

Instytut Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej
Raport serii PRE nr 95/79

WYBRANE KRYTERIA BIOFIZYCZNE
KOMFORTU CIEPLNEGO
W POMIESZCZENIACH MIESZKALNYCH

Elżbieta Śliwińska

Praca doktorska

Promotor: Doc.dr hab. Krzysztof Cena

Słowa kluczowe: biofizyka sztucznego środowiska człowieka,
komfort cieplny

Wrocław 1979

Mgr Elżbieta Śliwińska

Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej

Zespół Badawczy Mikroklimatu Mieszkań

ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, gmach nr D-1

50 - 370 Wrocław

pok. nr 211

tel. 23-78

Raport opracowano w ramach tematu badawczego BS - 332 /7
pod kierownictwem dr inż. L. Śliwowskiego

Raport przygotowano w języku polskim.

Cel przygotowania raportu: Rozprawa doktorska

Symbol pracy: P

Raport wpłynął do Redakcji Wydawnictw Instytutu Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej dnia 8.V. 1979 r.

Pragnę podziękować doc. dr hab. Krzysztofowi Genie za życzliwe kierowanie moją pracą doktorską oraz udzieloną mi wszechstronną pomoc. Dziękuję również dr Lechowi Śliwowskiemu, kierownikowi zespołu badawczego, za opiekę w czasie wykonywania tej pracy. Dziękuję także moim kolegom, mgr T. Łakomemu i mgr J. Michalczykowi za pomoc przy wykonywaniu pomiarów.

Część niniejszej pracy, dotycząca pomiarów w eksploatowanych budynkach mieszkalnych, została wykonana w ramach Programu Rządowego nr 5 (BS - 332/1).

SPIS TRESCI

STRESZCZENIE	5
SPIS OZNACZEŃ.....	6
WSTEP	8
I. TEORIA	15
1. Bilans cieplny człowieka	15
1.1. Ciepło tracone przez drogi oddechowe	15
1.2. Wymiana ciepła przez konwekcję	16
1.3. Teoretyczne oszacowanie współczynnika konwekcji ...	18
1.4. Wymiana ciepła przez promieniowanie	21
1.5. Wymiana ciepła przez parowanie	24
2. Regulacja gospodarki cieplnej w ustroju - izolacyjność fizjologiczna	28
3. Termoregulacyjna produkcja ciepła	30
4. Ocena stanu termicznego człowieka w środowisku chłodnym.	33
5. Ocena stanu termicznego człowieka w środowisku termo- neutralnym	35
II. METODA	38
1. Przyrządy pomiarowe	38
2. Opis doświadczeń	42
2.1. Badania dyskomfortu w warunkach chłodnych	42
2.2. Badania komfortu cieplnego	45
2.3. Doświadczenia pomocnicze	46
3. Materiał doświadczalny	47
4. Metoda obliczeń	50
4.1. Oszacowanie współczynnika konwekcji	50
4.2. Oszacowanie izolacyjności zestawów odzieżowych...	55
4.3. Obliczenie średniej temperatury skóry	57

IV. WYNIKI	59
1. Badania w warunkach dyskomfortu	59
1.1. Weryfikacja modelu	59
1.2. Temperatura skóry	67
1.3. Wpływ izolacyjności odzieży na temperaturę skóry.	69
1.4. Wpływ asymetrycznego pola promieniowania na temperaturę skóry	70
2. Badania w eksploatowanych budynkach	71
V. DYSKUSJA	77
1. Model biofizyczny	77
2. Dokładność metody	81
3. Krytyczna temperatura otoczenia	84
4. Izolacyjność odzieży	86
5. Energetyczny koszt stania	87
6. Współczynnik konwekcji	88
7. Materiał doświadczalny	91
8. Metoda pomiaru temperatury skóry	95
9. Osiąganie stanu równowagi termicznej	97
10. Temperatura skóry jako wskaźnik stanu termicznego organizmu	98
10.1. Środowisko chłodne	98
10.2. Środowisko termoneutralne	100
11. Komfort cieplny	101
11.1. Badania w eksploatowanych budynkach	101
11.2. Kryteria komfortu cieplnego w budynkach	106
WNIOSKI	110
PIŚMIENNICTWO	111

Spis ważniejszych oznaczeń

A_D	- powierzchnia ciała wg DuBoisa'a	m^2
C	- ciepło wymieniane na drodze konwekcji	$W m^{-2}$
E	- ciepło wymieniane na drodze parowania	$W m^{-2}$
E_d	- ciepło tracone na odparowanie wody dyfundującej przez skórę	$W m^{-2}$
F_{cl}	- współczynnik efektywności ubrania	N.D.
F_{pcl}	- współczynnik skuteczności przenikania	N.D.
I_{cl}	- izolacyjność odzieży	$m^2 K W^{-1}, s m^{-1}$
I_{clo}	- izolacyjność odzieży	clo
I_t	- izolacyjność fizjologiczna (tkanek)	$m^2 K W^{-1}, s m^{-1}$
I_{tm}	- maksymalna izolacyjność fizjologiczna	$m^2 K W^{-1}, s m^{-1}$
M	- produkcja ciepła metabolicznego	$W m^{-2}$
M_O	- minimalna dla danej czynności produkcja ciepła metabolicznego	$W m^{-2}$
M_s	- całkowita produkcja ciepła metabolicznego pomniejszona o straty przez drogi oddechowe	$W m^{-2}$
M_{so}	- produkcja ciepła metabolicznego w środowisku termoneutralnym tracona przez powierzchnię skóry	$W m^{-2}$
ΔM	- termoregulacyjny wzrost produkcji ciepła	$W m^{-2}$
ΔM_s	- część termoregulacyjnej produkcji ciepła tracona przez powierzchnię skóry	
P_a	- ciśnienie parcjale pary wodnej w powietrzu	Pa
PMV	- przewidywana Średnia Ocena (odczucia komfortu cieplnego)	
R	- ciepło wymieniane na drodze promieniowania	$W m^{-2}$
T_{cl}	- średnia temperatura powierzchni ubrania	$^{\circ}C$

T_d	- głęboka temperatura ciała	$^{\circ}\text{C}$
T_s	- średnia temperatura powierzchni skóry	$^{\circ}\text{C}$
T_a	- temperatura powietrza	$^{\circ}\text{C}$
T_o	- temperatura operatywna otoczenia	$^{\circ}\text{C}$
T_r	- temperatura radiacyjna otoczenia	$^{\circ}\text{C}$
Y	- odczucia cieplne w skali ASHRAE, wartości eksperymentalne	
f_{cl}	- współczynnik zwiększenia powierzchni przez założenie ubrania	N.D.
h	- współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie łącznie	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
h_c	- współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
h_r	- współczynnik wymiany ciepła przez promieniowanie	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
v	- prędkość ruchu powietrza	m s^{-1}
w	- wilgotność skóry.	N.D.

STRESZCZENIE

Praca przedstawia opis modelu wymiany ciepła między człowiekiem a jego otoczeniem w warunkach chłodnych i termoneutralnych. W oparciu o podany model wyprowadzono zależności pozwalające przewidywać reakcje fizjologiczne człowieka. Na podstawie parametrów mikroklimatycznych pomieszczenia, izolacyjności odzieży oraz grubości tkanki tłuszczowej danego osobnika, wyznacza się wartość średniej temperatury skóry i termoregulacyjnego wrostu produkcji ciepła jako wskaźników stanu termicznego organizmu. Pozwoliło to na opracowanie metody przewidywania odczuć cieplnych człowieka.

Część doświadczalna dotyczyła weryfikacji opisanego modelu w warunkach laboratoryjnych (środowisko chłodne) i w warunkach eksploatowanych budynków (środowisko termoneutralne). Porównano przewidywane wartości reakcji fizjologicznych oraz przewidywane odczucia termiczne, z wartościami obserwowanymi eksperymentalnie. Zgodność powyższych wyników pozwala na stwierdzenie, że opisana metoda jest skutecznym sposobem oceny warunków mikroklimatycznych pomieszczeń i przewidywania stanu odczuć cieplnych przebywających w nim ludzi.

W S T Ę P

Współczesny człowiek większą część swojego życia spędza w pomieszczeniach zamkniętych. Bioklimat tych pomieszczeń jest określony przez zespół parametrów: temperaturę powietrza i jego wilgotność, temperaturę przegród budowlanych, stanowiących główne źródło promieniowania cieplnego, ruch powietrza i jego wymianę określającą warunki wentylacyjne, oświetlenie pomieszczenia związane także z jego nasłonecznieniem, zmiany w składowaniu powietrza wyrażone zawartością domieszek i zanieczyszczeń gazowych. Poprawne kształtowanie wartości liczbowych tych parametrów ma podstawowe znaczenie dla dobrego samopoczucia i zdrowia osób przebywających w pomieszczeniu (Jankowiak, 1976).

Warunki mikroklimatyczne wnętrza znacznie się różnią od zewnętrznych warunków atmosferycznych. Wyraża się to przede wszystkim złagodzeniem amplitud temperatury, zmniejszeniem ruchu powietrza i osłabieniem natężenia światła dziennego. Stopień uniezależnienia od wpływu środowiska zewnętrznego jest uwarunkowany izolacyjnością cieplną użytych materiałów budowlanych, wielkością powierzchni przeszklonych, rodzajem i sposobem rozmieszczenia urządzeń ogrzewczych i klimatyzacyjnych oraz usytuowaniem budynku.

Ponieważ człowiek większą część dnia spędza w pomieszczeniach zamkniętych, powinny one spełniać nie tylko rolę ochrony przed szkodliwymi wpływami środowiska zewnętrznego, hałasem, niesprzyjającymi czynnikami termicznymi, ale również powinny stwarzać takie warunki mikroklimatyczne, aby przebywający w nich ludzie odnosili wrażenie komfortu cieplnego. Ma to ogromny wpływ na samo-

poczucie człowieka i jego sprawność psychofizyczną. Zgodnie z normą ASHRAE (Amerykańskie Towarzystwo Inżynierów Ogrzewnictwa, Wentylacji i Klimatyzacji) nr 55-66, komfort cieplny człowieka określa się jako stan zadowolenia z warunków cieplnych otoczenia. Odczuwanie warunków jako obojętnych jest kryterium niewystarczającym. Wskutek różnic biologicznych niemożliwe jest uzyskanie komfortu cieplnego u wszystkich ludzi przebywających w danym pomieszczeniu. Dobrze byłoby jednak stworzyć takie warunki mikroklimatu, aby możliwie jak największa liczba ludzi mogła osiągnąć ten stan.

Warunkiem koniecznym odczuwania przez człowieka stanu komfortu cieplnego jest jak najmniejsze obciążenie układu termoregulacji. Każde odchylenie od tego stanu jest związane z wystąpieniem negatywnych odczuć termicznych. Badania komfortu cieplnego oraz wpływu danego środowiska na organizm człowieka prowadzone są od ponad pół wieku przez przedstawicieli różnych dyscyplin naukowych. Pierwsze prace w tej dziedzinie rozpoczęły się klasycznymi studiami Houghten'a i Yaglou /1923/. Zajęli się oni sumaryczną oceną wpływu elementów meteorologicznych na ustrój człowieka. Wprowadzona przez nich "Temperatura Efektywna", łącząca temperaturę, wilgotność i prędkość ruchu powietrza, jest używana do dzisiaj jako wskaźnik odczuć termicznych. W latach późniejszych specjaliści z dziedziny fizjologii środowiskowej, przy zastosowaniu różnych metod kalorymetrycznych, dążyli do uzyskania ilościowych relacji opisujących wymianę ciepła z otoczeniem. W wyniku prac prowadzonych przez Winslowa /1936/ oraz Hardy'ego i DuBoisa /1937/ opracowano związki między różnymi procesami fizjologicznymi a odczuciem termicznym i komfortem cieplnym.

W latach czterdziestych zajmowano się głównie granicami tolerancji środowisk gorących i zimnych dla warunków tropikalnych i arktycznych. Późniejsze badania, prowadzone głównie przez grupę Wyndhmana z Południowej Afryki, pozwoliły na opracowanie norm warunków pracy w środowiskach gorących, takich jak kopalnie złota (Wyndham, 1962).

W drugiej połowie XX wieku znacznie wzrosło zainteresowanie komfortem cieplnym człowieka. Amerykańskie Towarzystwo Inżynierów Ogrzewnictwa, Wentylacji i Klimatyzacji (ASHRAE) rozpoczęło finansowanie ciągłych badań nad komfortem cieplnym na uniwersytecie stanowym w Kansas, prowadzonych przez Nevinsa, Rohlesa i McNalla. W wyniku tych prac powstały szczegółowe opracowania warunków komfortu cieplnego (Nevins et al., 1966; McNall et al. 1967). Podobne badania prowadzi również grupa Fangera z Uniwersytetu Technicznego w Danii (Fanger, 1970; Fanger, 1973; Olesen i Fanger, 1973), określając warunki komfortu cieplnego dla różnych izolacyjności odzieży, poziomów aktywności organizmu oraz podając rozkład temperatury skóry w tych warunkach. Wpływem takich czynników na stan odczuć termicznych jak rodzaj ścian, kolory, pole promieniowania cieplnego, zajmuje się McIntyre z Anglii (McIntyre, 1970, 1973, 1974). Szerokie badania związane z komfortem cieplnym w budynkach prowadzi także Brytyjski Instytut Budownictwa (Humphreys, 1976). W Polsce podobną tematyką, a w szczególności wpływem rodzaju grzejników na rozkład parametrów komfortu cieplnego, zajmowała się Okołowicz - Grabowska /1976/. W ostatnich latach zainteresowano się także środowiskami specjalnymi. Charakteryzują się one nietypowym składem atmosfery, silnym promieniowaniem cieplnym lub fizjologicznie wysoką (Poczopko, 1971) temperaturą otoczenia. Tą tematyką zajmuje się głównie Laboratorium Fundacji J.B.Pierce'a:

Gagge /1970/, Gagge /1973/, Gonzalez /1973/, Nishi i Gagge /1977/. Badacze ci opracowali również szereg wskaźników stanu termicznego człowieka w warunkach termoneutralnych i gorących. Są to "Standardowa Wilgotna Temperatura operatywna" (Gagge i Nishi, 1972), "Standardowa temperatura Efektywna" (Gagge et al., 1972), "Modelowa Temperatura Skóry" (Nishi i Ibamoto, 1969). Ilość różnych wskaźników tego typu jest znaczna i leży także w dziedzinie bioklimatologii (np. wskaźnik entalpii powietrza; Gregorczyk, 1968).

W wyniku wszystkich wspomnianych wyżej badań powstało szereg modeli matematycznych i fizycznych, opisujących zależności między człowiekiem, a jego środowiskiem. Najważniejsze z nich to: dwuczęściowy model termoregulacji Gaggégo /1973/, opisujący wymianę ciepła w środowiskach gorących i termoneutralnych oraz równanie komfortu cieplnego Fanger'a /1970/, wyprowadzone na bazie bilansu cieplnego człowieka, które pozwala na określenie warunków środowiska, dających poczucie komfortu. Brak jest natomiast modeli przewidujących stan termiczny ustroju w środowiskach chłodnych.

Warunkiem prawidłowego funkcjonowania organizmu ludzkiego jest utrzymanie na stałym poziomie jego temperatury wewnętrznej. Jest to możliwe dzięki mechanizmom termoregulacyjnym, które dostosowują ilość ciepła wytwarzanego i usuwanego z ustroju do potrzeb równowagi bilansu cieplnego. Wymiana ciepła między organizmem człowieka a otoczeniem odbywa się głównie na drodze promieniowania, konwekcji i parowania. W zależności od warunków opisujących środowisko fizyczne, układ termoregulacji włącza szereg mechanizmów kontrolnych, regulujących wymianę ciepła. W środowisku gorącym obserwuje się przemieszczenie krwi w ustroju. Duża jej część zostaje skierowana do powierzchniowych tkanek

ciała. Podwyższona w wyniku tego temperatura skóry pozwala na zwiększone oddawanie ciepła do otoczenia. Wzmaga się również wydzielanie gruczołów potowych. Odparowanie potu jest jedyną skuteczną metodą usuwania ciepła z organizmu człowieka w środowiskach gorących. W otoczeniu o niskiej temperaturze przepływ krwi w tkance skórnej jest zredukowany, pocenie zanika, a wzrost napięcia mięśniowego oraz drżenie zwiększa wzrost metabolicznej produkcji ciepła.

Jak wspomniano wyżej, stan termiczny ustroju jest ściśle związany ze stopniem obciążenia układu termoregulacji, a więc w środowisku chłodnym najprościej jest go wyrazić termoregulacyjnym wzrostem produkcji ciepła metabolicznego. Wielkość tego wzrostu, na podstawie doświadczeń przeprowadzonych przez Benzingera /1969/, Bligha /1966/, Tanaki /1978/, zależy od spadku temperatury skóry oraz prawdopodobnie od temperatury wewnętrznej ciała. Na temat wpływu tej ostatniej zdania są podzielone. Na podstawie powyższych oraz innych podobnych badań opracowano szereg równań opisujących ilościowo wzrost produkcji metabolicznej (Wyndham i Atkins, 1968 a, Nadel et al., 1970). Różnią się one bardzo między sobą z powodu niejednolitości przyjmowanych definicji i metod określania takich parametrów, jak "set point" czy "temperatura odniesienia". Hayward et al. /1977/ starali się uporządkować ten problem. Na podstawie badań eksperymentalnych podał on równanie opisujące termoregulacyjny wzrost produkcji ciepła w funkcji temperatury wewnętrznej ciała i temperatury skóry. Nie jest ono jednak wygodne w zastosowaniach praktycznych, gdyż wymaga uciążliwych pomiarów fizjologicznych.

Z praktycznego punktu widzenia celowe byłoby podanie metody, pozwalającej na przewidywanie stanu termicznego człowieka na podstawie jedynie parametrów środowiska zewnętrznego. Warunki te częściowo spełnia metoda Stolwijk i Hardy'ego /1966/. Opracowali oni dynamiczny, 16 składnikowy model termoregulacji w języku FORTRAN, który ma z wystarczającą dokładnością przewidywać fizjologiczne reakcje człowieka na dany stress termiczny. Model ten został sprawdzony przez Konza et al. /1977/ w warunkach gorących. Brak jest na razie informacji na temat jego działania w środowisku chłodnym. Na podstawie danych, dotyczących tego modelu można jednak przypuszczać, iż jego przydatność w temperaturach niskich jest ograniczona. Po pierwsze dlatego, że został on opracowany dla przypadku człowieka nagiego, po drugie, mogą powstać znaczne błędy w wielkościach przewidywanych reakcji metabolicznych spowodowane tym, że w modelu nie uwzględnia się różnic w budowie ciała. Tymczasem od dawna już obserwowano mniejszy przyrost termoregulacyjnej produkcji ciepła u ludzi otyłych w porównaniu do szczupłych. Wykazały to m.in. badania Beckmanna i Reevesa /1966/, Wyndhama et al. /1968/ i Jequier et al. /1974/. Dlatego logiczne byłoby powiązanie tego zjawiska ze stopniem nagromadzenia tkanki tłuszczowej w ustroju. Posiada ona niską przewodność termiczną i może stanowić dobrą warstwę izolacyjną ciała.

Celem niniejszej pracy jest więc podanie modelu opisującego wymianę ciepła między człowiekiem a otoczeniem w środowiskach chłodnych i termoneutralnych. Model taki powinien umożliwiać przewidywanie reakcji fizjologicznych, np. wielkości termoregulacyjnej produkcji ciepła czy wartości średniej temperatury skóry. Pozwoli to na opracowanie praktycznej metody przewidywania

stanu termicznego człowieka w wymienionych środowiskach na podstawie znajomości parametrów mikroklimatycznych pomieszczenia, izolacyjności odzieży i grubości podskórnej tkanki tłuszczowej. Przedmiotem zainteresowania będzie również określenie warunków mikroklimatycznych, głównie temperatury powietrza, poniżej której występuje termoregulacyjny wzrost produkcji ciepła, związany z odczuciem dyskomfortu. Ponieważ metody oceny stanu komfortu cieplnego opierają się na badaniach ankietowych, wskazaniach przyrządów pomiarowych oraz różnych wskaźnikach oceny komfortu, celem niniejszej pracy będzie także skonfrontowanie podstawowych metod teoretycznych i doświadczalnych. Spośród wielu możliwych kryteriów komfortu cieplnego w pomieszczeniach pod uwagę zostaną wzięte proste kryteria i testy fizjologiczne, a szczególnie temperatura skóry u człowieka. Dla urealnienia wyników część weryfikacji modelu zostanie wykonana w warunkach naturalnych, tzn. w eksploatowanych budynkach.

Biblioteka
Pol. Wrocław.

T E O R I A

1. Bilans cieplny człowieka

Stan równowagi cieplnej człowieka przebywającego w danym środowisku i nie wykonującego żadnej pracy zewnętrznej (współczynnik aktywności ruchowej $\eta = 0$), możemy opisać równaniem, wynikającym bezpośrednio z pierwszej zasady termodynamiki:

$$M \pm R \pm C_s \pm C_r \pm E_s \pm E_r = 0, \quad [W m^{-2}] \quad /1/$$

gdzie:

M jest gęstością strumienia energii powstającej w wyniku przemian metabolicznych,

R jest gęstością strumienia energii wymienianej na drodze promieniowania,

C jest gęstością strumienia energii wymienianej przez konwekcję,

E jest gęstością strumienia energii wymienianej przez parowanie.

Symbol "s" dotyczy skóry, "r" - dróg oddechowych.

1.1. Ciepło tracone przez drogi oddechowe

Całkowite ciepło Q_r , tracone przez drogi oddechowe, składa się ze strumienia ciepła utajonego E_r i strumienia konwekcji C_r , tak że: $Q_r = E_r + C_r$. Składniki te można określić posługując się

zależnościami wyprowadzonymi przez Fanguera /1974/:

$$E_R = 17.3 \times 10^{-3} M (5.87 - P_a), \quad /2/$$

$$C_R = 1.4 \times 10^{-3} M (34 - T_a), \quad [W m^{-2}] \quad /3/$$

gdzie:

5.87 kPa jest ciśnieniem pary nasyconej dla średniej temperatury płuc równej 35.5°C,

P_a oznacza ciśnienie parcjalne pary wodnej w otaczającym powietrzu,

34 °C jest średnią temperaturą wydychanego powietrza,

T_a jest temperaturą otaczającego powietrza.

Ciepło tracone przez drogi oddechowe można oszacować na około 10 % ciepła metabolicznego wytwarzanego w danym momencie. Po została część jest wymieniana ze środowiskiem przez powierzchnię skóry:

$$M_s = [1 - 0.173 (5.87 - P_a) - 0.0014 (34 - T_a)] M. \quad /4/$$

1.2. Wymiana ciepła przez konwekcję

Ilość ciepła wymieniana przez człowieka na drodze konwekcji zależy od gradientu temperatury między powierzchnią ubrania i otaczającego powietrza:

$$C = h'_c (\bar{T}_{cl} - T_a), \quad [W m^{-2}] \quad /5/$$

gdzie:

- \bar{T}_{cl} - jest średnią temperaturą powierzchni odzieży,
 h'_c - jest współczynnikiem wymiany ciepła przez konwekcję,

Gęstość strumienia energii jest w tym wypadku wyrażona w watach na jednostkę powierzchni tej części ubrania, która bierze udział w wymianie ciepła przez konwekcję. W odniesieniu do jednostki powierzchni skóry, powyższe równanie przyjmie postać:

$$C = f_{ec} h'_c f_{cl} (T_{cl} - T_a) = h_c (T_{cl} - T_a), \quad /6/$$

gdzie:

- f_{ec} - jest stosunkiem powierzchni biorącej udział w wymianie ciepła przez konwekcję do całej powierzchni odzieży,
 h_c - jest współczynnikiem wymiany ciepła przez konwekcję w odniesieniu do jednostki powierzchni skóry,
 f_{cl} - jest współczynnikiem zwiększenia powierzchni przez założenie ubrania.

Fanger /1974/ oraz Breckenridge i Goldman /1972/ wykazali, że f_{cl} wzrasta o około 15 % wraz z każdą jednostką "clo" założonej odzieży:

$$f_{cl} = 1 + 0.15 I_{clo}, \quad /7/$$

gdzie: I_{clo} jest izolacyjnością odzieży w jednostkach clo.

Jednostka "clo" została wprowadzona w 1941 roku przez Gagge'go, w celu opisanego wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem. Jej pierwotna definicja określała, że 1 clo jest izolacyjnością niezbędną do utrzymania w stanie komfortu człowieka siedzącego w temperaturze powietrza równej 21°C, przy prędkości wiatru 0,1 m s⁻¹ i wilgotności powietrza niższej niż 50 %. 1 clo odpowiada wartości 0.155 m² K W⁻¹. Cena i Clark /1978/ na podstawie analogii między przepływem masy i ciepła wykazali, że 1 clo jest równe oporności 200 s m⁻¹. Ten ostatni system jednostek jest bardzo wygodny przy porównywaniu izolacyjności tkanek ciała z izolacyjnością odzieży.

1.3. Teoretyczne oszacowanie współczynnika konwekcji

Współczynnik konwekcji można oszacować teoretycznie na podstawie teorii podobieństwa. Liczbami podobieństwa dla zjawisk termodynamicznych dotyczących konwekcji są: liczba Nusselta (Nu), Grashofa (Gr), Prandtla (Pr) i Reynoldsa (Re).

Liczba Nusselta charakteryzuje średnie natężenie wymiany ciepła przez konwekcję między powierzchnią ciała, a swobodnym lub wymuszonym strumieniem cieczy lub gazu. Jest ona związana ze współczynnikiem konwekcji następującym równaniem:

$$Nu = h_c d / k , \quad /8/$$

gdzie:

d - jest wymiarem charakterystycznym ciała w metrach,

k - współczynnik przewodnictwa cieplnego cieczy lub gazu wyrażone w jednostkach W m⁻¹K⁻¹.

Liczba Reynoldsa określa stosunek sił bezwładności do sił lepkości:

$$Re = v d / \nu , \quad /9/$$

gdzie:

v - jest prędkością strumienia cieczy lub gazu w $[m s^{-1}]$,

ν - lepkością kinematyczną w $[m^2 s^{-1}]$.

Liczba Prandtla charakteryzuje podobieństwo płynów pod względem przenoszenia ciepła. Jest stosunkiem lepkości kinematycznej (ν) do dyfuzyjności termicznej (χ)

$$Pr = \nu / \chi \quad /10/$$

Liczba Grashofa jest stosunkiem iloczynu siły bezwładności i siły wyporu do kwadratu sił lepkości

$$Gr = \alpha g d^3 \Delta T / \nu^2 \quad /11/$$

gdzie:

α - jest współczynnikiem rozszerzalności termicznej gazu ($1/273 K^{-1}$),

g - oznacza przyspieszenie ziemskie - $9.81 [m s^{-2}]$,

ΔT - jest różnicą temperatur między powierzchnią ciała a danym środowiskiem.

Liczba Grashofa określa transport ciepła w konwekcji swobodnej, gdy ruch płynu wywołany jest różnicą gęstości spowodowaną

niejednorodnością temperatury w pobliżu ciała.

W wypadku konwekcji wymuszonej, liczba Nusselta zależy od wielkości wymiany ciepła w laminarnej warstwie przyściennej, powstałej wokół powierzchni opływanej przez powietrze o innej niż ona temperaturze. Liczba Nusselta jest więc funkcją liczb Reynoldsa i Prandtla:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}), \quad /12/$$

W przypadku powietrza, w szerokim zakresie temperatur, liczba Prandtla jest wartością prawie stałą, wobec tego liczbę Nusselta można określić funkcją o postaci:

$$\text{Nu} = A \text{Re}^n, \quad /13/$$

gdzie stałe "A" i "n" zależą od wielkości liczby Reynoldsa.

W wypadku konwekcji swobodnej wymiana ciepła wywołana jest przez gradienty temperatur, powodujące wystąpienie gradientu gęstości. A więc liczba Nusselta jest funkcją liczby Grashofa i Prandtla:

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr}), \quad /14/$$

Przyjmując, że $\text{Pr} = \text{const}$, otrzymujemy:

$$\text{Nu} = B \text{Gr}^m \quad /15/$$

gdzie "B" i "m", podobnie jak w przypadku konwekcji wymuszonej, zależą od zakresu liczby Reynoldsa.

Stwierdzono eksperymentalnie, że dla człowieka konwekcja swobodna dominuje przy prędkościach wiatru od 0 do 0.2 m s^{-1} Kerslake, 1972. Prędkości od 0.1 do 0.2 m s^{-1} leżą w strefie konwekcji mieszanej. Kerslake /1972/ podaje również kryterium polegające na zbadaniu stosunku bezwymiarowych liczb podobieństwa. Jeśli iloraz $Gr / (Re)^2$ jest mniejszy od jednośc, wówczas należy przyjąć, że dominuje konwekcja wymuszona. Jeśli stosunek ten jest dużo większy od jednośc, to mamy do czynienia z konwekcją swobodną. Fanger /1967/ proponuje w przypadku konwekcji mieszanej obliczyć współczynnik konwekcji swobodnej i wymuszonej, a do obliczeń przyjąć wartość większą z tych dwóch.

1.4. Wymiana ciepła przez promieniowanie

Wymianę ciepła przez promieniowanie opisuje równanie Stefana-Boltzmann:

$$R = \epsilon \sigma \left[(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4 \right], \quad \text{W m}^{-2} \quad /16/$$

gdzie:

T_r jest średnią temperaturą promieniowania otoczenia w $^{\circ}\text{C}$,

ϵ jest współczynnikiem emisyjności,

σ jest stałą Stefana - Boltzmann.

Jako średnią temperaturę promieniowania, w odniesieniu do danego człowieka, znajdującego się w określonym miejscu, w określonej pozycji ciała i ubranego w określoną odzież, przyjmuje się temperaturę czarnej osłony, która powodowałaby takie same straty ciepła przez promieniowanie, jakie powoduje rozważane środowisko.

Przy założeniu, że $(\bar{T}_{cl} - T_r) \ll \bar{T}$, gdzie $\bar{T} = [(\bar{T}_{cl} + T_r) / 2] + 273$,
równanie /16/ można zlinearyzować, zapisując je w postaci:

$$R = h'_r (\bar{T}_{cl} - T_r), \quad /17/$$

gdzie $h'_r = 4 \epsilon \sigma \bar{T}^3$ jest liniowym współczynnikiem wymiany ciepła przez promieniowanie. Przeprowadzając rozważania analogicznie jak w wypadku konwekcji, w odniesieniu do jednostki powierzchni ciała otrzymamy równanie następujące:

$$R = h'_r f_{cl} f_{er} (\bar{T}_{cl} - T_r) = h_r (\bar{T}_{cl} - T_r), \quad /18/$$

gdzie:

f_{er} - wyraża procentowy udział powierzchni ubrania, biorącej udział w wymianie ciepła przez promieniowanie,

h_r - jest współczynnikiem wymiany ciepła przez promieniowanie w odniesieniu do jednostki powierzchni skóry.

Dla człowieka stojącego, przyjmuje się za Fangerem /1970/, że $f_{er} = 0.725$. Analizę zjawisk fizycznych i fizjologicznych związanych z promieniowaniem cieplnym człowieka przedstawił Cena /1974/.

Wymianę ciepła przez promieniowanie i konwekcję, tzw. ciepło suche, można połączyć równaniem:

$$\begin{aligned} R + C &= h_c (\bar{T}_{cl} - T_a) + h_r (\bar{T}_{cl} - T_r) = \\ &= h (\bar{T}_{cl} - T_o), \end{aligned} \quad /19/$$

gdzie:

$h = h_c + h_r$ jest współczynnikiem wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie łącznie,

$T_o = (h_c T_a + h_r T_r) / h$ nazywamy temperaturą operatywną otoczenia. /20/

Temperatura operatywna została zdefiniowana przez Gaggego /1977/ jako temperatura izotermicznej, doskonale czarnej zamkniętej przestrzeni, w której dany człowiek wymienia tę samą ilość ciepła przez promieniowanie i konwekcję co w aktualnym, niejednorodnym termicznie środowisku.

Aby równanie /19/ można było zapisać w postaci niezależnej od temperatury odzieży \bar{T}_{cl} , konieczne jest uwzględnienie wymiany ciepła w tej warstwie izolacyjnej. Zjawiskami fizycznymi, składającymi się na proces przenikania ciepła przez odzież, są: dyfuzja molekularna, przewodzenie wzdłuż włókien, konwekcja i promieniowanie. Zostały one opisane przez Cenę i Monteitha /1975/ oraz Cenę i Clarka /1978/. W stanie równowagi ilość ciepła przenikająca przez ubranie wszystkimi wymienionymi wyżej drogami jest równa ilości ciepła oddawanego z jego powierzchni:

$$(\bar{T}_s - \bar{T}_{cl}) / I_{cl} = h (\bar{T}_{cl} - T_o), \quad /21/$$

gdzie \bar{T}_s jest średnią temperaturą powierzchni skóry.

