

Prace Naukowe Instytutu Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej

53

Seria: Monografie

21

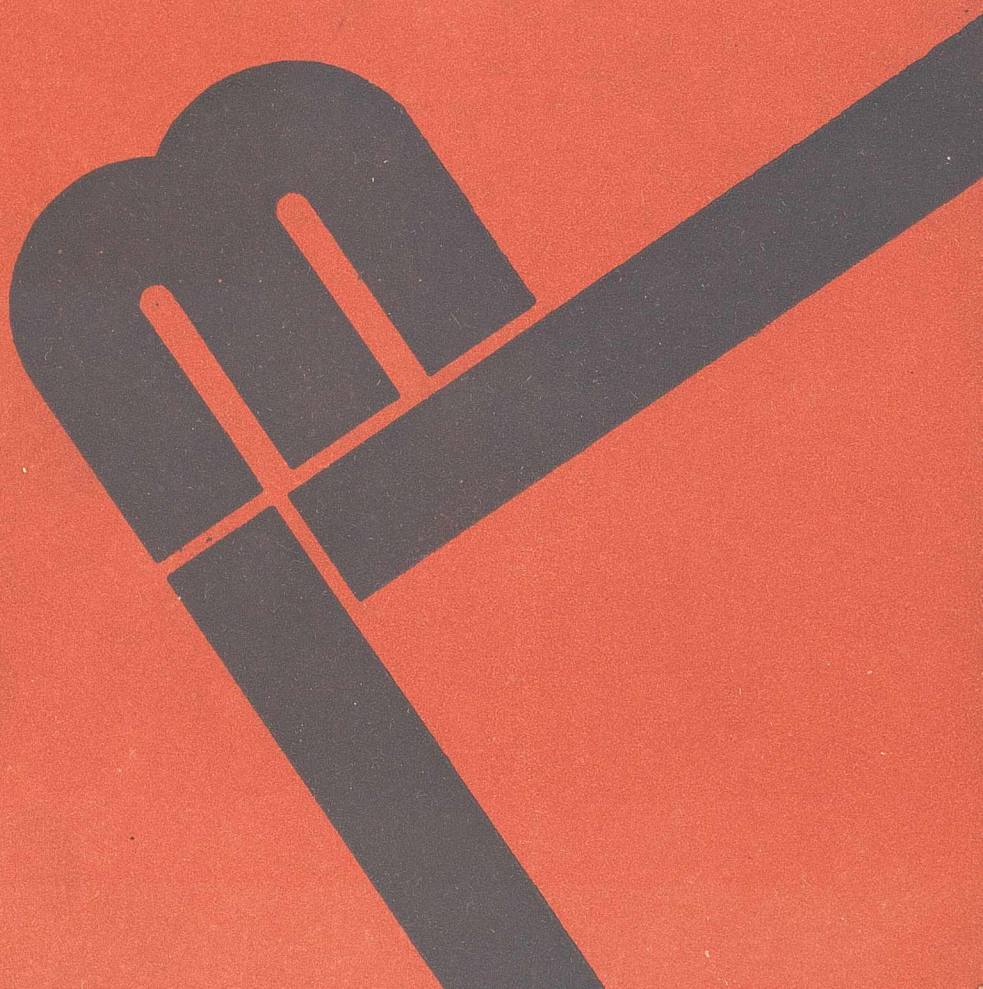
Elżbieta Śliwińska

Dz. 8

**Komfort cieplny ludzi na chłodnych
i termoneutralnych stanowiskach pracy**

Wrocław 1988

A 3416 I



Elżbieta ŚLIWIŃSKA

Thermal comfort of workers in cool
and thermoneutral workplaces

Contents

1. Introduction	4
2. Man in thermoneutral and cool environments	8
2.1. Regulation of heat exchange in human body	9
2.2. Clothing	11
2.3. Thermal comfort	16
2.4. Work in cool environment	18
3. Thermal comfort of humans in cool and thermoneutral workplaces — Experiments	19
3.1. Methods	19
3.2. Results	25
4. Thermal comfort of industrial workers — Discussion	35
4.1. Microclimate in workshops	35
4.2. Evaluation of thermal comfort	37
4.3. Role of protective clothing in creating a comfortable work environ- ment	48
Conclusions	57
References	59
Appendix 1	69
Appendix 2	70
Appendix 3	71



Elżbieta Śliwińska

**Komfort cieplny ludzi na chłodnych
i termoneutralnych stanowiskach
pracy**



Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej · Wrocław 1988

Recenzenci

Bożena OKOŁOWICZ-GRABOWSKA

Krystyna KOSTYRKO

Redaktor naczelny

Jerzy CIEKOT

Redaktor naukowy

Lech ŚLIWOWSKI

Opracowanie redakcyjne

Maria KOPEĆ

Korekta

Maria IZBICKA

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISSN 0324 - 9875

Nakład 180 + 70 egz. Ark. wyd. 6. Ark. druk. 4¹/₂. Papier offset.kl.III, 70g, B1.
Oddano do druku w kwietniu 1988r. Druk ukończono w kwietniu 1988r.
Zakład Graficzny Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 2686/88 - Cena zł 120,-

*Odczucia cieplne, komfort cieplny,
dyskomfort cieplny, izolacyjność
odzieży, środowisko chłodne,
warunki przemysłowe*

Elżbieta ŚLIWIŃSKA*



KOMFORT CIEPLNY LUDZI NA CHŁODNYCH I TERMONEUTRALNYCH STANOWISKACH PRACY

Określono zależności między wybranymi czynnikami wpływającymi na komfort cieplny ludzi. Przeanalizowano zwłaszcza wpływ dyskomfortu lokalnego na ogólne odczucia cieplne oraz rolę odzieży ochronnej w kształtowaniu warunków komfortu cieplnego pracowników. Badania prowadzono w warunkach rzeczywistych, tj. w halach produkcyjnych chłodni i w rozlewniach browarów. Objęto nimi 110 pracowników wymienionych obiektów. Przy analizie warunków komfortu cieplnego uwzględniono czynniki środowiskowe (wielkości fizyczne charakteryzujące mikroklimat) oraz ludzkie (aktywność fizyczną i izolacyjność cieplną odzieży).

