inż. Ryszard Korycki, prof. PŁ**

Recenzenci: **prof. dr hab. inż. Iwona Frydrych
dr hab. inż. Maria Pawłowa, prof. nadzw. PRad**

W pracy scharakteryzowano materiały odzieżowe, powleczone membranami półprzepuszczalnymi pod kątem ochrony organizmu przed utratą ciepła oraz odprowadzania potu. Wyznaczono wartości oporów cieplnego i pary wodnej, co pozwala projektować materiał wyrobów odzieżowych z uwagi na optymalne wypełnianie funkcji użytkowych i zapewnienie odpowiedniego komfortu w warunkach użytkowania. Parametry termofizyczne mierzono za pomocą przyrządu do pomiaru oporu cieplnego i oporu pary wodnej w warunkach stanu ustalonego (metoda pocącej się zaizolowanej cieplnie płyty) przyrządu: Alambeta i Thermo Labo II. Dokonano porównania średnich wartości oporu cieplnego, współczynnika przewodzenia ciepła i maksymalnej gęstości przepływu strumienia ciepła między wynikami uzyskanymi trzema metodami. W pracy przedstawiono rozwiązanie modelu teoretycznego sprzężonego przewodzenia masy i energii cieplnej. Do rozwiązania i wizualizacji wyników wykorzystano program użytkowy ADINA. Dokonano analizy porównawczej zmian parametrów mikroklimatu pododzieżowego: temperatury i wilgotności w fazie spoczynku, wysiłku i odpoczynku podczas testu na cykloergometrze dla trzech kurtek. Testowane kurtki skonfekcjonowano z materiałów o konstrukcji wielowarstwowej posiadających membranę półprzepuszczalną.

1. WPROWADZENIE

Odzież jest podstawowym środkiem przeciwdziałania ujemnym warunkom klimatycznym. Wytwarza określony mikroklimat wokół ciała ludzkiego i zapewnia użytkownikowi komfort cieplny. Od wielu lat prowadzone są badania nad wpływem

właściwości odzieży i materiałów, z których została wytworzona, na organizm człowieka. Właściwości te określa się mianem właściwości biofizycznych. Stwierdzono, że na wytwarzanie mikroklimatu wokół ciała ludzkiego wpływają takie parametry charakteryzujące odzież, jak: przewodność, zdolność do przepuszczania pary wodnej oraz izolacyjność cieplna. Właściwa wentylacyjność odzieży powinna zabezpieczyć przed nadmiarem dwutlenku węgla w warstwach przyskórnych (normalne stężenie przyjmuje się w ilości 0,03%). Przepuszczalność pary wodnej określa zdolność odzieży do odprowadzania potu z powierzchni skóry tak, aby nie osiadał na skórze w postaci cieczy, a właściwa izolacyjność cieplna pozwala na utrzymanie średniej temperatury skóry człowieka na poziomie 33 °C (306 K). Duży wpływ na te właściwości ma materiał, z którego została ona wykonana oraz konstrukcja odzieży [1].

Problematyka właściwości biofizycznych materiałów, m.in. przepuszczalności pary wodnej i powietrza, posiada duży dorobek bibliograficzny, gdyż relacje odzieży z fizjologią ciała ludzkiego były przedmiotem badań już w XVII wieku. Spotyka się coraz więcej opracowań na temat związku tych parametrów z ich strukturą, np.: z rodzajem włókien, z których wytworzony jest wyrób, rodzajem splotu, grubością przędzy i samego wyrobu, rodzajem naniesionej apretury itp. [2÷5].

Przemysł dostarcza coraz to nowych surowców włókienniczych, które zmieniają właściwości wytworzonych z nich materiałów. W przypadku materiałów odzieżowych paroprzepuszczalnych, membrany pozwalają na swobodne przenikanie cząsteczek pary wodnej, a jednocześnie stanowią nieprzekraczalną barierę dla wilgoci i szkodliwych czynników zewnętrznych. Zastosowanie w wielowarstwowym materiale z membraną paroprzepuszczalną dzianiny typu polar jako warstwy wewnętrznej zwiększy ciepłochronność odzieży wykonanej z tego materiału. Straty ciepła powstają głównie wtedy, gdy powietrze z łatwością przenika przez warstwę materiału włókienniczego. Odzież wyposażona w membranę redukuje przewodność do minimum, stąd też temperatura ciała i korzystny mikroklimat zostają zachowane, nawet przy silnym wietrze. Membrany są jednak cienkie i dlatego nie wykazują dobrych właściwości izolacyjnych. Toteż w przypadku niskich temperatur niezbędne jest stosowanie dodatkowej warstwy ocieplającej. Podczas konfekcjonowania odzieży z laminatów dwuwarstwowych będą wymagać one użycia dodatkowego materiału odzieżowego nie tylko z uwagi na mechaniczną ochronę membrany, lecz także na konieczność zniwelowania negatywnego odczucia chłodu przy kontakcie laminatu ze skórą użytkownika.

Zadaniem odzieży wierzchniej jest zapewnienie jej użytkownikowi ochrony termicznej. W praktyce oznacza to, że powinna nas zabezpieczyć przed przemarznięciem, przemoczeniem, przewianiem, ale także przed przegrzaniem. Pojawienie się nowych materiałów zwiększyło trudności ustalania przydatności różnych materiałów włókienniczych do odpowiedniej odzieży. Różnorodne zastosowanie wyrobów wielowarstwowych powoduje, że w zależności od ich przeznaczenia powinny one charakteryzować się różnymi właściwościami, aby efektywnie spełniać swoją rolę.

2. CEL PRACY

Celem pracy było opracowanie modelu przepływu ciepła i masy, który może być wykorzystany do projektowania wyrobów wielowarstwowych o wymaganych właściwościach termofizycznych.

3. MATERIAŁ BADAWCZY

Materiał badawczy stanowiły wodoszczelne, paroprzepuszczalne materiały odzieżowe z udziałem membran. W tabeli 1 podano symbole badanych materiałów odzieżowych i ich charakterystykę.

Tabela 1. Charakterystyka badanych laminatów

Ozn.	Charakterystyka	Masa powierzchniowa g/m ²	Grubość ·10 ⁻³ m	Liczba nitek na decymetr (tkanina)		Splot (tkanina zewnętrzna)
				osnowa	Wątek	
2L1	Laminat dwuwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PES – 100%	145 ± 6	0,29 ± 0,02	503±10	494±15	skośny
2L2	Laminat dwuwarstwowy: tkanina PES – 30% + CO – 70% membrana PU – 100%	220 ± 9	0,54 ± 0,02	276 ± 6	250 ± 8	skośny
2L3	Laminat dwuwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PU – 100%	160 ± 6	0,47 ± 0,02	323±6	260±8	skośny
2L4	Laminat dwuwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PES – 100%	165±7	0,40 ± 0,02	386±8	283±6	skośny
2L5	Laminat dwuwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PU – 100%	180±7	0,40 ± 0,02	418±17	365±22	skośny
2L6	Laminat dwuwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PU – 100%	140±6	0,28 ± 0,02	571±23	565±34	plócienny
2L7	Laminat dwuwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PES– 100%	290±12	0,73 ± 0,02	470±19	312±19	skośny
3L1	Laminat trójwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PU – 100% dzianina polarowa: PES – 100%	370 ± 15	2,43 ± 0,02	618±25	460±28	plócienny

3L2	Laminat trójwarstwowy: tkanina PES – 70%, CV – 30% membrana PU – 100% dzianina polarowa: PES – 100%	394 ± 16	2,21 ± 0,02	214±9	192±12	plócienny
3L3	Laminat trójwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PTFE – 100% dzianina polarowa: PES – 100%	330 ± 13	2,04 ± 0,02	271 ± 5	260 ± 8	plócienny
3L4	Laminat trójwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PU – 100% dzianina polarowa: PES – 100%	330 ± 14	2,17 ± 0,04	271 ± 5	260±8	plócienny
3L5	Laminat trójwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PES – 100% dzianina polarowa: PES – 100%	285 ± 12	2,20 ± 0,03	503 ± 10	494±15	skośny
3L6	Laminat trójwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PTFE– 100% dzianina polarowa: PES – 100%	310 ± 12	2,09 ± 0,05	271±5	260±8	plócienny
3L7	Laminat trójwarstwowy: tkanina PES – 100% membrana PES– 100% dzianina: PES – 100%	193 ± 8	0,53 ± 0,02	503±10	494±15	skośny

4. METODYKA BADAŃ

4.1. Wyznaczanie oporu cieplnego i oporu pary wodnej

Opór cieplny i opór przenoszenia pary wodnej wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 31092: 1998/Apl:2004, Tekstyli. Wyznaczanie właściwości fizjologicznych. Pomiar oporu cieplnego i oporu pary wodnej w warunkach stanu ustalonego (metoda pocącej się zaizolowanej cieplnie płyty).

4.2. Wyznaczanie grubości

Badania grubości wykonano zgodnie z PN-EN ISO 5084:1999, Tekstyli. Wyznaczanie grubości wyrobów włókienniczych. Powierzchnia pomiarowa stopki dociskowej – $20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, stosowane naciski: wyrób płaski – 1000 Pa, wyrób wypukły – 100 Pa.