Równanie /19/ przyjmie teraz postać:

$$R + C = h (\bar{T}_s - T_o) / (h I_{cl} + 1) = h F_{cl} (\bar{T}_s - T_o). \quad /22/$$

Wielkość $F_{cl} = 1 / (h I_{cl} + 1)$ Burton /1955/ nazwał współczynnikiem efektywności ubrania (efficienty factor for clothing).

1.5. Wymiana ciepła przez parowanie

Maksymalna ewaporacyjna utrata ciepła z całkowicie wilgotnej skóry może być opisana równaniem:

$$E_{\max} = \lambda D \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad /23/$$

gdzie:

- λ - utajone ciepło parowania potu w $J \text{ kg}^{-1}$,
- D - współczynnik dyfuzji cząsteczkowej dla pary wodnej w $m \text{ s}^{-1}$,
- φ - koncentracja pary wodnej na powierzchni skóry i w otaczającym powietrzu w kg m^{-3} .

Korzystając z równania Clapeyrona:

$$V \cdot P = R \cdot T \quad /24/$$

gdzie:

- V - jest objętością jednego mola gazu,
- P - jego ciśnieniem parcjalnym,
- T - temperaturą gazu,
- R - stałą gazową dla jednego mola,

równanie /23/ można zapisać w postaci:

$$E_{\max} = \left[\lambda D m_0 / L R T \right] (P_{cl} - P_a) = h_e (P_{cl} - P_a), \quad [W m^{-2}] \quad /25/$$

gdzie:

L - jest głębokością warstwy dyfuzji,

h_e - współczynnik wymiany ciepła przez parowanie,

P_a - ciśnienie parcjalne pary wodnej na powierzchni ubrania

m_0 - masą cząsteczkowa pary wodnej.

Ilość ciepła, jaką człowiek oddaje na drodze parowania, zależy od grubości i rodzaju odzieży, a szczególnie od jej przepuszczalności dla pary wodnej. Stan równowagi dla wymiany ciepła przez parowanie opisuje zależność:

$$h'(P_s^* - P_{cl}) = h_e(P_{cl} - P_a), \quad /26/$$

gdzie:

h' - dyfuzyjny współczynnik wymiany ciepła przez ubranie,

P_{cl} - ciśnienie parcjalne pary wodnej na powierzchni ubrania,

P_s^* - ciśnienie pary nasyconej w temperaturze równej \bar{T}_s .

Korzystając z równania /26/ można wyrugować wielkość P_{cl} z równania /25/ i wtedy wyrażenie na maksymalną ewaporycyjną utratę ciepła przyjmie postać:

$$E_{\max} = h_e F_{pcl} (P_s^* - P_a). \quad /27/$$

Współczynnik $F_{pcl} = h / (h_e + h')$ jest współczynnikiem skuteczności przenikania (permeation efficiency factor, Ibamoto i Nishi 1968). Nishi i Gagge /1979/ wykazali, że dla ubrania o średniej przenikalności, wartość F_{pcl} można określić na podstawie znajomości izolacyjności:

$$F_{pcl} = (1 + 0.143 I_{clo} h_e)^{-1} \quad /28/$$

gdzie:

I_{clo} jest izolacyjnością podaną w jednostkach clo.

Istnieje ścisła analogia między wymianą masy i ciepła w warstwie granicznej powietrza, przylegającej do powierzchni ciała lub ubrania człowieka (Monteith 1973). Wymianę ciepła w tej warstwie opisuje równanie:

$$C = k (\bar{T}_{cl} - T_a) / L \quad /29/$$

gdzie:

k - jest współczynnikiem przewodnictwa cieplnego powietrza,

L - jest grubością warstwy dyfuzji.

Korzystając z równania /6/, /25/ i /29/, możemy wyznaczyć stosunek h_e / h_c :

$$h_e / h_c = \lambda D m_0 / R k T.$$

/30/

Dla temperatury powietrza w warstwie granicznej równej 20°C , współczynniki w równaniu /30/ mają następujące wartości:

$$R = 8.31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$D = 2.42 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda = 2454 \text{ J g}^{-1}$$

$$k = 25.7 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$m_0 = 18 \text{ g}$$

Współczynnik wymiany ciepła przez parowanie (h_e) jest więc związany ze współczynnikiem konwekcji zależnością:

$$h_e = 1.71 \cdot 10^{-2} [\text{K Pa}^{-1}] \cdot h_c.$$

/31/

Wielkość utraty ciepła przez parowanie (E_s) zależy od koncentracji pary wodnej w otaczającym powietrzu oraz od stopnia zwilżenia skóry potem. Jeśli wprowadzimy termin "wilgotność skóry" (Gagge 1977), zdefiniowany jako stosunek obszaru skóry, który pokryty potem dawałby aktualnie obserwowaną utratę ciepła przez parowanie, do całej powierzchni ciała, to:

$$E_s = w E_{\text{max}},$$

/32/

gdzie "w" jest wilgotnością skóry.

U człowieka przebywającego w środowisku chłodnym nie obserwuje się pocenia termoregulacyjnego, a jedynie dyfuzję pary wodnej przez skórę (perspiratio insensibilis). Odpowiadająca jej minimalna wartość "w", na podstawie danych Brebnera /1956/,

wynosi: 0.06. Utrata ciepła przez parowanie w środowisku chłodnym (E_d) jest więc opisana zależnością:

$$E_d = 0.06 \times 1.71 \times 10^{-2} F_{pcl} (P_s^* - P_a). \quad /33/$$

Cisnienie pary nasyconej w temperaturze równej średniej temperaturze skóry może być aproksymowane funkcją liniową (Gagge, Nishi, 1971).

$$P_s^* = a \bar{T}_s + b, \quad /34/$$

gdzie:

$$a = 256 \text{ [Pa K}^{-1}\text{]},$$

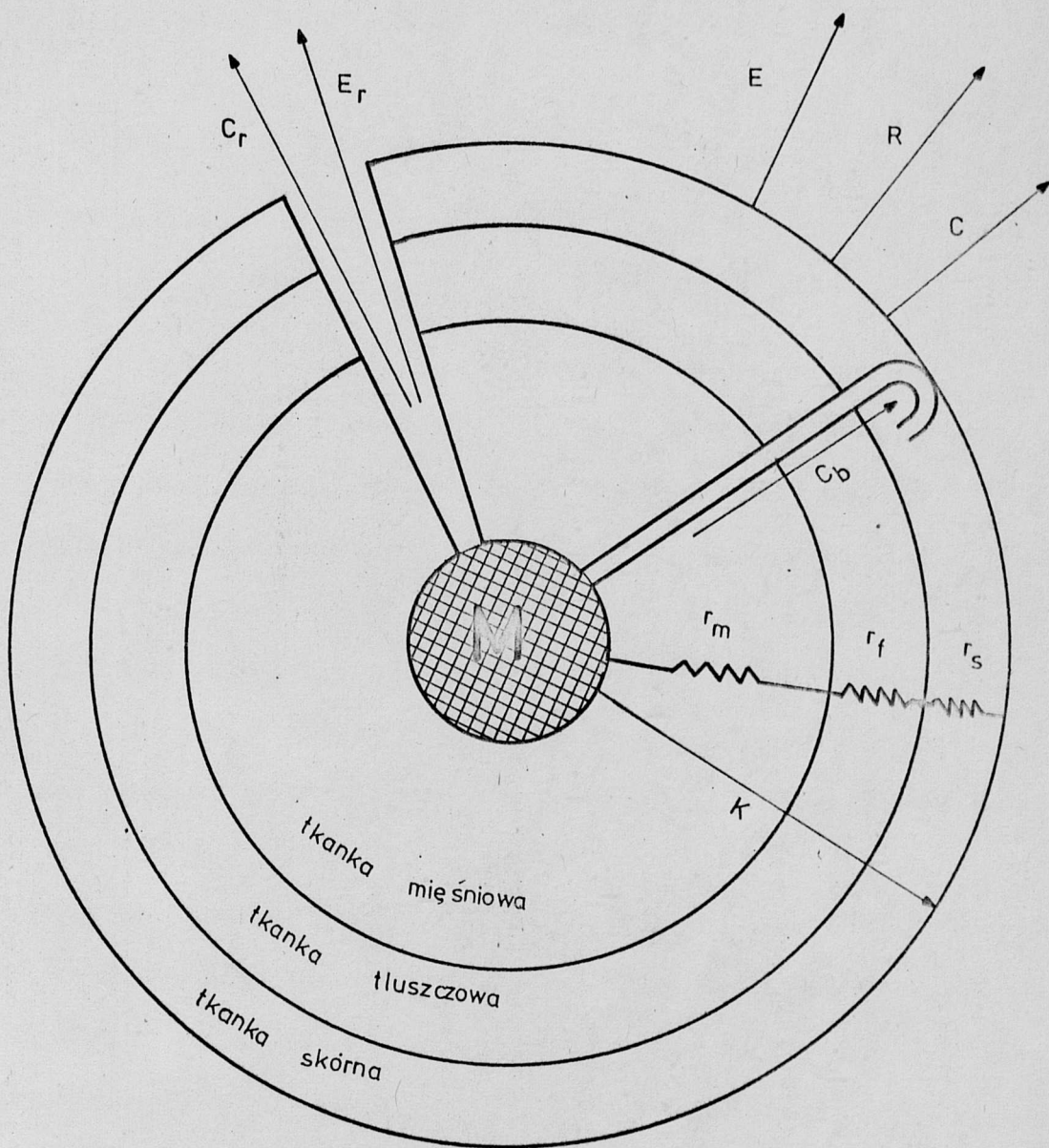
$$b = - 3373 \text{ [Pa]}.$$

Po podstawieniu powyższych wartości, równanie /33/ przyjmie postać:

$$E_d = 0.263 h_c F_{pcl} \bar{T}_s - h_c F_{pcl} (3.5 + 10^{-3} P_a). \quad /35/$$

2. Regulacja gospodarki cieplnej ustroju - izolacyjność fizjologiczna

Ciepło wytwarzane w wyniku przemian metabolicznych (M) przenika do powierzchni skóry na drodze przewodzenia przez tkanki oraz na drodze konwekcji - wraz z krążącą krwią (rys.1). Ilość ciepła przewodzonego (K) zależy od rozkładu temperatur w warstwie izolacyjnej ciała. Warstwę tę stanowią: tkanka skórna, tkanka tłuszczowa i tkanka mięśniowa. Ich przewodności właściwe, przy skurczonych naczyniach



Rys. 1. Przenikanie ciepła z wnętrza ciała do otoczenia.

- r_m - opór cieplny tkanki mięśniowej,
- r_f - opór cieplny tkanki tłuszczowej,
- r_s - opór cieplny skóry,
- K - ciepło przenoszone na drodze przewodzenia,
- C_b - ciepło przenoszone na drodze konwekcji, przez krew,
- C_r, E_r - wymiana ciepła przez drogi oddechowe,
- E, R, C - wymiana ciepła między powierzchnią ciała a otoczeniem przez parowanie, promieniowanie i konwekcję.

krwionośnych, wynoszą odpowiednio (Mitchell, 1970).

$$k_s = 0.29 \div 0.34 \text{ [W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]},$$

$$k_f = 0.21 + 0.38 \text{ [W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]},$$

$$k_m = 0.53 \text{ [W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}.$$

Jak widać z powyższego porównania, warstwą o największej oporności cieplnej jest tkanka tłuszczowa. Również obliczenia Bullarda i Rappa /1970/ wykazują, że 3-milimetrowa tkanka tłuszczowa jest równoważna pod względem izolacji cieplnej sześciu milimetrom tkanki mięśniowej bez przepływu krwi. Izolacyjność, jaką tworzą wyżej wymienione tkanki przy całkowicie skurczonych naczyniach krwionośnych jest maksymalną izolacyjnością fizjologiczną danego człowieka (I_{tm}).

Ilość ciepła, przenoszonego drogą konwekcji, zależy od działania układu termoregulacji, od jego wpływu na stan naczyń krwionośnych. Wiadomo, że ilość krwi przepływająca przez skórę w otoczeniu termoneutralnym przewyższa 20 do 30 razy ilość potrzebną do zaspokojenia potrzeb metabolicznych tej tkanki. Przepływ krwi jest za to ściśle związany ze stanem termicznym ustroju. Jego wartość minimalną obserwuje się w środowisku chłodnym. Wynosi ona $0.25 \text{ l m}^{-2} \text{ min}^{-1}$. W wypadku stresu cieplnego ilość przepływającej krwi może przekroczyć wartość $2.8 \text{ l m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ (Guyton, 1967).

Zmiany w skórnym przepływie krwi powodują z mianę efektywnej przewodności cieplnej tkanej od $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ do $100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (Stolwijk i in. 1968). Adaptacja skórnego przepływu krwi do temperatury otoczenia jest wynikiem działania wpływów nerwowych, miejscowych

wpływów humoralnych oraz miejscowego działania temperatury na naczynia krwionośne. Naczynia krwionośne skóry są unerwione przez włókna współczulne (naczyniozężające), których czynność jest sterowana przez ośrodek termoregulacyjny znajdujący się w podwzgórzu. Istnienie unerwienia przywspółczulnego (naczyniorozszerzającego) w skórze jest problematyczne, chociaż niektórzy badacze twierdzą, że odgrywa ono pewną rolę w takich obszarach ciała jak twarz czy ramiona. Przypuszcza się, że regulacja nerwowa tonusu mięśniowego naczyń krwionośnych dotyczy przede wszystkim kończyn, podczas gdy zwiększenie dopływu krwi np. do skóry tułowia obserwuje się pod wpływem działalności gruczołów potowych, (Klonowicz i Kozłowski, 1970).

3. Termoregulacyjna produkcja ciepła

W środowiskach ciepłych i termoneutralnych ilość wytwarzanego ciepła metabolicznego nie zależy od parametrów tego środowiska. Zmiana temperatury otoczenia jest kompensowana reakcją na czynioruchową (Klonowicz i Kozłowski, 1970). Przy pewnej temperaturze otoczenia, nazywanej temperaturą krytyczną (T_{oc}), skurcz naczyń krwionośnych jest maksymalny. Odpowiada to także maksymalnej izolacyjności fizjologicznej danego osobnika. Temperaturę skóry w takim momencie (T_{sc}) możemy wyznaczyć z równania Fouriera dla stacjonarnego przepływu ciepła:

$$M_{so} = (T_d - T_{sc}) / I_{tm} ,$$

gdzie:

M_{so} - jest produkcją ciepła metabolicznego w środowisku termoneutralnym, traconą przez powierzchnię skóry,

T_d - jest głęboką temperaturą ciała,

T_{sc} - jest krytyczną temperaturą skóry,

I_{tm} - jest maksymalną izolacyjnością fizjologiczną danego osobnika.

Dolną krytyczną temperaturę otoczenia dla danego osobnika ubranego w odzież o izolacyjności I_{cl} , można wyznaczyć z równania bilansu cieplnego w stanie równowagi. Ciepło metaboliczne pomniejszone o ciepło utracone przez drogi oddechowe jest równe ciepłu oddawanemu do otoczenia z powierzchni skóry o temperaturze krytycznej:

$$M_{so} = h F_{cl} (T_{sc} - T_{oc}) + E_d , \quad /37/$$

stąd, po podstawieniu odpowiednich zależności, krytyczna temperatura otoczenia jest opisana wzorem:

$$T_{oc} = T_{sc} + (I_{cl} + h^{-1}) (E_d - M_{so}) . \quad /38/$$

Spadek temperatury otoczenia poniżej temperatury krytycznej (T_{oc}), jeśli temperatura głęboka ciała ma być utrzymana na niezmiennym poziomie, musi być skompensowany termoregulacyjnym wzrostem metabolizmu. Reakcje powodujące szybki wzrost natężenia przemiany materii i wytwarzanie ciepła w zimnym środowisku, są wywołane przede wszystkim na drodze odruchowej. U człowieka, jak wykazują badania (Rewerski, Kozłowski, 1972), istnieją dwa

rodzaje termoreceptorów: centralne (w podwzgórzu) oraz obwodowe (w skórze i błonie śluzowej). Impulsy ze skórnych termoreceptorów zimna pobudzają ośrodek zachowania ciepła, znajdujący się w tylnej części podwzgórza. Pobudzenie to, poprzez odpowiednie łuki odruchowe, powoduje ostatecznie wzrost napięcia mięśni oraz drżenie, a w efekcie wzrost przemian tkankowych i wytwarzanie ciepła. Może również wystąpić wzrost wydzielania hormonów tarczycy i nadnerczy (tyroksyny, noradrenaliny, adrenaliny), zwiększających wewnątrzustrojowe wytwarzanie ciepła. Ośrodek zachowania ciepła pozostaje pod stałym, hamującym wpływem przedniej części podwzgórza. Wielkość hamowania zależy od temperatury wewnętrznej, działającej na neurony centralne. A więc ostatecznie termoregulacyjny wzrost produkcji ciepła metabolicznego - ΔM - zależy od obu czynników: stopnia obniżenia temperatury wewnętrznej ciała oraz spadku temperatury skóry (Benzinger, 1969; Bligh, 1966).

Aby móc w uproszczony sposób zapisać wielkość reakcji metabolicznej, założymy, że działanie układu termoregulacji składa się z dwóch etapów. Pierwszym jest obniżenie temperatury z T_{sc} do T'_s , co wywołuje reakcję zwiększenia metabolizmu proporcjonalną do różnicy ($T_{sc} - T'_s$). Ponieważ jednak wzrost metabolizmu jest skutkiem wzrostu napięcia mięśniowego, konieczne jest dostarczenie większej ilości krwi do naczyń obwodowych. Skutkiem tego musi wystąpić zmniejszenie izolacyjności fizjologicznej do wielkości I_t i lekki wzrost temperatury skóry taki, że $T'_s < T_s < T_{sc}$. Zakładając dużą sprawność mechanizmów termoregulacji, ostateczny wzrost produkcji metabolicznej będzie tak duży, że pokryje straty ciepła przez skórę, spowodowane zmniejszeniem izolacyjności fizjologicznej oraz spadkiem temperatury skóry poniżej

krytycznej. Uwzględniając straty przez drogi oddechowe powyższy warunek można w uproszczeniu zapisać:

$$\Delta M_s = (T_{sc} - T_s) / (I_{tm} - I_t) .$$

/39/

4. Ocena stanu termicznego człowieka w środowisku chłodnym

Celem niniejszej pracy jest podanie metody, pozwalającej na przewidywanie stanu termicznego człowieka w środowisku chłodnym. Stan ten może być opisany wielkością obciążenia fizjologicznego układu termoregulacji - ΔM , oraz wartością średniej temperatury skóry. Dlatego dąży się do wyznaczenia tych dwóch wielkości jako funkcji parametrów fizjologicznych, fizycznych i mikro - klimatycznych.

W wyniku wyżej przeprowadzonych rozważań otrzymujemy układ trzech równań, opisujących wymianę ciepła człowieka w środowisku chłodnym:

- i. I zasada termodynamiki, wyrażona równaniem bilansu cieplnego człowieka,
- ii. równanie Fouriera dla stacjonarnego przepływu ciepła, opisujące wymianę ciepła między wnętrzem ciała a jego powierzchnią,
- iii. równanie opisujące wielkość reakcji metabolicznej w środowisku chłodnym.

Na podstawie zależności /1/, /22/, /36/, /39/

równania te można zapisać w postaci:

$$M_s = E_d + h F_{cl} (T_s - T_o), \quad /40/$$

$$M_s = (T_d - T_s) / I_t, \quad /41/$$

$$M_s = (T_{sc} - T_s) / (I_{tm} - I_t), \quad /42/$$

gdzie:

$M_s = M_{so} + \Delta M_s$ jest całkowitą produkcją ciepła metabolicznego w środowisku chłodnym, pomniejszoną o straty ciepła przez drogi oddechowe.

Rozwiązaniem powyższego układu trzech równań będzie wyrażenie kwadratowe na przewidywaną izolacyjność fizjologiczną:

$$A I_t^2 + B I_t + C = 0 \quad /43/$$

gdzie:

$$A = M_{so} (0.263 h_c F_{pcl} + h F_{cl}),$$

$$B = - (h F_{cl} + 0.263 h_c F_{pcl}) \left\{ 2 T_d (h F_{cl} + 0.263 h_c F_{pcl}) - 2 \left[h_c F_{pcl} (3.5 + 10^{-3} Pa) - h F_{cl} T_o \right] \right\},$$

$$C = I_{tm} (h F_{cl} + 0.263 h_c F_{pcl}) \left[T_d (h F_{cl} + 0.263 h_c F_{pcl}) - h_c F_{pcl} (3.5 + 10^{-3} Pa) - h F_{cl} T_o \right].$$

Wybór pierwiastka tego równania determinują warunki:

$$I_t \leq I_{tm},$$

$$I_t > 0.$$

Mając przewidzianą izolacyjność fizjologiczną, możemy obliczyć przewidywany wzrost metabolizmu:

$$\Delta M_s = T_{sc} (h F_{cl} + 0.263 h_c F_{pcl}) - [h_c F_{pcl} (3.5 + 10^{-3} P_a) + h F_{cl} T_o + M_{so}] \cdot [(I_{tm} - I_t) (h F_{cl} + 0.263 h_c F_{pcl}) + 1]^{-1} \quad /44/$$

i średnią temperaturę skóry:

$$\bar{T}_s = \Delta M_s + [h_c F_{pcl} (3.5 + 10^{-3} P_a) + h F_{cl} T_o + M_{so}] (h F_{cl} + 0.263 h_c F_{pcl})^{-1}. \quad /45/$$

5. Ocena stanu termicznego człowieka w środowisku termoneutralnym

Współczesny człowiek przeważającą część swojego życia spędza w sztucznie wytworzonym mikroklimacie. Mikroklimat ten powinien być dostosowany do potrzeb cieplnych organizmu i zapewniać minimalne obciążenie układu termoregulacji. W takim środowisku nie obserwuje się termoregulacyjnego wzrostu przemiany materii. Metaboliczna produkcja ciepła jest utrzymywana na stałym poziomie, zależnym od stanu aktywności organizmu (M_o). Stan termiczny ustroju

w tych warunkach może być wyrażony wartością średniej temperatury skóry (Yaglou, 1927; Gagge, 1937). Wielkość tę można bezpośrednio wyznaczyć z równania /45/. Po podstawieniu wartości $\Delta M = 0$ otrzymujemy:

$$\bar{T}_s = \left[h_c F_{pcl} (3.5 + 10^{-3} P_a) + h F_{cl} T_o + M_{so} \right] \\ (h F_{cl} + 0.263 h_c F_{pcl})^{-1} .$$

/46/

Jak widać z powyższej zależności, temperatura skóry zależy od warunków mikroklimatycznych, od izolacyjności odzieży oraz od metabolicznej produkcji ciepła, nie zależy natomiast od maksymalnej izolacyjności tkanek, charakterystycznej dla danego osobnika. Należy się więc spodziewać zbliżonych jej wartości dla różnych ludzi znajdujących się w warunkach komfortu cieplnego. Badania eksperymentalne przeprowadzone przez Yaglou /1927/, Gagge'go /1937/, Olesena i Fanguera /1973/, potwierdzają to przypuszczenie. Obliczanie temperatury skóry według powyższego wzoru daje więc możliwość teoretycznego przewidywania wpływu warunków mikroklimatycznych danego pomieszczenia na człowieka.

W wypadku masowych badań komfortu cieplnego, wygodne jest użycie psychofizycznego testu Bedforda /1936/ lub ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers). Test ten polega na oznaczeniu przez osobę badaną swoich odczuć termicznych, poprzez wybór odpowiedniej wielkości na podanej skali (rys.2).

skala Bedforda

skala ASHRAE

za gorąco	7	gorąco
za ciepło	6	ciepło
przyjemnie ciepło	5	lekko ciepło
komfortowo	4	neutralnie, ani za ciepło ani za zimno.
przyjemnie chłodno	3	lekko chłodno
za chłodno	2	chłodno
za zimno	1	zimno

Rys.2 Psychofizyczne skale komfortu cieplnego.

Możliwe jest również teoretyczne przewidywanie oceny danego mikroklimatu w wyżej podanej siedmiostopniowej skali ASHRAE. Pozwala na to opracowany przez Fanger'a /1970/ wskaźnik PMV (Przewidywana Średnia Ocena). Wskaźnik ten, wyprowadzony na bazie równania komfortu cieplnego, jest funkcją stanu aktywności organizmu (wyrażonej wielkością metabolicznej produkcji ciepła), temperatury powietrza, prędkości wiatru, średniej temperatury promieniowania otoczenia, zawartości pary wodnej w powietrzu oraz izolacyjności odzieży. Ponieważ wyrażenie na PMV ma skomplikowaną postać, do obliczeń konieczne jest użycie maszyny cyfrowej lub posłużenie się zestawieniami podanymi przez Fanger'a.

M E T O D A

1. Przyrządy pomiarowe

W celu weryfikacji proponowanej metody przewidywania stanu termicznego organizmu przeprowadzono eksperyment, w którym mierzono następujące parametry dotyczące mikroklimatu i człowieka badanego: temperaturę powietrza, jego wilgotność, średnią temperaturę promieniowania otoczenia, temperaturę skóry, temperaturę powierzchni odzieży oraz strumień ciepła oddawanego z powierzchni ciała do otoczenia.

Temperaturę otaczającego powietrza (T_a) oraz jego wilgotność (ϕ) mierzono psychrometrem Assmanna, model TB 19, produkowanym przez Wytwórnię Sprzętu Zootechnicznego w Krakowie.

Dane techniczne: zakres pomiaru temperatury	- 30 + +50°C,
zakres pomiaru wilgotności	10 + 100 %,
dokładność	± 0.1 °C, 1%,
czas pomiaru	4 min.

Do pomiarów średniej temperatury promieniowania otoczenia (T_r) stosowano termometr kulisty typu Vernona, produkcji Zakładu Doświadczalnego Techniki Medycznej w Łodzi. Podstawową częścią tego przyrządu jest kula metalowa, pokryta czarną pianką poliuretanową. Do środka kuli wprowadzony jest termometr rtęciowy. Przy minimalnym ruchu powietrza średnia temperatura promieniowania otoczenia jest równa temperaturze wskazywanej przez termometr (T_g). Przy większych prędkościach wiatru temperaturę radiacyjną oblicza się wg wzoru:

$$T_r = \left[(T_g/100)^4 + 2.77 \sqrt{v} (T_g - T_a) \right]^{0.25} \quad [K] \quad /47/$$

Dane techniczne:

zakres pomiarowy	- 20 + +50°C
	0 + +50°C
	0 + +100°C
dokładność	± 0.5°C
czas stabilizacji	30 min.

Do kontaktowych pomiarów temperatury skóry używano termopar miedziowo-konstantanowych, indywidualnie cechowanych. Drut miedziany o średnicy 0.1 mm i konstantanowy o średnicy 0.15 mm, oba w izolacji jedwabnej, włożono dodatkowo w koszulkę bawełnianą. Jej zadaniem była ochrona przed uszkodzeniem mechanicznym oraz zapobieganie wpływom czynników zewnętrznych. Zastosowanie wielokanałowego przełącznika termopar pozwoliło na prawie jednoczesny pomiar temperatury w 18 punktach ciała. Temperaturą odniesienia dla zestawu pomiarowego była temperatura mieszaniny wody z lodem (0°C), kontrolowana termometrem laboratoryjnym. Napięcie termometryczne mierzono woltomierzem cyfrowym typu V-533. Błąd pomiarowy zestawu: termopary - przełącznik - woltomierz oszacowano na 0.3°C.

Do określania średniej temperatury radiacyjnej powierzchni ubrania używano aparatury termowizyjnej typu AGA THV-680 Standard. Pracuje ona w zakresie długości fal od 2 do 5.6 μm, a przy założeniu filtra przeciwsłonecznego - w zakresie od 3.5 do 5.6 μm. Urządzenie to składa się z kamery zawierającej detektor promieniowania podczerwonego, którym jest fotowoltaiczny antymonek indu

(InSb), oraz monitora, na którym obserwuje się przetworzony obraz termiczny. Zróżnicowanie termiczne powierzchni obiektu rzeczywistego odpowiada zróżnicowaniu stopnia szerokości na ekranie monitora. Dokładny opis aparatury i zasady jej działania jest podany w monografii Rudowskiego /1977/. W wyniku badań pilotowych stwierdzono, że średnia temperatura badanego obszaru mierzona metodą termograficzną odpowiadała średniej ważonej temperaturze tej powierzchni, mierzonej metodą kontaktową w odpowiedniej ilości punktów. Pozwala to na szybką i w miarę dokładną ocenę średniej temperatury radiacyjnej danego, zróżnicowanego termicznie obszaru. Odczytów temperatury dokonywano względem standardowego źródła odniesienia, będącego wyposażeniem aparatury.

Dane techniczne:

zakres pomiarowy	- 30 + +2000°C,
czułość maksymalna	0.2°C przy mierzonej temperaturze 30°C ,
zakres temperatury otoczenia	- 15 + 55°C
zakres spektralny	2 + 5.6 μm.

Do pomiarów przepływu strumienia ciepła między powierzchnią skóry osoby badanej a otaczającym środowiskiem używano indywidualnie kalibrowanych mierników ciepła typu Hatfielda firmy Brooks i firmy J.Loebel, oraz mierników ciepła typu WS produkcji Technisch Physische Dienst w Holandii. Miernik Hatfielda jest płytką półprzewodnikową o średnicy 10 mm, wykonaną ze stopu srebra i telluru, na którą nałożono obustronnie elektrody w formie siatki miedzianej. Gradient temperatury między powierzchniami

dysku powoduje powstanie między siatkami różnicy potencjałów, proporcjonalnej do przepływającego strumienia ciepła. Czułość tych mierników zawierała się w granicach od $1.34 \text{ W m}^{-2} \mu\text{V}^{-1}$ do $0.7 \text{ W m}^{-2} \mu\text{V}^{-1}$. Umieszczone w specjalnych ramkach mierniki mocowano do skóry za pomocą przylepca. Mierniki Hatfielda połączone były poprzez wielokanałowy przełącznik z woltomierzem typu V-623. Mierniki ciepła typu WS składają się ze stosów termoparowych w formie spirali, umieszczonych wewnątrz krążka z gumy silikonowej. Średnica krążka wynosi 50 mm (typ WS-31) lub 100 mm (typ WS-32). Do pomiaru napięcia, odpowiadającego strumieniowi przepływającego ciepła, używano mikrowoltomierza firmy COMARK, lub woltomierza cyfrowego typu V-533.

Dane techniczne:

przewodność właściwa	$0.25 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$,
stałe kalibracji:	
typ WS-31	$16.1 \text{ W m}^{-2} \text{mV}^{-1}$,
	17.5
	19.1
typ WS-32	$5.8 \text{ W m}^{-2} \text{mV}^{-1}$.

W doświadczeniu weryfikacyjnym metodę pomiarową temperatury skóry użyto cyfrowego termometru kontaktowego typu Digitron-Model 1750. Przyrząd ten, produkowany przez brytyjską firmę Digitron Instrumentation Ltd., służy do kontaktowego pomiaru temperatury powierzchni badanego obiektu. Składa się on z kilku sond zawierających czujnik termoparowy, połączonych z elektronicznym układem liczącym o odczycie cyfrowym.

Dane techniczne:

typ czujnika	chromel - alumel,
zakres pomiarowy	-50 + 1000°C,
rozdzielczość	0.1°C dla temperatur poni- żej 185°C, 1.0°C dla temperatur wyższych od 185°C,
dokładność w temperatu- rze otoczenia 20 ÷ 25°C	0.5% odczytu.

2. Opis doświadczeń

2.1. Badania dyskomfortu w warunkach chłodnych

Doświadczenia prowadzono w pomieszczeniach o stałych parametrach mikroklimatycznych w następujących zakresach temperatur:

- 6 + -4°C - środowisko zimne,
- + 5 + +12°C - środowisko chłodne,
- + 18 + +23°C - środowisko lekko chłodne i neu-
tralne.

Dodatkowy eksperyment przeprowadzono w naturalnym środowisku chłodnym.

Jeden cykl pomiarowy trwał około 5 godzin. W tym czasie prowadzono pomiary na jednym osobniku, zmieniając izolacyjność i sztuczne obciążenie cieplne.