Przeprowadzono również laboratoryjne badania wpływu aktywności fizycznej i postawy człowieka na zmiany izolacyjności cieplnej odzieży roboczej. Ich celem było określenie charakteru zmian tej izolacyjności w trakcie wykonywania pracy.

Wykazano wyraźne korelacje między ogólnymi odczuciami ciepła a odczuciami ciepła z poszczególnych obszarów ciała. Ich postać zależy od warunków termicznych otoczenia. Im bardziej odbiegają one od komfortowych, tym bardziej ogólne odczucia ciepła zależą od stopnia dyskomfortu w peryferyjnych obszarach ciała.

Stwierdzono również istotny wpływ izolacyjności cieplnej odzieży, noszonej przez pracowników, nie tylko na ogólne odczucia komfortu, lecz także na odczucia cieplne z obszaru dłoni i stóp. Obszary te, jak wiadomo, nie mogą być wystarczająco chronione przez zastosowanie izolacyjności lokalnej.

Na podstawie analizy wyników badań własnych oraz analizy literatury tematu wykazano, że na chłodnych i termoneutralnych stanowiskach pracy możliwa jest poprawa komfortu cieplnego pracowników oraz wydatne zmniejszenie ich dyskomfortu lokalnego przez prawidłowy dobór odzieży ochronnej.

* Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27

WYKAZ PODSTAWOWYCH OZNACZEŃ

- A_{cl} - powierzchnia ciała człowieka ubranego w odzież, m^2
 A_{Du} - powierzchnia ciała nagiego człowieka obliczona ze wzoru Du Bois, m^2
 f_{cl} - współczynnik zwiększenia powierzchni ciała przez odzież
 I_a - izolacyjność warstwy powietrza przylegającego do odzieży, $clo, m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
 I_{cl} - podstawowa (basic) izolacyjność odzieży, $clo, m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
 I_{cle} - efektywna izolacyjność odzieży, $clo, m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
 I_{cli} - podstawowa izolacyjność poszczególnych części ubioru, $clo, m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
 I_t - całkowita izolacyjność odzieży, $clo, m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
 M - metaboliczna produkcja ciepła, $W \cdot m^{-2}$
 PMV - przewidywana średnia ocena komfortu
 RH - wilgotność względna powietrza, %
 T_a - temperatura powietrza, $^{\circ}C$
 T_{cz} - temperatura skóry na czole, $^{\circ}C$
 T_1 - temperatura wewnętrzna ciała, $^{\circ}C$
 T_o - temperatura operatywna otoczenia, $^{\circ}C$
 T_r - temperatura promieniowania otoczenia, $^{\circ}C$
 T_s - temperatura skóry, $^{\circ}C$
 v_a - prędkość ruchu powietrza, $m \cdot s^{-1}$
 Y - odczucia cieplne człowieka, w skali Bedforda
 Y_5 - odczucia cieplne z obszaru dłoni
 Y_6 - odczucia cieplne z obszaru stóp
 Y_7 - odczucia cieplne z obszaru głowy,
 Y_8 - odczucia cieplne z obszaru tułowia.

WSTĘP

Badania bilansu i komfortu cieplnego człowieka prowadzone są od prawie sześćdziesięciu lat. Ich rozwój został zapoczątkowany powstaniem laboratorium ASHVE (American Society of Heating and Ventilating Engineers - Amerykańskiego Towarzystwa Inżynierów Ogrzewnictwa i Wentylacji) w 1919 roku w Piteburgu. W wyniku pierwszych badań dotyczących przede wszystkim wpływu temperatury, wilgotności i prędkości ruchu powietrza na odczucia cieplne ludzi, powstała skala temperatur efektywnych (Houghten i Yaglou, 1923 [65]), używana zresztą do dzisiaj jako wskaźnik odczuć termicznych. W latach późniejszych badacze z dziedziny

fizjologii środowiskowej, dzięki zastosowaniu różnych metod kalorymetrycznych, dążyli do uzyskania ilościowych relacji opisujących wymianę ciepła z otoczeniem. Wymiana ta podlega prawom fizyki, jednocześnie układ termoregulacji człowieka aktywnie bierze udział w kontrolowaniu temperatury wewnętrznej ciała, a więc i jego bilansu cieplnego. Ponadto odczucia ciepłe zależą od dodatkowych czynników takich, jak przeszłość termiczna, samopoczucie, upodobania czy przyzwyczajenia. A więc relacja człowiek-środowisko ciepłe jest bardzo skomplikowana.

W wyniku prac prowadzonych przez Winelowa i in. (1936 [156]), Hardy'ego i DuBoisa (1937 [59]) opracowano związki między różnymi procesami fizjologicznymi a odczuciami i komfortem cieplnym. W latach czterdziestych zajmowano się przede wszystkim tolerancją środowisk gorących i zimnych w warunkach tropikalnych i arktycznych. W połowie lat sześćdziesiątych ponownie wzrosło w USA zainteresowanie komfortem cieplnym człowieka. W wyniku prac prowadzonych w laboratorium ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - nowa nazwa ASHVE), przeniesionym już wówczas do Kansas, powstawały szczegółowe opracowania warunków komfortu cieplnego (Nevins i in. 1966, [103], McNall i in. 1967 [95]). Stanowiły one bazę danych do opracowania równania komfortu cieplnego przez Fanger'a (1970 [35]). Pod jego kierownictwem prowadzone były również badania komfortu w Duńskim Uniwersytecie Technicznym (Fanger, 1973 [36], Olesen i Fanger, 1973 [118], Fanger i Pedersen, 1977 [44], Fanger i in. 1980 [39], Olesen i in. 1982 [123], Fanger i in. 1985 [42]). W wyniku tych prac oraz badań prowadzonych w innych ośrodkach zbadano wpływ wielu różnych czynników na komfort cieplny ludzi. Najważniejsze z czynników osobowych to wiek, płeć, adaptacja i rasa ludzi (Nevins i in. 1966 [103], Fanger 1970 [35], Olesen i Fanger, 1973 [118], Fanger i Langkilde, 1975 [43], Humphreys, 1975 [67]). Zbadano również wpływ niektórych czynników otoczenia, takich jak kolor ścian i hałas (McIntyre, 1970 [87], Fanger i in. 1977b [40]), rodzaj ogrzewania (Okołowicz-Grabowska, 1976 [114], Berglund i Gagge, 1985 [11]), lokalne przeciągi (Fanger i Pedersen, 1977 [44]) i asymetria promieniowania (McNall i Biddison, 1970 [94], Olesen i in. 1972a [119], McIntyre i Griffiths, 1975b [93]). Obezernym przeglądem z bioinżynierii komfortu cieplnego jest monografia Ceny i Clarka (1981 [23]). Większość wymienionych prac była wykonana w warunkach laboratoryjnych. W tym okresie prowadzone były również badania komfortu i bilansu cieplnego ludzi w różnego rodzaju pomieszczeniach, z którymi związany jest współczesny człowiek. Były to pomieszczenia mieszkalne (Śliwowski, 1982 [141], Śliwowski i in. 1983 [142], Cena i in. 1986 [26]), szkoły (McNall i Nevins, 1968 [96], Wyon, 1969 [160]).