4.3. Wyznaczenie wskaźników izolacyjności cieplnej

Wykorzystano do tego celu przyrząd pomiarowy Alambeta, firmy Sensora, który służy do wyznaczenia:

- współczynnika przewodności cieplnej,
- dyfuzji cieplnej,
- absorpcji termicznej,
- oporu cieplnego,
- ilorazu przepływu ciepła maksymalnego i stacjonarnego,
- maksymalnej gęstości przepływu strumienia ciepła.

Badania wykonano w klimacie normalnym (temperatura powietrza 293 K, wilgotność względna powietrza 65%).

4.4. Pomiar odczucia „ciepło/zimno” $q_{\max}$ oraz stałej przewodności cieplnej

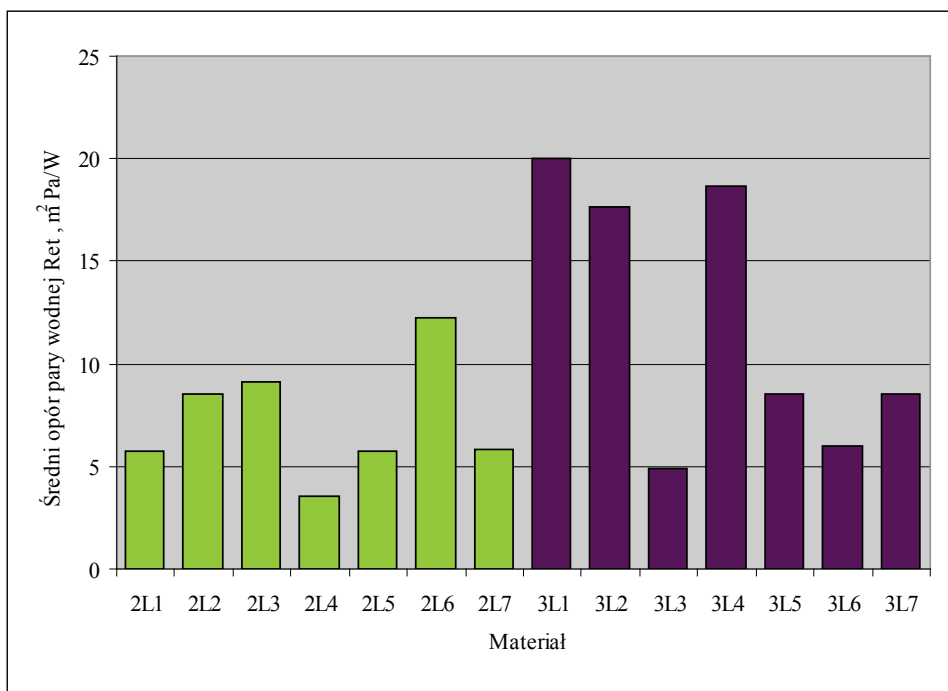
Do wyznaczenia odczucia „ciepło/zimno”, którego miarą jest maksymalna gęstość strumienia ciepła $q_{\max}$, oraz przewodności cieplnej wykorzystano przyrząd KES-F7 THERMO LABO II TYPE.

5. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA WYNIKÓW

5.1. Analiza wyników badań laminatów membranowych zmierzonych na przyrządzie do pomiaru oporu cieplnego i oporu pary wodnej w warunkach stanu ustalonego (metoda pocącej się zaizolowanej cieplnie płyty) – „Sztuczna skóra”

W celu określenia, który z laminatów charakteryzuje się najlepszą „oddychalnością”, a więc który wykazuje najmniejszy opór przy przenoszeniu pary wodnej zostały przeprowadzone badania oporu przenikania pary wodnej, których wyniki przedstawiono na rysunku 1.

Z rysunku 1 wynika, że najmniejsze wartości oporu przenikania pary wodnej wykazują laminaty dwuwarstwowe (2L1÷2L7) średnio na poziomie $7,25 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa/W}$ oraz laminaty trójwarstwowe oznaczone symbolem 3L3 i 3L6 o oporze przenikania pary wodnej wynoszącym dla 3L3 – $4,91 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa/W}$, a dla 3L6 – $5,98 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa/W}$. Laminaty te mają najlepsze właściwości wśród badanych materiałów, ponieważ im mniejsze wartości oporu przenikania pary wodnej przez materiał, tym lepsza jest jego zdolność do odprowadzania potu wydzielonego przez człowieka. Membrany są bardzo wrażliwe na przebicie i dlatego w gotowym wyrobie są chronione.



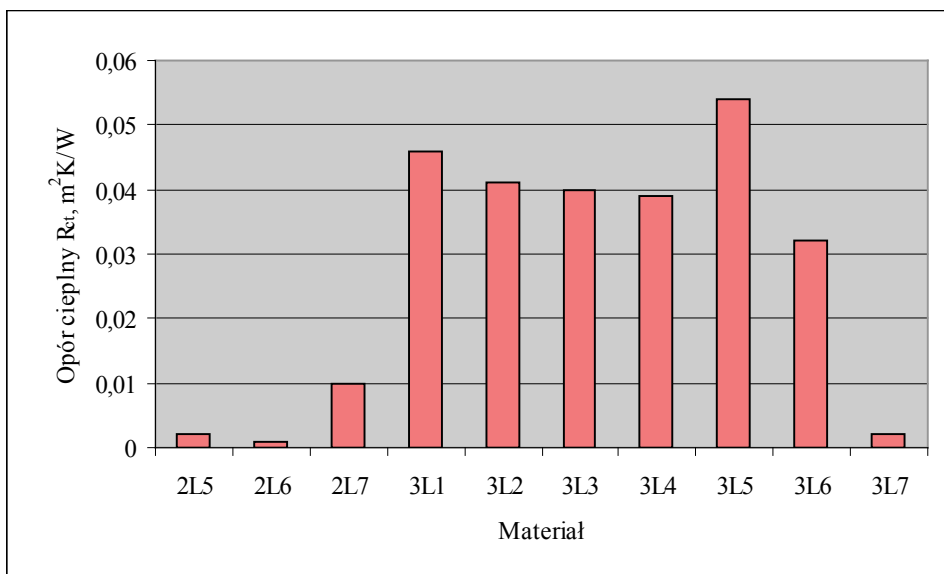
Rys. 1. Wykres średnich jednoczynnikowej analizy wariancji dla oporu przenoszenia pary wodnej

Podczas konfekcjonowania odzieży z laminatów dwuwarstwowych będą wymagać one użycia dodatkowego materiału odzieżowego (podszewki, ocieplacza) nie tylko z uwagi na mechaniczną ochronę membrany, lecz także na konieczność zniwelowania negatywnego odczucia chłodu przy kontakcie laminatu ze skórą użytkownika. Wśród laminatów trójwarstwowych najniższy opór przenikania pary wodnej wykazują laminaty oznaczone symbolem 3L3 i 3L6, w których membrana z policzterofluoroetyleny (PTFE) jest laminowana do dzianiny polarowej. Większość laminatów wykazuje wartości oporu przenikania pary wodnej $R_{et} \leq 20 \text{ m}^2 \text{ Pa/W}$. Znając klasyfikację odzieży ciepłochronnej pod względem wielkości tego parametru (tabela 2), można stwierdzić, że niemal wszystkie laminaty należą do klasy 3, a więc do materiałów korzystnych pod względem właściwości biofizycznych.

Tabela 2. Klasyfikacja oporu pary wodnej [6]

Opór przenikania pary wodnej R_{et}	Klasa		
	1	2	3
$\frac{\text{m}^2 \cdot \text{Pa}}{\text{W}}$	$R_{et} > 40$	$20 < R_{et} \leq 40$	$R_{et} \leq 20$

Dobrym przykładem pokazującym wpływ membrany na wartość oporu przenikania pary wodnej jest porównanie ze sobą laminatów 3L4 (PU) i 3L6 (PTFE), które mają bardzo zbliżoną grubość (laminat 3L4 – $2,17 \cdot 10^{-3}$ m, a laminat 3L6 – $2,09 \cdot 10^{-3}$ m) i wykazują różne wartości oporu przenikania pary wodnej (laminat 3L4 – $18,65 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa/W}$, a laminat 3L6 – $5,98 \text{ m}^2 \cdot \text{Pa/W}$).