Podstawowym obciążeniem cieplnym było naturalne promieniowanie termiczne danego środowiska. Do stworzenia obciążenia dodatkowego zastosowano promienniki podczerwieni, połączone w zestawy o mocy:

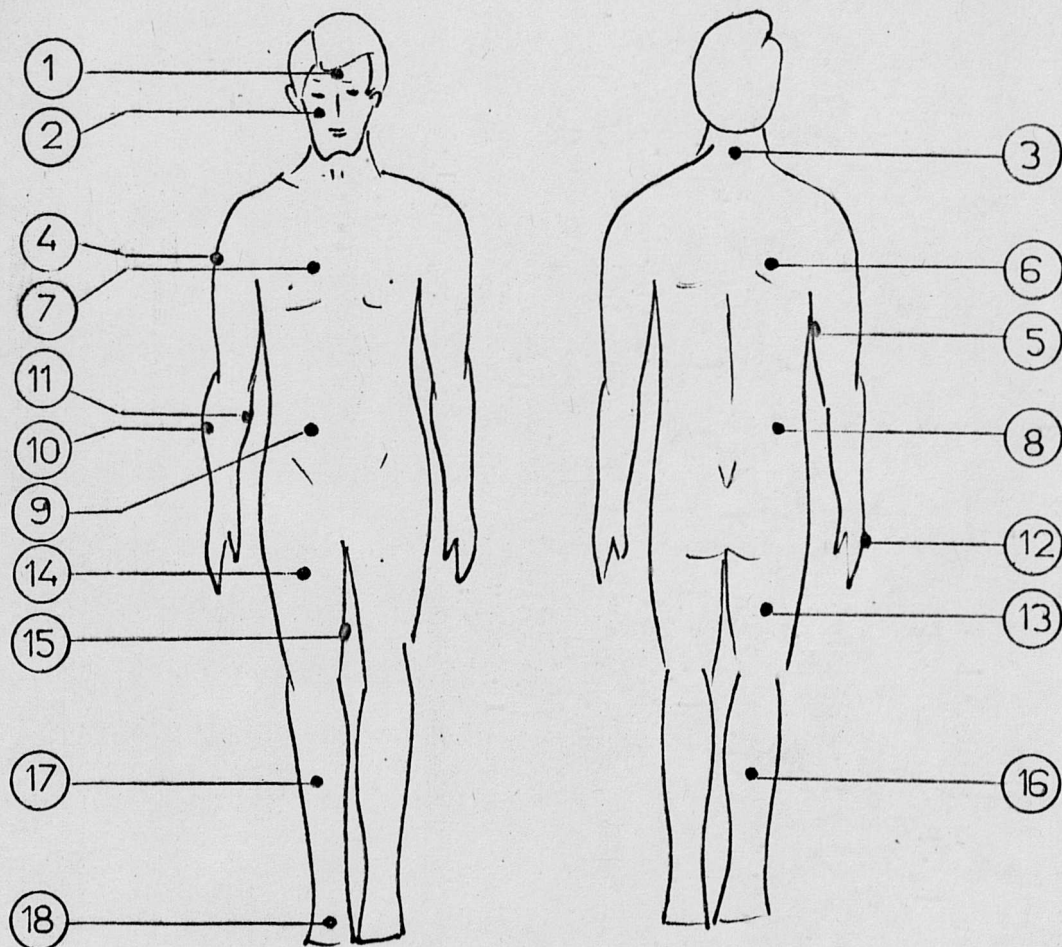
- 4 x 250 W - poziom "P-4",
- 8 x 250 W - poziom "P-8" ,
- 16 x 250 W - poziom "P-16".

Ogrzewaniu poddawano tylną część tułowia, głowy, rąk i nóg osoby badanej.

W trakcie badań używane były zestawy odzieżowe, składające się z elementów ubrania będących standardowym wyposażeniem wojskowym. Ich opis i izolacyjności podane będą w dalszej części pracy.

W pomieszczeniu przygotowawczym, stanowiącym środowisko termoneutralne, przyklejano poloplastem termopary do skóry osoby badanej. Punkty pomiaru temperatury skóry pokazane są na rys.3.

Po ubraniu osoby badanej w dany zestaw odzieżowy wprowadzono ją do pomieszczenia pomiarowego. Od tego momentu rozpoczynała się obserwacja temperatury skóry w wybranym punkcie na plecach (punkt nr 6 na rys.3) i jej rejestracja w odstępach jednominutowych. Po około 20 - 30 minutach można było zauważyć ustalenie się tej temperatury, co świadczyło o osiągnięciu pewnego stanu równowagi. W tym momencie rozpoczynał się eksperyment właściwy, to znaczy pomiar temperatury skóry we wszystkich 18 punktach, wymienionych wcześniej, oraz pomiar średniej temperatury powierzchni ubrania i parametrów mikroklimatycznych środowiska



Rys. 3. Punkty pomiaru temperatury skóry.

Następnie zwiększano obciążenie cieplne poprzez włączenie pierwszego zestawu promienników podczerwieni i całą procedurę opisaną wyżej powtarzano. Podobnie postępowano przy poziomach

promieniowania "P -8" i "P-16". Po ostatnim obciążeniu cieplnym, ze względu na dużą jego moc, konieczna była dłuższa przerwa. Po około 30 minutach powtarzano cały eksperyment dla kolejnego zestawu izolacyjności. W czasie pomiarów osoba testowana stała w postawie rozluźnionej.

2.2. Badania komfortu cieplnego

W ramach tematu badawczego, opracowywanego na zlecenie Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie, przebadano pod względem komfortu cieplnego 411 mieszkań na terenie Wrocławia (ul. Benedektyńska, ul. Rogowska) i Wałbrzycha (osiedle Podzamcze). Głównymi parametrami mikroklimatycznymi mierzonymi w tych mieszkaniach były: temperatura powietrza, wilgotność powietrza oraz średnia temperatura promieniowania otoczenia. Pomiarów dokonywano za pomocą przyrządów opisanych wcześniej, a mianowicie psychrometru Assmanna i termometru kulistego typu Vernona. W czasie pomiarów jeden z mieszkańców, najczęściej główny lokator, odpowiadał na pytania zawarte w specjalnie do tego celu przygotowanej ankiecie. Dotyczyła ona oceny mieszkania w ogóle oraz jego oceny pod względem komfortu cieplnego. Jednocześnie respondenci podawali aktualny stan swoich odczuć termicznych posługując się siedmiostopniową skalą ASHRAE (rys.2), omówioną w rozdziale I. Izolacyjność odzieży, w jaką była ubrana testowana osoba, określano na podstawie wzoru podanego przez Sprague'a i Munsona /1974/. Wzór ten zostanie omówiony w dalszej części pracy.

W 29 z przebadanych mieszkań mierzono osobom testowanym dodatkowo temperaturę skóry w maksymalnie dostępnej ilości punktów.

2.3. Doświadczenia pomocnicze

W celu sprawdzenia przewidywanej izolacyjności fizjologicznej, przewidywanej produkcji ciepła metabolicznego oraz prawdziwości oszacowania współczynnika konwekcji, przeprowadzono dodatkowe badania z użyciem mierników strumienia ciepła typu Hatfielda i typu WS. Miejscami pomiarowymi dla mierników Hatfielda były: punkt na piersi, pod łopatką, na zewnętrznej części przedramienia i tylnej stronie podudzia. Punktami pomiarowymi dla mierników typu WS : pierś, górna część ramienia, strona przednia uda oraz zewnętrzna część podudzia. Punkty na kończynach wybierane były pod kątem możliwości przymocowania mierników. Pomiary te wykonano dla izolacyjności $I_{cl} = 0$ i poziomu promieniowania "P-0" (naturalne promieniowanie cieplne otoczenia).

W celu obserwacji osiągania stanu równowagi w środowisku zimnym, co trzy minuty rejestrowano temperatury skóry w 18 punktach na powierzchni ciała. Doświadczenie to przeprowadzono w temperaturze powietrza -5°C i dla izolacyjności odzieży równej 1.6 clo i 0.97 clo.

Porównano również wskazania zestawu termopar ze wskazaniami przyrządu do szybkiego, kontaktowego pomiaru temperatury firmy DIGITRON.. Pomiary wykonano u siedmiu osób w czterech punktach na powierzchni skóry: czoło, policzek, przedramię i dłoń.

Aby poznać wpływ przylepca używanego do mocowania termopar na mierzoną temperaturę skóry, porównano wskazania termopar przyklejanych "poloplastem" oraz specjalnym przylepem chirurgicznym amerykańskiej firmy 3M.

3. Materiał doświadczalny

W badaniach laboratoryjnych uczestniczyło w sumie 14 osób. Dane fizjologiczne dotyczące osób biorących udział w eksperymencie dotyczącym dyskomfortu chłodnego, zestawione są w tabeli 1.

Są to:

1. waga w [kg]
2. wzrost w [m]
3. powierzchnia ciała według wzoru DuBois /1916/

$$A_D = 0.202 W^{0.425} L^{0.725}, \quad [m^2] \quad /48/$$

gdzie:

W - ciężar ciała w [kg],

L - wzrost w [m],

4. metaboliczna produkcja ciepła, obliczona na podstawie wzoru podanego przez Pandolfa i in./1977/:

$$M_o = 1.5 W / A_D, \quad [W m^{-2}] \quad /49/$$

Tabela 1.

Dane fizjologiczne osób badanych

Osoba	W [kg]	L [m]	A_D [m ²]	M_o [W m ⁻²]	Grubość fałdu skórniego [mm]										d_f [mm]	I_{tm} [s m ⁻¹]
					a	b	c	d	e	f	g	h	i	k		
K.M.	59.7	1.565	1.6	56.3	7.0	11.5	15.2	8.5	15.6	16.1	25.9	11.9	9.5	9.5	4.5	200
D.T.	57.7	1.595	1.59	54.4	13.9	13.0	18.2	11.4	16.0	24.7	23.9	12.2	10.0	12.1	5.8	230
P.Z.	67.6	1.70	1.78	57.0	3.0	8.5	9.0	4.5	7.5	10.0	11.5	7.0	3.5	3.0	1.9	140
F.W.	76.5	1.75	1.91	60.0	8.5	14.0	20.5	13.5	14.5	19.0	19.5	14.0	8.0	7.0	4.9	210
M.J.	75.5	1.795	1.94	58.4	8.0	9.5	13.0	10.9	12.1	16.0	17.8	8.2	7.0	5.5	3.4	174
M.A.	68.0	1.70	1.78	57.3	9.0	10.0	10.5	6.5	8.0	10.5	12.5	7.5	4.5	4.0	2.15	146
M.K.	61.0	1.75	1.74	52.6	6.0	8.5	11.0	9.5	12.5	15.0	16.5	4.0	4.5	4.5	2.6	156
S.E.	51.0	1.60	1.52	50.3	5.5	6.0	9.0	5.5	8.0	10.5	12.0	9.0	7.5	3.5	1.8	138

W - waga,

L - wzrost,

 A_D - powierzchnia ciała, wg DuBois'a, M_o - energetyczny koszt stania, d_f - grubość tkanki tłuszczowej I_{tm} - maksymalna izolacyjność fizjologiczna

5. grubości fałdów skórnych mierzonych wg Montgomery'ego i Williamsa /1976/ w punktach:

- a. podbródek,
- b. policzek - na wysokości nozdrzy,
- c. plecy - poniżej szczytu łopatki,
- d. klatka piersiowa - środkowo pachowa granica mięśnia piersiowego większego,
- e. strona boczna tułowia - w połowie odległości między grzebieniem biodrowym a pachą,
- f. brzuch - na prawo od pępka,
- g. talia - w środkowo-pachowej linii między żebrami a grzebieniem biodrowym,
- h. kolano - tuż nad rzepką,
- i. podudzie - na tylnej stronie mięśnia braucha- tego łydki w pobliżu kolana,
- k. biceps - nad środkowym punktem brzuśca mięs- niowego, przy ramieniu spoczywającym w pozycji odwróconej na udzie badanego,

6. średnia grubość tkanki tłuszczowej obliczona metodą Allena /1956/, przy założeniu, że średnia grubość skóry jest równa 2 mm :

$$d_f = (\sum 10 \text{ fałdów skórnych} - 40) / 20, \quad [\text{mm}] \quad /50/$$

W przypadku jednej osoby (P.Z.), u której obserwowano gruboś- ci fałdów skórnych równe 3 mm, co świadczy o grubości skóry najwyżej 1.5 mm przynajmniej w tych punktach , zastosowano wzór:

$$d_f = (\sum 10 \text{ fałdów} - 30) / 20 ; \quad /50a/$$

7. maksymalna izolacyjność fizjologiczna - I_{tm} , obliczona w oparciu o wzór empiryczny, podany w pracy Kollias i in. /1974/ :

$$I_{tm} = 0.018 d_f + 0.074. \quad [m^2 K W^{-1}] \quad /51/$$

4. Metoda obliczeń

4.1. Oszacowanie współczynnika konwekcji

Większość pomiarów przeprowadzono w pomieszczeniach zamkniętych, o prędkości ruchu powietrza co najwyżej 0.1 m s^{-1} . W takich warunkach konwekcję wymuszoną można pominąć i oszacowanie teoretyczne współczynnika konwekcji przeprowadzić dla konwekcji swobodnej.

W celu ustalenia strat ciepła człowieka drogą konwekcji, stosuje się odwzorowanie jego ciała pod postacią walca pionowego (Stewart i van Rensburg 1976, Cena i Clark, 1976) lub kuli (Rapp, 1973).

Jeżeli zastąpimy człowieka walcem o wymiarze charakterystycznym 1.7 m , to liczba Nusselta dla takiego kształtu, w zależności od liczby Grashofa, wynosi (Monteith 1977):

$$10^4 < Gr < 10^9, \quad Nu = 0.58 Gr^{0.25} \quad \text{- przepływ laminarny,} \quad /52/$$

$$10^9 < Gr < 10^{12}, \quad Nu = 0.11 Gr^{0.33} \quad \text{- przepływ turbulentny.} \quad /53/$$

Wartość maksymalną dla danych warunków termicznych liczba Grashofa osiągnie przy maksymalnym gradiencie temperatury między powierzchnią człowieka a otoczeniem. Takie warunki obserwowano w czasie pomiarów w pomieszczeniu o ujemnych temperaturach powietrza. Dla człowieka ubranego w odzież o małej izolacyjności gradient tem-

peratur mógł osiągnąć wartość 20 K. W tym wypadku:

$$T_a = -5^{\circ}\text{C}, (268 \text{ K}),$$

$$k = 3.27 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1},$$

$$\nu = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1},$$

$$\Delta T = 20 \text{ K},$$

$$\text{Gr} = 2.45 \cdot 10^{10},$$

$$\text{Nu} = 0.11 (\text{Gr})^{0.33} = 295,$$

$$h'_c = (\text{Nu}) k / d = 4.1 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1},$$

h'_c posiada wartość maksymalną, równą 4.1.

Najczęściej obserwowane różnice temperatur wynosiły 10 do 15 K.

Dla tych pomiarów:

$$T_a = 5^{\circ}\text{C}, (278 \text{ K}),$$

$$k = 2.45 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1},$$

$$\nu = 1.37 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1},$$

$$\Delta T = 12 \text{ K},$$

$$\text{Gr} = 1.1 \cdot 10^{10},$$

$$\text{Nu} = 228.4,$$

$$h'_c = 3.3 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Wartości minimalnej współczynnika h_c należy się spodziewać dla otoczenia o w miarę wysokiej temperaturze i człowieka ubranego w odzież o dużej izolacyjności:

$$T_a = +10^{\circ}\text{C} (283 \text{ K}),$$

$$k = 2.49 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1},$$

$$\nu = 1.42 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1},$$

$$\Delta T = 5 \text{ K},$$

$$\text{Gr} = 4.38 \cdot 10^9,$$

$$\text{Nu} = 167,$$

$$h'_c = 2.5 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Rapp /1973/ na podstawie badań eksperymentalnych i obliczeń teoretycznych podaje, że w przypadku konwekcji swobodnej człowiek wymienia ciepło tak jak kula o średnicy charakterystycznej 0.75 m. Liczba Nusselta będzie wtedy zależeć od liczby Grashofa w sposób następujący Monteith 1977 :

dla $\text{Gr} < 220$ przepływ laminarny

/54/

$$\text{Nu} = 2 + 0.54 (\text{Gr})^{0.25}$$

Podobnie jak w wypadku walca, maksymalna wartość współczynnika konwekcji wystąpi dla następujących warunków:

$$T_a = -5^\circ\text{C} \quad (268 \text{ K}),$$

$$\Delta T = 20 \text{ K},$$

$$\text{Gr} = 2.11 \cdot 10^9,$$

$$\text{Nu} = 118,$$

$$h'_c = 3.7 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Wartości średnie h_c :

$$T_a = +5^\circ\text{C}, \quad (278 \text{ K}),$$

$$\Delta T = 12 \text{ K},$$

$$\text{Gr} = 9.69 \cdot 10^8,$$

$$\text{Nu} = 97.3,$$

$$h_c = 3.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}.$$

Wartość minimalna współczynnika konwekcji wystąpi dla człowieka w odzieży o dużej izolacyjności, 1.5 - 2.0 clo :

$$T_a = + 10^{\circ}\text{C}, \quad (283 \text{ K}),$$

$$\Delta T = 5 \text{ K},$$

$$\text{Gr} = 3.76 \cdot 10^8,$$

$$\text{Nu} = 77.2,$$

$$h'_c = 2.6 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Przy oszacowywaniu współczynnika konwekcji należy także uwzględnić następujące fakty:

- i. powyższe rozważania odnoszą się do powierzchni gładkich podczas gdy powierzchnia ubranego człowieka jest chropowata i posiada nieregularne kształty,
- ii. nakładanie na siebie kolejnych warstw odzieży powoduje stopniowe wyłączanie pewnych obszarów powierzchni ciała z procesu wymiany ciepła przez konwekcję; są to obszary wewnętrznej strony ramienia i części tułowia, do której ono przylega, oraz wewnętrznej części nóg. Procent powierzchni ciała biorącej udział w wymianie ciepła przez konwekcję jest określony współczynnikiem f_{ec} , omówionym w równaniu /6/ ,
- iii. w dalszych obliczeniach podaje się gęstość strumienia energii na jednostkę powierzchni ciała, a nie odzieży, co jest wyrażone współczynnikiem f_{cl} w równaniu /6/.

Na podstawie powyższych rozważań można zauważyć, że zmniejszanie się współczynnika konwekcji h_c przy dużych izolacyjnościach odzieży (1.5 - 2 clo) jest skorelowane z niewielkim zmniejszeniem f_{ec} oraz wzrostem f_{cl} . Przy małych izolacyjnościach

$f_{cl} \approx 1$ i $f_{ec} \approx 1$, a współczynnik konwekcji będzie zależał od stopnia nieregularności powierzchni.

Przeprowadzone oszacowania pozwalają na przyjęcie do dalszych obliczeń wartości współczynnika konwekcji $h_c = f_{ec} f_{cl} h'_c = 3$.

W przypadku pomiarów w środowisku naturalnym, przy obserwowanej prędkości wiatru $v = 0.5 \text{ m s}^{-1}$, mamy do czynienia z konwekcją wymuszoną. Możemy założyć, że wymiar charakterystyczny przy ruchu powietrza w kierunku prostopadłym do głównej płaszczyzny człowieka wynosi $d = 0.3 \text{ m}$. (Cena, Clark 1976). Odpowiadająca obserwowanej temperaturze lepkość powietrza jest równa $1.4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Liczba Reynoldsa jest więc równa:

$$Re = v d / \nu = 1.07 \cdot 10^4$$

Dla liczb Reynoldsa w zakresie: $4 \cdot 10^3 + 4 \cdot 10^4$, liczba Nusselta jest określona wzorem (Monteith 1977):

$$Nu = 0.17 Re^{0.62} = 53.6 \quad /55/$$

Współczynnik konwekcji h'_c przyjmie więc wartość równą 4.3.

Dla małych izolacyjności odzieży, kiedy temperatura powierzchni ubrania jest bliska temperaturze skóry, nie można zaniedbać konwekcji swobodnej. Uwzględnienie jej, jak również uwzględnienie wszystkich innych faktów podanych przy rozpatrywaniu konwekcji swobodnej, pozwala na oszacowanie współczynnika konwekcji $h_c = f_{ec} f_{cl} h'_c = 4.5$.

4.2. Oszacowanie izolacyjności zestawów odzieżowych

Sprague i Munson /1974/, jako wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na ogrzewanym manekinie, podali następujące wzory na obliczanie izolacyjności zestawów odzieżowych:

$$I_{clo} = 0.727 \sum_i I_{clo}^i + 0.113 \text{ (dla mężczyzn),} \quad /56/$$

$$I_{clo} = 0.770 \sum_i I_{clo}^i + 0.050 \text{ (dla kobiet),} \quad /57/$$

gdzie:

I_{cl} jest izolacyjnością zestawu odzieżowego w [clo],

I_{cl}^i są izolacyjnościami poszczególnych elementów garderoby w [clo].

Dokładność oceny zestawu odzieżowego według powyższego wzoru wynosi 0.05 clo.

Na podstawie wzoru dotyczącego odzieży męskiej oraz tabel zawartych w pracach Sprague'a i Munsona /1974/, Seppanena i in. /1972/ oraz Ceny i Clarka /1978/, otrzymano wartości izolacyjności poszczególnych zestawów odzieżowych zestawione w tabeli 2. Wyodrębniono zestawy odzieżowe używane w środowiskach zimnych, które tym się różniły od pozostałych, że zawierały dodatkowo czapkę i rękawiczki. Wartości izolacyjności podano w jednostkach [clo] (gdyż w takich jednostkach są podawane stabelaryzowane izolacyjności poszczególnych elementów garderoby w wymienionych pracach), w jednostkach SI, stosowanych w obliczeniach, oraz w jednostkach [s m⁻¹] stosowanych przy porównywaniu izolacyjnoś-

ci odzieży i izolacyjności fizjologicznej.

Tabela 2. Izolacyjności zestawów odzieżowych.

Symbol zestawu	Skład zestawu	Izolacyjność		
		[clo]	[m ² K W ⁻¹]	[s m ⁻¹]
I ₀	krótkie kalesony	0,00	0,0	0,0
I ₀ [*]	krótkie kalesony + długie kalesony bawełniane + skarpety wełniane + buty	0.37	0.0574	74
I ₁ [*]	krótkie kalesony + długie kalesony + 1 koszulka	0.42	0.0651	84
I ₁	I ₀ [*] + jedna koszulka bawełniana z długim rękawem + polowe spodnie wojskowe	0.66	0.1023	132
I ₂	I ₀ [*] + 2 koszulki + spodnie	0.77	0.1194	154
I ₃	I ₀ [*] + 3 koszulki + spodnie	0.88	0.1364	176
I ₄	I ₀ [*] + 4 koszulki + spodnie	0.99	0.1535	198
I ₅	I ₀ [*] + 5 koszulek + spodnie	1.08	0.1670	216
I ₂ [*]	I ₀ [*] + 1 koszulka + polowa bluza wojskowa + spodnie	0.88	0.1364	176
I ₃ [*]	I ₂ [*] + polowa kurtka wojskowa z podpinką + spodnie	1.50	0.2325	300
I ₁ '	I ₁ + czapka + rękawiczki	0.75	0.1163	150
I ₂ '	I ₂ + czapka + rękawiczki	0.86	0.1333	172
I ₃ '	I ₃ + czapka + rękawiczki	0,97	0.1504	194
I ₄ '	I ₄ + czapka + rękawiczki	1.08	0.1674	216
I ₅ '	I ₅ + czapka + rękawiczki	1.18	0.1829	236
I ₂ [*] '	I ₂ + czapka + rękawiczki	0.97	0.1504	194
I ₃ [*] '	I ₃ + czapka + rękawiczki	1.60	0.2480	320
I ₆ [*] '	I ₅ + bluza + czapka + rękaw.	1.40	0.2170	280
I ₇ [*] '	I ₆ + kurtka	2.00	0.3100	400

I_{cl} izolacyjności stosowane w środowiskach zimnych.

4.3. Obliczanie średniej temperatury skóry

Ogólnie stosowaną metodą na określanie średniej temperatury skóry jest obliczanie średniej ważonej na podstawie pomiaru temperatury w n specyficznych punktach ciała. Średnią tę zapisujemy w postaci:

$$\bar{T}_s = c_1 T_1 + c_2 T_2 + \dots + c_n T_n \quad /58/$$

gdzie współczynniki " c_i " są ułamekami wskazującymi jaki procent powierzchni ciała stanowi obszar skóry o temperaturze T_i .

Do tej pory opracowano wiele wzorów na obliczanie średniej temperatury skóry, różniących się głównie liczbą punktów pomiarowych. Najdokładniejszą średnią można oczywiście uzyskać przez pomiar temperatury skóry w bardzo dużej ilości punktów oraz dokładne określenie obszaru jaki one reprezentują. W praktyce liczba punktów jest ograniczona przez takie czynniki jak czas pomiaru czy konieczność swobody ruchów osoby badanej (duża ilość przewodów). Z powodu trudności w dokładnym określaniu poszczególnych powierzchni o temperaturze T_i , przeważnie dzieli się ciało na części takie jak głowa, tułów, ramiona itp., których powierzchnie można już oszacować wg Hardy - DuBois /1938/, tabela 3. Za temperaturę danego regionu ciała przyjmuje się średnią arytmetyczną z pomiarów w kilku punktach.

Tabela 3. Względne powierzchnie poszczególnych obszarów ciała, wg Hardy'ego - DuBoisa, /1938/.

Obszar ciała	Względna powierzchnia
głowa	0.07
ramiona	0.14
dłonie	0.05
stopy	0.07
uda	0.19
podudzia	0.13
tułów	0.35

W środowisku chłodnym występuje stosunkowo duża niejednorodność temperatury na powierzchni ciała. Dlatego też w niniejszej pracy skorzystano z metody Winsłowa /1936/. Metodę tę Lund i Gisolfi /1974/ oraz Mitchell i Wyndham /1969/ określili jako optymalną na podstawie badań porównawczych przeprowadzonych w różnych warunkach pomiarowych. Punkty pomiaru proponowane przez Winsłowa są oznaczone na rys. 3 numerami: 1,2,3,4,6,7,8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 18. Po obliczeniu średniej arytmetycznej temperatury skóry dla każdego z regionów podanych w tabeli 3, oraz po uwzględnieniu odpowiadających im współczynników, wzór na średnią ważoną temperaturę skóry można zapisać w postaci:

$$\bar{T}_s = 0.07 T_g + 0.14 T_r + 0.35 T_t + 0.19 T_u + \\ + 0.13 T_p + 0.05 T_d + 0.07 T_s$$

/59/

gdzie:

$$T_g = (T_1 + T_2 + T_3) / 3 ,$$

$$T_r = (T_4 + T_{10}) / 2 ,$$

$$T_t = (T_6 + T_7 + T_8 + T_9) / 4 ,$$

$$T_u = (T_{13} + T_{14}) / 2 ,$$

$$T_p = (T_{16} + T_{17}) / 2 ,$$

$$T_d = T_{12} ,$$

$$T_s = T_{18} .$$

W Y N I K I

1. Badania w warunkach dyskomfortu

1.1. Weryfikacja modelu

Do określenia stanu termicznego ustroju według zaproponowanego w tej pracy modelu, konieczna jest znajomość następujących parametrów fizycznych i fizjologicznych: temperatury i wilgotności powietrza, średniej temperatury promieniowania otoczenia, współczynnika konwekcji, współczynnika promieniowania, izolacyjności odzieży, wzrostu i wagi osoby badanej oraz średniej grubości jej tkanki tłuszczowej.

Przeprowadzone badania obejmowały zakres temperatur powietrza od -5°C do $+21^{\circ}\text{C}$, zakres izolacyjności odzieży od 0 do $0.31 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ ($0 + 2.0 \text{ clo}$) oraz zakres grubości tkanki tłuszczowej od 1.8 do 5.8 mm.

Wartości termoregulacyjnego wzrostu metabolizmu ΔM obliczono ze wzoru /44/, a średniej temperatury skóry \bar{T}_s - ze wzoru /45/. Zgodnie z przeprowadzonymi wcześniej oszacowaniami, używaną w obliczeniach wartość współczynnika konwekcji przyjęto za równą 3 dla pomieszczeń zamkniętych, 4.5 dla środowiska naturalnego. Współczynnik promieniowania h_r obliczano dla każdego poszczególnego przypadku na podstawie zmierzonej średniej temperatury powierzchni odzieży T_{cl} , ze wzoru:

$$h_r = 4 \cdot f_{er} \cdot f_{cl} \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^3$$

/60/

gdzie:

$$f_{er} = 0.725$$

$$f_{cl} = 1 + 0.15 I_{clo} , \quad I_{clo} \text{ w } clo$$

$$\varepsilon = 0.95 ,$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [W m}^{-2} \text{ K}^{-4}\text{]},$$

$$\bar{T} = [(T_R + T_{cl}) / 2] + 273 \text{ [K]}.$$

Powyższe współczynniki zostały omówione w rozdziale I.

Temperaturę operatywną T_o określono ze wzoru /20/ na podstawie temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania otoczenia. Ciśnienie parcjalne pary wodnej (P_a), określano na podstawie znajomości wilgotności względnej powietrza:

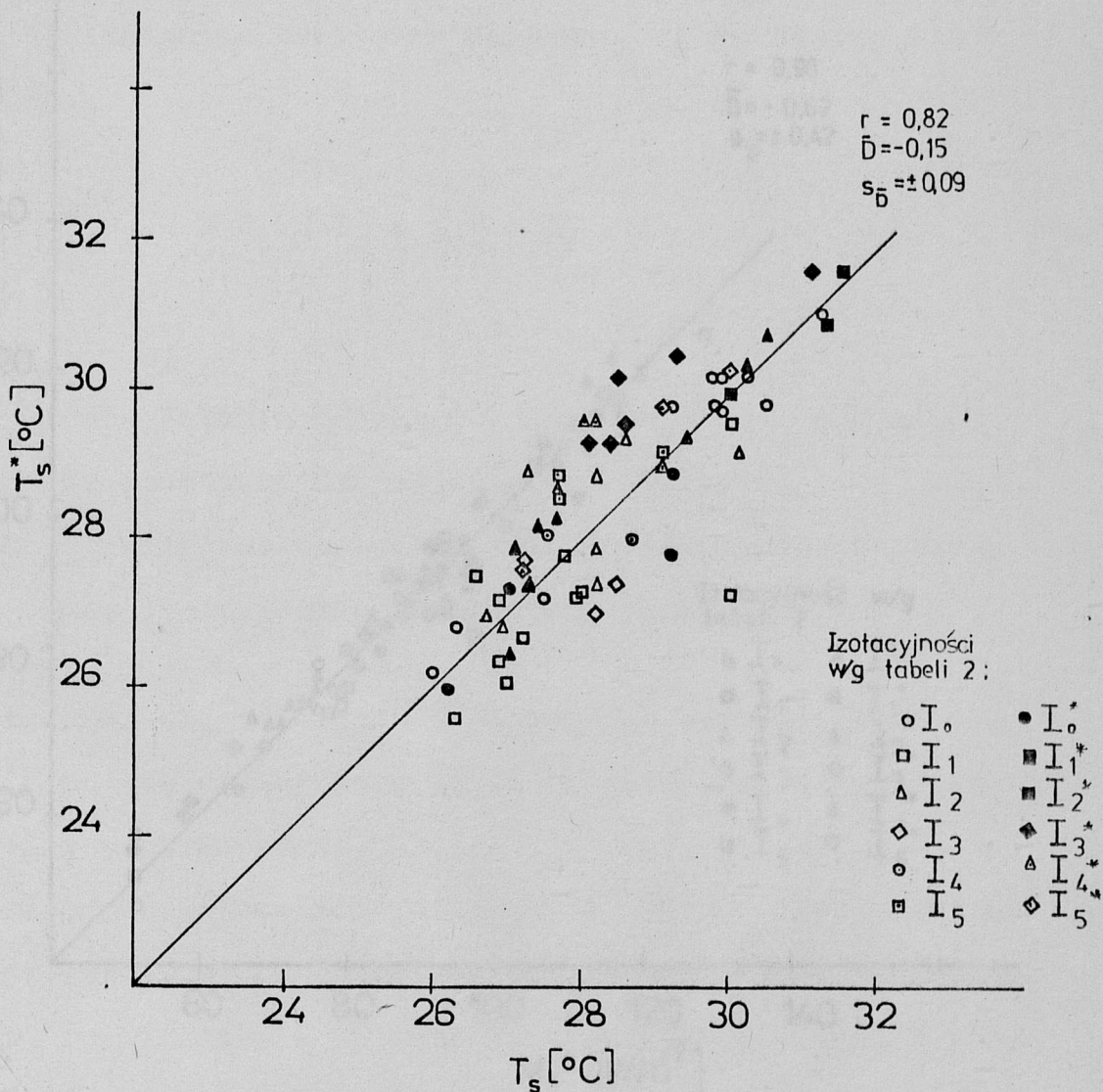
$$P_a = \Phi P_a^* \quad [\text{Pa}] \quad /61/$$

gdzie:

Φ jest wilgotnością względną,

P_a^* jest ciśnieniem pary nasyconej w danej temperaturze powietrza w [Pa] .