Humphreys, 1972 [66], Nocek, 1962 [111]), szpitale (Wyon i in. 1968 [163], Sliwińska i in. 1982 [138]), a także biura i urzędy (Wyon, 1973 [161]). Zajmowano się również komfortem i bilansem cieplnym pracowników przemysłowych. Większość publikacji dotyczy jednak pracy w warunkach ciepłych i gorących (Wyndham, 1962 [157], Vogt i Foehr, 1975 [150], Ramsey, 1978 [129], Wyon, 1978 [162], Vogt i in. 1980 [149]).

Najmniej badań prowadzono w warunkach chłodu i zimna. A tymczasem niskie temperatury otoczenia ułatwiają powstawanie infekcyjnych, a także nieinfekcyjnych chorób, zwłaszcza schorzeń dróg oddechowych, takich jak katar, bronchit, angina i zapalenie płuc (Repin, 1972 [130], Enander i in. 1979 [33]). Skutkiem tego jest duża absencja chorobowa ludzi pracujących w takich warunkach.

W warunkach chłodu przepływ krwi w tkance skórnej jest zredukowany. Szczególnie silny skurcz naczyń krwionośnych występuje w peryferyjnych obszarach ciała. Słabe ukrwienie dłoni i stóp wywołuje dwa niepożądane zjawiska: pierwsze - to odczucia dyskomfortu lokalnego, drugie - to gorze funkcjonowanie tkanek w tych obszarach. Zmniejsza się więc czułość i zręczność palców. Fakt ten, a także ciągle niezadowolenie ze środowiska termicznego odczuwane przez pracowników, ma istotny wpływ na efektywność pracy.

Szczególnie dużo chłodnych stanowisk pracy obserwuje się w przemyśle spożywczym. Jest to związane z wymaganiami technologicznymi produkcji żywności. Pracownicy na takich stanowiskach wykonują najczęściej pracę lekką. Stosunkowo więc niska metaboliczna produkcja ciepła u tych ludzi jest czynnikiem pogłębiającym stres spowodowany zimnem. Obserwowana zaś u nich prawie nieruchoma pozycja stojąca może być dodatkową przyczyną dyskomfortu lokalnego w obszarze stóp także wtedy, gdy środowisko jest generalnie uważane za termoneutralne. Ważnym problemem na chłodnych stanowiskach pracy jest również odczuwanie zimna w dłonie, wywołane ciągłym dotykiem schłodzonych produktów żywnościowych. Problem ten jest trudny do rozwiązania, gdyż praktycznie nie ma możliwości wyprodukowania rękawic o odpowiednio dużej izolacyjności cieplnej. Tymczasem należy przypuszczać, że nieprzyjemne odczucia dyskomfortu z kończyn będą mieć istotny wpływ na ogólne odczucia ciepłe tych ludzi.

Z badań Spealmana (1968 [136]) i Siple'a (1968 [134]) można wnioskować, że możliwe jest podniesienie temperatury skóry w peryferyjnych obszarach ciała przez dodatkową izolację na tułowiu. McIntyre i Griffiths (1975a [92]) twierdzą jednak, że dodanie wełnianego swetra podczas przebywania w zimnym otoczeniu nie zmienia odczuć z obszaru kończyn. Problem nie jest więc do końca zbadany, a bardzo interesują-

cy. Jego rozwiązanie niesie możliwość wydatnego zmniejszenia dyskomfortu lokalnego odczuwanego na chłodnych stanowiskach pracy.

W pomieszczeniach produkcyjnych, gdzie mikroklimat i aktywność fizyczna są wymuszone przez procesy technologiczne, główną możliwością poprawienia warunków termicznych jest odzież o odpowiednio dobranej izolacyjności. Należy jednak zwrócić uwagę, że aktywność fizyczna będzie powodować zmiany przylegania odzieży do powierzchni ciała, a także wywoływać ruchy powietrza wewnątrz odzieży, co może mieć wpływ na wartość jej izolacyjności.

Problem komfortu cieplnego pracowników jest istotny ze względu na ich zdrowie i wydajność pracy. Konieczne więc są badania pogłębiające wiedzę na ten temat, aby znaleźć sposób na stworzenie optymalnych warunków pracy, mimo zachowania warunków mikroklimatycznych wymaganych przez procesy technologiczne. Istnieje potrzeba prowadzenia tych badań w warunkach rzeczywistych, gdyż stwarzają one największą możliwość uzyskania wiarygodnych informacji na temat wpływu warunków termicznych środowisk produkcyjnych na pracujących tam ludzi.

Celem niniejszej pracy było poznanie zależności odczuć cieplnych człowieka od wybranych czynników wpływających na komfort cieplny. Szczególny nacisk położono na analizę wpływu dyskomfortu lokalnego na ogólne odczucia cieplne ludzi oraz na określenie roli odzieży ochronnej w kształtowaniu warunków komfortu cieplnego. Dokonano także próby wyboru obiektywnego wskaźnika odczuć cieplnych ludzi w warunkach chłodnych i termoneutralnych.

Cel pracy osiągnięto badaniami eksperymentalnymi w warunkach przemysłowych. W kwestii dotyczącej odzieży ochronnej badania te rozszerzono o pomiary laboratoryjne. Pozwoliło to na dokładniejszą obserwację zmian izolacyjności cieplnej odzieży, związanych z wykonywaniem pracy.