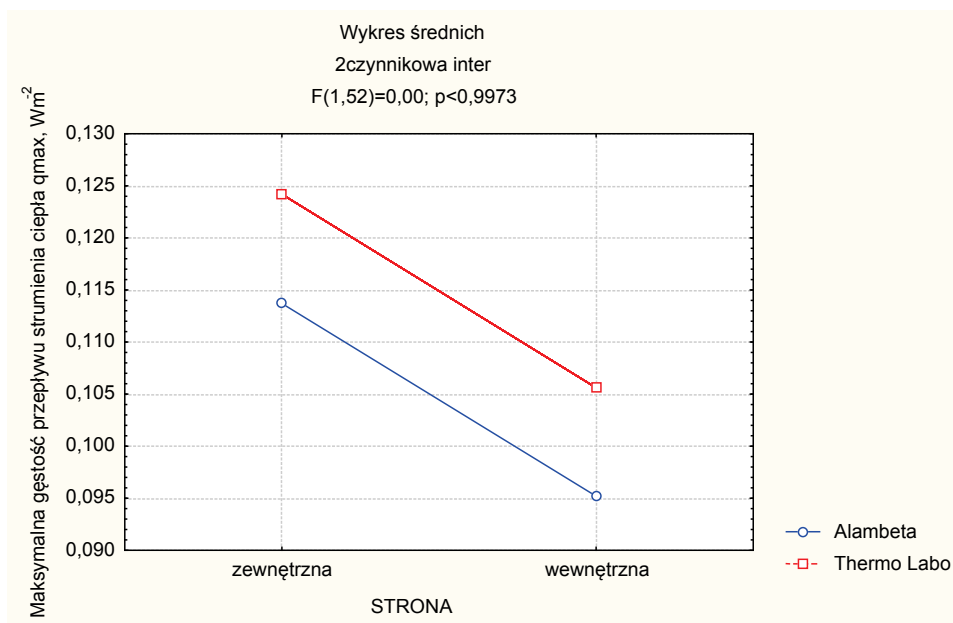


Rys. 2. Wykres średnich jednoczynnikowej analizy wariancji dla oporu cieplnego

Uzyskane wartości oporu cieplnego dla badanych laminatów (rys. 2) mieszczą się w szerokim przedziale (od $0,001 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ do $0,054 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$). Duże zróżnicowanie wynika z różnej grubości laminatów. Im większa grubość laminatu (największą grubość posiada laminat oznaczony symbolem 3L1), tym wyższe wartości oporu cieplnego, a więc lepsza ochrona przed zimnem. Chcąc uzyskać materiał będący dobrym izolatorem cieplnym, należy więc zwrócić uwagę na jego grubość. Należy jednak optymalizować właściwości cieplne i wagę odzieży, aby odzież nie była zbyt ciężka, co wpłynęłoby na pogorszenie komfortu jej użytkowania. Laminat oznaczony numerem 2L6 wykazuje się najniższym oporem cieplnym spośród badanych materiałów. Ma on najmniejszą grubość wśród badanych laminatów, co świadczy o proporcjonalnym wpływie grubości na wartości oporu cieplnego.

5.2. Analiza porównawcza wybranych metod pomiaru parametrów termoizolacyjnych

Wyniki pomiarów maksymalnej gęstości przepływu strumienia ciepłego zmierzone za pomocą przyrządu Thermo Labo i Alambeta dla wyrobów wielowarstwowych przedstawiono na rys. 3.

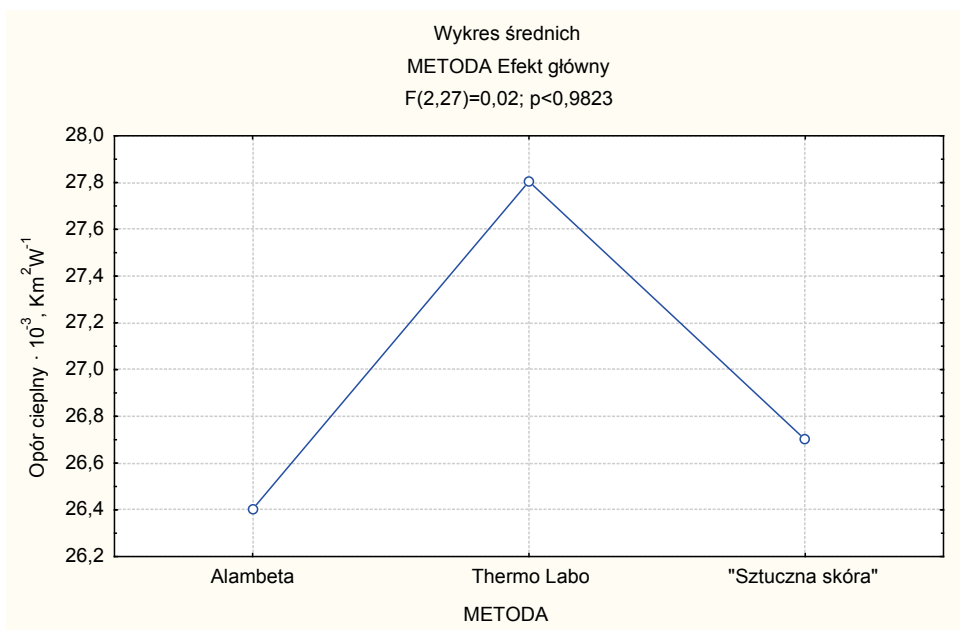


Rys. 3. Wykresy dwuczynnnikowej analizy wariancji dla średnich wartości maksymalnej gęstości przepływu strumienia ciepła

Przeprowadzona dwuczynnnikowa analiza wariancji (rys. 3) pokazała, że zastosowana metoda badania maksymalnej gęstości strumienia przepływu ciepła nie wpływa istotnie na wynik pomiaru ($P > 0,05$).

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji badań oporu cieplnego dla wyrobów wielowarstwowych w postaci średnich wartości zmierzonych trzema metodami.

Przeprowadzona analiza wariancji wyników pomiaru oporu cieplnego według trzech metod badawczych, przedstawiona na wykresie (rys. 4), jako średnie wartości z wszystkich badanych materiałów potwierdza, że rodzaj zastosowanej metody nie wpływa istotnie na wynik pomiaru oporu cieplnego ($F = 0,0179$, $P = 0,9823$).



Rys. 4. Wykresy średnich wartości oporu cieplnego dla laminatów

6. BADANIA UŻYTKOWE NA CYKLOERGOMETRZE

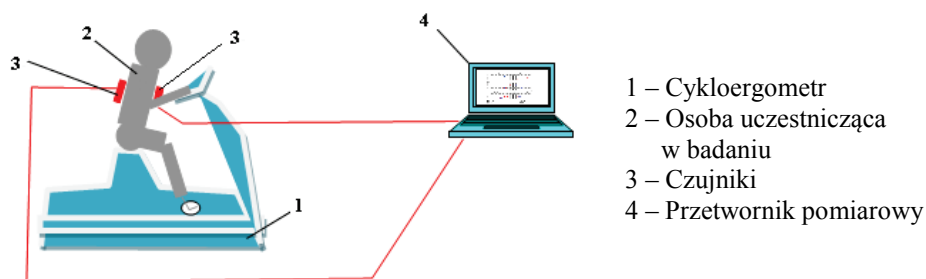
6.1. Cel badań

Celem pracy była ocena właściwości biofizycznych wyrobów na podstawie pomiarów mikroklimatu pododzieżowego w warunkach stacjonarnych i niestacjonarnych z zastosowaniem urządzenia wysiłkowego – cykloergometru.

6.2. Stanowisko do badań wysiłkowych

Stanowisko pomiarowe (rys. 5) umożliwiające rejestrację mikroklimatu pododzieżowego, wytworzonego między ciałem osoby testującej a odzieżą składa się z:

- cykloergometru,
- dwóch czujników do pomiaru mikroklimatu pododzieżowego podłączonych do komputera,
- komputera z oprogramowaniem Hygrotec:
 - Aplikacja Rekord COM1 – służy do pomiaru temperatur, wilgotności i entalpii z czujnika 1,
 - Aplikacja Rekord COM2 – służy do pomiaru temperatur, wilgotności i entalpii z czujnika 2.



Rys. 5. Stanowisko do badań parametrów mikroklimatu pododzieżowego na cykloergometrze [7]

Cykl pomiarowy obejmuje rejestrację mikroklimatu pododzieżowego w stanie spoczynku, w fazie wysiłku fizycznego przy obciążeniu 50 W, a następnie w fazie odpoczynku. Rejestracji temperatury i wilgotności dokonuje się na klatce piersiowej i plecach użytkownika dla wybranych wariantów odzieży [8].

Testy zostały przeprowadzone w pomieszczeniu o klimacie normalnym, zgodnym z warunkami klimatycznymi normy PN – EN 139 : 2006: Tekstyliia. Klimaty normalne do aklimatyzacji badań [9].

6.3. Metodyka badań parametrów mikroklimatu pododzieżowego

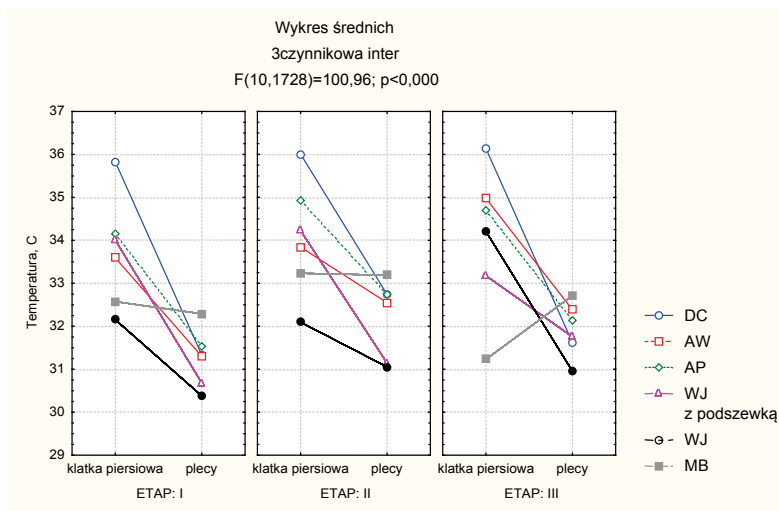
Każde badanie składało się z trzech etapów. Pierwszy etap to 15-minutowy spoczynek, drugi etap to wysiłek trwający 30 minut, a trzeci to odpoczynek – 30 minut. Test został przeprowadzony w laboratorium o temperaturze ok. 20°C, przy wilgotności względnej ok. 65%. W czasie eksperymentu rejestrowano temperaturę i wilgotność względną.