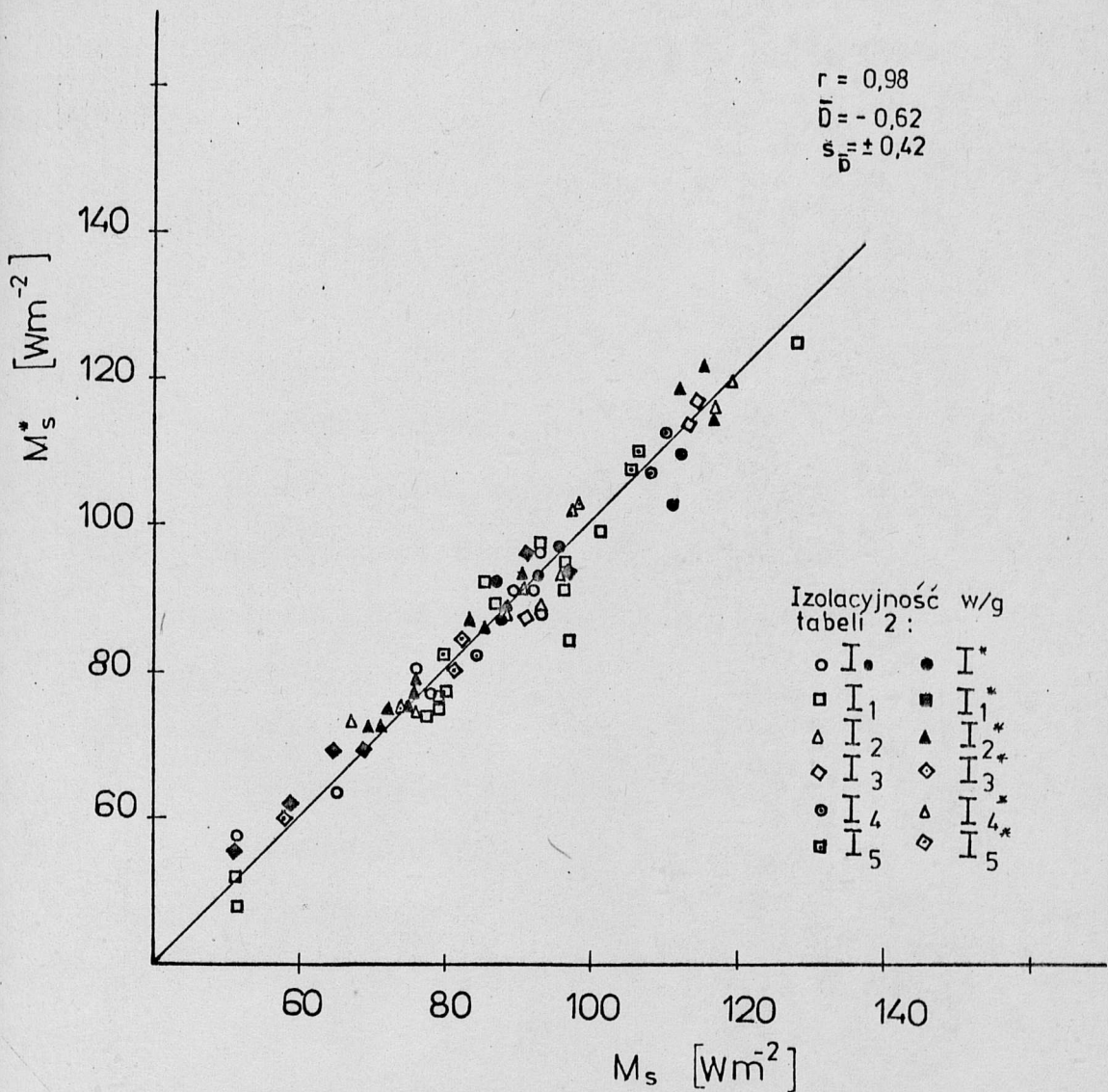
Wyniki obliczeń teoretycznych porównano z odpowiednimi wielkościami obserwowanymi w doświadczeniu. W tabeli 4 zestawiono dane konieczne do obliczeń, wyniki tych obliczeń oraz odpowiadające im wartości eksperymentalne. Rys.4 przedstawia graficzne porównanie średnich temperatur skóry, przewidywanych z modelu, ze średnimi ważonymi temperaturami skóry, obserwowanymi w doświadczeniu. Współczynnik korelacji wynosi $r = 0.82$. Testem Studenta dla zmiennych połączonych, przy poziomie istotności $\alpha = 0.05$, nie stwierdzono różnic między wartościami przewidywanymi i obserwowanymi. Na rys. 5 dokonano porównania przewidywanej



Rys. 4. Porównanie teoretycznych i eksperymentalnych wartości średniej temperatury skóry.

T_s - wartość teoretyczna, (wg wzoru /45/),

T_s^* - wartość eksperymentalna, (średnia ważona wg wzoru /59/).



Rys. 5. Porównanie teoretycznych i eksperymentalnych wartości metabolicznej produkcji ciepła.

M_s - wartość teoretyczna, (wg wzoru /44/),

M_s^* - wartość eksperymentalna, (wg wzoru /61/),

produkcji ciepła metabolicznego M_s z wielkością strumienia ciepła określanego na podstawie obserwacji temperatury skóry z zależności:

$$M_s = h F_{cl} (\bar{T}_s^* - T_o) + E_d \quad /61/$$

gdzie:

\bar{T}_s^* - jest średnią ważoną temperaturą skóry, obliczoną na podstawie danych eksperymentalnych

E_d - obliczano ze wzoru /35/. Współczynnik korelacji dla porównywanych wielkości wynosi 0.98.

Testem Studenta dla zmiennych połączonych. Przy poziomie istotności 0.05 nie stwierdzono różnic między wartościami przewidywanymi i obserwowanymi.

Dodatkowo przeprowadzono badania, w których ciepło metaboliczne, przewidywana na podstawie modelu, porównano z ciepłem mierzonym. Doświadczenie polegało na pomiarze wszystkich parametrów koniecznych do obliczeń modelowych oraz dodatkowo na pomiarze tzw. ciepła suchego ($M_D = R + C$) miernikami Hatfielda lub miernikami typu WS. Średnią utratę ciepła z powierzchni skóry stanowiła średnia ważona, obliczana na podstawie względnych powierzchni Hardy - DuBois /1938/, przedstawionych w tabeli 3. W przypadku mierników Hatfielda dyski umieszczone na piersi i pod łopatką reprezentowały utratę ciepła z tułowia, głowy, górnej części ramion i górnej części ud, a mierniki umieszczone na przedramieniu i podudziu - resztę powierzchni ciała. Mierniki typu WS mocowane były w punktach według Ramanathana /1964/.

Lp	Osoba	T_o [°C]	P_a [Pa]	$\frac{h_r}{r}$ [Wm ⁻² k ⁻¹]	I_{cl} [m ² k W ⁻¹]	I_t [m ² k W ⁻¹]	ΔM_s [W m ⁻²]	M_s [W m ⁻²]	M_s^* [W m ⁻²]	T_s [°C]	T_s^* [°C]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	JM	6.5	620	4.1	I_1	0.102	0.092	45.0	96.4	90.9	28.2	27.0
2	JM	6.7	620	4.3	I_2^*	0.136	0.095	36.3	87.7	87.8	28.7	28.7
3	JM	6.9	620	4.6	I_3^*	0.233	0.108	17.5	68.9	68.6	29.6	30.3
4	FW	5.7	510	4.1	I_1	0.102	0.113	40.3	92.5	96.8	26.6	27.5
5	FW	5.9	540	4.2	I_2^*	0.136	0.119	30.5	83.3	86.8	27.1	27.9
6	FW	6.2	560	4.4	I_3^*	0.233	0.135	13.2	65.4	69.1	28.1	29.3
7	P.Z.	8.7	690	4.2	I_1	0.102	0.073	46.6	96.2	94.5	30.0	29.6
8	P.Z.	7.7	620	4.2	I_2^*	0.136	0.075	40.3	89.9	90.6	30.2	30.4
9	P.Z	7.5	580	4.4	I_3^*	0.233	0.083	21.6	71.2	72.9	31.1	31.6
10	F.W	7.5	620	4.2	I_1	0.102	0.116	34.8	87.0	89.4	26.9	27.2
11	F.W	8.5	680	4.2	I_2^*	0.136	0.124	23.5	75.7	78.7	27.6	28.3
12	F.W	8.7	690	4.4	I_3^*	0.233	0.147	6.7	59.2	62.1	28.4	29.3
13	K.M	8.5	690	4.2	I_1	0.102	0.108	37.4	86.4	91.9	27.7	28.8
14	K.M	11.5	690	4.3	I_2^*	0.136	0.120	20.1	69.6	73.1	28.6	29.4
15	K.M	12.7	880	4.6	I_3^*	0.233	0.150	1.8	51.3	55.2	29.3	30.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
16	D.T	10.0	630	4.1	I_0^*	0.057	0.122	40.4	88.3	86.9	26.2	26.0
17	D.T	9.5	590	4.2	I_1	0.102	0.127	31.8	79.1	75.0	27.0	26.1
18	D.T	8.7	570	4.3	I_2^*	0.136	0.131	27.3	74.6	75.0	27.3	27.4
19	P.Z	8.5	690	4.0	I_0^*	0.057	0.07	62.0	111.8	110.1	29.2	28.9
20	P.Z	8.8	670	4.2	I_1	0.102	0.073	46.6	96.2	94.5	30.0	29.6
21	P.Z	9.5	710	4.3	I_2^*	0.136	0.077	34.7	84.9	86.2	30.5	30.8
22	K.M	9.5	740	4.1	I_0^*	0.057	0.105	45.8	95.3	97.4	27.0	27.3
23	K.M	9.5	720	4.2	I_1	0.102	0.110	33.4	82.9	82.9	27.8	27.8
24	K.M	9.3	730	4.3	I_2^*	0.136	0.115	26.5	76.0	78.8	28.2	28.9
25	P.Z	8.7	770	4.0	I_0^*	0.057	0.07	61.3	110.9	102.7	29.2	27.8
26	P.Z	8.7	770	4.2	I_1	0.102	0.073	46.3	96.5	83.7	30.0	27.3
27	P.Z	8.1	710	4.3	I_2	0.119	0.074	43.7	93.3	89.4	30.1	29.2
28	D.T	8.9	760	4.0	I_0^*	0.057	0.121	43.6	91.5	92.7	26.0	26.2
29	D.T	9.1	770	4.1	I_1	0.102	0.128	31.6	79.5	77.0	26.9	26.4
30	D.T	9.3	810	4.2	I_2^*	0.136	0.134	24.0	71.9	75.1	27.4	28.2
31	K.M	11.3	910	4.1	I_0^*	0.057	0.108	38.9	88.4	86.9	27.5	27.2
32	K.M	10.5	830	4.2	I_1	0.102	0.112	30.0	79.5	76.1	28.0	27.3
33	K.M	10.3	800	4.3	I_2	0.119	0.115	26.9	76.4	75.0	28.2	27.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
34	D.T	10.1	810	4.0	I_0^*	0.057	0.123	39.4	87.3	91.6	26.3	26.8
35	D.T	10.7	740	4.2	I_1	0.102	0.131	27.1	76.6	74.2	27.2	26.7
36	D.T	11.9	780	4.1	I_2	0.119	0.139	19.3	67.2	73.1	27.7	28.7
37	JM	-5.9	180	4.1	I_3^{*}	0.248	0.091	47.5	97.1	93.6	28.2	27.0
38	JM	-5.9	180	3.8	I_2^{*}	0.150	0.086	67.7	117.3	115.4	27.0	26.5
39	JM	-5.9	180	3.7	I_1'	0.116	0.084	78.6	128.2	125.3	26.3	25.6
40	JM	-4.1	210	3.7	I_2'	0.133	0.086	67.5	117.1	116.4	27.0	26.8
41	JM	-4.0	210	3.8	I_3'	0.150	0.086	63.0	112.6	114.0	27.0	27.6
42	JM	-4.4	210	3.8	I_4'	0.167	0.087	58.8	108.4	110.6	27.5	28.1
43	JM	-4.8	200	3.9	I_5'	0.183	0.088	55.4	105.0	108.1	27.7	28.6
44	JM	-4.5	200	4.0	I_6^{*}	0.217	0.090	47.7	97.3	102.0	28.2	29.6
45	JM	-4.5	200	4.2	I_7^{*}	0.310	0.097	30.9	80.5	80.2	29.1	29.0
46	JM	-4.9	200	4.2	I_7^{*}	0.310	0.096	32.5	82.1	83.9	29.1	29.8
47	JM	-4.9	200	4.0	I_6^{*}	0.217	0.090	48.7	98.3	103.2	28.1	29.6
48	JM	-4.9	200	3.9	I_5'	0.183	0.088	56.4	106.0	110.1	27.7	28.8
49	JM	-4.9	200	3.8	I_4'	0.167	0.087	60.1	109.7	112.5	27.4	28.2
50	JM	-4.9	200	3.8	I_3^{*}	0.150	0.086	64.4	114.0	116.7	27.2	27.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
51	JM	-4.9	200	3.7	I_2'	0.133	0.085	69.7	119.3	119.6	26.8	26.9
52	JM	-4.1	210	4.0	I_3^{*i}	0.248	0.093	40.7	90.3	93.0	28.6	29.5
53	JM	-4.1	210	3.8	I_2^{*i}	0.150	0.087	62.7	112.3	118.7	27.3	28.9
54	JM	-4.5	200	4.0	I_3^{*i}	0.248	0.093	41.5	91.1	96.1	28.5	30.2
55	JM	-4.9	200	3.8	I_2^{*i}	0.150	0.086	65.0	114.6	121.5	27.1	28.9
56	DT	22.8	1060	4.3	I_0	0.000	0.160	0	50.6	56.8	29.9	29.7
57	DT	23.3	1040	4.3	I_1^*	0.065	0.107	0	50.6	48.3	31.3	30.9
58	P.Z	23.3	1040	4.3	I_0	0.000	0.090	13.7	65.0	63.4	31.2	31.0
59	P.Z	23.3	1040	4.3	I_1^*	0.065	0.108	0	51.3	52.0	31.5	31.6
60	M.A	18.3	850	4.2	I_0	0.000	0.0785	41.0	92.6	95.9	29.8	30.2
61	M.A	18.5	850	4.2	I_0	0.000	0.079	39.9	91.5	91.3	29.8	29.8
62	M.A	18.5	850	4.2	I_1^*	0.065	0.080	36.7	88.3	88.2	30.0	30.0
63	M.A	19.0	880	4.2	I_0	0.000	0.080	37.5	89.1	91.1	29.9	30.2
64	M.K	21.0	1170	4.3	I_0	0.000	0.087	30.2	77.5	77.2	30.2	30.2
65	M.J	20.0	1170	4.2	I_0	0.000	0.103	22.9	75.5	80.5	29.2	29.8
66	S.E	19.0	880	4.2	I_0	0.000	0.071	48.1	93.4	87.9	30.5	29.8
67	JM	6.9	690	4.2	I_1'	0.116	0.093	49.9	101.3	98.8	27.9	27.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
68	JM	7.1	710	4.3	I_2'	0.133	0.092	43.6	95.0	92.5	28.2	27.4
69	JM	7.1	710	4.4	I_3'	0.150	0.094	39.3	90.7	86.5	28.5	27.4
70	JM	7.7	770	4.4	I_4'	0.167	0.097	32.9	84.3	81.8	28.7	28.0
71	JM	7.8	780	4.4	I_5'	0.183	0.099	28.8	80.2	82.4	29.1	29.2
72	JM	7.8	780	4.5	I_6^{*}	0.217	0.104	22.2	73.6	74.9	29.4	29.4
73	JM	8.3	830	4.7	I_7^{*}	0.310	0.122	6.4	57.8	60.2	30.0	30.3

Kolumny oznaczone * zawierają dane doświadczalne.

Punkty na piersi i ramieniu reprezentowały głowę, tułów i ręce, punkty na udzie i podudziu - nogi.

Na rys.6 przedstawione jest porównanie mierzonej gęstości strumienia ciepła (M_D^*) z wartością teoretyczną ($M_D = M_S - E_d$). Współczynnik korelacji $r = 0.82$. Testem Studenta dla zmiennych połączonych. Przy poziomie istotności $\alpha = 0.05$ nie stwierdzono różnic między wartościami mierzonymi i obserwowanymi.

Na podstawie pomiaru średniej temperatury skóry i średniej utraty ciepła suchego można określić średnią izolacyjność fizjologiczną ciała:

$$I_t^* = (T_d - \bar{T}_s^*) / (M_D^* + E_d) \quad /62/$$

gdzie:

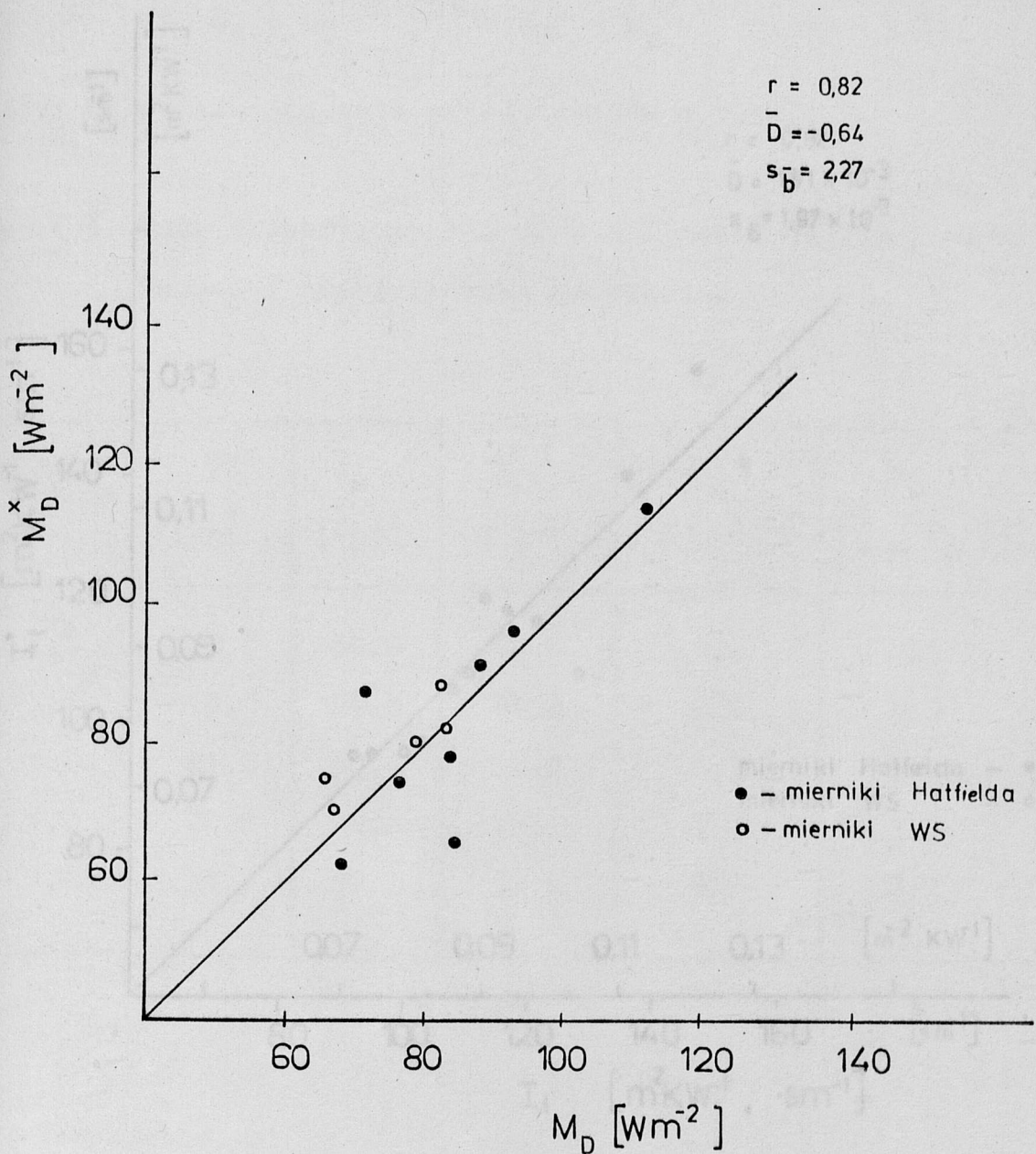
M_D^* jest średnią ważoną z wyników pomiaru ciepła,

\bar{T}_s^* jest średnią ważoną z wyników pomiaru temperatury skóry,

T_d jest temperaturą głęboką ciała, równą 37°C .

Porównanie wielkości teoretycznych (I_t) obliczanych z równania /43/ i eksperymentalnych (I_t^*) pokazano na rys.7. Współczynnik korelacji $r = 0.92$ Testem Studenta dla zmiennych połączonych, przy poziomie istotności $\alpha = 0.05$ nie stwierdzono różnic między wartościami I_t i I_t^* .

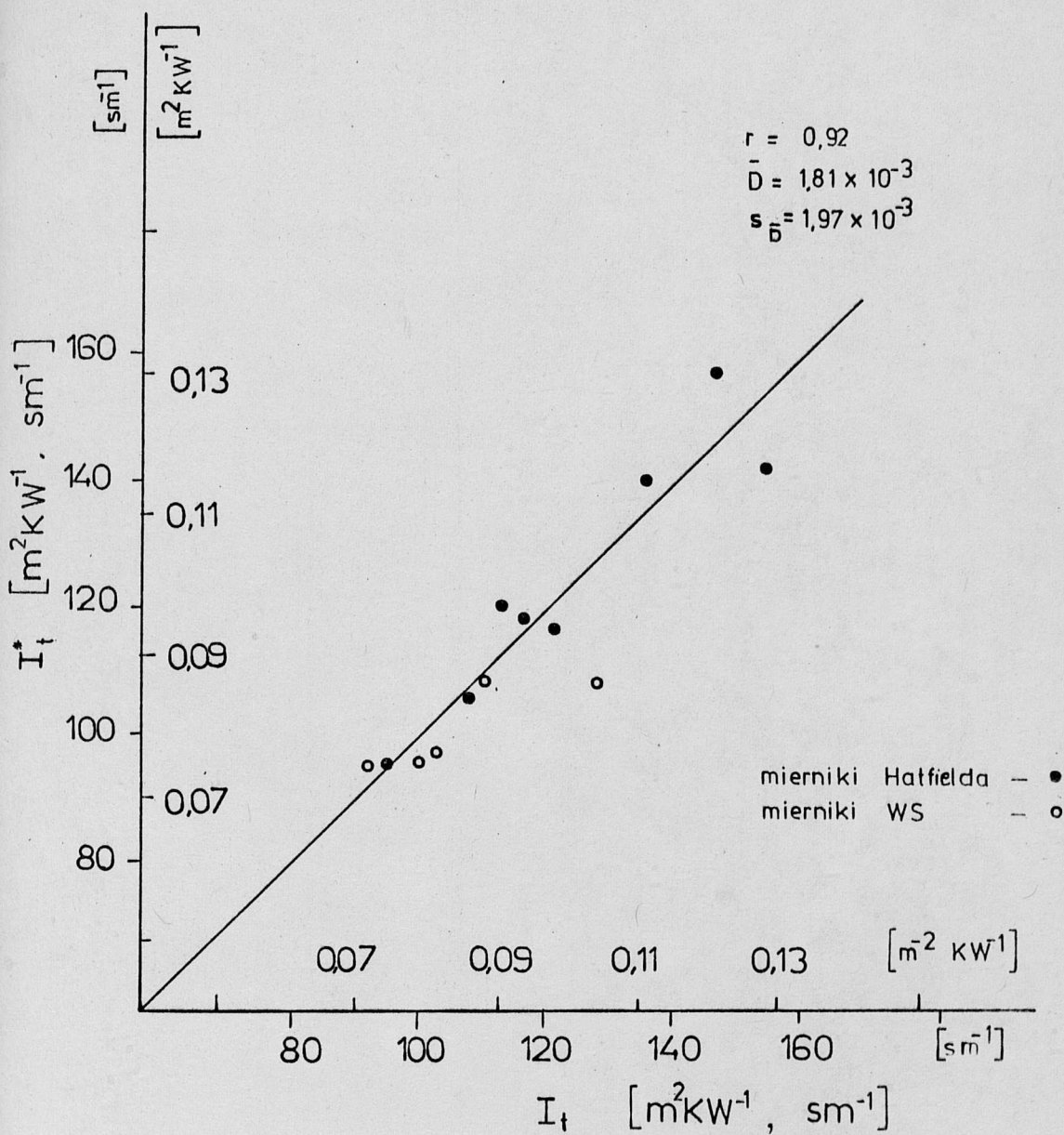
W czasie pomiarów z miernikami typu WS na osobnikach nagich, możliwe było również określenie współczynnika konwekcji na podstawie danych eksperymentalnych. W tym celu skorzystano z następującej zależności, wynikającej bezpośrednio z równania /22/ :



Rys. 6. Porównanie teoretycznych i eksperymentalnych wartości gęstości strumienia ciepła "suchego".

M_D - wartość teoretyczna, (wg wzoru /41/),

M_D^* - wartość eksperymentalna.



Rys. 7. Porównanie teoretycznych i eksperymentalnych wartości izolacyjności fizjologicznej ciała.

I_t - wartość teoretyczna, (wg wzoru /43/),

I_t^* - wartość eksperymentalna, (wg wzoru /62/).

$$h_c = M_D^* / (\bar{T}_s^* - T_o) - h_r$$

Wyniki tego doświadczenia przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Dane eksperymentalne oraz obliczone na ich podstawie wartości współczynnika konwekcji.

Osoba badana	T_o [°C]	\bar{T}_s^* [°C]	M_D^* [W m ⁻²]	h_R [W m ⁻² K ⁻¹]	h_C [W m ⁻² K ⁻¹]
A.M.	19.0	30.0	80.4	4.2	2.9
E.S.	19.0	29.8	88.2	4.2	4.0
K.M.	21.0	30.2	70.0	4.3	3.3
J.M.	20.0	29.8	75.0	4.2	3.5
A.M.	18.3	30.2	82.3	4.2	2.7

1.2. Temperatura skóry

Skóra nie jest jednorodna termicznie w danych warunkach cieplno-wilgotnościowych. Nawet w środowisku termicznie naturalnym istnieją wyraźne różnice między poszczególnymi częściami ciała (Olesen, Fanger 1973). Generalnie głowa jest o 1 - 2 °C cieplejsza, a nogi o 3-4 °C chłodniejsze niż tułów czy ramiona (Montgomery, Williams, 1976). Nawet wzdłuż samych kończyn, jak podaje Kerslake /1964/ istnieje gradient 2 - 3°C. Gradienty te stają się większe w niskich temperaturach osiągając wartość 14°C

w temperaturze $T_a = 10^{\circ}\text{C}$ (Froese, Burton 1957). Największą jednorodność temperatury na powierzchni skóry obserwuje się w temperaturach otoczenia ok. 35°C (Houdaw 1972). Odpowiada to sytuacji, kiedy oddawanie ciepła przez konwekcję i promieniowanie jest zredukowane do zera i ciepło metaboliczne jest tracone głównie na drodze parowania potu. W temperaturach T_a wyższych od 35°C wzrasta jeszcze temperatura stóp (większe możliwości wasomotoryczne kończyn), natomiast piersi i czoła nie zmienia się.

Przykładowe rozkłady temperatury skóry w środowiskach chłodnych i zimnych dla izolacyjności I_1 podano w tabeli 6. Jak widać, nie obserwuje się tak dużych gradientów temperatur jak podaje Froese i Burton /1957/, gdyż izolacyjności I_1 odpowiada grubsza warstwa odzieży na nogach, a cieńsza na tułowi (kalesony, spodnie, koszulka).

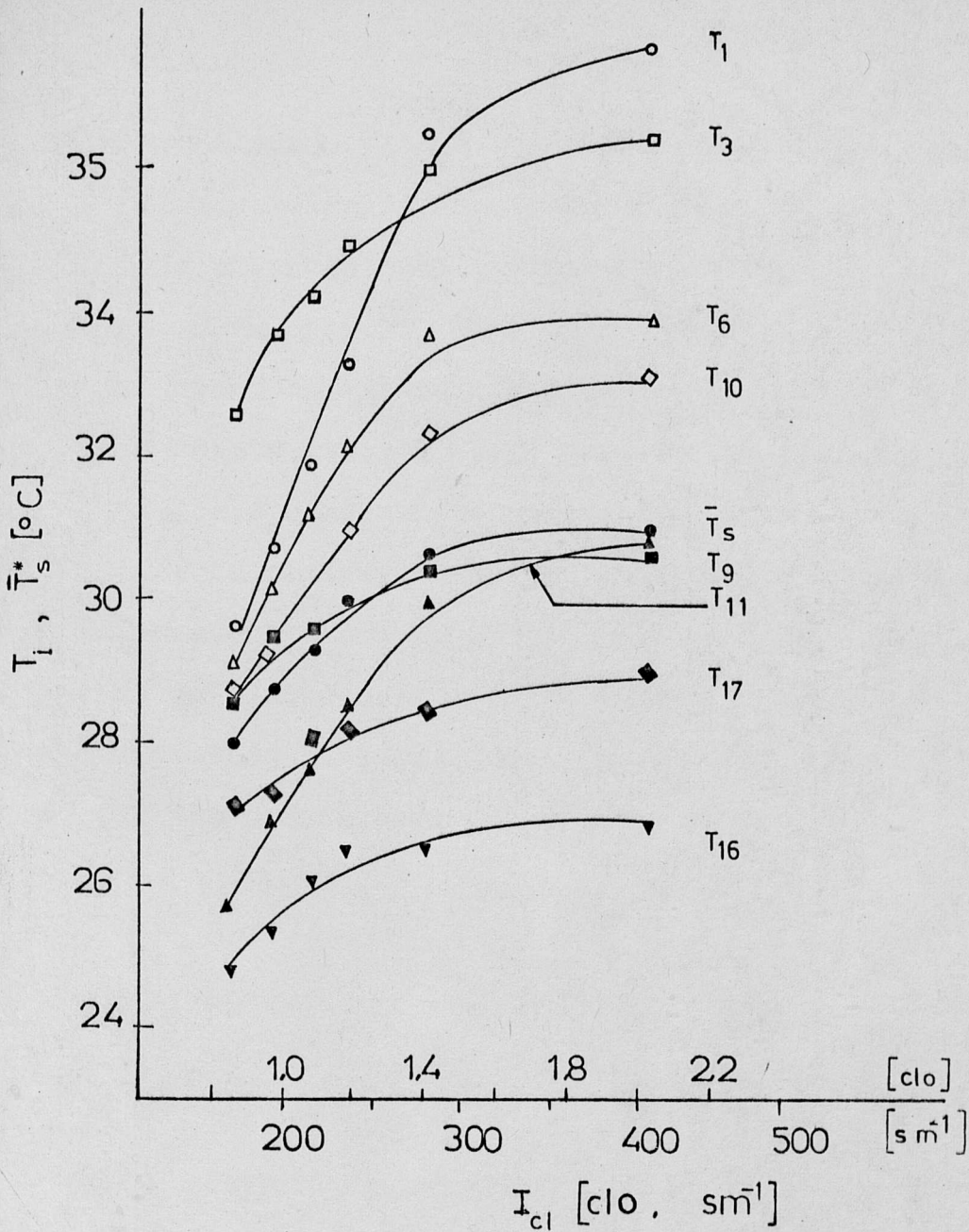
Tabela 6. Rozkład temperatury skóry w środowisku chłodnym i zimnym, (osobnik J.M) dla izolacyjności I_1 .

T_a [$^{\circ}\text{C}$]	Czoło T_1 [$^{\circ}\text{C}$]	Szyja T_3 [$^{\circ}\text{C}$]	Plecy T_6 [$^{\circ}\text{C}$]	Brzuch T_9 [$^{\circ}\text{C}$]	Dłoń T_{12} [$^{\circ}\text{C}$]	Łydka T_{17} [$^{\circ}\text{C}$]	Stopa T_{18} [$^{\circ}\text{C}$]	Średnia temp. skóry \bar{T}_s
+ 16	31.1	28.9	29.7	28.7	26.6	30.3	31.9	29.4
+ 6	35.4	27.9	26.9	27.1	23.7	29.1	30.3	27.0
- 5	27.6	27.6	29.5	27.6	24.7	24.9	26.4	26.1

1.3. Wpływ izolacyjności odzieży na temperaturę skóry

Wpływ izolacyjności odzieży na wartości lokalne temperatury skóry przedstawiono na rys.8. Zwiększenie izolacyjności odzieży w niskiej temperaturze otoczenia ($T_a = -5^{\circ}\text{C}$), powoduje wzrost temperatury skóry. Zależność jest prawie liniowa dla izolacyjności od 0.88 clo do 1.4 clo. Dalsze ubieranie osoby badanej ma już mniejszy wpływ na zmianę jej temperatury skóry. Zjawisko to można tłumaczyć tym, że założenie grubej odzieży powoduje zmniejszenie obciążenia układu termoregulacji (zmniejszenie termoregulacyjnej produkcji ciepła). Ponieważ nie jest już konieczne tak duże ukrwienie tkanki mięśniowej, obserwuje się więc zmniejszenie izolacyjności fizjologicznej i tendencję do spadku temperatury skóry. Jednocześnie jest zmniejszony bezpośredni wpływ działania zimnego powietrza na skórę, co sprzyja wzrostowi jej temperatury. Sumaryczne działanie obu czynników daje efekt obserwowany na rys.8.