Efektom badań własnych prowadzonych w warunkach rzeczywistych (hale produkcyjne przemysłu spożywczego) było uzyskanie wielu nowych informacji dotyczących dyskomfortu lokalnego. Szczególnie interesujący jest wpływ odczuć cieplnych z peryferyjnych obszarów ciała na ogólne odczucia cieplne ludzi, a także możliwość poprawy odczuć dyskomfortu lokalnego w warunkach chłodu przez specjalny dobór odzieży ochronnej.

Laboratoryjne badania własne (komora klimatyczna Duńskiego Uniwersytetu Technicznego) pozwoliły natomiast na ilościową obserwację zmian izolacyjności cieplnej odzieży, spowodowanych aktywnością fizyczną człowieka i pozycją ciała.

Uzyskane w badaniach informacje mogą być w przyszłości wykorzystane do poprawy warunków pracy na stanowiskach chłodnych.

2. CZŁOWIEK W ŚRODOWISKU TERMONEUTRALNYM I CHŁODNYM

Komfort cieplny człowieka jest zagadnieniem interdyscyplinarnym. Z jednej strony wpływa nań środowisko reprezentowane przez czynniki mikroklimatyczne, a także warunki pracy. Z drugiej strony - odczuwanie komfortu cieplnego jest bardzo subiektywne, podlegające indywidualnym reakcjom ciała ludzkiego. Dlatego też podczas badań z tej dziedziny należy również uwzględniać podstawową wiedzę z termofizjologii.

Do prawidłowego funkcjonowania organizmu ludzkiego niezbędne jest utrzymywanie na stałym poziomie jego temperatury wewnętrznej. Jest to możliwe dzięki działaniu układu termoregulacji. Od jego stanu zależą odczucia ciepłe ludzi. Warunkiem odczuwania komfortu jest oczywiście jak najmniejsze obciążenie mechanizmów termoregulacyjnych.

W celu wyjaśnienia powiązania między warunkami cieplnymi otoczenia (środowiskiem termicznym) a działaniem układu termoregulacji, wyodrębniono następujące strefy wpływu środowiska termicznego na organizm człowieka^{*)}:

- a) strefa komfortu cieplnego - względnie wąskie pasmo warunków termicznych, w których stała temperatura wewnętrzna utrzymywana jest dzięki małym adaptacyjnym zmianom eliminacji ciepła przez ustrój,
- b) strefa chłodu - strefa, w której skuteczność termoregulacji fizycznej osiąga granice ale nie jest jeszcze potrzebne zwiększanie wytwarzania ciepła do zachowania homeostazy termicznej; wzrasta znaczenie zmian behawioralnych,
- c) strefa zimna - temperatura powietrza jest niższa od krytycznej, tzn. takiej, poniżej której zwiększa się wytwarzanie ciepła w organizmie - temperatura wewnętrzna zostaje utrzymana dzięki zwiększeniu metabolicznej produkcji ciepła,
- d) strefa nietolerowanej zimna - mimo maksymalnego nasilenia reakcji termoregulacyjnych homeostaza termiczna zostaje zakłócona i temperatura wewnętrzna ciała obniża się.

Z wymienionymi strefami wiąże się używane w niniejszej pracy pojęcia takie, jak: "warunki termoneutralne, chłodu i zimna" lub "środowisko termoneutralne, chłodne i zimne".

^{*)} KOZŁOWSKI S., Granice przystosowania, Warszawa 1986, W.P.

2.1. Regulacja gospodarki cieplnej ustroju

2.1.1. Termoregulacja fizyczna. Izolacyjność fizjologiczna

Ciepło wytwarzane w wyniku przemian metabolicznych przenika do powierzchni skóry przez przewodzenie oraz wskutek konwekcji wraz z krążącą krwią. Ilość ciepła M przewodzonego przez tkanki zależy od różnicy temperatur w warstwie izolacyjnej ciała. Warstwę tę stanowią: tkanka skórna, tkanka tłuszczowa i tkanka mięśniowa. Ich współczynniki przewodnictwa cieplnego przy skurczonych naczyniach krwionośnych, wynoszą odpowiednio (Mitchell, 1970 [98]):

$$k_s = 0,23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$$

$$k_f = 0,21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$$

$$k_m = 0,50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Jak widać z zestawienia, warstwę o największej oporności cieplnej jest tkanka tłuszczowa. Odgrywa ona bardzo istotną rolę w zachowaniu ciepła, a więc i temperatury wewnętrznej ustroju. W warunkach zimna ludzie otyli mają wyższą temperaturę wewnętrzną oraz niższą temperaturę skóry niż osobnicy szczupli (Buskirk i in. 1963 [17]). Powoduje to prawie czterokrotne wydłużenie czasu przeżycia w zimnej wodzie osób otyłych w porównaniu do szczupłych (Keatinge, 1969 [73], Kollias i in. 1974 [76], Timbal i in. 1976 [145]).

Stopień skurczu naczyń krwionośnych w tkance skórnej zależy od ogólnego bilansu cieplnego ustroju. Możliwość regulacji przewodności cieplnej tej tkanki zawiera się od $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ dla pełnego skurczu, przez $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ dla osoby siedzącej w warunkach neutralnych, do $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ i więcej podczas silnego wydzielania potu (McIntyre, 1980 [91]).

Najsilniejszy skurcz naczyń krwionośnych występuje w obszarze kończyn. Może to spowodować spadek temperatury skóry w warunkach zimnych nawet o 10 K. Takie obniżenie temperatury ma już istotne znaczenie dla normalnego funkcjonowania tkanek w tych obszarach. Brak jest natomiast termoregulacyjnych zmian przepływu w skórze głowy. Spadek temperatury skóry na czole w czasie przebywania w warunkach zimnych wynosi zaledwie 1 K w porównaniu do stanu neutralnego (McIntyre, 1980 [91]). Wpływa to na znaczną utratę ciepła z obszaru głowy. W ten sposób człowiek może utracić nawet 50% ciepła (Rewerski i in. 1972 [131]).