Wzory uszytych kurtek przedstawiono na rysunku 6.



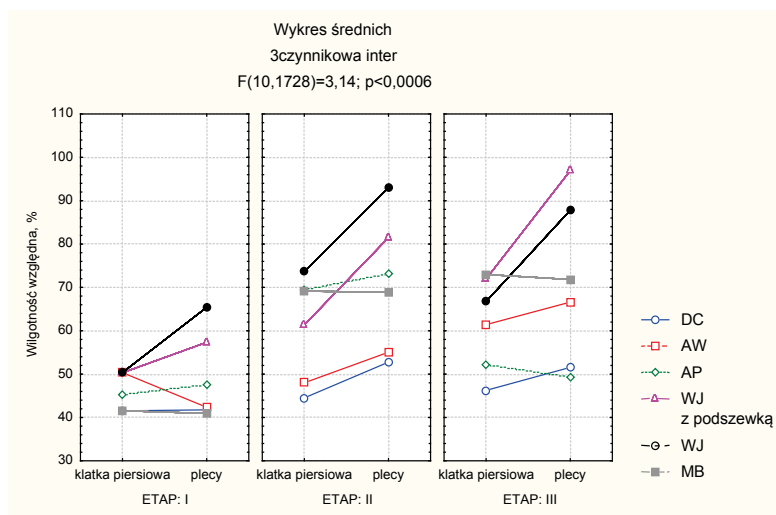
Rys. 6. Projekty kurtek przeciwdeszczowych

W celu określenia, która kurtka charakteryzowała się najkorzystniejszymi właściwościami biofizycznymi, wykonano trójczynnиковą analizę wariancji parametrów określających mikroklimat pododzieżowy (rys. 7÷8), z podziałem na trzy etapy badania oraz uwzględniając miejsce umieszczenia czujnika pomiarowego (klatka piersiowa czy plecy).



etap I – aklimatyzacja, etap II – wysiłek, etap III – odpoczynek

Rys. 7. Wykres średnich trójczynninkowej analizy wariancji dla parametru mikroklimatu pododzieżowego – temperatury



etap I – aklimatyzacja, etap II – wysiłek, etap III – odpoczynek

Rys. 8. Wykres średnich trójczynninkowej analizy wariancji dla parametru mikroklimatu pododzieżowego – wilgotności względnej

Badania wykazały zróżnicowany komfort termiczny i transport wilgoci. Rozkład temperatury i przewodzenie wilgoci są zróżnicowane w zależności od analizowanej części ciała człowieka. Największe zróżnicowanie parametrów mikroklimatu pododzieżowego w zależności od rodzaju surowca, z jakiego była wykonana kurtka stwierdzono dla fazy odpoczynku po wysiłku.

W warunkach komfortu termicznego (równowagi cieplnej organizmu), temperatura wewnętrzna (w stanie spoczynku) utrzymuje się na stałym poziomie $37 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, średnia ważona temperatury powierzchni skóry wynosi $32 \div 34^{\circ}\text{C}$ [10].

Występujące w większości przypadków obniżanie się temperatury mikroklimatu pod odzieżą, mierzonej bezpośrednio po wysiłku, można próbować wytłumaczyć różną adaptacją badanych do wysiłku fizycznego.

W celu scharakteryzowania właściwości termofizycznych materiałów zastosowanych na kurtki chroniące przed niekorzystnymi warunkami pogodowymi (deszcz, wiatr) przeanalizowano wyniki oporu cieplnego i oporu przenikania pary wodnej przedstawione na rys. 1 i 2. Materiały odzieżowe oznaczone symbolem 3L3 i 3L5 cechują się zbliżonymi wartościami oporu cieplnego. Mimo najniższej wartości oporu cieplnego materiału o symbolu 3L7, podczas badań kurtki odnotowano spadek temperatury skóry użytkowników do $32,7^{\circ}\text{C}$, a więc do temperatury odczuwalnej w warunkach komfortu fizjologicznego.

Podstawowym wskaźnikiem właściwości biofizycznych materiałów jest opór przenikania pary wodnej (R_{et}). Materiały na kurtki oznaczone symbolem 3L3, 3L5 i 3L7 charakteryzują się niskim oporem przenikania pary wodnej $R_{\text{et}} < 10 \text{ (m}^2 \cdot \text{Pa)/W}$, co oznacza, że posiadają bardzo dobre właściwości fizjologiczne.

Analizując wyniki badań mikroklimatu poodzieżowego można stwierdzić, że spośród badanych kurtek przeciwdeszczowych najkorzystniejsze właściwości biofizyczne wykazała kurtka damska wykonana z trójwarstwowego materiału o symbolu 3L3. Wyniki te potwierdzają wyniki badań laboratoryjnych (rys. 1 i 2). Kurtka wykonana z trójwarstwowego materiału 3L3, dzięki zastosowaniu membrany 100% PTFE chroni użytkownika przed niesprzyjającymi czynnikami atmosferycznymi przed wiatrem, deszczem oraz przed niskimi temperaturami, dzięki zastosowaniu dzianiny typu polar jako warstwy spodniej materiału wielowarstwowego. Jednocześnie zaś zapewnia skórze warunki do oddychania i odprowadzania wilgoci (potu) na zewnątrz, o czym świadczą wyniki badań laboratoryjnych (rys. 1 i 2) i badań użytkowych (rys. 7 i 8).

7. ROZWIĄZANIE MODELU TEORETYCZNEGO SPRĘŻONEGO PRZEWODZENIA MASY I ENERGII CIEPLNEJ

7.1. Rozwiązanie ustalonego przewodzenia masy i energii cieplnej

Rozwiązanie problemu znacznie upraszcza się dla stałych wartości parametrów przewodzenia ciepła i masy w czasie, czyli zjawiska ustalonego przewodzenia. Pochodne zmiennych stanu względem czasu zerują się, z uwagi na stałe ich wartości. Stąd równania stanu określone dla pierwszego etapu procesu sorpcji związkami:

$$\begin{cases} \eta \left(1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{\rho} \right) \frac{dw_f}{dt} = -\text{div} \mathbf{q}_w + f_w; & \mathbf{q}_w = D \nabla w_f + \mathbf{q}_w^*; \\ c \frac{dT}{dt} + \lambda_w \frac{dw_f}{dt} = -\text{div} \mathbf{q} + f; & \mathbf{q} = \mathbf{A} \cdot \nabla T + \mathbf{q}^*, \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: $\mathbf{A}$ – macierz współczynników przewodności cieplnej dla materiału nieizotropowego,

c – pojemność cieplna materiału konstrukcji włókienniczej,

$D = h_a \varepsilon / \zeta$ – współczynnik transportu masy (pary wodnej) we włóknach,

f – wydatek źródła ciepła,

f_w – wydatek źródła masy,

$\mathbf{q}$ – wektor gęstości strumienia ciepła,

$\mathbf{q}^*$ – wektor wstępnej gęstości strumienia ciepła,

$\mathbf{q}_w$ – wektor gęstości strumienia masy,

$\mathbf{q}_w^*$ – wektor wstępnej gęstości strumienia masy,

w_f – stężenie pary wodnej we włóknach,

ε – efektywna porowatość materiału włókienniczego,

η – współczynnik absorpcji,

ρ – gęstość włókien,

λ_w – współczynnik transportu krzyżowego określony jako transport ciepła z parą wodną we włóknach,

∇ – operator gradientowy,

T – temperatura,

i dla drugiego etapu związkami:

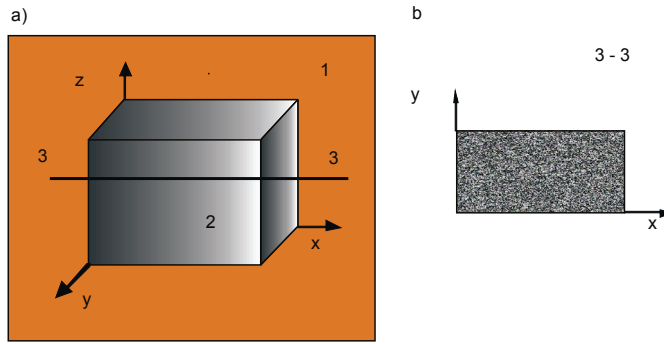
$$\begin{cases} \eta \left(1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{\eta} \right) \frac{dw_f}{dt} = -\text{div} \mathbf{q}_w + f_w, & \mathbf{q}_w = D \nabla w_f + \mathbf{q}_w^*, \\ c \frac{dT}{dt} + \lambda_w \frac{dw_f}{dt} = -\text{div} \mathbf{q} + f, & \mathbf{q} = \mathbf{A} \cdot \nabla T + \mathbf{q}^*, \end{cases} \quad (2)$$

można teraz zdefiniować następująco:

$$\begin{cases} -\text{div} \mathbf{q}_w + \mathbf{f}_w = 0, & \mathbf{q}_w = D \nabla w_f + \mathbf{q}_w^*, \\ -\text{div} \mathbf{q} + f = 0, & \mathbf{q} = \mathbf{A} \cdot \nabla T + \mathbf{q}^*. \end{cases} \quad (3)$$