Odzież wpływa na zmianę temperatury skóry nie tylko w miejscu jej przylegania, co jest spowodowane ogólnym działaniem układu termoregulacji. W czasie doświadczenia obserwowano wzrost temperatury skóry na podudziu (T_{16} , T_{17}), mimo zmiany izolacyjności tylko górnej części ubrania. Również temperatura na czole (T_1), a jest to miejsce wystawione na bezpośrednie działanie zimnego powietrza, reaguje na zmianę izolacyjności w innym obszarze ciała. Zawsze w niskich temperaturach obserwowano wzrost temperatury na czole. Osiągała ona często wartości wyższe niż w warunkach komfortu cieplnego.



Rys. 8. Zależność temperatury skóry od izolacyjności odzieży, (naturalne pole promieniowania cieplnego).

- T_1 - temperatura czoła,
- T_3 - temperatura na szyi,
- T_6 - temperatura pod łopatką,
- T_{10} - temperatura na przedramieniu,
- T_9 - temperatura na brzuchu,
- T_{11} - temperatura na wewnętrznej części przedramienia,
- T_{12} - temperatura na dłoni,
- T_{16} - temperatura na tylnej części podudzia,
- T_{17} - temperatura na przedniej części podudzia,
- T_s - średnia temperatura skóry.

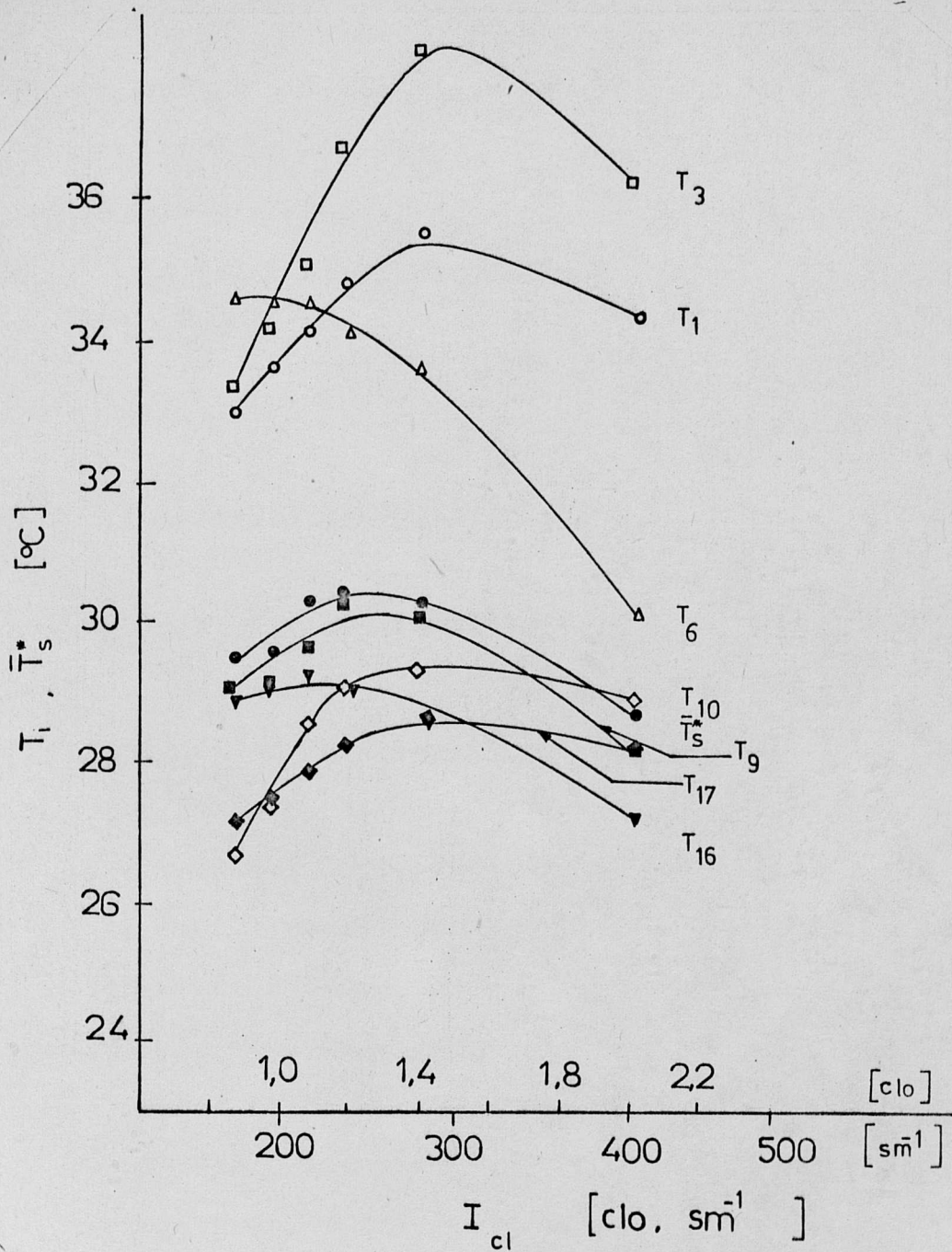
Charakterystyczne wyniki otrzymano przy stosowaniu asymetrycznego pola promieniowania, (rys.9). Zwiększanie izolacyjności odzieży powoduje lokalny spadek temperatury skóry na obszarze ogrzewanym plecy: T_6 i T_8 . Obserwacja pozostałych regionów ciała podczas ogrzewania pleców daje następujące wyniki:

- i. zwiększanie izolacyjności odzieży do wartości 1.4 clo powoduje ogólny wzrost temperatury skóry,
- ii. założenie odzieży o izolacyjności 2 clo wywołuje spadek temperatury skóry we wszystkich punktach ciała.

Zjawisko to może mieć duże znaczenie praktyczne, związane z określeniem optymalnej izolacyjności odzieży przy ogrzewaniu ludzi promieniowaniem podczerwonym.

1.4. Wpływ asymetrycznego pola promieniowania na temperaturę skóry

W każdym przypadku ogrzewania promiennikami obserwowano wzrost temperatury skóry we wszystkich punktach ciała. Również tych, które nie były wystawione na bezpośrednie działanie promieniowania. Czasami wyjątek stanowiły dystalne części kończyn. Chociaż Nadel i in. /1973/, ogrzewając różne obszary skóry w temperaturach otoczenia równej 30°C , uzyskali inne wyniki. Podczas danej sesji pomiarowej temperatura skóry u osób przez nich badanych nie ulegała zmianie. Różne od naszych rezultaty są najprawdopodobniej spowodowane odmiennymi warunkami pomiaru. Stosowana przez tych badaczy temperatura otoczenia 30°C charakteryzuje środowisko ciepłe. Z takim środowiskiem jest związane silne rozszerzenie naczyń krwionośnych skóry, a więc dalsze ogrzewanie może spowodować



Rys. 9. Zależność temperatury skóry od izolacyjności odzieży, (asymetryczne pole promieniowania; łączna moc promienników podczerwieni: 2500 W).

Oznaczenia jak na rys. 8.

co najwyżej wzrost aktywności gruczołów potowych i utrzymanie temperatury skóry na niezmiennym poziomie. Drugą przyczyną może być wielkość obszaru ogrzewanej skóry, która u Nadelá wynosiła 0.03 do 0.1 m², w porównaniu do użytej w niniejszej pracy - 0.5 m².

2. Badania w eksploatowanych budynkach

Uzyskane w wyniku opracowań statystycznych średnie wartości parametrów mikroklimatycznych w mieszkaniach, średnie wartości izolacyjności odzieży używanej w warunkach domowych (I_{cl}) oraz średnią ocenę komfortu cieplnego (Y) według skali ASHRAE, (rys.2) zestawiono w tabeli 7. Wyszczególniono wyniki z okresu ogrzewczego i z okresu letniego. W ostatniej rubryce została podana Przewidywana Średnia Ocena komfortu cieplnego (PMV) według Fanger'a /1970/, omówiona w rozdziale I. Obliczenia PMV wykonano na minikomputerze firmy Hewlett-Packard typu HP-67, używając programu opracowanego przez Nishi'ego dla typu HP-65 (Nishi 1977), zmodyfikowanego przez McIntyre (informacja prywatna). Obliczenia wykonano dla średnich warunków mikroklimatycznych każdego z wyróżnionych okresów. Założono w pracy, że średni wydatek energetyczny mieszkańców wynosi 80 W m⁻². Jest to średnia wartość między wydatkiem energetycznym człowieka odpoczywającego w pozycji siedzącej (58 W m⁻²), a wydatkiem energetycznym kobiety wykonującej niezbyt ciężkie prace domowe (100 W m⁻²). Wskaźnik "PMV" Fanger'a, obejmujący skalę od -3 do +3 ze stopniowaniem takim samym jak w skali ASHRAE, został przeliczony na stosowaną w badaniach skalę od 1 do 7.

W tabeli 8 zestawiono wartości temperatury powietrza, wilgotności powietrza i średniej temperatury promieniowania otoczenia, odpowiadające ocenie odczuć termicznych $Y = 4$ (neutralnie: ani za ciepło, ani za zimno).

Tabela 7.

Średnie parametry mikroklimatyczne, izolacyjność odzieży i ocena komfortu cieplnego w badanych mieszkaniach

Okres pomiarowy	T_a [°C]	ϕ %	T_r [°C]	I_{cl} [clo]	Y	PMV
zima (wariancja)	21.8 (1.9)	60.5 (19.9)	22.6 (1.85)	0.59 (0.17)	3.92 (1.04)	3.89
lato (wariancja)	21.6 (1.5)	57.5 (13.2)	22.5 (1.75)	0.50 (0.16)	3.91 (1.22)	3.70
cały rok (wariancja)	21.8 (1.8)	59.8 (18.5)	22.6 (1.83)	0.57 (0.17)	3.92 (1.17)	3.84

Tabela 8.

Parametry mikroklimatyczne odpowiadające ocenie
odczuć termicznych $Y = 4$

Okres	T_a dla $Y = 4$ [°C]	\varnothing dla $Y = 4$ %	T_r dla $Y=4$ [°C]
okres ogrzewczy	21.75	60.49	22.67
okres letni	21.67	58.39	22.43
cały rok	21.72	59.75	22.47

$Y = 4$ oznacza warunki komfortu cieplnego.

W tabeli 9 zestawiono dane dotyczące mieszkań, w których przeprowadzono test fizjologiczny, tzn. pomiar temperatury skóry. Oprócz parametrów mikroklimatycznych, wartości izolacyjności odzieży respondenta oraz jego oceny komfortu cieplnego, podano również Przewidywaną Średnią Ocenę komfortu cieplnego (PMV) dla

danych warunków, temperaturę skóry na czole (T_1), średnią temperaturę skóry obserwowaną u badanej osoby (\bar{T}_s^*) oraz temperaturę skóry (\bar{T}_s) przewidywaną na podstawie zależności /46/. Do obliczeń PMV i średniej temperatury skóry założono, że:

- i. wydatek energetyczny M_0 wynosi 58 W m^{-2} , jeśli osoba badana przed rozpoczęciem testu przebywała w pozycji siedzącej, a 100 W m^{-2} - jeśli wykonywała lekkie prace domowe,
- ii. wilgotność skóry "w" przyjęto na podstawie pracy Gagge'go i in. /1974/ równą 0.06 dla wydatku energetycznego 58 W m^{-2} i równą 0.2 dla wydatku energetycznego 100 W m^{-2} ,
- iii. średnią ważoną temperaturę skóry \bar{T}_s^* obliczano ze wzoru Winslowa, Hardy'ego-DuBoisa lub Palmesa-Parka, w zależności od ilości dostępnych punktów pomiarowych. Wzory te są zamieszczone w pracy Mitchella i Wyndhama /1969/.

Obserwowana średnia temperatura skóry \bar{T}_s^* , w warunkach mieszkaniowych wynosiła $31.9 \pm 0.9 \text{ }^\circ\text{C}$, średnia z wartości \bar{T}_s , przewidywanych dla tych warunków, wynosiła 32.4 ± 1.5 . Na podstawie przeprowadzonego testu Studenta, przy poziomie istotności $\alpha = 0.05$ można uznać, że średnie te są równe.

Średnia temperatura czoła obserwowana u osób badanych wynosiła 33.4 ± 1.0 .

Tabela 9.

Dane dotyczące mieszkań, w których przeprowadzono test fizjologiczny

płeć	Wiek	T_a	T_r	Φ	I_{cl}	T_l czoła	T_s	T_s	Y	PMV
		[°C]	[°C]	%	[clo]		[°C]	[°C]	ASHRAE	ASHRAE
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
K	30	24.6	25.0	54	0.50	34.4	32.2	34.0	4	4
K	20	24.8	25.0	66	0.43	35.4	32.0	33.7	5	4
K	30	25.6	27.3	55	0.53	35.1	33.6	35.6	6.	5
K	50	24.4	22.5	61	0.54	32.7	32.9	32.9	4	3
K	20	21.2	24.0	68	0.39	34.0	31.9	31.5	6	3
M	20	24.8	25.4	55	0.36	33.9	32.2	31.2	5	3
K	20	22.8	24.7	59	0.37	34.4	32.3	32.2	4	3
K	50	24.0	26.3	52	0.54	33.7	31.2	34.6	4	4
K	60	22.4	24.7	60	0.47	34.9	32.3	32.8	4	3
K	30	19.8	22.9	78	0.70	34.4	31.8	32.5	4	3
M	20	19.4	21.8	82	1.0	34.4	32.4	31.9	2	3
K	20	19.2	21.3	66	0.25	33.4	31.0	28.3	3	1
M	40	19.8	21.0	60	0.88	32.2	30.8	32.5	3	3
K	20	21.8	23.0	62	0.51	33.9	32.4	31.9	3	3
M	30	21.2	24.1	59	0.53	32.0	31.4	32.4	4	3
K	70	19.6	21.0	61	0.76	33.4	30.6	31.6	3	3
M	20	20.8	21.0	48	0.85	33.1	31.8	32.5	2	3
M	70	20.2	21.8	60	0.92	32.2	31.5	33.0	1	3
K	70	20.2	22.0	55	0.37	32.0	30.7	29.8	4	2
K	60	21.6	24.0	53	0.62	33.7	33.1	32.9	4	3
M	40	19.6	22.3	49	0.59	32.7	32.4	31.1	3	2

Tabela 9 c.d.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
22	K	60	21.6	23.8	46	0.46	32.2	31.3	31.8	4	3
23	K	70	20.8	22.9	57	0.53	31.0	30.1	31.6	4	3
24	K	20	21.8	23.8	49	0.64	32.7	30.9	33.0	4	3
25	M	20	22.8	24.7	53	0.48	33.4	31.9	32.9	2	3
26	M	30	20.0	23.0	48	0.53	33.3	32.5	33.7	4	4
27	K	50	19.8	23.0	54	0.61	32.7	31.0	31.7	4	3
28	K	30	21.8	24.1	55	0.37	33.4	33.5	34.3	5	4
29	K	20	21.2	22.0	56	0.40	34.2	31.9	30.4	3	2
Wartości średnie							33.4	31.9	32.4	3.72	3.07
Odchylenie standardowe							1,0	0.9	1.5	1.13	0.75

Y oznacza ocenę podawaną przez respondenta

PMV-ocena spodziewana na podstawie teorii Fanger'a (1970).

Średnia ocena odczuć termicznych Y, podawana przez respondentów, wynosiła 3.72 ± 1.13 , a średnia z wartości PMV, obliczanych dla poszczególnych mieszkań, wynosiła 3.07 ± 0.75 . Wartości Y i PMV są statystycznie tożsame przy poziomie istotności $\alpha = 0.05$.

D Y S K U S J A

1. Model biofizyczny

Proponowana w niniejszej pracy metoda umożliwia przewidywanie stanu termicznego ustroju na podstawie znajomości parametrów mikroklimatycznych, izolacyjności odzieży i grubości tkanki tłuszczowej. Metoda ta wymaga jednak dość czasochłonnych obliczeń. Z praktycznego punktu widzenia interesującym byłoby podanie prostego sposobu na szybkie przewidywanie obciążenia układu termoregulacji człowieka w danym środowisku. Ponieważ zmianą fizjologiczną, świadczącą ewidentnie o wielkości tego obciążenia, jest wzrost produkcji metabolicznej - najprościej jest przyjąć ten właśnie czynnik jako kryterium stanu termicznego organizmu w środowisku chłodnym.

Uproszczenie modelu dla celów praktycznych wymaga zastanowienia się nad wpływem poszczególnych parametrów fizycznych i fizjologicznych na wielkość reakcji ustroju. Obliczenia wykazują, że zmiana wilgotności względnej od 0 do 80 % wpływa na produkcję ciepła metabolicznego i temperaturę skóry w niewielkim tylko stopniu. δM wynosi ok. 2 - 3 W m⁻², a δT_s - 0.1 °C. Jest to zrozumiałe, jeśli weźmie się pod uwagę fakt, że w środowisku o niskiej temperaturze, kiedy nie występuje pocenie termoregulacyjne, praktycznie cała woda dyfundująca przez skórę, jak również woda wydalana przez drogi oddechowe, ma możliwość odparowania, gdyż są to w sumie ilości niewielkie.

Metaboliczna produkcja ciepła, odpowiadająca danej aktywności ruchowej w środowisku termoneutralnym, w odniesieniu do jednego metra kwadratowego powierzchni ciała, (M_o), jest wartością zmienia-

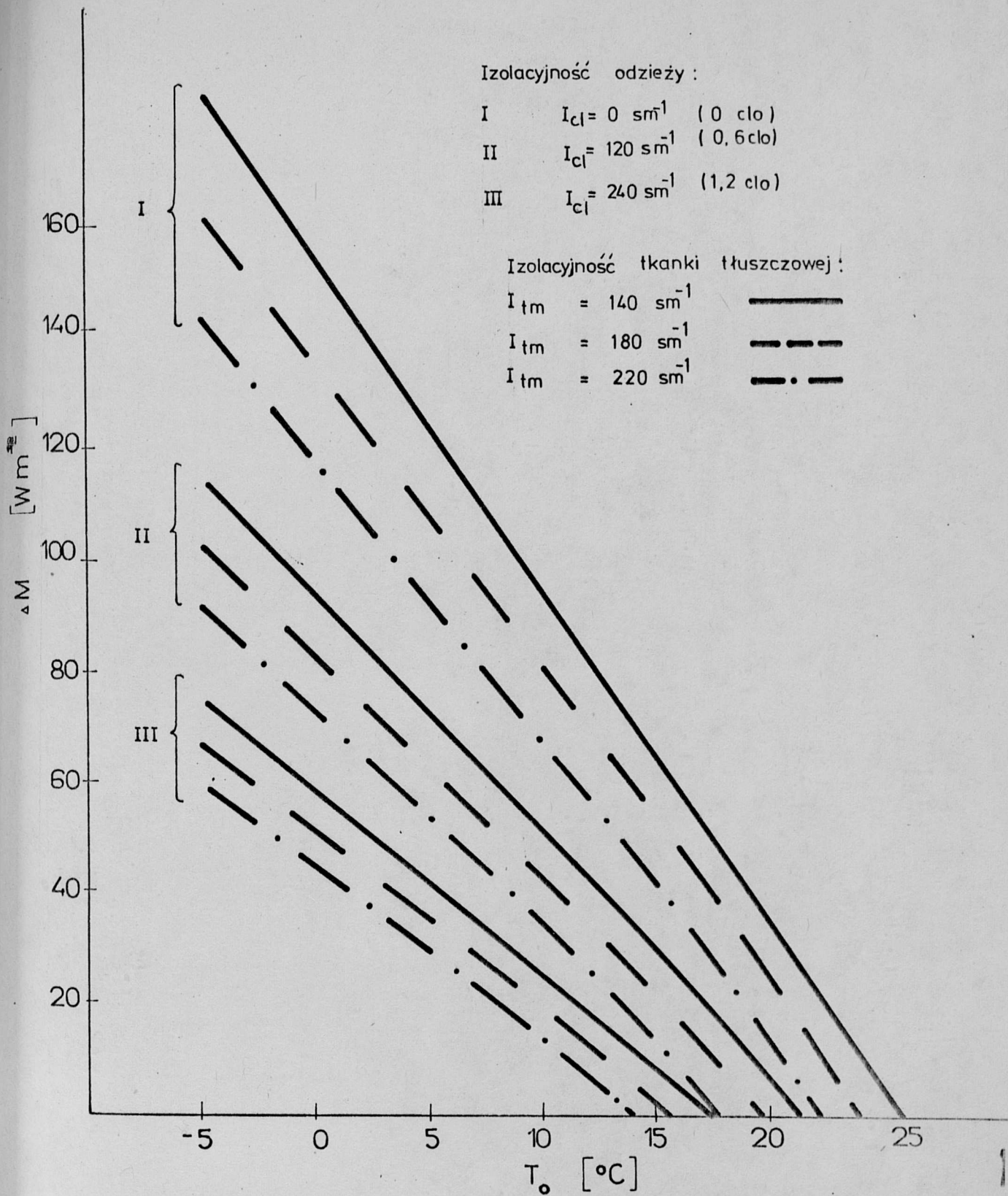
jącą się niewiele, (Fanger 1970). Do przybliżonego szacowania stanu termicznego ustroju, za M_o można przyjąć wartość stałą, odpowiednią dla danej czynności.

Wpływ pozostałych parametrów fizycznych i fizjologicznych na bilans cieplny człowieka obrazuje rys.10. Wykonany on został dla poziomu produkcji metabolicznej 58 W m^{-2} , obejmuje przedział temperatur od -5 do $+20 \text{ }^\circ\text{C}$, a parametrami są: grubość tkanki tłuszczowej (1.9, 3.7, 5.5 mm) oraz izolacyjność odzieży (0, 0.6 i 1.2 clo).

Połączenie maksymalnej izolacyjności tkanek (I_{tm}), określonej wzorem /51/, oraz izolacyjności odzieży (I_{cl}) w jedną wspólną (I_c), dało możliwość skonstruowania prostych nomogramów siatkowych, rys. 11 i 12. Na osiach tych nomogramów stosowane są najwygodniejsze w tym wypadku jednostki $[\text{s m}^{-1}]$.

Przy pomocy tak skonstruowanych nomogramów można szybko ocenić stan termiczny danego osobnika, ubranego w odzież o określonej izolacyjności. Przykładowo, dla osoby o grubości tkanki tłuszczowej 4 mm (co odpowiada maksymalnej izolacyjności fizjologicznej 188 s m^{-1}), ubranej w odzież o izolacyjności 180 s m^{-1} (0.9 clo) i przebywającej w otoczeniu o temperaturze operatywnej $T_o = 0^\circ\text{C}$, wzrost produkcji metabolicznej osiągnie wartość 28 W m^{-2} . Powyższy nomogram został skonstruowany dla osób o grubości tkanki tłuszczowej do 6 mm, a więc o budowie szczupłej i normalnej.

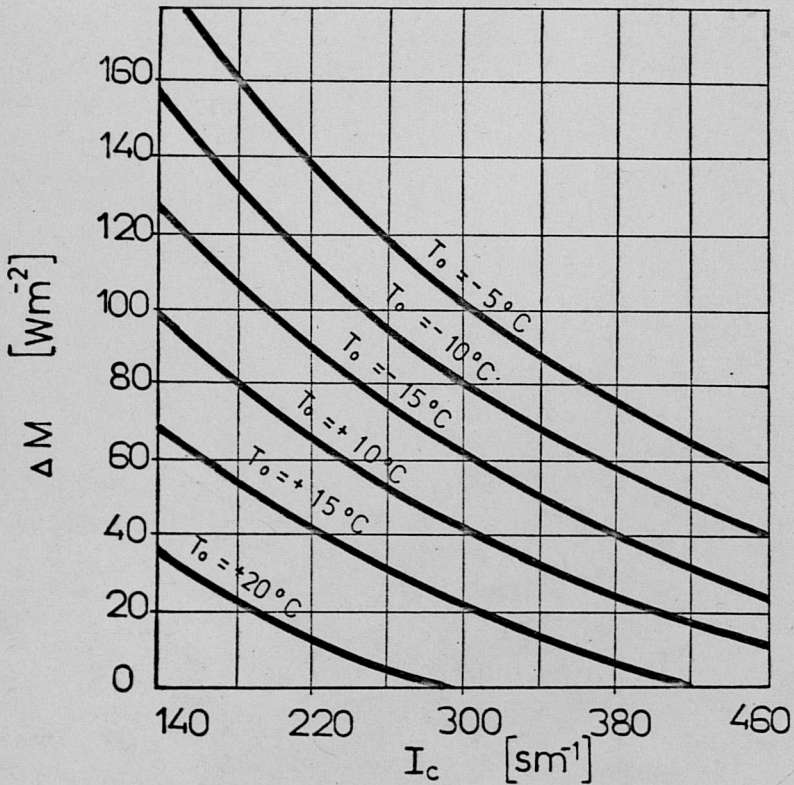
Obciążenie układu termoregulacji, wyrażone w środowisku zimnym przede wszystkim wzrostem produkcji ciepła metabolicznego, zależy od wielu czynników. Na podstawie przeprowadzonych uprzednio rozważań, możemy zauważyć, że najistotniejszymi z tych czynników są: operatywna temperatura otoczenia (T_o), maksymalna izo-



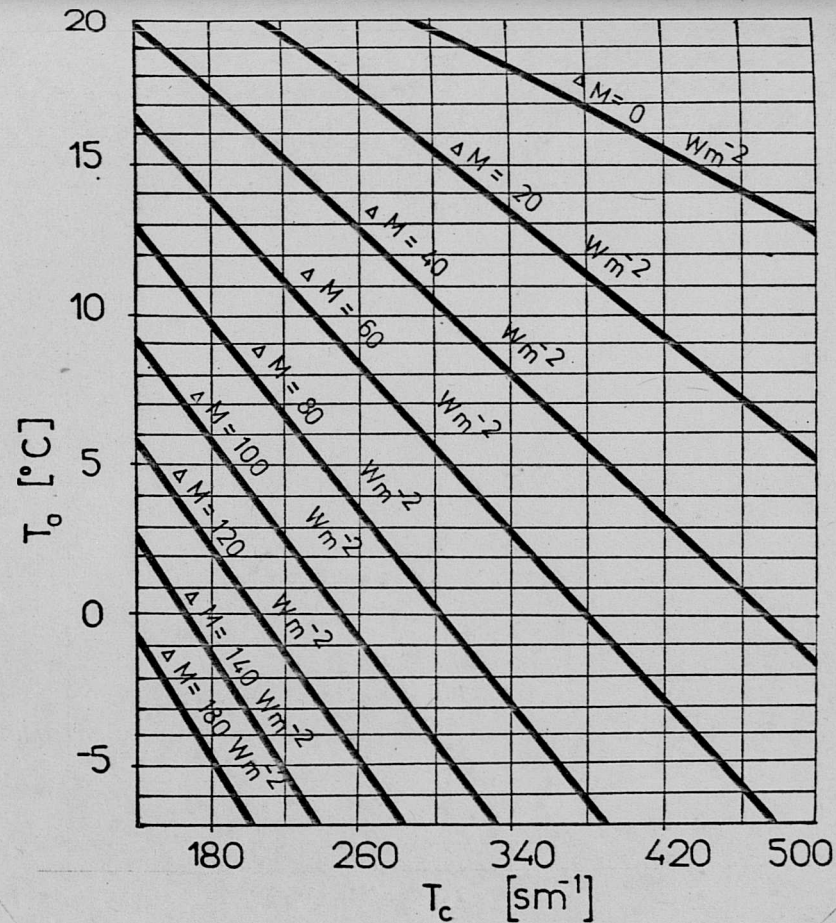
Rys. 10. Wpływ parametrów fizycznych i fizjologicznych na bilans cieplny człowieka.

T_0 - temperatura operatywna otoczenia,

ΔM - termoregulacyjna produkcja ciepła (obciążenie układu termoregulacji).



Rys. 11.



Rys. 12.

Nomogramy do wyznaczania termoregulacyjnego wzrostu produkcji ciepła (ΔM).

$I_c = I_{tm} + I_{cl}$ jest izolacyjnością całkowitą (tkanek + odzieży).

Nomogramy opracowano dla osób o grubości tkanki tłuszczowej do 6 mm, (osobnik szczupły i normalny).

lacyjność fizjologiczna ciała (I_{tm}), izolacyjność odzieży (I_{cl}) oraz stan aktywności organizmu (M_0). Jeśli model przewidywałby stan termiczny ustroju w szerokim zakresie zmienności wyżej wymienionych parametrów, to byłby modelem idealnym. W praktyce należy się liczyć z tym, że dla ludzi otyłych wartości \bar{T}_s i ΔM mogą odbiegać od rzeczywistych. A jest to spowodowane możliwością zaburzeń w przemianie materii, co jest często u tego typu osób spotykane. Również warunki mocno stressowe, np. nagi osobnik w temperaturze bliskiej zeru, mogą spowodować reakcje różne od przewidywanych z modelu. U osobnika niezaaklimatyzowanego nie wystąpi tak duża produkcja ciepła metabolicznego, która pozwoliłaby na zachowanie temperatury wewnętrznej ciała na niezmiennym poziomie. Wielkość produkcji metabolicznej w środowisku zimnym zależy od wspomnianego już stopnia zaaklimatyzowania, od sposobu żywienia (rodzaj diety: węglowodanowa, białkowa, tłuszczowa) oraz od właściwości organizmu. Maksymalna wartość przemiany materii, obserwowana u ludzi zaaklimatyzowanych i będących w stanie równowagi cieplnej, wynosiła ok. 170 W m^{-2} (Burton i Edholm, 1969). Zakładając, że nie wykonywali oni żadnej pracy fizycznej, termoregulacyjny wzrost produkcji ciepła wynosił u nich ok. 110 W m^{-2} . Na podstawie rys. 10, możemy więc określić najniższą temperaturę otoczenia, w jakiej możliwe jest jeszcze przeżycie nagiego człowieka. Wzrost produkcji ciepła metabolicznego $\Delta M = 110 \text{ W m}^{-2}$ wystąpi w temperaturze otoczenia ok. $+5^\circ\text{C}$. Zrozumiałe stało się więc zjawisko życia nagich ludzi w temperaturach bliskich zeru. Buszmeni z pustyni Kalahari, pomimo cienkiej tkanki tłuszczowej i braku ubioru, bez kłopotu znoszą dotkliwe chłody w nocy. (Jethon 1977). Również tubylcy z okolicy Alice Springs (Australia Centralna), nie używając niemal żadnego okrycia, żyją na obszarach,

gdzie panują temperatury od -4°C do $+37^{\circ}\text{C}$, (Jethon, 1977). Wulsin /1949/ donosi o plemionach z Ziemi Ognistej doskonale znoszących nago temperatury poniżej zera. U osobników niezaaklimatyzowanych, jak wspomniano wyżej, niemożliwe jest utrzymanie równowagi cieplnej w tak stressowych warunkach. Objawia się to obniżeniem temperatury wewnętrznej ciała. To z kolei powoduje zmniejszanie i tak już niskiej przemiany materii. Wystąpi więc zagrożenie homeostozy organizmu.

Pomijając warunki krańcowe, organizm skutecznie broni się przed oziębieniem i można uznać, że nie wystąpi obniżenie temperatury wewnętrznej (temperatury podwzgórza). Jednak Rewerski /1972/, na podstawie prac własnych i Bezingera podaje, że aby wzrost metabolizmu w ogóle wystąpił, temperatura podwzgórza nie powinna być wyższa niż 37.1°C . Model zaproponowany w tej pracy nie wyklucza możliwości lekkiego spadku temperatury wewnętrznej, koniecznego do zapoczątkowania reakcji termoregulacyjnej, gdy osoba badana przebywa w środowisku o niskiej temperaturze. Zakłada on jednak, że wielkość reakcji metabolicznej będzie zależała od temperatury wewnętrznej równej 37°C , gdyż utrzymanie na takim właśnie poziomie jest zadaniem układu termoregulacji. Wyjątek mogą stanowić osobnicy o temperaturze stale odbiegającej od wyżej podanej wartości. Wówczas należy to we wzorach uwzględnić.