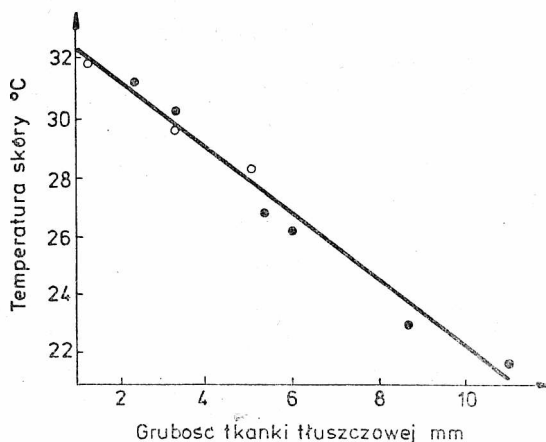
2.1.2. Termoregulacja chemiczna. Wzrost przemiany materii

Jeśli temperatura otoczenia obniża się, skurcz naczyń krwionośnych przestaje być wystarczający do utrzymania równowagi cieplnej organizmu. Wówczas metaboliczna produkcja ciepła zaczyna wzrastać w wyniku zwiększenia spoczynkowego napięcia mięśni szkieletowych i drżenia

mięśniowego. Możliwa jest również termogeneza bezdrzeniowa wskutek aktywizacji hormonalnej tarczycy i nadnerczy. Temperatura otoczenia, poniżej której zaczyna liniowo wzrastać metaboliczna produkcja ciepła, nazywana jest temperaturą krytyczną T_{oc} . Temperatura krytyczna dla człowieka nagiego w spoczynku wynosi ok. 25°C (Wilkinson i in. 1972 [155], Śliwińska i Michalczyk, 1981 [140]).

Termoregulacyjny wzrost produkcji ciepła ΔM jest proporcjonalny do spadku temperatury wewnętrznej ciała, gdy średnia temperatura skóry T_s jest stała oraz do spadku temperatury skóry, jeśli temperatura wewnętrzna T_{re} jest stała. Wpływ zmian temperatury wewnętrznej na wzrost produkcji ciepła jest znacznie większy niż takich samych zmian temperatury skóry (Hong i Nadel, 1979 [64], Tanaka, 1978 [44]). Obserwowano także drżenie mięśniowe przy termoneutralnych wartościach średniej temperatury skóry i stałej temperaturze wewnętrznej na skutek oziębienia samej twarzy (Buguet i in. 1976 [16]).

Wielkość termoregulacyjnego wzrostu produkcji ciepła zależy od grubości tkanki tłuszczowej, która znacznie chroni ustrój przed oziębieniem (Daniels i Baker, 1961 [30], Jequier i in. 1974 [70], Wyndham i in. 1968 [159]). Wartości progowe temperatury wewnętrznej i temperatury skóry, poniżej których wzrasta metaboliczna produkcja ciepła, są wyższe dla osób szczupłych niż otyłych (rys. 1).



Rys. 1. Wartość średniej temperatury skóry obserwowanej w momencie wystąpienia termoregulacyjnego wzrostu przemiany materii: * - punkty doświadczalne uzyskane przez LeBlanc (1954 [77]), ° - punkty doświadczalne uzyskane przez Śliwińską i Michalczyka (1980 [139])

Fig. 1. Mean skin temperature at the onset of thermoregulatory heat production versus fat thickness: * - experimental data of LeBlanc (1954 [77]), ° - experimental data of Śliwińska and Michalczyk (1980 [139])

U tych ostatnich wyższa temperatura wewnętrzna ciała hamuje wpływ niskiej temperatury skóry.

Maksymalna produkcja ciepła obserwowana w trakcie drżenia mięśniowego osiągnęła pięciokrotną wartość spoczynkowej produkcji ciepła, tj. ok. $290 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, (Iampietro i in. 1960 [68], Goldman, 1978 [52]).

W warunkach otoczenia odpowiadających strefie nietolerowanego zimna, gdy termoregulacyjny wzrost produkcji ciepła jest niewystarczający do utrzymania temperatury wewnętrznej człowieka, następuje stopniowe ochładzanie ciała. Wówczas najbardziej efektywną formą zachowania ciepła staje się termoregulacja behawioralna. Zwłaszcza istotne jest zwiększenie izolacyjności odzieży i aktywności ruchowej.

Termoregulacyjny wzrost produkcji ciepła stanowi obciążenie fizjologiczne organizmu ludzkiego. Dlatego też podczas częstego i długotrwałego narażania człowieka na zimno (np. pracowników chłodni) należy dążyć do tego, aby termoregulacyjny wzrost produkcji ciepła ΔM był jak najniższy. Istotną rolę odgrywa odpowiednia odzież ochronna.

2.2. Odzież

2.2.1. Transport ciepła i masy przez odzież

W warunkach zimowych, kiedy niemożliwe jest utrzymanie równowagi cieplnej za pomocą mechanizmów termoregulacyjnych, właściwa odzież staje się czynnikiem niezbędnym do zachowania zdrowia. Jeśli jej izolacyjność jest dobrana odpowiednio do temperatury otoczenia, pozwala to na zminimalizowanie obciążenia układu termoregulacji (nie jest potrzebny termoregulacyjny wzrost produkcji ciepła). A minimalne zaangażowanie układu termoregulacji jest niezbędnym warunkiem odczuwania komfortu cieplnego.

W ostatnich latach daje się zauważyć duży wzrost zainteresowania własnościami termicznymi odzieży. Stosowane dziś w wielu laboratoriach ogrzewane manekiny pozwalają na dokładniejsze, w porównaniu z metodami wcześniejszymi, zbadanie faktycznego wpływu różnorodnej odzieży na utratę ciepła z organizmu ludzkiego. Te ostatnie polegały przede wszystkim na pomiarze oporu cieplnego płaskich warstw materiału (Morris, 1953 [99], O'Callaghan i Probert, 1976 i 1977 [112] i [113]). Okazały się one niewystarczające, gdyż różnice w izolacyjności cieplnej materiałów nie zawsze powodują podobne różnice w izolacyjności cieplnej gotowych ubiorów (McCullough i in. 1983 [85]).

Odzież jest złożonym układem włókien i zawartego między nimi powietrza. Powietrze to wypełnia przestrzeń między kolejnymi jej warstwami. Występuje również w samym materiale, z którego wykonana jest odzież. Objętość powietrza w materiale zależy od jego grubości, gęsto-

ści oraz rodzaju włókna i jego splotu. Od ilości nieruchomego powietrza zawartego w całym zestawie odzieżowym zależy izolacyjność ubioru (O'Callaghan i Probert, 1977 [113], Rohles i in. 1973 [132]).