Założmy dalej dla uproszczenia rozwiązania, że w rozpatrywanej konstrukcji włókienniczej wektory wstępnej gęstości strumienia ciepła i wstępnej gęstości strumienia masy są równe zeru $\mathbf{q}^* = 0$, $\mathbf{q}_w^* = 0$. Pozwala to zapisać równania stanu w znacznie prostszej postaci:

$$\begin{cases} D \nabla^2 w_f + f_w = 0, \\ \mathbf{A} \cdot \nabla^2 T + f = 0. \end{cases} \quad (4)$$



Rys. 9. Warunki brzegowe laminatowej konstrukcji włókienniczej:

- a) problem trójwymiarowy, x, y, z – trójwymiarowy kartezjański układ współrzędnych,
b) problem dwuwymiarowy, x, y – dwuwymiarowy kartezjański układ współrzędnych,
1 – skóra, 2 – laminat włókienniczy, 3 – dowolny przekrój laminatu

W większości typowych konstrukcji laminatów włókienniczych nie występują:

- wewnętrzne źródła ciepła $f = 0$, które mogą istnieć tylko w odzieży specjalistycznej, np. dla skoczków spadochronowych z dużych wysokości, do długiego nurkowania na dużych głębokościach itp.;
- wewnętrzne źródła masy $f_w = 0$, które występują wyłącznie w konstrukcjach z materiałami zmiany fazy (tzw. materiały pcm), czyli różnego rodzaju odzieży obniżającej temperaturę ciała użytkownika, opatrunkach itp.

Związki (4) mają wtedy bardzo prostą postać równań różniczkowych drugiego rzędu z zastosowaniem operatora Hamiltona ∇ (nabla):

$$\begin{cases} \nabla^2 w_f = 0, \\ \nabla^2 T = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Jeśli warunki przewodzenia ciepła i masy są takie same na całej grubości laminatu (patrz rys. 9), wtedy rozpatruje się jego dowolny przekrój (na rys. 9 wzdłuż osi y). Równania stanu dla jednowymiarowego przewodzenia ciepła można dodatkowo uprościć w stosunku do (5) do postaci:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w_f}{\partial y \partial y} = 0, \\ \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial y} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Rozwiązanie analityczne układu równań stanu (6) jest proste, wymaga tylko dwukrotnego scałkowania każdego z nich względem zmiennej y , a następnie wyznaczenie stałych całkowania z warunków brzegowych istniejących w danym laminacie włókienniczym.

Założmy następnie, że laminat włókienniczy jest materiałem jednowarstwowym. Warunki brzegowe określają związki:

$$\begin{aligned} T(\mathbf{x}, t) &= T^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_T; \quad w_f(\mathbf{x}, t) = w_f^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_1; \\ q_n(\mathbf{x}, t) &= q_n^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_q; \quad q_{nw}(\mathbf{x}, t) = q_{nw}^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_2; \\ q_n(\mathbf{x}, t) &= h[T(\mathbf{x}, t) - T_\infty(\mathbf{x}, t)] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_C; \quad q_{nw}(\mathbf{x}, t) = h_w[w_f(\mathbf{x}, t) - w_{f\infty}(\mathbf{x}, t)] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_3 \\ q_{nr}(\mathbf{x}, t) &= \sigma \varepsilon_w [T(\mathbf{x}, t)]^4 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_r; \\ T^{(i)}(\mathbf{x}, t) &= T^{(i+1)}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_4; \quad w_f^{(i)}(\mathbf{x}, t) = w_f^{(i+1)}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_4; \\ T(\mathbf{x}, 0) &= T_0(\mathbf{x}, 0) \quad \mathbf{x} \in (\Omega \cup \Gamma); \quad w_f(\mathbf{x}, 0) = w_f^0(\mathbf{x}, 0) \quad \mathbf{x} \in (\Omega \cup \Gamma); \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: $q_n = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}$ – gęstość strumienia ciepła w kierunku normalnym do brzegu zewnętrznego,

$q_{nw} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_w$ – gęstość strumienia masy w kierunku normalnym do brzegu zewnętrznego,

Γ – brzeg zewnętrzny konstrukcji,

Ω – obszar konstrukcji włókienniczej;

mają one w tym przypadku postać:

- warunków pierwszego rodzaju w warstwie między skórą i laminatem (dla $y = 0$),
- warunków trzeciego rodzaju na zewnętrznej powierzchni konstrukcji (dla $y = L$).

W konsekwencji warunki brzegowe problemu można matematycznie zapisać jako:

$$\begin{aligned} T|_{y=0} &= T^0 ; \quad w_f|_{y=0} = w_f^0, \\ q_n &= A\varepsilon \frac{dT}{dy} \Big|_{y=L} = h(T|_{y=L} - T_\infty); \quad q_{nw} = D\varepsilon \frac{dw_f}{dy} \Big|_{y=L} = h_w(w_f|_{y=L} - w_{f\infty}). \end{aligned} \quad (8)$$

Po dwukrotnym scałkowaniu obu równań (6) z uwagi na współzrzedną y oraz po wprowadzeniu stałych całkowania $C_1 \div C_4$ otrzymuje się:

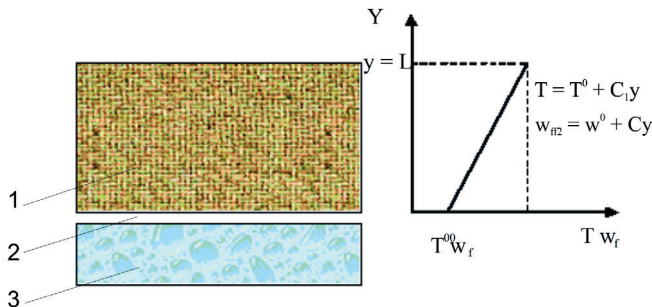
$$\begin{cases} w_{f,yy}=0 ; \quad w_{f,y}=C_1, \quad w_f=C_1y+C_2, \\ T_{,yy}=0 ; \quad T_{,y}=C_3, \quad T=C_3y+C_4. \end{cases} \quad (9)$$

Uwzględniając powyższe warunki brzegowe (6) w równaniach stanu przewodzenia energii cieplnej i masy (9), uzyskuje się następujące funkcje określające temperaturę i stężenie masy (pary wodnej) wewnątrz konstrukcji ubioru jednowarstwowego:

$$w_f = \frac{h_w(w_f^0 - w_{f\infty})}{D\varepsilon - h_wL}y + w_f^0, \quad T = \frac{h(T^0 - T_\infty)}{A\varepsilon - hL}y + T^0. \quad (10)$$

Na obu krańcowych powierzchniach laminatu włókienniczego, po podstawieniu wartości $y = 0$ oraz $y = L$, otrzymuje się następujące wartości:

$$\begin{aligned} w_f|_{y=0} &= w_f^0, & T|_{y=0} &= T^0, \\ w_f|_{y=L} &= \frac{h_w(w_f^0 - w_{f\infty})}{D\varepsilon - h_wL}L + w_f^0, & T|_{y=L} &= \frac{h(T^0 - T_\infty)}{A\varepsilon - hL}L + T^0. \end{aligned} \quad (11)$$

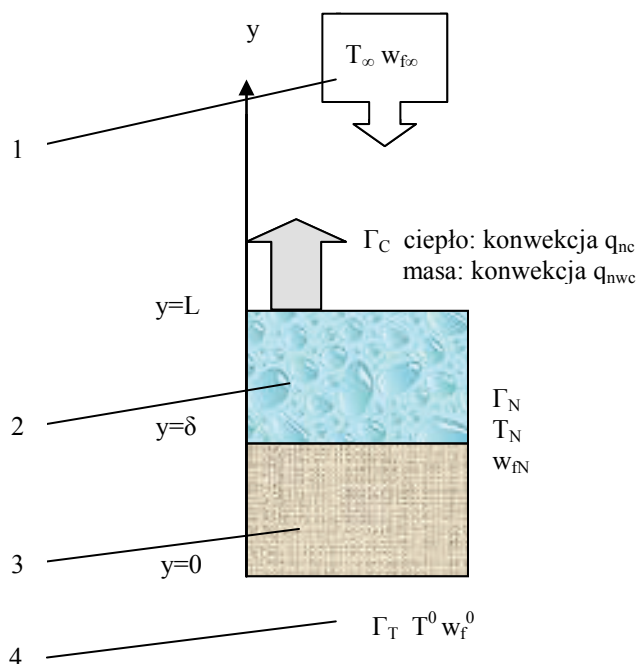


Rys. 10. Rozwiązanie problemu ustalonego, jednowymiarowego przewodzenia ciepła w materiale włókienniczym

1 – jednowarstwowy materiał włókienniczy, 2 – warstwa powietrza między skórą użytkownika i laminatem, 3 – skóra użytkownika

Jak wynika z powyższych związków (11), funkcje zmiennych stanu to zależności liniowe współrzędnej y . Iloraz temperatury i stężenia pary wodnej na powierzchniach zewnętrznej i wewnętrznej zależy od poziomu zmiennych stanu w otoczeniu. Możemy rozpatrzyć tutaj dwa przypadki:

- Wartości zmiennych stanu w otoczeniu są większe niż w warstwie przy skórze użytkownika, zatem $w_\infty > w_f^o$, $T_\infty > T^o$. W konsekwencji analizy związków (11), wartości zmiennych stanu na powierzchni zewnętrznej laminatu są również większe od wartości zmiennych stanu w warstwie powietrza między ubiorem a skórą, patrz rys. 10. Jest to wynik dodatnich wartości ułamków występujących w zależnościach (10) i (11).