Podany w ramach niniejszej pracy model zakłada, że wzrost metabolicznej produkcji ciepła jest wprost proporcjonalny do wielkości spadku temperatury skóry poniżej wartości krytycznej. Potwierdzają to m.in. ostatnie doświadczenia Tanaki /1978/. Autor prowadził obserwacje reakcji termicznych organizmu u pięciu osobników. Ubrano ich w ciepłą odzież ochronną i wystawiono

na działanie temperatur: 0° , -10° i -15°C . Z badań tych wynika, że już po 5 minutach ekspozycji w niskiej temperaturze, przyrost produkcji metabolicznej był ściśle skorelowany ze zmianą temperatury skóry (współczynnik korelacji $r = 0.89$). Wprawdzie do świadczenia Bugueta /1976/ wykazały drżenie mięśniowe u ludzi o termoneutralnych temperaturach skóry i stałej temperaturze rektalnej, ale dotyczyło to specyficznego przypadku. Ludzie ci przebywali w ciepłych śpiworach w bardzo niskiej temperaturze powietrza, wynoszącej -35°C . Autor tłumaczy wyniki swojej pracy przeciwprądową wymianą ciepła między tętnicą i żyłą szyjną. W czasie eksperymentu część głowy badanego była wystawiona na bezpośrednie działania niskiej temperatury. Ochładzanie dróg oddechowych powodowało kierowanie impulsów wprost do ośrodka w podwzgórzu.

2. Dokładność metody

Podany w niniejszej pracy model dość dokładnie przewiduje stan termiczny ustroju. Obserwowane na rys. 4 różnice temperatur do 1.9°C , oraz na rys. 6 różnice wielkości produkcji metabolicznej, osiągające odchylenie 19 W m^{-2} , wynikają ze stosowania w trakcie obliczeń wartości przybliżonych. Odnosi się to do współczynnika konwekcji, izolacyjności odzieży, maksymalnej izolacyjności fizjologicznej oraz kosztu energetycznego danej czynności. Aby oszacować wynikający stąd bezwzględny błąd maksymalny przewidywanych wartości \bar{T}_s i ΔM , przyjęto, że błędy w określaniu wyżej wymienionych parametrów mogą osiągać wartości :

i. I_{tm} : 20 %, na podstawie pracy Kollias i in./1974/,
dotyczącej obliczania izolacyjności fizjologicznej na podstawie grubości tkanki tłuszczowej,

ii. I_{cl} : 20 %, na podstawie pracy Nishi'ego i in. /1978/,

iii. h_C : ± 1 /ok.30 %/, na podstawie tabeli 5,

IV . M_o : ± 4 W m⁻², na podstawie pracy Pandolfa i in. /1977/,
dotyczącej przewidywania energetycznego kosztu stania.

Obliczono wpływy tych błędów na wartości końcowe \bar{T}_s i ΔM_s , dla izolacyjności małych (0.6 clo) i dużych (1.5 + 2.0 clo), dla trzech stosowanych w doświadczeniu zakresów temperatur otoczenia. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Oszacowanie wielkości błędów

Parametr i błąd jego określenia	$\delta \bar{T}_s$ [°C] dla:		$\delta \Delta M_s$ [W m ⁻²]	
	$I_{cl} = 0.6$ clo	$I_{cl} = 2$ clo	$I_{cl} = 0.6$	$I_{cl} = 2$ clo
I_{tm} 20 %	0,8	1,3	3	4
I_{cl} 20 %	0.2	0.3	3	5
h_C ± 1	0.3	0.2	7	5
M_o ± 4	0.3	0.3	4	4
błąd sumaryczny	± 1.6	± 2.1	± 17	± 18

W tabeli 10 nie umieszczono wpływu współczynnika promieniowania (h_r) oraz temperatury operatywnej (T_o). Jak wykazały obliczenia, błąd wynikający z niedokładności określenia tych parametrów jest mniejszy niż dokładność rachunków.

Maksymalny błąd spowodowany przyjmowaniem do obliczeń przybliżonych wartości I_{tm} , I_{cl} , h_c i M_o , ocenia się na około 18 W m^{-2} dla produkcji metabolicznej i na $1.6 \pm 2.1^\circ\text{C}$ dla temperatury skóry. Na rys. 5, wskutek stosowanej metody określania metabolizmu "obserwowanego", wyeliminowano błąd pochodzący od I_{cl} , h_c i M_o . Występujące odchylenia ok. 5 W m^{-2} , są spowodowane błędem oszacowania izolacyjności tkanek (I_{tm}) oraz błędem pomiaru i obliczania średniej temperatury skóry.

Wartości eksperymentalne temperatury i ciepła obarczone są pewnym, trudnym do oszacowania błędem wynikającym z tego, że za wielkość średnią przyjmuje się średnią ważoną. Błąd może osiągać dużą wartość zwłaszcza w wypadku pomiarów gęstości strumienia ciepła na podstawie czterech tylko punktów, (co było podyktowane możliwościami aparaturowymi). Należy pamiętać również o tym, że wyniki z eksperymentów prowadzonych na organizmach żywych, mogą być obarczone dużymi błędami przypadkowymi. Badania Boudewyns'a /1976/ wykazują, że możliwe są odchylenia w reakcji organizmu, spowodowane czynnikami natury psychologicznej. Zeiner i Pollak /1976/ mówią nawet o świadomej kontroli temperatury skóry.

Uproszczenie modelu do postaci nomogramu (rys. 11 i 12), jest związane z powstaniem dodatkowego błędu, wynikającego z połączenia izolacyjności tkanek i izolacyjności odzieży. Błąd spowodowany jest tym, że utrata ciepła na odparowanie wody dyfundującej przez skórę zależy od izolacyjności odzieży (I_{cl}), a nie izolacyjności całkowitej (I_c). A tymczasem danej izolacyjności całkowitej $I_c = I_{cl} + I_{tm}$, może odpowiadać wiele różnych izolacyjności odzieży.

Krzywe na nomogramach są poprowadzone tak, że błąd stąd wynikający rozkłada się równomiernie po obu jej stronach. Jego wartość maksymalną oszacowano na ok. 3 % wartości M , a więc jest to wielkość z punktu widzenia fizjologii zanedbywalna. Charakter tego błędu jest powodem, dla którego dany nomogram nie może obejmować szerszego zakresu grubości tkanek tłuszczowych, gdyż wywołałby do dalsze zmniejszenie dokładności. Dla ludzi o grubszych tkankach tłuszczowych należy skonstruować nowy, przesunięty wzdłuż osi ΔM , nomogram.

Jak wykazała wstępna próba przyporządkowania termoregulacyjnego wzrostu produkcji ciepła skali odczuć termicznych, zmiana o wartość ± 1 na skali ASHRAE była skorelowana ze zmianą ΔM , równą ok. 30 W m^{-2} . Analogicznie wygląda sytuacja dla średniej temperatury skóry. Skok o ± 1 na skali odczuć termicznych odpowiada dwustopniowemu przedziałowi temperatury, (Jethon i in. 1973).

Na podstawie przeprowadzonych wyżej rozważań, można wnioskować, że proponowana w niniejszej pracy metoda jest wystarczająco dokładna, aby skutecznie ocenić stan termiczny danego osobnika.

3. Temperatura krytyczna otoczenia

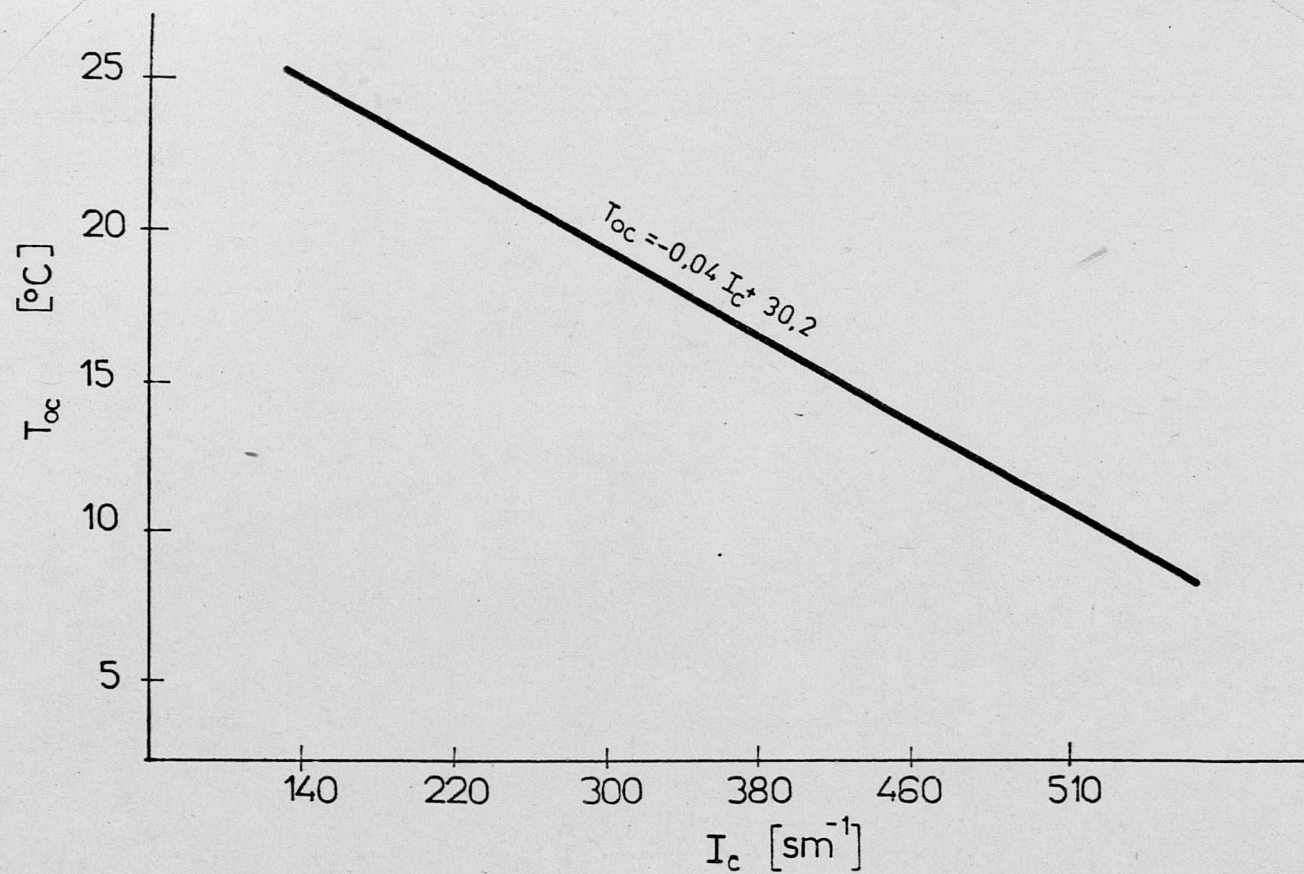
Temperatura krytyczna otoczenia jest ściśle związana z obciążeniem układu termoregulacji. Poniżej tej temperatury występuje wzrost produkcji ciepła metabolicznego. Wysokość temperatury krytycznej dla danego osobnika zależy od wartości jego maksymalnej izolacyjności fizjologicznej, a więc od grubości tkanki tłuszczo-

wej oraz od izolacyjności odzieży. Na rys. 13 pokazano zależność krytycznej temperatury otoczenia od sumarycznej izolacyjności ciała $I_c = I_{tm} + I_{cl}$, dla przemiany metabolicznej 58 W m^{-2} . Rysunek ten wykonano na podstawie przedstawionego w tej pracy modelu bilansu cieplnego. Przykładowo, dla człowieka ubranego w przeciętną domową odzież, o izolacyjności 120 s m^{-1} (0.6 clo), temperaturą krytyczną otoczenia będzie:

18°C - jeśli grubość tkanki tłuszczowej jest $d_f = 5.5 \text{ mm}$,
($I_{tm} = 220 \text{ s m}^{-1}$),

21°C - przy grubości tkanki tłuszczowej $d_f = 1.9 \text{ mm}$,
($I_{tm} = 140 \text{ s m}^{-1}$).

Dla człowieka nagiego, przebywającego w pozycji leżącej ($M_o = 47 \text{ W m}^{-2}$), krytyczną temperaturę otoczenia możemy określić bezpośrednio z równania /38/, podanego w rozdziale I. Temperatura ta będzie się zmieniała od ok. 27°C dla osobnika szczupłego ($d_f = 1.9 \text{ mm}$) do 21°C dla osobnika otyłego ($d_f = 10 \text{ mm}$). Wartości te pokrywają się danymi zamieszczonymi w pracy Geny i Clarka /1978/ oraz z wynikami eksperymentalnymi, uzyskanymi przez Wilkersona /1972/. Przeprowadził on badania na pięciu osobnikach o różnej budowie ciała. Osoby badane, ubrane tylko w szorty, przebywały w pozycji leżącej w pomieszczeniu, którego temperaturę zmieniano w zakresie od 28°C do 8°C . W czasie doświadczenia mierzono parametry środowiska zewnętrznego oraz temperaturę skóry, metabolizm i temperaturę wewnętrzną osób badanych. W wyniku eksperymentu otrzymano wartość temperatur krytycznych od 21.7 do 27.1°C , w zależności od osobnika. Dokładne porównanie nie jest możliwe, gdyż autor cytowanej pracy nie podał grubości tkanek tłuszczowych, a jedynie wzrost i wagę osób biorących udział w doświadczeniu.



Rys. 13. Krytyczna temperatura otoczenia w funkcji izolacyjności całkowitej.

$$I_c = I_{tm} + I_{cl}, \quad M_o = 58 \text{ W m}^{-2}.$$

Na podstawie powyższych rozważań można zauważyć, jak znaczną rolę odgrywa tkanka tłuszczowa w ochronie organizmu przed zimą. Potwierdza to również praca Timbala i in. /1976/. Autorzy obliczają, że oziębienie ciała do temperatury 35°C , w wodzie o temperaturze 15°C , wystąpi u człowieka otyłego po ok. 5 godzinach, podczas gdy szczupły osiągnie tę temperaturę już po 40 minutach. Żaden z nich nie jest jednak w stanie utrzymać równowagi termicznej ustroju, z powodu ogromnych strat ciepła, jakie zachodzą w środowisku wodnym na drodze przewodzenia i konwekcji.

3.4. Izolacyjność odzieży

W trakcie obliczeń stosowano podany wcześniej wzór Sprague'a i Munsona /1974/. Zależność ta /56/ została opracowana w wyniku badań eksperymentalnych, przeprowadzonych na manekinie. Nishi i in. /1977/ w celu sprawdzenia dokładności tej metody, przeprowadzili badania na ludziach z różnych grup wiekowych. Wyniki badań pozwoliły im na stwierdzenie, że wzór Sprague'a daje wartość o 20 % za dużą. Cena (informacja prywatna, 1979), wykonał w Danii pomiary izolacyjności różnych zestawów odzieżowych. na manekinie Madsona. Wynik porównania wartości zmierzonych oraz obliczonych ze wzoru Sprague'a wprawdzie potwierdza sugestię Nishi'ego, ale tylko dla ubrań o izolacyjności większej niż 1 clo. Trudno jest jednak mówić o dokładnych wartościach izolacyjności obliczanych, gdyż w wyżej omówionym doświadczeniu, oprócz typowych elementów odzieży, stosowano również takie, których izolacyjności nie można było odczytać wprost z tabelic Seppanena /1972/. Ta sama sytuacja wystąpiła w trakcie

badania przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy. Napotkano na trudności w oszacowaniu izolacyjności kurtki wojskowej z podpin-
ką. Używana wartość 0.85 clo (170 s m^{-1}) jest więc wartością
przybliżoną. W tej sytuacji nie ma sensu stosowanie poprawki
Nishi'ego, gdyż błąd oszacowania pojedynczego fragmentu gar-
deroby (w tym wypadku kurtki), mógł osiągnąć porównywalną z tą
poprawką wielkość. Należy się więc liczyć z faktem, że stosowa-
ne w ramach doświadczeń zestawy odzieżowe, mogą mieć izolacyj-
ność oszacowaną z błędem większym niż zakładana, przez Sprague'a
dokładność 0.05 clo. Dotyczy to zwłaszcza zestawów I_3^* i I_7^* ,
(tabela 2). Zdecydowano się jednak stosować wyżej dyskutowany
wzór z dwóch powodów: Po pierwsze, jest to jedyna szybka metoda
na szacowanie izolacyjności bez jej pomiaru. Po drugie, błąd
oszacowania izolacyjności 20 % powoduje błąd w obliczaniu cie-
pła tylko ok. 6 % (Nishi 1977).

4.5. Energetyczny koszt stania

Fanger /1974/ podaje, za innymi badaczami, że dla człowieka
w pozycji stojącej produkcja ciepła metabolicznego wynosi 70 W m^{-2} .
I tę wielkość, w przybliżonych obliczeniach, większość badaczy
przyjmowała. Inne jednak wyniki uzyskano z ostatnich doświadczeń
przeprowadzonych przez Pandolfa i in. /1977/, oraz niezależnie od
nich, przez Garga i in. /1978/. Wykazały one, że dla człowieka
stojącego bez obciążenia, nie wykonującego żadnych prac manual-
nych, strumień ciepła metabolicznego wynosi od 1.5 W na kilogram
wagi ciała (Pandolf), do 1.68 W / kg (Garg). W przeliczeniu na m^2
powierzchni ciała daje to wielkość od 50 - do 60 W m^{-2} , w zależ-
ności od typu budowy osobnika.

Również Blaxter /1966/ podaje, że nakład energii zużytej na stanie w stosunku do energii zużytej w czasie leżenia, dla pozycji rozluźnionej, wynosi ok. 0.21 W kg^{-1} . Odpowiednie przeliczenie daje energetyczny koszt stania w wysokości 55 W m^{-2} . Wynik ten jest zbliżony do średnich wartości, otrzymanych ze wzoru Pandolfa dla osobników biorących udział w naszym doświadczeniu.

Odmienny wynik Fanger'a może być spowodowany wieloma przyczynami. Między innymi duży wpływ może dać inny rodzaj postawy stojącej np. "na baczność", jak również specyficznie dynamiczne działanie pokarmów.

6. Współczynnik konwekcji

W ciągu ostatnich lat przeprowadzono wiele badań eksperymentalnych i teoretycznych, mających na celu określenie współczynnika konwekcji. Przeważająca część z nich dotyczyła człowieka na giego i konwekcji wymuszonej.

Jak wykazali Mitchell /1972/, Monteith /1977/ oraz Stewart i Rensburg /1976/, prędkość przepływu powietrza w przypadku konwekcji wymuszonej może być dokładnie określona na podstawie teorii podobieństwa dla gładkich cylindrów. Zadawalające wyniki osiąga się również prowadząc obliczenia dla kuli, o średnicy proporcjonalnej do pierwiastka trzeciego stopnia z objętości zwierzęcia (Mitchell, 1976).

Konwekcja swobodna wokół człowieka została już dość dobrze rozpracowana jakościowo przy użyciu metody smug. Badania w tym kierunku prowadzili Cox i Clark /1973/, Clark i Cox /1974/ i Clark i Mullan /1978/. Dokładna analiza ilościowa przepływu ciepła jest możliwa przy zastosowaniu dla każdego poszczególnego

wypadku techniki sublimacji naftalenu Nishi'ego i Gaggego /1970/. Nie opracowano jeszcze jednak ogólnych równań, opisujących straty ciepła przez konwekcję swobodną. Można jednak, jak sugeruje Rapp /1973/, symulować ją dla nagiego człowieka przez użycie kuli o średnicy 0.75 m.

Aby porównać współczynnik konwekcji, otrzymany w wyniku oszacowań teoretycznych, przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy, z wartościami spotykanymi w literaturze, w tabeli 11 zestawiono eksperymentalne wartości współczynnika konwekcji dla człowieka lub manekina stojącego w normalnie wentylowanych pomieszczeniach, a w tabeli 12 - wzory empiryczne i teoretyczne, opisujące wymianę ciepła przy ruchu powietrza o małej prędkości.

Tabela 11. Eksperymentalne wartości współczynnika konwekcji dla osoby stojącej w normalnie wentylowanych pomieszczeniach ($v = 0.15 \text{ m s}^{-1}$).

Wartość h_c W $\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$	Zródło	Uwagi
1	2	3
4.8	Nelson, 1974	stojący człowiek, normalnie wentylowane pomieszczenie
4.0	Madson i Cena /1979/ informacja prywatna	manekin stojący
4.0	Nelson 1947	$v = 0.2, \Delta T = 14$
4.3.	Woodcock, Breckenridge, 1965,	stojący człowiek, $v = 0.15, \Delta T = 4$

c.d. Tab.11.

1	2	3
3.1	Nielsen, Pedersen, 1952	stojący manekin, konwekcja swob. $\Delta T = 5$,
4.2	"-	$\Delta T = 9$,
3.2	Goldman, 1967	stojący manekin,
2.11	Gagge, 1965	$v = 0.07$, $\Delta T = 12 \pm 7$, człowiek siedzący,
2.8	Tamari, 1972	$\Delta T = 5$, $v = 0.15$, model stojący,
3.2	Nishi, Gagge 1970	stojący manekin, $v = 0.15 + 0.2$.

Tabela 12. Wzory empiryczne i teoretyczne dla wartości współczynnika konwekcji swobodnej ($v = 0.1 \text{ m s}^{-1}$), oraz wartości współczynnika konwekcji dla typowych warunków eksperymentu.

Wzór w układzie SI	źródło	Wartość h_c dla $v = 0.1$ $T = 10$ $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
1	2	3
$1.16 (3 + 16 v^{0.5})$	Winslow i in. 1949	9.4
$8.7 v^{0.5}$	Nelson i in. 1947	2.8
$11.6 v^{0.8}$	Hall, 1950	1.8
$1.16 (2.3 + 7.5 v^{0.67})$	Colin, Houdas 1967	4.5
$0.703 + 8.94 v^{0.66}$	Stewart, Rensburg 1976	2.7
$8.6 v^{0.56}$	Gagge, Nishi, 1977	3.0
$2.4 (T_{cl} - T_a)^{0.25}$	Nielsen, Podersen, 1952	4.3
$6.08 v^{0.5} (1 + 0.01 \Delta T / v^2)^{0.25}$	Rapp, 1973	3.5

Jak widać z danych zawartych w tabelach 11 i 12, wartość współczynnika konwekcji h_c dla warunków konwekcji swobodnej zmienia się od 1.8 do 9.4 $W m^{-2}K^{-1}$, w zależności od badacza. W tej sytuacji słusznym było oparcie się na wynikach aktualnych badań w danej dziedzinie i oszacowanie go na podstawie teorii podobieństwa dla walca i kuli. Otrzymana wartość $h_c = 3$, jest w przybliżeniu wartością średnią wśród spotykanych w literaturze.

7. Materiał doświadczalny

Doświadczenia związane z pomiarami fizjologicznymi (nie wliczając grupy w budynkach) przeprowadzono z udziałem ośmiu osób (w tym 3 kobiety) w wieku 24 - 28 lat. Osoby te różniły się grubością tkanki tłuszczowej, która przyjmowała wartości od 1.8 do 5.8 mm. Jest to zakres odpowiadający osobnikom szczupłym, normalnym i mającym lekką tendencję do otyłości. Celowo nie użyto osób bardzo otyłych, gdyż u nich często występują zaburzenia przemiany materii. Pod innymi względami grupę można uważać za jednorodną: młodzi, zdrowi, niezaaklimatyzowani, prowadzący podobny tryb życia (studenci). Takie dobranie materiału doświadczalnego pozwala na uniezależnienie badanego zjawiska przepływu ciepła od czynników innych, niż interesująca nas izolacyjność termiczna ciała. Nie znaczy to jednak, iż należy się spodziewać jakiegokolwiek wpływu czynników takich, jak wiek, płeć, na samą metodę badawczą. Natomiast od rodzaju populacji mogą zależeć pewne wielkości fizjologiczne. Na przykład podstawowa przemiana materii zależy od wieku. Nie ma to jednak wpływu na samą metodę przewidywania stanu termicznego ustroju. Stosując ją do ludzi starszych czy dzieci, trzeba ich

metabolizm przy danej aktywności ruchowej znac. Ponieważ w ramach niniejszej pracy nie mierzono kosztu energetycznego danej czynności (gdyż nie to było jej celem), a korzystano ze wzoru empirycznego, sprawdzonego na populacji ludzi zdrowych i młodych, dlatego też podobną grupę użyto w celu weryfikacji proponowanego modelu.

W pracach, na podstawie których wyciąga się wnioski na temat populacji, niezbędne są badania przeprowadzone na dużej liczbie osób należących do tej populacji. Przykładem są tu eksperymenty Fangera /1970/. W celu zbadania wpływu na zakres stosowania równania komfortu cieplnego takich czynników jak wiek, płeć, cykl menstruacyjny, strefa geograficzna, przeprowadził on eksperyment na 256 osobach (64 starsze kobiety + 64 starszych mężczyzn + 64 młode kobiety + 64 młodych mężczyzn). Taka ilość osób badanych dała zresztą możliwość wyciągnięcia wniosku, że żadne z tych czynników, wbrew powszechnemu mniemaniu, nie mają wpływu na odczucia komfortu cieplnego. W celu zbadania rozkładu temperatury skóry w stanie komfortu cieplnego, Olesen i Fanger /1973/ przeprowadzili doświadczenie z użyciem 16 mężczyzn i 16 kobiet w wieku około 24 lat. Grupa była w miarę jednorodna (podobne ciężary ciała i wzrost). Osoby ubrane w odzież o izolacyjności 0.6 clo przebywały w pozycji siedzącej w pomieszczeniu, którego temperaturę dostosowano do ich życzeń. Na podstawie wyników powyższej pracy można wyciągnąć następujące wnioski: preferowana temperatura otoczenia wynosi 25.5°C zarówno dla mężczyzn jak i kobiet; średnia temperatura skóry w stanie komfortu wynosi 33.5°C dla obu płci, z tym, że kobiety wykazywały większą niejednorodność w rozkładzie temperatury skóry.

W przypadkach prac, w których bada się mechanizmy danych zjawisk, w eksperymentach bierze udział mniejsza ilość osób. Jest to podyktowane specyfiką tych badań. Na przykład w badaniach średniej temperatury skóry w zależności od intensywności wykonywanej pracy fizycznej, Lund i Gisolfi /1974/ użyli 6 osobników, biegających na bieżni z trzema różnymi prędkościami, przy trzech różnych temperaturach otoczenia. Również Nishi i Gagge /1970/, określając współczynnik konwekcji metodą sublimacji naftalenu, użył tylko 7 mężczyzn i manekinu. Mitchell et al. /1969/ badał wymianę ciepła przez konwekcję i promieniowanie na dwóch osobnikach. Jeździli oni z różną prędkością na rowerze przy pięciu temperaturach otoczenia. Na podstawie teorii i powyższego eksperymentu, Mitchell opracował uogólnione równania, opisujące wymianę ciepła między nagim człowiekiem a środowiskiem, dla temperatur powietrza od 10 do 50°C i prędkości wiatru od 0.5 do 5 ms⁻¹.

Również Tam et al. /1978/ przeprowadzili badania weryfikujące teorię Jacksona i Hammelsa o obniżaniu się "set point" w czasie wysiłku fizycznego. Doświadczenie przeprowadzono na dwóch osobach, jednej normalnej i jednej dotkniętej paraplegią. Osoby te przebywały w spoczynku lub wykonywały pracę fizyczną w temperaturach otoczenia od 20°C do 35°C. Na podstawie swoich doświadczeń, autorzy cytowanej pracy wyciągnęli szereg ważnych i ogólnych wniosków, mimo użycia tylko dwóch osobników.

Jeszcze mniejszej ilości materiału doświadczalnego w sensie liczby badanych osobników wymagają prace, w których porównuje się model opracowany na podstawie przesłanek teoretycznych z wynikami doświadczeń. Nadel i in. /1971/ porównywali model matematyczny opisujący lokalne tempo wydzielania potu (w zależności od

średniej temperatury skóry, temperatury skóry lokalnej i temperatury wewnętrznej) z wynikami doświadczeń przeprowadzonych na 6 mężczyznach. Poddawano ich działaniu temperatur powietrza od 25 do 35°C oraz dodatkowo nagrzewano niektóre miejsca na powierzchni skóry specjalnymi lampami, tak jak w niniejszej pracy. Na podstawie otrzymanych wyników, możliwe było określenie współczynników liczbowych, występujących w równaniu teoretycznym. Rapp /1973/ sprawdził teoretyczny model przepływu ciepła przez konwekcję na pięciu przypadkach doświadczeń opisanych przez innych badaczy. Nishi i Ibamoto /1969/, porównując temperaturę skóry przewidywaną z modelu teoretycznego, z temperaturą skóry obserwowaną w doświadczeniu, użył dwóch osobników, ubranych w odzież o izolacyjności 0.3 clo i przebywających w temperaturach otoczenia od 26.4 do 38.4°C.

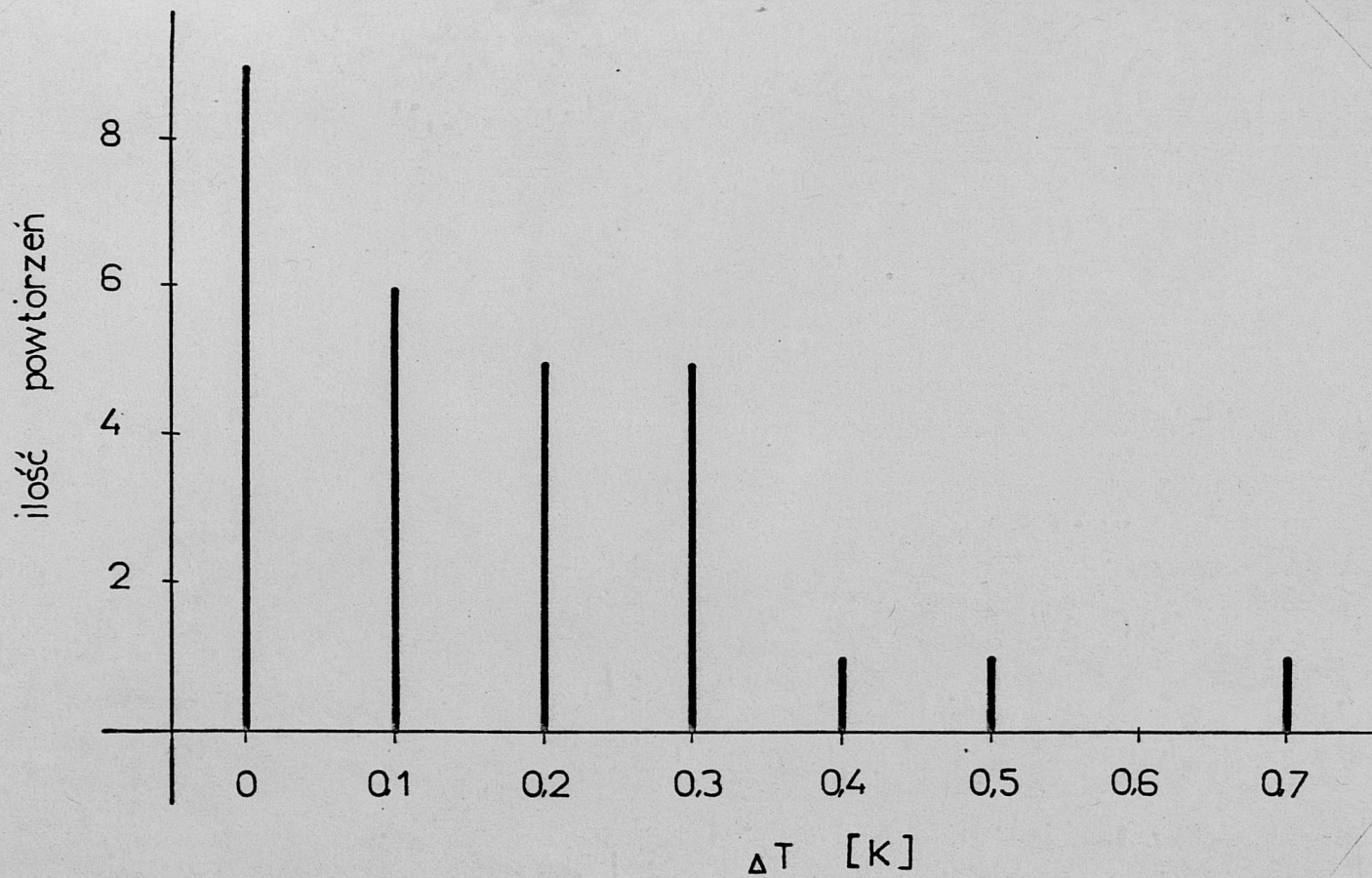
Również w niniejszej pracy, której celem było opracowanie metody przewidywania stanu termicznego człowieka (a więc jej specyfika jest zbliżona do pracy Nishi'ego), do weryfikacji modelu wystarczyłby jeden osobnik o znanej maksymalnej izolacyjności fizjologicznej oraz znanym koszcie energetycznym danej czynności. Rozszerzono jednak materiał doświadczalny do ośmiu osób między innymi dlatego, że maksymalną izolacyjność tkanek oraz koszt energetyczny stania określano na podstawie wzorów empirycznych. Zastosowanie większej ilości osób pozwala na bardziej równomierne rozłożenie błędów, spowodowanych powyższymi czynnikami. Natomiast w pomiarach wykonanych w budynkach mieszkalnych użyto odpowiednio statystycznie reprezentatywnej grupy zarówno ludzi jak i mieszkań.