Drógę przepływu ciepła od powierzchni ciała człowieka do otoczenia można podzielić na trzy odcinki:

- przepływ ciepła pomiędzy powierzchnią skóry a odzieżą
- przepływ ciepła przez odzież
- przepływ ciepła z powierzchni odzieży do otoczenia.

Na wszystkich odcinkach przepływ ten odbywa się przez przewodzenie przez włókna (oprócz punktów kontaktu stosunkowo niewielkiego, gdyż większość włókien ułożona jest prostopadle do strumienia ciepłego) oraz przez przewodzenie, konwekcję i promieniowanie w warstwach i pustkach powietrznych. Dokładny opis tych procesów można znaleźć w pracach Ceny i Clarka (1978a [20] i 1979 [22]).

Na podstawie podanej charakterystyki przepływu ciepła widać od jak wielu czynników zależy izolacyjność odzieży. Przewodzenie w punktach kontaktu jest duże w porównaniu z przewodzeniem przez obszary powietrzne. Stąd od rodzaju powierzchni wewnętrznej materiału będzie zależało oddawanie ciepła ze skóry. Na przykład materiały wełniane z wystającymi nad ich powierzchnię włoskami mają stosunkowo małą powierzchnię kontaktu w porównaniu z gładkimi powierzchniami materiałów jedwabnych, określanych jako chłodne. Z tych samych powodów odzież ciasna, dopasowana, będzie miała mniejszą izolacyjność niż luźna. Jednak w odzieży obszernej silny wiatr lub intensywne ruchy ciała mogą powodować zwiększoną wymianę ciepła przez konwekcję. W tym przypadku zaburzona zostaje również warstwa zewnętrzna powietrza przylegającego do ubrania, zmniejszając jego izolacyjność całkowitą. Rozłożenie poszczególnych części ubrania na powierzchni ciała oraz jego fason znacznie wpływają na izolacyjność cieplną odzieży. Badania Seppanena i in. (1972 [133]) wykazały, że pod wpływem mody tylko między rokiem 1969 a 1971 wartość średniej izolacyjności cieplnej odzieży, noszonej przez populację amerykańską zwiększyła się z 0,9 do 1,09 clo (0,140 do 0,169 m² · K · W⁻¹), tj. o około 20%.

Ostatnio coraz częściej stosuje się sztuczne włókniny, które w swojej strukturze mogą zawierać znaczne ilości powietrza, co czyni z nich materiały o dużej izolacyjności cieplnej w porównaniu z tkaninami i dzianinami. We włókninach jednak występuje stosunkowo duży przepływ ciepła przez promieniowanie. Można temu zapobiec stosując po obu stronach takiego materiału warstwy refleksyjne. Badania Breckenridge'a (1978 [14]) wykazały, że sposób ten pozwala zwiększyć izolacyjność o ok. 85%.

Sumując, izolacyjność cieplna odzieży jest zależna od własności materiałów, z których jest wykonana, od ilości warstw i ich rozkładu na powierzchni ciała, od stopnia pokrycia powierzchni ciała, dopasowania odzieży, itp.

Charakteryzując odzież jako barierę cieplną między człowiekiem a otoczeniem należy pamiętać o jej istotnej roli w transporcie wilgoci z powierzchni ciała do otoczenia. Ubiór stanowi dodatkową przeszkodę dla dyfuzji pary wodnej pochodzącej z parowania potu. Ponadto może absorbować pot w fazie ciekłej. To wszystko zmniejsza efektywność pocenia (zmniejsza się gradient gęstości pary wodnej), które jest najważniejszą drogą wymiany ciepła w warunkach gorących. Fakt ten staje się mniej istotny w warunkach chłodu, kiedy wydzielanie wody przez organizm ogranicza się do "perspiratio insensibilis" (dyfuzja pary wodnej przez skórę, Brebner i in. 1956 [13]), które ocenia się na ok. 6% maksymalnej ewaporacji potu (Gagge i Nishi, 1977 [47]).

Odzież ze względu na transport wilgoci można scharakteryzować współczynnikiem przepuszczania (przenikania) f_{pcl} , wprowadzonym przez Nishi'ego i Gagge'go (1970 [106]). Wartość tego współczynnika zawiera się między 0 dla odzieży nieprzemakalnej a 1 wtedy, kiedy nie ma odzieży. Autorzy założyli, że parowanie potu odbywa się całkowicie na powierzchni skóry. Metodę określania "efektywnego oporu parowania" przez odzież, czyli charakterystyki odzieży ze względu na transport wilgoci, podali również Holmer i Elnäs (1981 [63]).

Od własności absorpcyjnych i przepuszczalności cząsteczek wody przez materiał zależy mikroklimat odzieży. Materiały bawełniane na przykład lepiej absorbują wilgoć z powierzchni skóry niż poliamidowe, natomiast mają gorszą przepuszczalność pary wodnej. Jest to przyczyną większej zawartości wilgoci w odzieży bawełnianej. W związku z tym obserwuje się zmniejszenie "perspiratio insensibilis" lub pocenia termoregulacyjnego, a więc również obciążenia układu termoregulacji (Tokura i in. 1982 [147], Kawakami i in. 1984 [72], Tokura, 1985 [146]). Fakt ten ma duże znaczenie w odczuwaniu komfortu cieplnego przez człowieka w warunkach zbliżonych do termoneutralnych lub lekko ciepłych w zależności od surowca, z jakiego wykonana jest odzież. Od własności sorpcyjnych włókien zależy też możliwość odparowania potu, gdy jest gorąco. Włókna poliamidowe mogą pochłonąć w sumie mniej wilgoci przy danej wilgotności otoczenia niż na przykład bawełniane czy wełniane. W warunkach ekstremalnych uniemożliwiają więc odparowanie całego wydzielonego potu i powodują odczuwanie zwiększonego dyskomfortu cieplnego. Ponadto są przyczyną zawiłgocenia skóry, co znacznie zwiększa możliwość jej uszkodzenia, szczególnie na stopach (stąd różnice między skarpetami bawełnianymi i poliamidowymi).