Rys. 11. Problem ustalonego, jednowymiarowego przewodzenia ciepła w dwuwarstwowym laminacie włókienniczym

1 – otoczenie, wartości zmiennych stanu w otoczeniu, 2 – zewnętrzna warstwa laminatu, 3 – wewnętrzna warstwa laminatu, 4 – warstwa powietrza między skórą i laminatem, wartości zmiennych stanu przy skórze użytkownika

- Wartości zmiennych stanu w otoczeniu są mniejsze niż w warstwie przy skórze użytkownika, czyli $w_\infty < w_f^o$, $T_\infty < T^o$. W wyniku analizy związków (11), wartości zmiennych stanu na powierzchni zewnętrznej laminatu są także mniejsze od odpowiednich wartości przy skórze. Odpowiednie ułamki w związkach (10) i (11)

są w tym przypadku ujemne. Sytuacja ta nie została pokazana na rysunku z uwagi na elementarną prostotę i zupełną analogię do rys. 10.

Rozważmy następnie laminat włókienniczy zbudowany z dwóch warstw materiału, patrz rys. 11. Warunki brzegowe można zapisać na brzegach zewnętrznych związkami (8), wprowadzając dodatkowo warunek czwartego rodzaju na styku obu warstw wewnętrznych laminatu. Wszystkie warunki są teraz postaci:

$$\begin{aligned} T^{(1)} \Big|_{y=0} &= T^0, \quad w_f^{(1)} \Big|_{y=0} = w_f^0, \\ q_n^{(2)} &= A\varepsilon \frac{dT}{dy} \Big|_{y=L} = h \left(T \Big|_{y=L} - T_\infty \right); \quad q_{nw} = D\varepsilon \frac{dw_f}{dy} \Big|_{y=L} = h_w \left(w_f \Big|_{y=L} - w_{f\infty} \right), \\ T^{(1)} \Big|_{y=\delta} &= T^{(2)} \Big|_{y=\delta} = T_N; \quad w_f^{(1)} \Big|_{y=\delta} = w_f^{(2)} \Big|_{y=\delta} = w_{fN}. \end{aligned} \quad (12)$$

Równania stanu zostały opisane zależnościami (6) dla materiału jednowarstwowego. Dla materiału wielowarstwowego równania te są słuszne dla każdej z warstw laminatu (i), tutaj $i = 1, 2$. W przypadku ogólnym możemy zatem rozszerzyć zapis tych równań na następujący:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w_f^{(i)}}{\partial y \partial y} = 0, \\ \frac{\partial^2 T^{(i)}}{\partial y \partial y} = 0. \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

Po dwukrotnym scałkowaniu związków (5.20) z uwagi na współrzędną y otrzymuje się dla każdej z warstw materiału:

$$\begin{cases} w_f^{(i)},_{yy} = 0, \quad w_f^{(i)},_y = C_1^{(i)}, \quad w_f^{(i)} = C_1^{(i)}y + C_2^{(i)}; \\ T^{(i)},_{yy} = 0, \quad T^{(i)},_y = C_3^{(i)}, \quad T^{(i)} = C_3^{(i)}y + C_4^{(i)}. \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (14)$$

Stałe całkowania w obu warstwach laminatu włókienniczego można określić wykorzystując warunki brzegowe (12) oraz rys. 11. W wewnętrznej warstwie laminatu zostały wprowadzone warunki brzegowe pierwszego rodzaju na obu brzegach: zewnętrznym stykającym się z warstwą powietrza przy skórze użytkownika oraz wewnętrznym na styku obu warstw materiału. Po podstawieniu warunków brzegowych otrzymuje się zmienne stanu będące następującymi funkcjami w pierwszej warstwie materiału:

$$\begin{aligned}
 T^{(1)}\Big|_{y=0} &= T^0, & T^{(1)}\Big|_{y=\delta} &= T_N, & \Rightarrow & T^{(1)} = \frac{T_N - T^0}{\delta} y + T^0. \\
 w_f^{(1)}\Big|_{y=0} &= w_f^0, & w_f^{(1)}\Big|_{y=\delta} &= w_{fN}, & \Rightarrow & w_f^{(1)} = \frac{w_{fN} - w_f^0}{\delta} y + w_f^0.
 \end{aligned} \quad (15)$$

Druga warstwa laminatu jest poddana działaniu warunków mieszanych. Są to warunki pierwszego rodzaju na brzegu wewnętrznym, czyli styku obu warstw laminatu. Na brzegu zewnętrznym materiału jest konwekcja ciepła i masy do otoczenia, czyli występuje warunek brzegowy trzeciego rodzaju. Wykorzystując powyższe warunki brzegowe, otrzymuje się następujące funkcje zmiennych stanu w drugiej warstwie materiału:

$$\begin{aligned}
 T^{(2)}\Big|_{y=\delta} &= T_N, & q_n^{(2)}\Big|_{y=L} &= A\varepsilon \frac{dT}{dy}\Big|_{y=L} = h(T\Big|_{y=L} - T_\infty) & \Rightarrow & T^{(2)} = h \frac{T - T_\infty}{A\varepsilon} (y - \delta) + T_N. \\
 w_f^{(2)}\Big|_{y=\delta} &= w_{fN}, & q_{nw}^{(2)}\Big|_{y=L} &= D\varepsilon \frac{dw}{dy}\Big|_{y=L} = h_w(w_f\Big|_{y=L} - w_{f\infty}) \\
 \Rightarrow w_f^{(2)} &= h_w \frac{w_f - w_{f\infty}}{D\varepsilon} (y - \delta) + w_{fN}.
 \end{aligned} \quad (16)$$

Jak wynika z zależności (15) i (16), obie zmienne stanu w obu przedziałach to liniowe funkcje współrzędnej y , ich wykresami jest więc linia prosta. Nachylenie zależy od konkretnych wartości parametrów występujących w tych związkach. Ze względu na fakt, iż są to równania z wieloma zmiennymi parametrami, nie jest więc możliwa analiza ich zmienności analogiczna do laminatu jednowarstwowego.

7.2. Rozwiązanie nieustalonego przewodzenia masy I energii cieplnej

Problem nieustalonego przewodzenia ciepła I energii jest skomplikowany, ponieważ wymaga rozwiązania numerycznego niezależnie od skomplikowania geometrii konstrukcji I warunków brzegowych. Równania stanu dla pierwszej fazy procesu sprzężonego przewodzenia ciepła I masy określają związki (1), zaś dla drugiej fazy – zależności (2). Warunki brzegowe i początkowe są zdefiniowane zależnościami (7). Odpowiednie równanie stanu jest rozwiązywane numerycznie dla poszczególnych, określonych kroków czasowych w zależności od tego, czy dotyczy pierwszej czy drugiej fazy procesu sorpcji. Według Li i Luo [11] granica między tymi fazami została przyjęta jako $t_{eq} = 540$ s.

Jako przykład ilustrujący modelowanie numeryczne w prezentowanej pracy został wybrany laminat oznaczony 3L3, którego składniki to:

- tkanina wykonana w 100% z poliestru, o splocie płóciennym, masie powierzchniowej (135 ± 0) g/m² oraz grubości 0,40 mm,
- membrany wykonanej z 100% PTFE o grubości 0,02 mm,

- dzianiny wykonanej w 100 % z polaru, o masie powierzchniowej (120 ± 6) g/m² oraz grubości 1,93 m.

Całkowita grubość laminatu wynosi zatem $2,35 \cdot 10^{-3}$ m. Przyjmuje się, że ciepło i masa są transportowane w jednym kierunku. Źródło to skóra użytkownika, a z punktu widzenia konstrukcji – warstwa powietrza między skórą a laminatem, transport odbywa się na zewnątrz. Z tego powodu sprzężony przepływ masy i ciepła rozpatruje się jako jednowymiarowy. Program graficzny ADINA, który posłużył do wykonania map zmiennych stanu, ma funkcję konwekcji przypisaną wyłącznie do powierzchni, co zmuszało do zastosowania przestrzennej siatki współrzędnych i przeprowadzenia obliczeń w układzie trójwymiarowym (przestrzeni trójwymiarowej 3D). Stanowi to dodatkowe sprawdzenie poprawności prowadzonych obliczeń, z uwagi na istnienie lub brak symetrii uzyskanych przebiegów oraz warstwicowy rozkład zmiennych stanu.

Dla uproszczenia analizy numerycznej przyjęto, że materiał ma izotropowe właściwości przewodzenia masy i energii cieplnej.