8. Metoda pomiaru temperatury skóry

Termopary, służące do pomiaru temperatury skóry, mocowano za pomocą "poloplastu". Taki przyklepiec może zaburzać lokalną gospodarkę cieplną skóry poprzez izolację od otaczającego powietrza oraz hamowanie odparowywania wody. Aby poznać jego wpływ na mierzoną temperaturę skóry, porównano wskazania termopar przyklejanych "poloplastem" oraz specjalnym przyklepcem chirurgicznym amerykańskiej firmy 3M, mającym właściwości antyalergiczne i przepuszczalnym dla powietrza i pary wodnej. Pomiaru wykonano w czterech punktach ciała (czoło, ramię, policzek i dłoń) u siedmiu osób. Badani przebywali w temperaturze termoneutralnej i byli w stanie równowagi cieplnej. Wynik tego doświadczenia przedstawiono na rys.14. Jak widać, w czasie większości pomiarów nie obserwowano wpływu rodzaju przyklepca na wskazania termopar ($\Delta T = 0$). Różnica ΔT równa 0.1 ± 0.3 °C, pojawiająca się w pozostałych wypadkach, leży w granicach błędu pomiarowego zestawu.

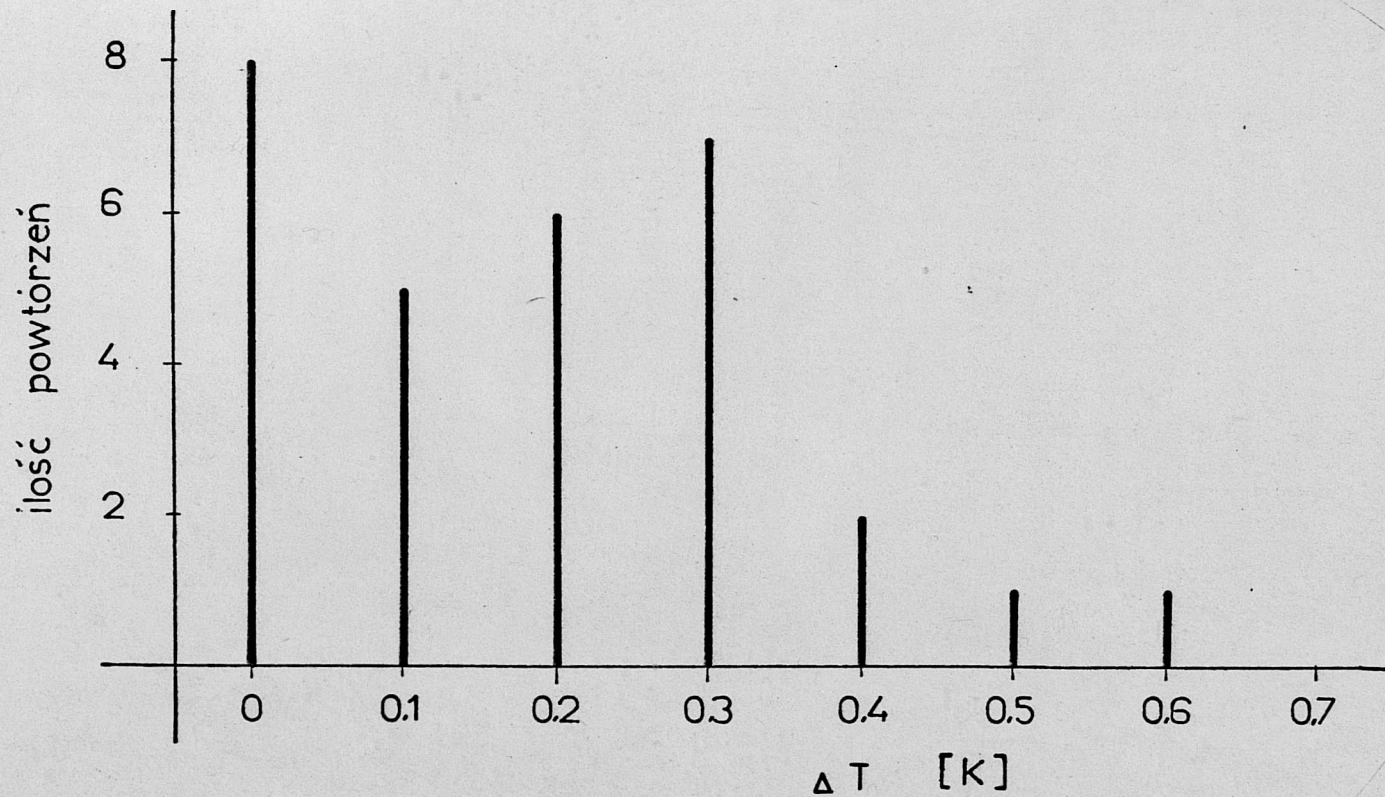
Porównano też metodę pomiaru temperatury skóry zestawem termopar z metodą pomiaru termometrem kontaktowym brytyjskiej firmy DIGITRON. Wyniki przedstawiono na rys. 15. Również i w czasie tego doświadczenia, najczęściej obserwowana różnica temperatur zawierała się w granicach od 0 do 0.3 °C, a więc była porównywalna z wielkością błędu pomiarowego.

Powyższe wyniki świadczą o tym, że temperatura skóry pod przyklepcem zależy bardziej od działania układu termoregulacji, sterowanego impulsami z całej powierzchni ciała, niż od lokalnej wymiany ciepła na małym (4 cm^2) obszarze. Do podobnych



Rys. 14. Wpływ rodzaju przylepca (poloplast, przylepiec firmy 3M), na obserwowaną wartość temperatury skóry.

ΔT - różnica wskazań zestawu termopar.



Rys. 15. Wpływ metody pomiaru na obserwowaną wartość temperatury skóry.

ΔT - różnica wskazań między zestawem termopar a termometrem kontaktowym firmy DIGITRON.

wniosków doszli Clark, Cena i Monteith /1973/, w wyniku badań nad lokalnym bilansem ciepła. Porównywali oni lokalny strumień ciepła suchego, przewidywany z podanego przez nich modelu, ze strumieniem mierzonym przy pomocy mierników Hatfielda. W wypadku pomiarów na człowieku, strumień mierzony osiągał zawsze wartości mniejsze niż przewidywany. Świadczy to o dodatkowej utracie ciepła przez odparowanie potu. Dyski Hatfielda, mimo że lokalnie zaburzają wymianę ciepła przez parowanie, dają wyniki związane ze średnim gradientem temperatury w zewnętrznych warstwach ciała. A więc mierzą raczej średnią utratę ciepła niż lokalną.

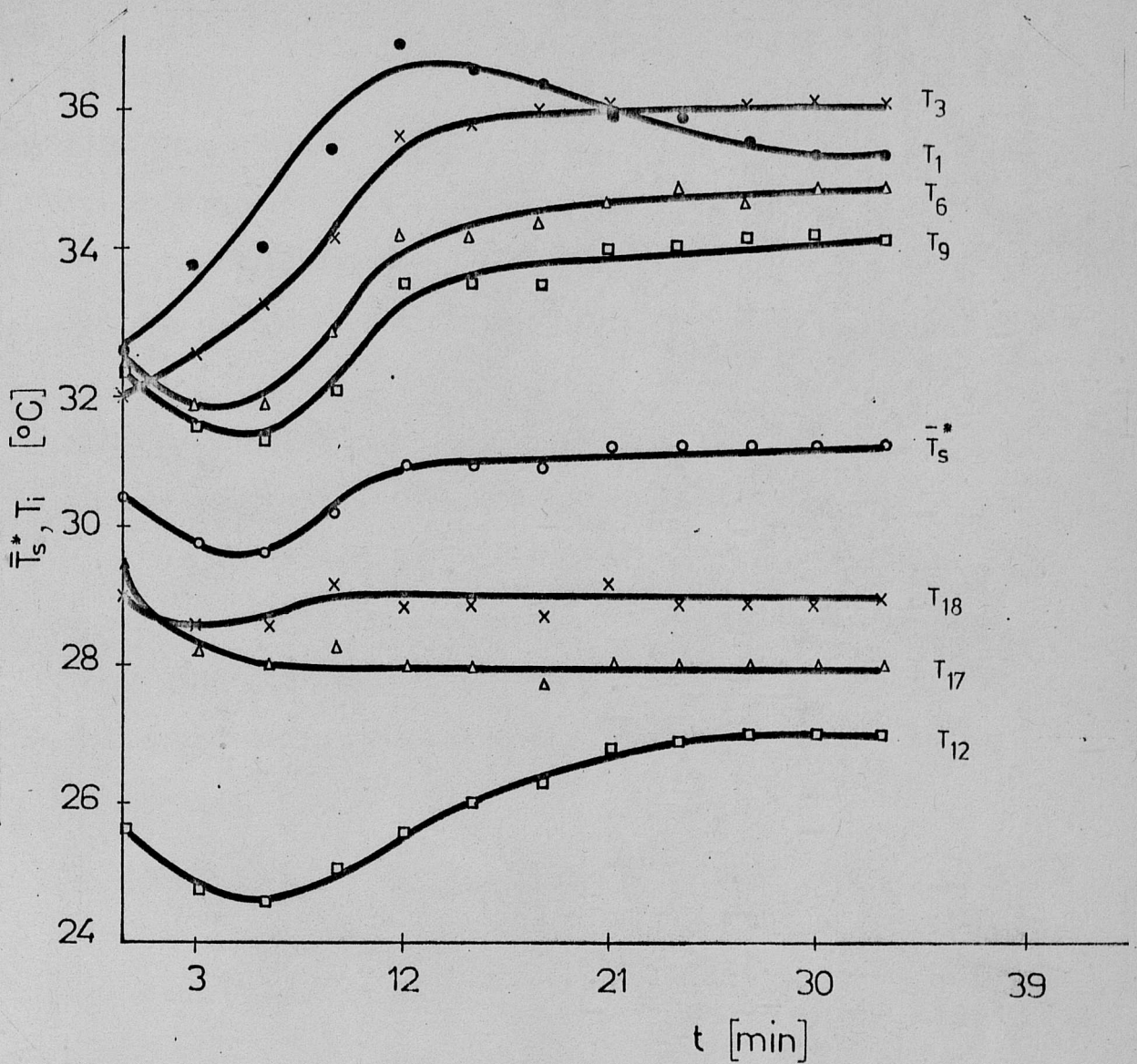
Omówione wyżej doświadczenie pozwoliło również na weryfikację cyfrowego termometru kontaktowego pod kątem przydatności do laboratoryjnych pomiarów temperatury skóry. Ze względu na większą pojemność cieplną czujnika tego termometru w stosunku do zestawu termopar oraz ciągłą zmianę wewnętrznej temperatury odniesienia, pomiar temperatury w danym punkcie wymagał stosunkowo długiego czasu. Czas ustalenia się wskazań wynosił 2-3 minuty (w zależności od wysokości temperatury ostatnio mierzonej), w porównaniu do około 30 sekund dla zwykłych termopar. Nasuwa się więc wniosek, że w razie potrzeby dokładnego pomiaru temperatury skóry w 15 punktach, wygodniejsze jest stosowanie zestawu termopar. Czas zużyty na ich mocowanie (ok. 10 min.) odzyskuje się na szybkości pomiaru. Rejestracja temperatury skóry w stanie nieustalonym również wymaga metody szybkiej. Jednak w warunkach polowych, ze względu na rozmiary miernika i łatwość odczytu, oczywiście znacznie korzystniejsze jest stosowanie termometru kontaktowego. Przewyższa on również tradycyjną metodę w wypadku pomiarów temperatury w małej ilości punktów.

9. Osiąganie stanu równowagi termicznej

Skokowa zmiana temperatury otoczenia lub izolacyjności odzieży powoduje równie nagłą zmianę mikroklimatu wokół człowieka. Dostosowanie się organizmu do nowych warunków wymaga jednak dłuższego czasu. Montgomery i Williams /1976/, na podstawie obserwacji zmian temperatury skóry, podają czas osiągnięcia stanu równowagi termicznej od 33 do 90 minut. Czas minimalny występuje w temperaturze otoczenia $T_a = 35^{\circ}\text{C}$. W temperaturach niższych i wyższych wydłuża się on średnio do około 60 minut. Houdas et al. /1972/ również podaje czas 60 min. dla wysokich temperatur powietrza. W późniejszej jednak pracy /1975/, sugeruje czas 30 minut jako wystarczający.

W celu sprawdzenia, ile takiego czasu potrzebuje organizm na osiągnięcie stanu równowagi w środowisku zimnym, przeprowadzono eksperyment z ciągłą obserwacją temperatury skóry we wszystkich punktach pomiarowych. Wyniki z niego, w formie wykresu, przedstawiono na rys. 16. Aby rysunek był czytelny, umieszczono na nim tylko wybrane punkty: T_1 - czoło, T_3 - szyja, T_6 - plecy, T_9 - brzuch, T_{12} - dłoń, T_{17} - łydka, T_{18} - stopa, \bar{T}_s - średnia temperatura skóry. Przebiegi dla pozostałych punktów ciała wyglądają podobnie.

Na podstawie rys.16 można zauważyć, że temperatura skóry nie maleje jednostajnie w czasie pobytu w chłodnym otoczeniu. Przechodzi ona przez minimum i ustala się na poziomie równym, a nawet wyższym niż w momencie zadziaływania niskiej temperatury. Może to świadczyć o działaniu termoregulacji fizjologicznej - wzroście napięcia i drżenia mięśniowego - czego wynikiem jest rozszerzenie obwodowych naczyń krwionośnych.



Rys. 16. Zmiany temperatury skóry w czasie pobytu w niskiej temperaturze otoczenia.

($T_a = -5^{\circ}\text{C}$, $I_{cl} = 1.5$ clo, osobnik J.M.).

- T_1 - temperatura na czole,
- T_3 - temperatura na szyi,
- T_6 - temperatura pod łopatką,
- T_9 - temperatura na brzuchu,
- T_{12} - temperatura na dłoni,
- T_{17} - temperatura na podudziu,
- T_{18} - temperatura na stopie,
- \bar{T}_s - średnia temperatura skóry.

Przebieg temperatury skóry na czole i szyi różni się od pozostałych prawdopodobnie dlatego, że miejsca te jako odkryte zareagowały szybciej i w momencie rozpoczęcia pomiaru (co miało miejsce po około 1 minucie od zadziałania stresu) były już w fazie rosnącej.

Na podstawie powyższego doświadczenia, jak również na podstawie obserwacji temperatury skóry pod łopatką podczas wszystkich innych badań, można się spodziewać, że w środowisku o niskiej temperaturze stan równowagi termicznej osiągnany jest po około 20-30 minutach. Sugestię tę potwierdza co najmniej tak samo szybkie ustalenie się wskazań mierników ciepła.

10. Temperatura skóry jako wskaźnik stanu termicznego organizmu

10.1. Środowisko chłodne

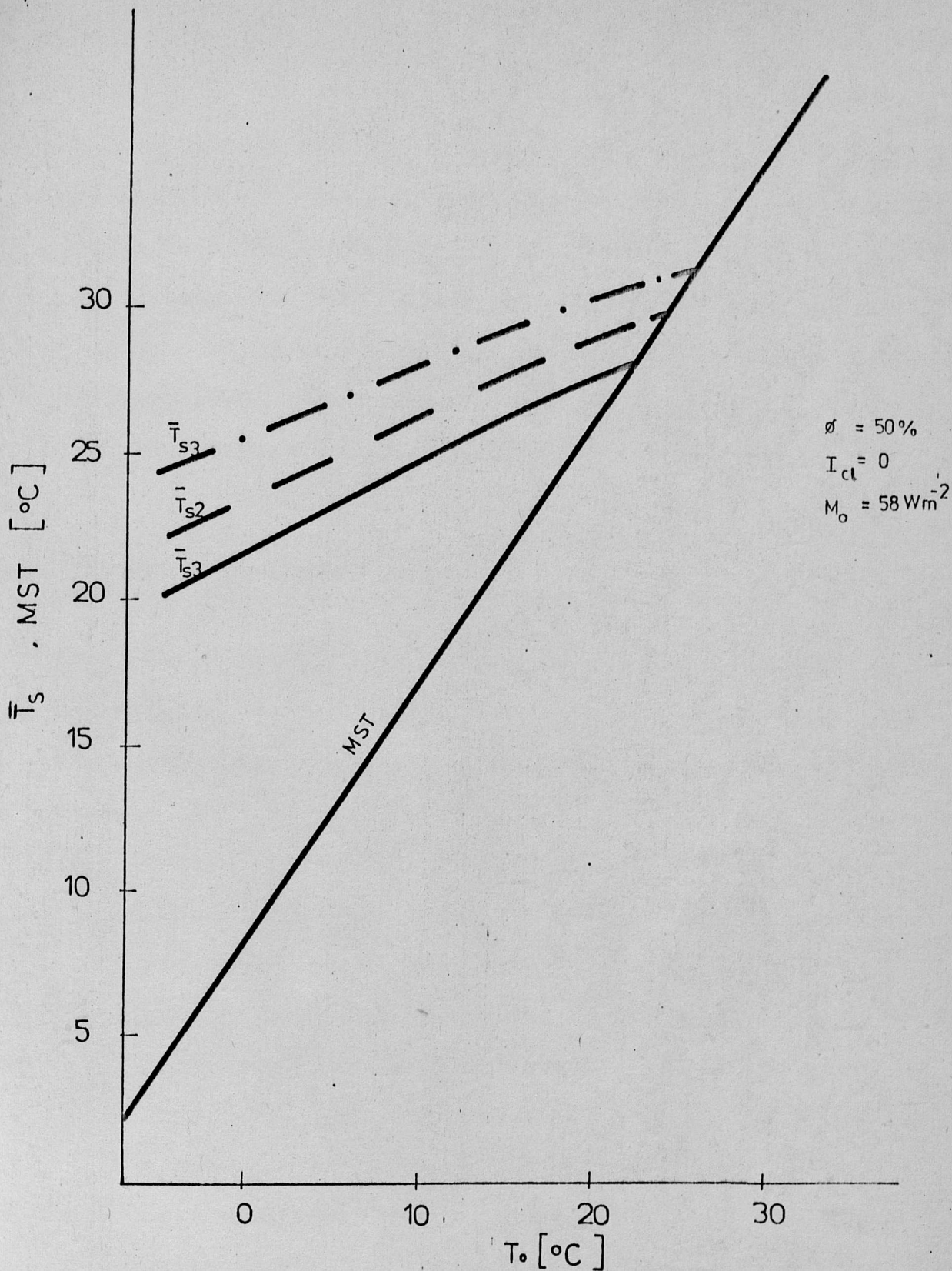
Powierzchnia skóry odgrywa istotną rolę w procesie wymiany ciepła między organizmem ludzkim a otoczeniem. Jej temperatura może świadczyć o stanie termicznym ustroju.

Yaglou już w 1927 roku wykazał powiązanie między temperaturą skóry, a odczuciem komfortu cieplnego. Dalsze badania w tym kierunku (Gagge, 1937) pozwoliły na wysunięcie wniosku, że temperatura skóry jest skorelowana ze stanem odczuć termicznych człowieka, bez względu na to czy jest on ubrany czy nie. Na podstawie powyższych przesłanek Nishi /1969/ opracował wskaźnik komfortu cieplnego, tzw. Modelową Temperaturę Skóry - MST. W wyniku eksperymentu autor powyższej pracy stwierdził, że MST pokrywa się z rzeczywistą temperaturą skóry w zakresie temperatur otoczenia od 26.4 do 38.4°C. Porównanie z wynikami doświadczalnymi

innych badaczy (również dla niższych temperatur otoczenia), dało różnicę temperatur między MST a \bar{T}_s dochodzącą do 5 °C dla temperatur skóry poniżej 30 °C. Można się więc spodziewać, że w środowiskach zimnych rzeczywista temperatura skóry będzie mocno odbiegać od Temperatury Modelowej.

W celu rozpatrzenia przydatności temperatury skóry jako wskaźnika stanu termicznego ustroju w środowisku chłodnym, wykreślono na podstawie podanego w tej pracy modelu jej zależność od temperatury otoczenia, dla trzech różnych grubości tkanki tłuszczowej: 1.9, 3.7, 5.5 mm (rys.17). Zakłada się stałą wilgotność względną powietrza - 50 %, izolacyjność odzieży $I_{cl} = 0 \text{ s m}^{-1}$ a metabolizm w środowisku termoneutralnym $M_0 = 58 \text{ W m}^{-2}$. Na rysunku tym, wykreślono również Modelową Temperaturę Skóry (MST) Nishi'ego. MST jest temperaturą skóry modelowego człowieka, który nie ma żadnej innej możliwości termoregulacji poza zmianą tejże temperatury skóry.

Jak widać z rys. 17, w temperaturze otoczenia $T_0 = 15^\circ\text{C}$, Modelowa Temperatura Skóry osiągnie wartość 22°C. Wartość ta nie może być reprezentatywna dla wszystkich ludzi. Jak wynika z obliczeń, obciążenie układu termoregulacji w tym środowisku będzie u osobnika szczupłego wyrażone wzrostem produkcji ciepła $\Delta M = 60 \text{ W m}^{-2}$, podczas gdy u osobnika o grubości tkanki tłuszczowej $d_f = 5.5 \text{ mm}$ wzrost produkcji ciepła wyniesie 40 W m^{-2} . Również rzeczywista temperatura skóry, bez odniesienia do budowy ciała, nie może świadczyć o stanie termicznym ustroju. Na przykład średnia temperatura skóry równa 28°C, u osoby szczupłej wystąpi w temperaturze otoczenia $T_0 = 10^\circ\text{C}$ i będzie jej odpowiadało obciążenie układu termoregulacji $\Delta M = 84 \text{ W m}^{-2}$. Osoba o grubości tkanki tłuszczowej $d_f = 5.5 \text{ mm}$ osiągnie tę temperaturę



Rys. 17. Porównanie Modelowej Temperatury Skóry (MST) ze średnią temperaturą skóry, obliczoną wg wzoru /45/.

- \bar{T}_{s1} - średnia temperatura skóry u człowieka o grubości tkanki tłuszczowej $d_f = 1.9 \text{ mm}$,
- \bar{T}_{s2} - średnia temperatura skóry u człowieka o grubości tkanki tłuszczowej $d_f = 3.7 \text{ mm}$,
- \bar{T}_{s3} - średnia temperatura skóry u człowieka o grubości tkanki tłuszczowej $d_f = 5.5 \text{ mm}$.

skóry w $T_0 = 21^{\circ}\text{C}$, a związany z nią wzrost metabolizmu wyniesie zaledwie kilka W m^{-2} . Należy zaznaczyć, że grubości tkanki tłuszczowej od 2 do 5.5mm występują u ludzi o normalnej budowie ciała. Osobnikom z tendencją do otyłości odpowiada grubość tkanki tłuszczowej około 8 mm, a ludziom otyłym - około 12 ± 13 mm, (Kollias 1974, Jequier 1974). Można więc przypuszczać, że wyżej omawiane różnice w temperaturach skóry osiągną dużo większe wartości.

10.2. Środowisko termoneutralne

Wśród badaczy z dziedziny fizjologii i fizyki środowiskowej istnieje rozbieżność poglądów na temat zakresu temperatur termoneutralnych. Spotyka się następujące określenia środowiska termoneutralnego:

- i. zakres temperatur operatywnych, w których metaboliczna produkcja ciepła pozostaje na niezmiennym poziomie - strefa minimalnej produkcji ciepła,
- ii. zakres temperatur operatywnych, w których temperatura ciała jest normalna, a nie występuje po-cenie termoregulacyjne ani wzrost metabolicznej produkcji ciepła - strefa minimalnego wysiłku termoregulacyjnego,
- iii. zakres temperatur operatywnych preferowanych przez człowieka - strefa komfortu cieplnego człowieka.
- iv. optymalne dla zdrowia i rozwoju środowisko termiczne, które nie musi być synonizmem żadnego z powyższych.

Większość badaczy skłania się do przyjęcia definicji drugiej z kolei (Mount 1974, Poczopko 1971). Taka też została podana

w glosariuszu termofizjologii (Bligh i Johnson, 1973). Powiązanie strefy termoneutralnej z innymi strefami charakterystycznymi dla fizjologii środowiskowej przedstawia rys. 18.

Jak wykazano w rozdziale I, w zakresie temperatur termoneutralnych rzeczywiste temperatury skóry są mocno zbliżone do Temperatury Modelowej, nie zależą od grubości tkanki tłuszczowej, a ich wartość może świadczyć o stanie termicznym ustroju. Powodem tego jest możliwość dostosowania izolacyjności fizjologicznej do potrzeb organizmu. U ludzi z grubą tkanką tłuszczową naczynia krwionośne będą bardziej rozszerzone niż u szczupłych, a temperatury skóry obu będą do siebie zbliżone. Analiza aspektów fizjologicznych i biofizycznych, związanych z wykresem na rys. 18 została przedstawiona przez Cenę i Clarka /1978/.

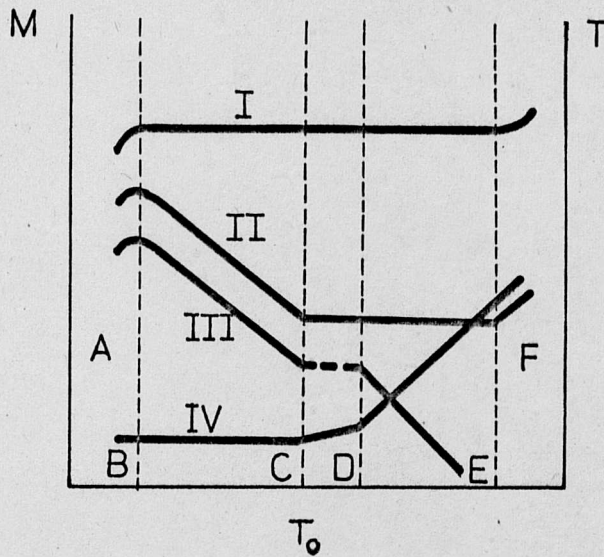
W pobliżu górnej temperatury krytycznej (punkt D na rys.18) należy znowu spodziewać się różnic międzyosobniczych. Organizm osobnika grubszego wcześniej wyczerpie możliwości termoregulacji naczynioruchowej. Całkowite rozszerzenie naczyń krwionośnych i wzrost aktywności gruczołów potowych wystąpi u niego w temperaturze otoczenia niższej niż u osobnika szczupłego, rys.19.

Strefa termoneutralna w przypadku osobników bardziej otyłych (w porównaniu do szczupłych) będzie więc przesunięta w kierunku niższych temperatur otoczenia.

11. Komfort cieplny

11.1. Badania w eksploatowanych budynkach

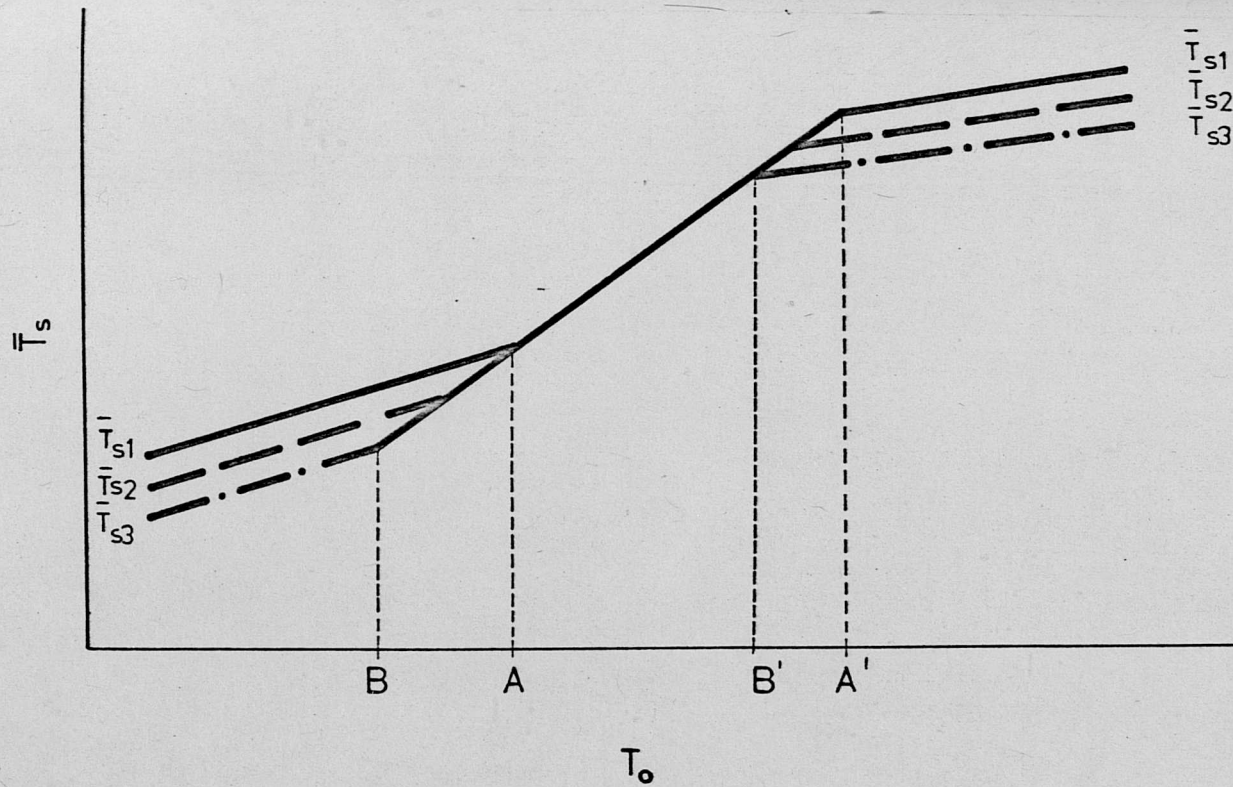
Na podstawie tabeli 7 przedstawiającej statystyczne opracowanie wyników uzyskanych z przebadania 411 mieszkań, można zauwa-



Rys. 18. Metaboliczna produkcja ciepła, utrata ciepła i głęboka temperatura ciała u organizmów homeotermicznych w zależności od temperatury otoczenia, (Mount, 1974).

- I - głęboka temperatura ciała,
- II - produkcja ciepła,
- III - nieewaporacyjna utrata ciepła,
- IV - ewaporacyjna utrata ciepła,

- A - strefa ochładzania ciała,
- B - punkt maksymalnej produkcji ciepła,
- C - temperatura krytyczna otoczenia,
- D - punkt wzrostu ewaporacyjnej utraty ciepła,
- E - górna temperatura krytyczna otoczenia,
- F - strefa przegrzewania organizmu,
- CD - strefa minimalnego obciążenia układu termoregulacji,
- CE - strefa minimalnej produkcji ciepła,
- BE - strefa termoregulacji.



Rys. 19. Położenie strefy termoneutralnej w zależności od grubości tkanki tłuszczowej.

AA' - strefa termoneutralna osobnika szczupłego,

BB' - strefa termoneutralna osobnika otyłego.

\bar{T}_{s1} - odpowiada minimalnej grubości tkanki tłuszczowej,

\bar{T}_{s3} - odpowiada maksymalnej grubości tkanki tłuszczowej.

żyć, że różnica między średnią temperaturą powietrza zimą i latem jest statystycznie nieistotna. Podobne właściwości wykazuje średnia temperatura promieniowania otoczenia. Obliczona na podstawie danych z tej tabeli średnia temperatura operatywna wynosi około 22.2°C .

Wyniki zawarte w tabeli 8 pozwalają na stwierdzenie, że średnia temperatura powietrza, oceniana jako komfortowa ($Y=4$) wynosi 21.7°C , a średnia temperatura radiacyjna - 22.5°C . Obie są prawie równe faktycznym średnim obserwowanym w przebadanych mieszkaniach. Nic więc dziwnego, że średnią oceną komfortu cieplnego, zarówno latem jak i zimą, jest ocena "4" przyjemnie - ani za ciepło, ani za zimno .