Pod wpływem wilgoci zmienia się też oczywiście izolacyjność cieplna odzieży, przy czym tkaniny zachowują się różnie w zależności od rodzaju włókien, z których zostały wykonane. Mogą one łatwiej nasiąkać wodą (włókna hydrofilne, na przykład poliamidowe) lub trudniej (włókna hydrofobowe, na przykład wełniane o małej zawartości wilgoci). Włókna wełniane i poliamidowe mają podobną izolacyjność, jeśli są suche. Kiedy jednak zachodzi w nich transport wody, np. wskutek pocenia się, ich izolacyjność spada, ale nie w jednakowym stopniu. Izolacyjność materiału z włókien poliamidowych zmniejsza się o 40% bardziej niż wełnianych (Behmann, 1962 [6]). Utrata ciepła w odzieży poliamidowej jest większa wskutek jej szybszego wysychania.

Z podanej charakterystyki odzieży wynika kilka ogólnych zasad, które należy uwzględnić podczas projektowania odzieży chroniącej przed zimnem. Odzież taka powinna być luźna. Przyleganie należy zapewnić jedynie w nadgarstkach, kostkach u nóg i wokół szyi. Ze względu na brak pocenia termoregulacyjnego można polecić materiały z włókien sztucznych, zwłaszcza jeśli będą one stanowiły drugą warstwę lub dalsze warstwy ubioru.

2.2.2. Izolacyjność odzieży. Definicje

Najważniejszą właściwością odzieży ze względu na jej zastosowania podczas zimna i chłodu jest jej izolacyjność, to jest opór cieplny warstwy między skórą a zewnętrzną powierzchnią odzieży, odniesiony do jednostki powierzchni. Pierwszą wprowadzoną i do tej pory najczęściej używaną jednostką izolacyjności jest "clo" (Gagge i in. 1941 [46]). 1 clo jest to izolacyjność odzieży niezbędna do zapewnienia komfortu cieplnego osobie siedzącej w temperaturze otoczenia 21°C. Ilościowo jest ona równa 0,155 m²·K·W⁻¹. W literaturze spotyka się również inne jednostki izolacyjności odzieży, np. 1 tog równy 0,1 m²·K·W⁻¹ (Peirce i Rees, 1946 [125]) lub 1 e·cm⁻¹, odpowiadający wartości 0,5 clo (Cena i Clark, 1978b [21]).

Wiele problemów spowodowało porównywanie wyników badań izolacyjności odzieży prowadzonych przez różnych autorów z powodu różnorodnego definiowania tej wielkości. Breckenridge i Goldman (1977 [15]) badali izolacyjność całkowitą I_t, Nishi i in. (1975 [108], 1976 [109]) - efektywną I_{cl_e}, natomiast Seppanen i in. (1972 [133]) oraz Sprague i Munson (1974 [137]) badali tzw. podstawową izolacyjność odzieży, I_{cl}.

Izolacyjność całkowita I_t jest izolacyjnością warstwy od powierzchni skóry do otoczenia, a więc zawiera efekt zwiększonej powierzchni ciała przez odzież oraz opór warstwy powietrza bezpośrednio przylegającego do powierzchni odzieży I_a:

$$I_t = \frac{T_s - T_o}{0,155 Q}, \quad (1)$$

gdzie

I_t - izolacyjność całkowita, clo

Q - utrata ciepła suchego z powierzchni ciała, $W \cdot m^{-2}$,

T_s - średnia temperatura skóry, $^{\circ}C$,

T_o - temperatura operatywna otoczenia, $^{\circ}C$.

Słabą stroną izolacyjności całkowitej jest to, że jej wartość zależy od czynników środowiska zewnętrznego (prędkość wiatru, temperatura powietrza), które bezpośrednio wpływają na grubość warstwy powietrza przylegającego do odzieży.

Efektywna izolacyjność odzieży I_{cle} jest izolacyjnością warstwy od powierzchni skóry do zewnętrznej powierzchni ubrania. Nie uwzględnia efektu zwiększenia powierzchni ciała przez włożenie odzieży:

$$I_{cle} = I_t - I_a = \frac{T_s - T_o}{0,155 Q} - I_a, \quad (2)$$

gdzie

I_{cle} - efektywna izolacyjność odzieży, clo

I_a - opór warstwy powietrza przylegającego do zewnętrznej powierzchni odzieży, clo.

Podstawowa (basic) izolacyjność odzieży jest to izolacyjność warstwy od skóry do powierzchni odzieży, liczona na jednostkę powierzchni nagości ciała (w clo):

$$I_{cl} = I_t - \frac{I_a}{f_{cl}} = \frac{T_s - T_o}{0,155 Q} - I_a/f_{cl}, \quad (3)$$

gdzie

f_{cl} - współczynnik zwiększenia powierzchni ciała przez odzież:

$f_{cl} = A_{cl}/A_{Du}$, gdzie A_{cl} - powierzchnia ciała człowieka ubranego, A_{Du} - powierzchnia ciała człowieka nagości.

Relacja między opisanymi izolacyjnościami jest następująca:

$$I_{cl} = I_{cle} + I_a(1 - 1/f_{cl}) = I_t - I_a/f_{cl}. \quad (4)$$

Zależność ta jest istotna podczas porównywania wyników pochodzących z różnych badań.

2.3. Komfort cieplny

2.3.1. Fizjologiczne kryteria komfortu

Komfort cieplny człowieka, zgodnie z definicją ASHRAE (1974 [2]), jest to taki stan umysłu, który wyraża zadowolenie z otaczającego środowiska termicznego. Oznacza to, że organizm człowieka musi być w stanie termicznie neutralnym, a ponadto w żadnym obszarze ciała nie mogą wystąpić odczucia dyskomfortu lokalnego.