Współczynniki przewodności ciepła i dyfuzji pary wodnej we włóknach zostały określone doświadczalnie tylko dla wielowarstwowych materiałów laminatowych, nie zaś dla ich poszczególnych składników. Homogenizacja całości laminatu nie jest wystarczająco miarodajna, wymaga bowiem stworzenia struktury jednorodnej złożonej aż z trzech warstw, w tym membrany o zupełnie odmiennych: materiale, budowie, właściwościach i geometrii (grubości). Stąd rozkład zmiennych stanu może być w takiej konstrukcji wyłącznie orientacyjny. Należy homogenizować każdą z warstw osobno, co pozwala na dokładne modelowanie przepływu energii i masy wewnątrz niej. Wartości parametrów charakteryzujących przepływ ciepła są określone doświadczalnie, z zastosowaniem przyrządu Alambeta. Ponieważ w pracy nie wyznaczono danych doświadczalnych dotyczących parametrów opisujących przepływ masy, przyjęto je według literatury. Wykorzystano tutaj fundamentalne prace Li i Luo [11] oraz Li [12].

W następnej kolejności należy przyjąć konkretne wartości parametrów materiałowych dla poszczególnych warstw laminatu. Warstwa tkaniny charakteryzuje się następującymi parametrami:

- materiał jest izotropowy i współczynnik przewodności cieplnej jest taki sam w każdym kierunku przewodzenia, stąd macierz współczynników przewodności cieplnej jest jednowyrazowa $\mathbf{A}^{(1)} = 0,04785 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$,
- współczynnik transportu pary wodnej we włóknach $D^{(1)} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$,
- efektywna porowatość materiału $\varepsilon^{(1)} = 0,925$,
- pojemność cieplna materiału $c^{(1)} = 1610 \cdot 10^3 \text{ J/(m}^3\text{K)}$,
- gęstość włókien $\rho^{(1)} = 1320 \text{ kg/m}^3$.

Membrana ma następującą charakterystykę:

- jednowyrazowa macierz współczynników przewodności cieplnej $\mathbf{A}^{(2)} = 0,0343 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$,

- współczynnik transportu pary wodnej we włóknach $D^{(2)} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$,
- efektywna porowatość materiału $\varepsilon^{(1)} = 0,1$,
- pojemność cieplna materiału $c^{(2)} = 1530 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{m}^3 \text{ K})$,
- gęstość tworzywa włókien $\rho^{(2)} = 1225 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Dzianina w warstwie zewnętrznej ma następującą charakterystykę:

- jednowyrazowa macierz współczynników przewodności cieplnej $A^{(3)} = 0,0422 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$,
- współczynnik transportu pary wodnej we włóknach $D^{(3)} = 2,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$,
- efektywna porowatość materiału $\varepsilon^{(3)} = 0,90$,
- pojemność cieplna materiału $c^{(3)} = 1860 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{m}^3 \text{ K})$,
- gęstość tworzywa włókien $\rho^{(3)} = 1350 \text{ kg}/\text{m}^3$,
- współczynnik konwekcji masy na powierzchni zewnętrznej $h_w = 0,1 \text{ m/s}$,
- współczynnik konwekcji ciepła na powierzchni zewnętrznej $h = 99,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Założmy następnie dla uproszczenia przeprowadzanych obliczeń numerycznych, że we wszystkich warstwach (czyli dla $i = 1, 2, 3$) są pomijalnie małe następujące parametry:

- wektor gęstości strumienia ciepła $\mathbf{q}^{*(i)} = 0$,
- wektor wstępnej gęstości strumienia ciepła $\mathbf{q}_w^{*(i)} = 0$,
- wydatek źródła ciepła $f^{(i)} = 0$,
- wydatek źródła masy $f_w^{(i)} = 0$.

Problem nieustalonego przewodzenia ciepła i masy jest zmienny w czasie, ponieważ energia cieplna i masa są transportowane z warstwy powietrza między skórą a laminatem, przez materiał, na zewnątrz konstrukcji wielowarstwowej. Inne są więc rozkłady zmiennych stanu w każdej chwili rozpatrywanego czasu. Problem sprzężony nieustalonego przewodzenia energii cieplnej i masy został rozwiązany dla kilku kroków czasu, przyjętych arbitralnie, konkretnie dla $t = 15 \text{ s}$, $t = 30 \text{ s}$ oraz $t = \infty$ (stan ustalony).

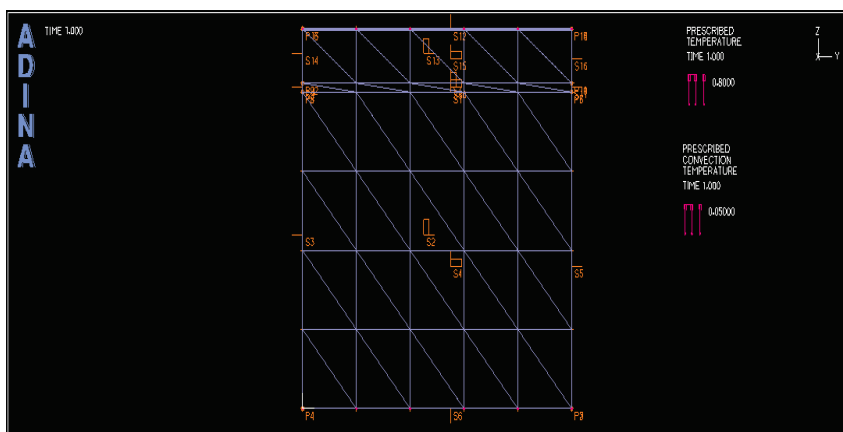
Dyskretyzację układu przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych. Z uwagi na przestrzenne modelowanie konwekcji ciepła i masy na powierzchni zewnętrznej laminatu zastosowano 4-węzłową przestrzenną siatkę elementów skończonych.

Konstrukcja włókiennicza (laminat) styka się z warstwą powietrza przy skórze użytkownika. Warstwa ta jest więc z punktu widzenia modelowania źródłem energii cieplnej o określonej temperaturze oraz masy mierzonej wilgotnością względną. Dlatego, z punktu widzenia modelu fizycznego przyjęto następujące parametry źródła energii i pary wodnej (masy): temperatura $T = 33^\circ \text{C}$; wilgotność względna 0,80%. Taka wartość temperatury jest przyjmowana dla warstwy powietrza przy skórze i zmienia się ona stosunkowo nieznacznie podczas wysiłku fizycznego, zaś wilgot-

ność względna odpowiada wydatkowi masy podczas umiarkowanego wysiłku fizycznego, patrz następny rozdział opisujący badania na cykloergometrze.

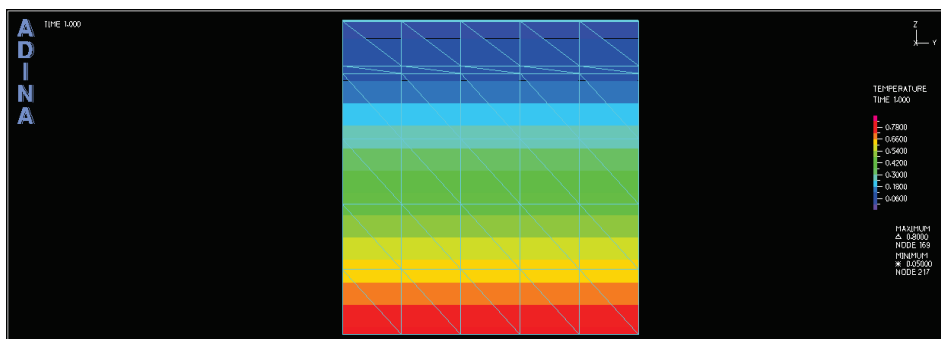
Niezależnie od tego należy przyjąć wartości zmiennych stanu dla otoczenia. Ich wartości nie są już ściśle narzucone i zależą od konkretnego zastosowania oraz warunków pracy dla danego laminatu włókienniczego. W związku z tym w otoczeniu przyjęto arbitralnie temperaturę $T = 0,1^{\circ}\text{C}$ i wilgotność względną 0,05%.

Siatkę metody elementów skończonych przedstawiono na rys. 12. Wyraźnie jest widoczne zagęszczenie siatki w miejscu membrany.

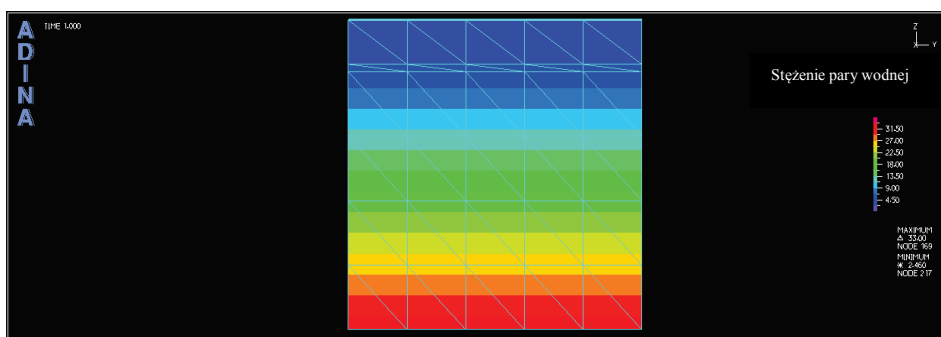


Rys. 12. Siatka metody elementów skończonych

Problem został rozwiązany przez scałkowanie numeryczne obu równań stanu, z zastosowaniem wprowadzonych warunków brzegowych. Wyniki zostały poddane wizualizacji w module graficznym programu ADINA. Uzyskane mapy temperatury oraz stężenia pary wodnej przedstawiono na rys. 13 i 14.