Z analizy Przewidywanej Średniej Oceny Komfortu Cieplnego wynika, że obniżenie temperatury operatywnej do 18°C spowoduje zmianę oceny komfortu cieplnego na "2" (za chłodno) dla ludzi wypoczywających, i na "3" (lekko chłodno) dla ludzi o średnim wydatku energetycznym, (tabela 13). Temperatura operatywna (równanie /20/) 20°C będzie odczuwana jako neutralna przez gospodynie wykonujące lekkie prace domowe, ale w dalszym ciągu będzie za niska dla ludzi przebywających w pozycji siedzącej. Dopiero temperatura około 24°C zadowoli mieszkańców wypoczywających, będzie ona jednak za wysoka dla poruszających się.

Tabela 13. Wpływ temperatury operatywnej, wydatku energetycznego i izolacyjności odzieży na Przewidywaną Średnią Ocenę komfortu cieplnego (PMV).

Temperatura operatywna T_o [°C]	Wydatek energetyczny M [W m ⁻²]	Izolacyjność odzieży I_{cl} [clo]	PMV
18	58	0.6	1.6

	100	0.6	3.6
20		1.0	4.2
	58	0.6	2.2

24		1.0	3.3
	100	0.6	4.0

24		1.0	4.5
	58	0.6	3.5

24		1.0	4.2
	100	0.6	4.7

24		1.0	5.0

Jak wykazały badania, ludzie w warunkach domowych najchętniej ubierają się w odzież o izolacyjności ok. 0.6 clo, z minimalną zależnością od temperatury otoczenia. Na podstawie powyższej analizy PMV można więc wnioskować, że temperaturą otoczenia, odpowiadającą komfortowi cieplnemu większości mieszkańców jest temperatura $T_o = 23^{\circ}C$.

Jednym ze wskaźników fizjologicznych, stanowiących podstawę oceny wpływu mikroklimatu na organizm człowieka, jest średnia temperatura powierzchni skóry. Jak wykazały badania Gagge'go /1938/ i Olesena /1972/, średnia temperatura skóry preferowana przez człowieka nie zależy od izolacyjności odzieży i wynosi ok. 33.5°C (jeśli nie wykonuje on pracy fizycznej). Temperatura ta odpowiada stanowi komfortu cieplnego. W zakresie temperatur otoczenia pozwalających na uzyskanie stanu komfortu cieplnego (temperatury termoneutralne), nie obserwuje się dużych różnic międzyosobniczych, a wartość temperatury skóry jest ściśle związana ze stanem termicznym. Może więc stanowić wskaźnik komfortu cieplnego. Rozkład temperatury skóry, a więc stopień niejednorodności, w stanie komfortu cieplnego zależy od izolacyjności odzieży i temperatury otoczenia (Olesen, Fanger 1973). Im niższa temperatura otoczenia i większa izolacyjność, tym większy stopień niejednorodności. Stąd wniosek, że w środowisku chłodnym powinno się mierzyć temperaturę skóry w jak największej liczbie punktów. W temperaturach pokojowych i przy odpowiadającej im izolacyjności 0.6 clo, powierzchnia skóry jest termicznie bardziej jednorodna i do określenia średniej jej temperatury wystarczy pomiar w ok. 10 punktach (Rensburg i Stewart 1976). Okazuje się jednak, że nawet to minimum jest często trudne do osiągnięcia. Ludzie w badanych mieszkaniach niechętnie pozwalają na pomiar temperatury na całej powierzchni skóry. Natomiast prawie zawsze możliwy jest pomiar w takich punktach jak czoło, policzek, kark czy ręka. Powierzchnia skóry na czole ma najwyższą i najbardziej stałą w danych warunkach temperaturę. Jest ona zależna od temperatury otoczenia, prędkości wiatru i w pewnym stopniu odzwierciedla stan termiczny całego organizmu (Klonowicz, Kozłowski,

1970). Mierzenie temperatury na czole nie nastrocza na ogół poważniejszych trudności, a więc ten test fizjologiczny można polecić w szybkich badaniach stanu termicznego. Olesen i Fanger /1973/ podają, że temperatura skóry na czole w stanie komfortu cieplnego (przy izolacyjności 0.6 clo) przyjmuje wartości od 33 °C do 35 °C. Podobne wyniki uzyskano w trakcie badań komfortu cieplnego w jednym z eksploatowanych budynków, tabela 9. Analiza danych, zawartych w tej tabeli, pozwala zauważyć, że w większej ilości wypadków ocena komfortu cieplnego podana przez respondenta (Y) jest wyższa niż przewidywana ze wzoru Fangera (PMV). Niedokładność ta może być spowodowana przyjmowaniem do obliczeń, przybliżonych siłą rzeczy, wartości wydatku energetycznego. Drugą przyczyną, którą na podstawie obserwacji prowadzonych w trakcie badań można uznać za bardziej prawdopodobną, jest czynnik psychologiczny. Część lokatorów badanego budynku zresztą dość liczna i reprezentowana na ogół przez ludzi bardzo starych lub bardzo młodych, uzyskała mieszkanie nie z własnej inicjatywy i nie za własne fundusze. Ci mieszkańcy wyrażali zadowolenie z występujących warunków komfortu cieplnego i innych. Pozostali lokatorzy o wiele bardziej krytycznie oceniali jakość swoich mieszkań i ich warunki mikroklimatyczne.

Na podstawie analizy średniej temperatury skóry (tabela 9) można zauważyć, że różnice między wartościami mierzonymi i obserwowanymi dochodzą od 1 do 2 °C. Jest to spowodowane przybliżoną oceną wydatku energetycznego danego osobnika, jak również obliczaniem średniej ważonej temperatury skóry z pomiarów w mniejszej ilości niż 15 punktów. Niemniej na ogół obie wartości (przewidywana i obserwowana) pozwalają na ocenę stanu komfortu cieplnego. Olesen i Fanger /1973/ podają wartości tempe-

ratury skóry, odpowiadające stanowi komfortu cieplnego, od 33 do 34°C. Łotach /1976/ wymienia wartości zbliżone, bo 32 ÷ 33.5°C. Nishi i Ibamoto /1969/- przyporządkowują na podstawie danych literaturowych stanowi komfortu cieplnego temperatury skóry od 32 do 34°C, ocenie "lekko chłodno" - temperaturę 31°C, a ocenie "lekko ciepło" - 35°C. Jethon i in. /1973/ łączą temperaturę skóry ze stanem termicznym następująco - komfort: 33.2 ± 1, chłodno: 31.1 ± 1, ciepło: 34.9 ± 1. Na podstawie wszystkich powyższych danych można przyjąć, że średnia temperatura skóry w stanie komfortu cieplnego przyjmuje wartości między 32 a 34°C. Wrażeniom "lekko chłodno" odpowiada zakres \bar{T}_s = od 30 °C do 32 °C, a "lekko ciepło" zakres od 34 do 36°C.

Analiza wyników testu fizjologicznego w badanych pomieszczeniach mieszkalnych pozwala na stwierdzenie, że większość mieszkańców znajdowała się w stanie komfortu cieplnego lub w jego pobliżu (przyjemnie ciepło, przyjemnie chłodno). Po porównaniu tego z ocenami przez nich podawanymi, można uznać temperaturę skóry jako dobry wskaźnik oceny stanu termicznego człowieka. Błąd tej metody nie powinien przekraczać wielkości ± 1 na skali ASHRAE.

11.2. Kryteria komfortu cieplnego w budynkach

Pierwszym koniecznym warunkiem odczuwania komfortu cieplnego jest uzyskanie stanu równowagi. Oczywiście to nie wystarcza, gdyż układ termoregulacji jest wystarczająco skuteczny, aby w szerokim zakresie niesprzyjających warunków termicznych móc utrzymać równowagę cieplną organizmu człowieka. Dlatego też drugim warunkiem komfortu cieplnego jest minimalne obciążenie układu termo -

regulacji: $\Delta M = 0$, $E_s = E_d$. Wypływają stąd następujące wnioski:

- i. odczuwanie komfortu cieplnego przez człowieka występuje tylko wówczas, gdy ilość ciepła oddawanego drogą odparowywania potu nie przekracza 25% ogólnej ilości oddawanego ciepła,
- ii. temperatura skóry, która jest związana z odczuciami termicznymi, musi się zawierać w pewnych wąskich granicach: $32 \div 34$ °C,
- iii. produkcja ciepła metabolicznego utrzymuje się na najniższym dla danej aktywności poziomie.

Aby te warunki mogły być spełnione, konieczne jest stworzenie odpowiedniego mikroklimatu w pomieszczeniach. Aktualne normy europejskie przewidują wartości temperatury powietrza od 21 °C do 24 °C, a absolutną zawartość pary wodnej w powietrzu: $5 \div 7$ g m⁻³. Okołowicz - Grabowska /1976/ wykazała, że obowiązujące w Polsce normy tylko odnośnie temperatury powietrza w pomieszczeniach są nieprecyzyjne i na ich podstawie nie można określać warunków mikroklimatu pomieszczenia. Dla zachowania komfortu cieplnego ważne jest również, aby różnica między temperaturą powietrza a średnią temperaturą promieniowania nie była zbyt duża. Norma niemiecka TGL 22313 podaje zasadę, że różnica ta nie powinna przekraczać wartości $2 \div 3$ °C. Zalecana różnica temperatur nie może być utrzymana jeśli ściany zewnętrzne pomieszczenia mają niedostateczną izolację cieplną, ogrzewanie pomieszczenia jest zainstalowane wadliwie lub stosunek powierzchni okien do powierzchni ścian jest duży. Z punktu widzenia komfortu cieplnego duża powierzchnia okien jest niekorzystna, gdyż latem działa jak radiator cieplny, zimą jak powierzchnia chłodząca. Analogicznie wygląda

sytuacja z punktu widzenia ekonomiki zachowania ciepła. Przy powierzchni okien, wynoszącej 50 % ogólnej powierzchni zewnętrznej budynku, aż 82 % ogólnych strat ciepła zachodzi właśnie przez nie, (Łotach 1976). Ostatnim czynnikiem mikroklimatycznym, mającym wpływ na odczucia cieplne mieszkańców, jest prędkość ruchu powietrza. Normy europejskie podają jako wartości graniczne prędkości ruchu powietrza, nie wywołujące jeszcze przeciągu, $v = 0.15 \text{ m s}^{-1}$, (TGL 22 313, SN-245), Prędkość ruchu powietrza nie może być jednak mniejsza niż 0.05 ms^{-1} , gdyż występuje wtedy wrażenie zaduchu ASHRAE 55-66.

Z powyższych rozważań wynika, że dla oceny warunków mikroklimatycznych pomieszczenia konieczny jest pomiar wszystkich parametrów decydujących o komforcie cieplnym, a więc temperatury powietrza i jego wilgotności, temperatury radiacyjnej (ewentualnie temperatury otaczających przegród) i prędkości ruchu powietrza. Należy również znać wartości izolacyjności odzieży i wielkość wydatku energetycznego ludzi, przebywających w danym pomieszczeniu.

W N I O S K I

1. Dla oceny stanu odczuć termicznych mieszkańców budynków konieczna jest znajomość parametrów mikroklimatycznych pomieszczeń, izolacyjności odzieży i grubości podskórnej tkanki tłuszczowej. Na podstawie tych danych można teoretycznie przewidzieć średnią temperaturę skóry danego osobnika i wielkość obciążenia układu termoregulacji.
2. Stan termiczny w środowisku chłodnym jest wyrażony wielkością obciążenia układu termoregulacji, tzn. termoregulacyjnym wzrostem produkcji ciepła. Stan termiczny w pomieszczeniach mieszkalnych, określanymi jako środowisko termoneutralne, jest wyrażony wartością średniej temperatury skóry danego osobnika. W zakresie temperatur otoczenia poza przedziałem termoneutralnym, wartość temperatury skóry jako wskaźnika jest problematyczna, gdyż jej wartość może zależeć od indywidualnych cech osobnika.
3. Przewidywane na podstawie zaproponowanego modelu wartości średniej temperatury skóry są zgodne z wartościami obserwowanymi eksperymentalnie w warunkach laboratoryjnych, a także w eksploatowanych budynkach. Również przewidywane wartości produkcji ciepła są zgodne z wartościami obserwowanymi w doświadczeniu.
4. Przewidywana krytyczna temperatura otoczenia dla przeciętnego człowieka w budynku mieszkalnym (izolacyjność odzieży $I_{cl} = 0.6 \text{ clo}$, wydatek energetyczny $M_o = 58 \text{ W m}^{-2}$), wynosi około 18 do 20°C.

5. Na reprezentatywnej grupie mieszkań stwierdzono, że temperatury powietrza w typowych budynkach wielokondygnacyjnych zawierają się w zakresie od 19 do 25°C. Średnia temperatura powietrza T_a w tych budynkach wynosiła 21.6 °C latem i 21.8 °C zimą. Średnia temperatura radiacyjna - 22.5 °C latem i 22.6 °C zimą. Odpowiadało im odczucie komfortu cieplnego w skali ASHRAE $Y = 4$ (przyjemnie ani za ciepło, ani za zimno). Średnia temperatura skóry dla tego stanu powinna się zawierać w granicach od 32 do 34°C, co też zostało potwierdzone testem fizjologicznym przeprowadzonym w części z przebadanych mieszkań.
6. Wielkość wymiany ciepła suchego w danym środowisku można określić metodą kalorymetrii częściowej, tzn. przez pomiar miernikami strumienia ciepła i obliczenie średniej ważonej gęstości strumienia ciepła. W badanych pomieszczeniach mieszkalnych wielkość wymiany ciepła suchego między człowiekiem i otoczeniem wynosiła ok. 60 W m⁻², co jest zgodne z danymi z piśmiennictwa.
7. Obliczanie Przewidywanej Średniej Oceny (PMV) warunków cieplnych w mieszkaniach, na podstawie parametrów mikroklimatycznych, izolacyjności odzieży i wydatku energetycznego, jak również obliczanie przewidywanej średniej temperatury skóry, jest skutecznym sposobem oceny warunków mikroklimatycznych mieszkania. Otrzymane wyniki mogą być weryfikowane doświadczalnie przez zastosowanie psychofizycznego testu ASHRAE lub testu fizjologicznego (tzn. pomiar temperatury skóry) u mieszkańców badanych budynków.

PISMIENNICTWO

1. Allen, T.H., M.T. Peng, K.P.Chen, T.F. Huang, C. Chang, H.S. Fang: Prediction of total adiposity from skinfolds and the curvilinear relationship between external and internal adiposity.
Metabolism, 5 : 346-352, 1956.
2. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Thermal comfort conditions.
ASHRAE Standard 55-66, New York, 1966.
3. Beckmann, E.L., E. Reeves: Physiological implications as to survival during immersion in water at 75°F.
Aerospace Med., 37 : 1136-1142, 1966.
4. Bedford, T.: The warmth factor in comfort at work.
Rep. Industr. Health Res. Board No 76, London, 1936.
5. Benzinger, T.H.: Heat regulation: homeostasis of central temperature in man.
Physiol. Rev., 49 : 671-759, 1969.
6. Blaxter, K.L.: The energy metabolism of ruminants.
Ed.: Hutchinson and Co. Ltd., London, 1962.
Wydanie polskie: Przemiany energetyczne u przeżuwaczy.
PWRiL, Warszawa, 1966.

7. Bligh, J.: The thermosensitivity of the hypothalamus and thermoregulation in mammals.
Biol. Rev., 41 : 317-367, 1966.
8. Boudewyns, P.A.: A comparison of the effects of stress vs relaxation instruction on the finger temperature response.
Behav. Ther., 7 : 54-67, 1976.
9. Brebner, D.F., D.McK. Kerslake, J.L. Waddel: The diffusion of water vapor through human skin.
J. Physiol. London, 132 : 225-231, 1956.
10. Breckenridge, J.R., R.F. Goldman: Human solar heat load.
ASHRAE Trans., 78 : 110-119, 1972.
11. Buguet, A.G.C., S.D. Livingstone, L.D. Reed, R.E. Limmer: Cold induced shivering in men with thermoneutral skin temperatures.
J. Appl. Physiol., 41 : 142-145, 1976.
12. Bullard, R.W., G.M. Rapp: Problems of body heat loss in water immersion.
Aerospace Med., 41 : 1269-1277, 1970.
13. Burton, A.C., A.C. Bazett: A study of the average temperature of the tissues, of the exchange of heat and vasomotor responses in man by means of a bath calorimeter.
Am. J. Physiol., 117 : 36, 1936.

14. Burton, A.C., O.G. Edholm: Man in a cold environment.
Hafner Publishing Company, New York, London, 1969.
Fascimile of the 1955 edition.
15. Cena, K.: Radiative heat loss from animals and man.
Chapter in: Heat loss from animals and man.
Eds.: J.L. Monteith, L.E. Mount, London, Butterworth, 1964.
16. Cena, K., J.A. Clark: Thermal radiation from animal coats.
Coat structure and measurements of radiative temperature.
Phys. Med. Biol., 18 : 432-443, 1973.
17. Cena, K., J.A. Clark: Thermal insulation units.
J. Thermal Biology, 3 : 173-174, 1978.
18. Cena, K., J.A. Clark: Thermal insulation of animal coats
and human clothing.
Phys. Med. Biol., 23 : 565-591, 1978.
19. Cena, K., J.L. Monteith: Transfer processes in animal coats.
I. Radiative transfer.
Proc. R. Soc. Lond., B. 188 : 377-393, 1975.
20. Clark, J.A., K. Cena: Solar and thermal heat loads in the
energy balance of man.
Eng. Med., 5 : 75-79, 1976.

21. Clark, R.P., R.N. Cox: The application of aeronautical technique to physiology. I. The human microenvironment and convective heat transfer.
Med. Biol. Engn., 12 : 270-274, 1974.
22. Clark, R.P., B.J. Mullan: Airflows in and around linear downflow "safety" cabinets.
J. Appl. Bacteriol., 45 : 131-135, 1978.
23. Colin, J., Y. Houdas: Experimental determination of coefficient of heat exchanges by convection of human body.
J. Appl. Physiol., 22 : 31-38, 1967.
24. Cox, R.N., R.P. Clark: The natural convection flow about the human body.
Rev. Gen. Thermique, 133 : 11, 1973.
25. DuBois, D., E.F. DuBois: Clinical calorimetry: A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known.
Arch. Int. Med., 17 : 863-871, 1916.
26. Fanger, P.O.: Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering.
Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
Wydanie polskie: Komfort cieplny.
Arkady, 1974.

27. Fanger, P.O.: Thermal environments preferred by man.
Build. Int., 6 : 127-142, 1973.
28. Froese, G., A.C. Burton: Heat losses from the human head.
J. Appl. Physiol., 10 : 235-241, 1957.
29. Gagge, A.P.: Effective radiant flux, an independent variable
that describes thermal radiation on man.
Chapter in: Physiological and behavioral temperature regulation.
Eds: J.D. Hardy, A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk.
Springfield, Illinois, C.C. Thomas, 1970.
30. Gagge, A.P.: A two-node model of human thermoregulation in
FORTRAN.
Appendix in Bioastronautics Data Book, p. 142-148.
Eds: J.F. Parker Jr, V.R. West.
Washington, D.C.: NASA, 1973
31. Gagge, A.P., R.R. Gonzalez: Physiological bases of warm
discomfort during heat strain for sedentary man.
Arch. Sci. Physiol., 27 : A 409 - A 424, 1973.
32. Gagge, A.P., Y. Nishi: Standard Humid Operative Temperature
- a single measure of environmental stress.
Biol. and Med., 188 : 2051-2063, 1972.

33. Gagge, A.P., Y.Nishi: Heat exchange between human skin surface and thermal environment.
Chapter in: Handbook of Physiology, section 9: Reactions to Environmental Agents.
Eds: D.H.K. Lee. American Physiological Society, Bethesda, Maryland, 1977.
34. Gagge, A.P., Y. Nishi, R.R. Gonzalez: Standard Effective Temperature - A single temperature index of temperature sensation and thermal comfort.
Thermal comfort and moderate heat stress, p.229-250.
Proceedings of the CIB Commission W 45 (Human Requirements). Symposium held at the Building Research Station, 13 - 15 September. 1972.
35. Gagge, A.P., J.A.J. Stolwijk, J.D. Hardy: A novel approach to measurement of man's heat exchange with a complex radiant environment.
Aerospace Med., 36 : 431-435, 1965.
36. Garg, A., D.B. Chaffin, G.D. Herrin: Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs.
Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 39 : 661-674, 1978.
37. Goldman, R.F.: Systematic evaluation of thermal aspects of air crew protective systems.
Chapter in: Behavioral problems in aerospace medicine.
Conference Proceedings No 25 of the Advisory Group for Aerospace Research and Development. Paris, October, 1967.

38. Gonzalez, R.R., K.B. Pandolf, A.P. Gagge: Physiological responses and warm discomfort during heat strain.
Arch. Sci. Physiol., 27 : A 563 - A 571, 1973.
39. Gregorczyk, M.: Bioclimates of the world related to air enthalpy.
Int. J. Biometeor., 12 : 35-39, 1968.
40. Hall, J.: Copper manikin regional heat loss and cooling constants.
MEMO Rept. MCREXD-696-1058, Wright Patterson AFB, Ohio, 1950.
41. Hardy, J.D., E.F. DuBois: The technic of measuring radiation and convection.
J. Nutr., 15 : 461-475, 1938.
42. Hardy, J.D., E.F. DuBois: Regulation of heat loss from the human body.
Proc. Natl. Acad. Sci., 23 : 624-631, 1937.
43. Hayward, J.S., J.D. Eckerson, M.L. Collis: Thermoregulatory heat production in man: prediction equation based on skin and core temperatures.
J. Appl. Physiol., 42 : 377-384, 1977.
44. Houdas, Y., J. Colin, J. Timbal, Ch. Boutelier, J.D. Guieu:

Skin temperatures in warm environments and the control of sweat evaporation.

J. Appl. Physiol., 33 : 99-104, 1972.

45. Houdas, Y., J.D. Guieu: Environmental factors affecting skin temperatures.

Bibl. Radiol., No 6, pp. 157-165, 1975.

46. Houghten, F.C., C.P. Yaglou: Determining lines of equal comfort.

ASHVE Trans., 28 : 163-176 and 361-384, 1923.

47. Humphreys, M.A.: Field studies of thermal comfort compared and applied.

Building Services Engineer, 44 : 5-23, 27, 1976.

48. Jankowiak, J.: Biometeorologia człowieka.

PZWL, Warszawa, 1976.

49. Jethon, Z.: Bariery ludzkich możliwości.

Wiedza Powszechna, Warszawa, 1977.

50. Jethon, Z., P. Krasucki, A. Rogoziński: Normy fizjologiczno-higieniczne w medycynie przemysłowej.

PZWL, Warszawa, 1973.

51. Jéquier, E., P.H. Gyax, P. Pittet, A. Vannotti: Increased thermal body insulation: relationships to the development

- of obesity.
J. Appl. Physiol., 36 : 674-678, 1974.
52. Kerslake, D.M.: An estimate of the preferred skin temperature distribution in man.
RAF Institute of Aviation Med., Report No FPRC/MEMO 213, 1964.
53. Kerslake, D.M.: The stress of hot environments.
Cambridge University Press, 1972.
54. Klonowicz, S., S. Kozłowski: Człowiek a środowisko termiczne.
PZWL, Warszawa, 1970.
55. Kollias, J., L. Barlett, V. Bergsteinova, S. Skinner, E.R. Buskirk, W.C. Nicholas: Metabolic and thermal responses of woman during cooling in water.
J. Appl. Physiol., 36 : 577-580, 1974.
56. Konz, S., C. Hwang, B. Dhiman, J. Duncan, A. Masud: An experimental validation of mathematical simulation of human thermoregulation.
Comput. Biol. Med., 7 : 71-82, 1977.
57. Lund, D., C.V. Gisolfi: Estimation of mean skin temperature during exercise.
J. Appl. Physiol., 36 : 625-628, 1974.

58. Łotach, H.: Mikroklimat pomieszczeń roboczych.
Instytut Wydawniczy CRZZ, Warszawa, 1976.
59. McIntyre, D.A.: Energy balance in rooms with surfaces of low emissivity.
ECRC/N300, August, 1970.
60. McIntyre, D.A.: A guide to thermal comfort.
Applied Ergonomics, 4 : 66-72, 1973.
61. McIntyre, D.A.: The thermal radiation field.
ECRC/M774, November, 1974.
62. McIntyre, D.A.: Seven point scales of warmth.
ECRC/M957, October, 1976.
63. McNall, P.E., Jaxx, J., F.H. Rohles, R.G. Nevins, W. Springer: Thermal comfort (thermal neutrality) conditions for three levels of activity.
ASHRAE Trans., 73 : 3.1 - 3.14, 1967.
64. Mitchell, D.: Convective heat transfer from man and other animals.
Chapter in: Heat loss from animals and man, pp.59-76.
Eds: J.L. Monteith, L.E. Mount,
London, Butterworths, 1974.

65. Mitchell, J.W.: Heat transfer from spheres and other animal forms.
Biophysical J., 16 : 561-569, 1976.
66. Mitchell, D., C.H. Wyndham: Comparison of weighting formulas for calculating mean skin temperature.
J. Appl. Physiol., 26 : 616-622, 1969.
67. Monteith, J.L.: Principles of environmental physics.
Edward Arnold Publishers Ltd., 1973.
Wydanie polskie: Fizyka środowiska biologicznego.
PWN, Warszawa, 1977.
68. Montgomery, L.D., B.A. Williams: Effect of ambient temperature on the thermal profile of the human forearm, hand and fingers.
Ann. Biomed. Engn., 4 : 209-219, 1976.
69. Mount, L.E.: The concept of thermal neutrality.
Chapter in: Heat loss from animals and man.
Eds: J.L. Monteith, L.E. Mount,
London, Butterworths, 1974.
70. Nadel, E.R., R. Bullard, J.A.J. Stolwijk: Importance of skin temperature in the regulation of sweating.
J. Appl. Physiol., 31 : 80-87, 1971.
71. Nadel, E.R., S.M. Horvath, C.A. Dawson, A. Tucker: Sensitivity to central and peripheral thermal stimulation in man.
J. Appl. Physiol., 29 : 603-609, 1970.

72. Nelson, N.L., W. Eichna, S.M. Horvath, W.B. Shelley, T.F. Hatch: Thermal exchanges of man at high temperatures. Am. J. Physiol., 151 : 626-652, 1947.
73. Nevins, R.G., F.H. Rohles, W. Springer, A.M. Feyerherm: A temperature humidity chart for thermal comfort of seated persons. ASHRAE Trans., 72 : 289-291, 1966.
74. Nielsen M., L. Pedersen: Studies on the heat loss by radiation and convection from the clothed human body. Acta Physiol. Scand., 27 : 272-294, 1952.
75. Nishi, Y.: Vapor permeation efficiency of clothing by naphthalene sublimation. Arch. Sci. Physiol., 27 : A 163 - A 169, 1973.
76. Nishi, Y.: Field assessment of thermal characteristics of man and his environment by using a programable pocket calculator. ASHRAE Trans., 83(I), 1977.
77. Nishi, Y., A.P. Gagge: Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation. J. Appl. Physiol., 29 : 830-838, 1970
78. Nishi, Y., A.P. Gagge: Moisture permeation of clothing - a factor governing thermal equilibrium and comfort. ASHRAE Trans., 76 : 137-145, 1970b.

85. Olesen, B.W., P.O. Fanger: The skin temperature distribution for resting man in comfort.
Arch. Sci. Physiol., 27 : A 385 - A 393, 1973.
86. Pandolf, K.B., B. Givoni, R.F. Goldman: Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly.
J. Appl. Physiol., 43 : 577-581, 1977.
87. Poczopko, P.: Termoregulacja w medycynie ludzkiej i weterynaryjnej, zootechnice i ekologii.
II Sympozjum poświęcone zagadnieniom termoregulacji.
Jabłonna k. Warszawy, 26-27 maja, 1971.
88. Ramanathan, N.L.: A new weighting system for mean surface temperature of the human body.
J. Appl. Physiol., 19 : 531-533, 1964.
89. Rapp, G.M.: Convective heat transfer and convective coefficients of nude man, cylinders and spheres at low air velocities.
ASHRAE Trans., 79 : 75-87, 1973.
90. Rensburg, A.J., J.M. Stewart: The selection of a method to measure mean skin temperature.
Congress of the South African Pharmacological Society and the Physiological Society of Southern Africa,
Durban, 1976.

79. Nishi, Y., A.P. Gagge: Effective temperature scale useful for hypo- and hyperbaric environments.
Aviat. Space and Environ. Med., 48 : 97-107, 1977.
80. Nishi, Y., R.R. Gonzalez, A.P. Gagge: Direct measurement of clothing heat transfer properties during sensible and insensible heat exchange with the thermal environment.
ASHRAE Trans., 81 : 183-199, 1975.
81. Nishi, Y., R.R. Gonzalez, R.G. Nevins, A.P. Gagge: Field measurement of clothing thermal insulation.
ASHRAE Paper No 2418 (for discussion), 1977.
82. Nishi, Y., K. Ibamoto: Model skin temperature - an index of thermal sensation in cold, warm and humid environments.
ASHRAE Trans., 75 : 94-107, 1969.
83. Okołowicz-Grabowska, B.: Komfort cieplny pomieszczeń ogrzewanych.
Prace naukowe Politechniki Warszawskiej. Budownictwo, Nr 45, Warszawa, 1976.
84. Olesen, S., J.S. Bassing, P.O. Fanger: Physiological comfort at sixteen combinations of activity, clothing, air velocity and ambient temperature.
ASHRAE Trans., 78(II), 1972.

91. Rewerski, W., S. Kozłowski, Z. Korolkiewicz, T.E. Wróblewski:
Termoregulacja: fizjologia, patofizjologia i farmakologia.
PZWL, Warszawa, 1972.
92. Rudowski, G.: Termowizja i jej zastosowanie.
Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1977.
93. Seppanen, O., P.E. McNall, D.M. Munson, C.H. Sprague:
Thermal insulating values for typical indoor clothing
ensembles.
Research Report RP-43, No 2219, 1972.
94. Sprague, C.H., D.M. Munson: A composite ensemble method
for estimating thermal insulating values of clothing.
ASHRAE Trans., 80 : 120-129, 1974.
95. Stewart, J.M., A.J. van Rensburg: A theoretical consideration
of heat transfer from nude man.
Research Review, Chamber of Mines of South Africa,
pp. 58-72, 1976/77.
96. Stoll, A.M.: Heat transfer in biotechnology.
Advan. Heat Transfer, 4 : 65-141, 1967.
97. Stolwijk, J.A.J., J.D. Hardy: Temperature regulation in
man - a theoretical study.
Pflügers Archiv., 291 : 129-162, 1966.

98. Tam, H.-S., R.C. Darling, H.-Y. Cheh, J.A. Downey: Sweating response: a means of evaluating the set point theory during exercise.
J. Appl. Physiol., 45 : 451-458, 1978.
99. Tamari, Y., E.F. Leonard: Convective heat transfer from the human form.
J. Appl. Physiol., 32 : 227- 233, 1972.
100. Tanaka, M.: Metabolic and thermal responses of men wearing cold protective clothing to various degrees of cold stress.
Eur. J. Appl. Physiol., 39 : 137-144, 1978.
101. Timbal, J., M. Loncle, Ch. Boutelier: Mathematical model of man's tolerance to cold using morphological factors.
Aviat. Space Environ. Med., 47 : 958-964, 1976.
102. Wilkerson, J.E., P.B. Raven, S.M. Hotvath: Critical temperature of unacclimatized male Caucasians.
J. Appl. Physiol., 33 : 451-455, 1972.
103. Winslow, C.E.A., L.P. Herrington: Temperature and human life.
Princeton University Press, Princeton, 1949.
104. Winslow, C.E.A., L.P. Herrington, A.P. Gagge: A new method of partitioned calorimetry.
Am. J. Physiol., 116 : 641-655, 1936.

105. Woodcock, A.H., J.R. Breckenridge: A model description of thermal exchange for the nude man in hot environments. *Ergonomics*, 8 : 223-235, 1965.
106. Wulsin, F.R.: Adaptations to climate among non European peoples.
Chapter 1 in: *Physiology of Heat Regulation and the Science of Clothing*.
Ed.: L.H. Newburgh. Saunders, Philadelphia, 1949.
107. Wyndham, C.H.: Tolerable limits of air conditioning for men at work in hot mines.
Ergonomics, 1962, 5 : 115-122, 1962.
108. Wyndham, C.H., A.R. Atkins: A physiological scheme and mathematical model of temperature regulation in man.
Pflügers Arch., 303 : 14-30, 1968a.
109. Wyndham, C.H., C.G. Williams, H. Loots: Reactions to cold.
J. Appl. Physiol., 24 : 282-287, 1968b.
110. Zeiner, A., M.H. Pollak: Bidirectional changes in digital skin temperature using biofeedback in a cold room.
Paper presented at Sixteenth Annual Meeting of the Society for Psychophysiological Research in San Diego, California, October, 1976.