Rys. 13. Rozkład temperatury dla trójwarstwowego laminatu włókienniczego



Rys. 14. Rozkład stężenia pary wodnej

7.3. Dyskusja wyników

Otrzymane mapy zmiennych stanu (tzn. temperatury i stężenia pary wodnej) mają charakter warstwicowy, o rozkładzie równomiernym i symetrycznym. Niewielkie nierównomierności są spowodowane błędami obliczeń numerycznych i nie mają znaczenia praktycznego.

Niezależnie od rodzaju zmiennej stanu zwraca uwagę duża zbieżność ich przedstawień graficznych – map przy przewodzeniu w danym kierunku. Temperatura i stężenie pary wodnej rozkładają się warstwicowo, inne są tylko skale tego rozkładu.

Jak wynika z przedstawionych rozkładów zmiennych stanu, przewodzenie ciepła i masy to proces zależny od kierunku, czyli od sekwencji ułożenia, geometrii oraz wymiarów materiałów wchodzących w skład laminatu. W przypadku modelowania laminatu ułożonego „polarem do skóry” występuje znacznie bardziej wyrównana prędkość przekazywania energii i masy do otoczenia niż w przypadku ułożenia „polarem na zewnątrz”. Rozkład zmiennych stanu wyrównuje się znacznie szybciej, czyli stan ustalony jest także osiągany szybciej. Stan ustalony jest charakteryzowany rozkładem temperatury i stężenia pary wodnej analogicznym dla obu opcji ułożenia – regularnym, warstwicowym. Uzyskane wyniki modelowania dowodzą celowości usytuowania laminatu „polarem do skóry” na cieple użytkownika. Niezależnie od uczucia ciepła występuje wówczas szybsze osiągnięcie stanu ustalonego, czyli stabilizacja warunków termicznych użytkownika wewnątrz ubioru wielowarstwowego przy założonych warunkach transportu ciepła i masy. Jest to usytuowanie stosowane znacznie częściej, zgodne z jego przeznaczeniem. Warstwa polaru została przeznaczona do kontaktu ze skórą, ponieważ stwarza wrażenie ciepła, ma tzw. ciepły chwyt. Warstwa tkaniny znajduje się od strony zewnętrznej laminatu. Dodatkowo charakteryzuje się tzw. zimnym chwytem, czyli wywołuje subiektywne uczucie zimna u jej użytkownika.

Sprawdzenie uzyskanych przebiegów teoretycznych zmiennych stanu według modelu i rzeczywistych, uzyskanych np. z badań eksploatacyjnych na cykloergometrze, może dać ocenę jedynie szacunkową. Przyczyna to bardzo indywidualne, osobnicze reakcje fizjologiczne organizmu na wysiłek fizyczny oraz skomplikowana metodologia pomiaru zmiennych stanu wewnątrz laminatu włókienniczego.

8. PODSUMOWANIE

Prezentowana praca stanowi pewną zamkniętą, komplementarną całość. W pierwszej jej części został zdefiniowany model teoretyczny wielowarstwowego wyrobu włókienniczego z membraną, który jest poddany działaniu sprzężonego strumienia energii cieplnej i masy (pary wodnej). Ma to silne powiązanie z komfortem cieplnym użytkownika odzieży, rozumianym jako wypadkowa temperatury i stężenia pary wodnej w przestrzeni między odzieżą i ciałem. Zostały dokładnie omówione budowa i właściwości wyrobów wielowarstwowych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu membran jako warstwy separującej i ochronnej. Dodatkowo zostały również określone czynniki wpływające na właściwości przewodzące wyrobów włókienniczych, określające otoczenie wyrobu i sam wyrób. Analiza wszystkich powyższych parametrów pozwala na określenie modeli fizycznego i matematycznego sprzężonego przewodzenia ciepła i masy w wielowarstwowej konstrukcji włókienniczej. Rozwiązanie tak sformułowanego modelu wymaga określenia diskutowanych parametrów dla konkretnego pakietu odzieży w części eksperymentalnej. W tym celu zostały wykorzystane różne przyrządy badawcze, omówiono również metodykę badań wszystkich parametrów. Uzyskane wyniki zostały szczegółowo przeanalizowane, co umożliwia ich wykorzystanie do rozwiązania modelu przewodzenia ciepła i masy, sformułowanego wcześniej. Wyniki można wizualizować z wykorzystaniem dowolnego programu z modulem wizualizacji, np. zastosowanego tutaj modułu graficznego programu użytkowego ADINA. Wykorzystując sformułowane wnioski i wytyczne, można określić zalecenia praktyczne dla typowych konstrukcji odzieżowych – kurtek. Ich praktyczna przydatność została zweryfikowana podczas badań na cykloergometrze, czego dowodem są zamieszczone wyniki badań mikroklimatu pododzieżowego dla różnych użytkowników.

Pewną trudność stanowi brak jednego, uniwersalnego wzorca mikroklimatu pododzieżowego. Nie ma jednego odczucia tych samych wartości temperatury i stężenia pary wodnej u dwóch różnych osób, a nawet u jednej osoby w różnych warunkach. Powodem tego są zarówno czynniki obiektywne (stan organizmu, rodzaj odzieży itp.), jak i subiektywne (zewnętrzne lub wewnętrzne sugestie, zmiany warunków podczas badań itp.). Częściowo wykazały to już badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy na cykloergometrze. Problem ten jest bardzo trudny do rozwiązania, nawet przy bardzo dużej próbie ilościowej podczas badań statystycznych.

Przedstawione wyżej zestawienie pozwala sformułować wniosek, że zostały spełnione założone wcześniej cel i teza pracy. Opracowany i przedyskutowany model obliczeniowy przepływu energii cieplnej i masy (pary wodnej) przez wyroby wielowarstwowe umożliwia skuteczny dobór optymalnej struktury jej warstw dla osiągnięcia wymaganej ciepłochronności wyrobu. W przypadku doboru konkretnej konstrukcji odzieży jest również możliwe określenie dokładnych rozkładów pól temperatury i stężenia pary wodnej wewnątrz wyrobu, patrz wizualizacje pól zmiennych stanu.

Literatura

- [1] **Praca zbiorowa:** Metrologia włókiennicza, Tom IV, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- [2] **Lamb G.E.R.:** Heat and Water Vapor Transport In Fabrics Under Ventilated Conditions, Text. Res. J., Vol. **62** (7), 387÷392, 1992.
- [3] **Le C. V., Ly N. G.:** Heat and Moisture Transfer In Textile Assemblies, part I: Steaming of Wool, Cotton, Nylon and Polyester Fabric Beds, Textile Research Journal, Vol. 65 (4), 203÷212, 1995.
- [4] **Uçar N., Yılmaz T.:** Thermal Properties of 1 x 1, 2 x 2, 3 x 3 Rib Knit Fabrics, Fibres & Textiles in Eastern Europe 3 (47), 34÷38, 2004.
- [5] **Nida Oglakcioglu, PinarCelik, Tuba Bedez Ute, Arzu Marmarali and Huseyin Kadoglu,** Thermal Comfort Properties of Angora Rabbit/Cotton Fiber Blended Knitted Fabrics Textile Research Journal, Vol. 79(10), 888÷894, 2009.
- [6] PN-EN 343: 2006 + A1:2007, Odzież ochronna. Ochrona przed deszczem.
- [7] **Jasińska I.:** Specialized underwear – the analysis of clothing microclimate in dynamic conditions, 9th Joint International Conference CLOTECH 2010 "INNOVATIVE MATERIALS & TECHNOLOGIES IN MADE-UP TEXTILE ARTICLES AND FOOTWEAR", 27-28 May 2010, Radom, 207÷214, ISBN 978-83-7351-377-8.
- [8] Instrukcja badawcza IN-1/07 – Wyznaczanie mikroklimatu pododzieżowego podczas badań użytkowych na cykloergometrze.
- [9] PN-EN 139:2006: Tekstylnia. Klimaty normalne do aklimatyzacji badań.
- [10] www.ciop.pl
- [11] **Li Y., Luo Z.,** An improved mathematical simulation of the coupled diffusion of moisture and heat in wool fabric, Textile Research Journal, 69 (10), 760÷768, 1999.
- [12] **Li Y.,** The science of clothing comfort, Textile Progress 15 (1, 2), 2001.

MODELING OF THE COUPLED HEAT AND MASS TRANSPORT WITHIN THE MULTILAYER PRODUCTS WITH THE SEMI-PERMEABLE MEMBRANES

Summary

The clothing materials, coated by semi-permeable membranes for the protection against a loss of body heat and sweat removal were characterized. The theoretical analysis determines the value of thermal resistance and water vapour, which allows designing of clothing materials due to the optimal fulfilment of utility functions and providing a suitable comfort in the condition of using. The thermo-physical parameters were measured by means of the sweating guarded-hotplate test to measure the thermal resistance and vapour resistance under steady state conditions, and Alambeta and Thermo Labo II devices. A comparison of average values of thermal resistance, thermal conductivity and the maximal heat flux density were made between the results obtained by three methods. The paper presents the solutions of the theoretical model of the coupled mass and heat conduction. To visualize the obtained results the ADINA program was used. The comparative analysis of changes in underclothing microclimate parameters: the temperature and relative humidity under the rest phase, the effort phase and the rest phase after the test on cycloergometer were made for three jackets. The tested jackets were made up from multilayer materials with semi-permeable membranes.