Odczucia cieplne człowieka są ściśle skorelowane ze stanem układu termoregulacji. Im większe obciążenie mechanizmów termoregulacyjnych (pocenie, drżenie), tym większy jest stopień dyskomfortu. Odczucia dyskomfortu spowodowanego zimnem są proporcjonalne do obniżenia temperatury skóry na danym obszarze ciała (Gagge i in. 1969 [48]), natomiast dyskomfortu spowodowanego ciepłem - do podwyższenia się wilgotności skóry (Cabanac, 1971 [18], Hardy, 1970 [58]). Generalne odczucie ciepła związane jest ze średnią temperaturą skóry \bar{T}_s , niezależnie od lokalizacji ciepłych i zimnych obszarów (Vokac i in. 1971 [153]). W warunkach komfortowych wartość średniej temperatury skóry wynosi $33,5^{\circ}\text{C}$ (Olesen i Fanger, 1973 [118]). Wartość $31,3^{\circ}\text{C}$ jest związana z odczuwaniem "przyjemnego chłodu", przy 30°C zaczyna występować drżenie, a przy średniej temperaturze skóry niższej niż 29°C dane środowisko jest oceniane jako "za zimne" (ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1985 [1]). Istotnym czynnikiem modyfikującym podane zależności jest stopień aktywności ruchowej (poziom metabolizmu). W trakcie wykonywania pracy człowiek może odczuwać tzw. "komfort mieszany" (Benzinger, 1978 [10]). Temperatura skóry ma wówczas niższą wartość niż $33,5^{\circ}\text{C}$, temperatura wewnętrzna ciała jest podwyższona, a wydzielanie potu zwiększone. Ponadto w trakcie wykonywania pracy człowiek jest mniej czuły na zmianę temperatury otoczenia niż osoba przebywająca w spoczynku.

Na podstawie fizjologicznych kryteriów komfortu cieplnego (tj. zakładając minimalne obciążenie układu termoregulacji oraz wartość średniej temperatury skóry równą 33°C) można określić w jaki sposób dane środowisko termiczne wpływa na odczucia cieplne ludzi. Stosuje się w tym celu, w zależności od sytuacji, wiele różnych wskaźników takich, jak temperatura subiektywna (McIntyre, 1976 [89]), standardowa temperatura efektywna (Nishi i Gagge, 1974 [107]), czy WBGT (Yaglou i Minard, 1957 [164]). Najbardziej popularne dla środowisk umiarkowanych jest jednak równanie komfortu cieplnego Fangera (1967 [34]) oraz opracowany na jego podstawie wskaźnik PMV (przewidywana średnia ocena komfortu).

2.3.2. Dyskomfort lokalny

Lokalne odczucie dyskomfortu może być spowodowane wieloma czynnikami, takimi jak asymetria promieniowania, przeciągi, zimne lub ciepłe podłogi, a także niejednorodność izolacyjności cieplnej odzieży.

Asymetria promieniowania w pomieszczeniach wynika z występowania w nich gorących lub zimnych powierzchni. Mogą to być ogrzewane sufity, grzejniki, okna, źle izolowane ściany. Wielu autorów prowadziło różnorodne badania komfortu cieplnego ludzi w asymetrycznym polu promieniowania (Chrenko, 1953 [27], Griffiths i McIntyre, 1974 [55], McNall i Biddison, 1970 [94], Bahidi, 1972 [4], Olesen i in. 1972a [119], McIntyre, 1975 [88], Fanger i in. 1980 [39]). Uzyskane z tych badań wyniki różnią się bardzo od siebie. Wynika to z różnorodności stosowanych metod pomiarowych i przyjmowanych wskaźników asymetrii. Ostatnie badania Fangera i in. (1985 [42]) wykazały, że najbardziej przykre odczucia powoduje asymetria promieniowania wywołana zimną powierzchnią ściany i ciepłą powierzchnią sufitu. Dopuszczalne wielkości asymetrii w tych wypadkach pokrywają się z rekomendacjami ASHRAE (1981 [3]) i ISO (1984 [69]) i wynoszą odpowiednio 10 K dla zimnej powierzchni ściany i 5 K dla ogrzewanego sufitu.

Przeciąg jest definiowany jako nieprzyjemne lokalne konwekcyjne ochładzanie ciała. Stopień dyskomfortu wywołany przeciągiem jest oczywiście zależny od prędkości ruchu i temperatury powietrza. Badania wykazały, że w zasadzie dopiero prędkości powyżej $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mogą spowodować odczucia dyskomfortu (McIntyre, 1980 [91]). Stopień odczuwania dyskomfortu jest również zależny od miejsca na powierzchni ciała, na które działa przeciąg. Człowiek jest znacznie bardziej czuły na ruch powietrza w obszarze szyi niż na przykład na wysokości kostek u nóg. Z doświadczeń Fangera i Pedersena (1977 [44]) wynika, że z punktu widzenia komfortu cieplnego bardzo istotne też są fluktuacje prędkości ruchu powietrza. Najbardziej nieprzyjemny jest ruch o częstotliwości zmian 0,3 do 0,5 Hz. Bodziec o tej częstotliwości wywołuje największy przepływ ciepła na głębokości 0,2 mm pod powierzchnią skóry, tzn. tam gdzie znajdują się zakończenia termoreceptorów (Madsen, 1977 [82]).

Dyskomfort lokalny stóp jest często spowodowany ich ochładzaniem konwekcyjnym lub za niską temperaturą podłogi. Kobiety częściej narzekają na dyskomfort z powodu zimnych stóp niż mężczyźni, aczkolwiek temperatura skóry stóp w stanie komfortu wynosi u kobiet $28,6^{\circ}\text{C}$, a u mężczyzn $31,2^{\circ}\text{C}$ (Nevins i Feyerherm, 1967 [101]).

Olesen na podstawie badań własnych (1977 [115]) oraz analizy wyników badań Nevinsa i in. (1964 [102]) podaje optymalną temperaturę podłogi równą 25°C dla osoby siedzącej w obuwiu i 23°C dla osoby sto-

jącej, dopuszczając 6% niezadowolonych. Przy temperaturze podłogi niższej niż 20-22°C odsetek ludzi odczuwających zimno w stopy szybko wzrasta.

U osób, którym ogólnie jest ciepło, obserwuje się dobrą cyrkulację krwi w peryferyjnych obszarach ciała i lekkie ochładzanie kończyn w zasadzie nie zmienia ich ogólnego odczucia ciepła. Może natomiast mieć wpływ na komfort cieplny samych stóp. Badania Lofstedta (1978 [80]) wykazały, że u takich osób zmiany temperatury powietrza wokół górnej części ciała mają większy wpływ na temperaturę samych stóp niż lokalne zmiany temperatury powietrza wokół kończyn dolnych. U osób mało aktywnych, odczuwających lekki chłód, zredukowany jest dopływ krwi do kończyn. I wówczas obszary te ochładzają się znacznie bardziej wraz ze spadkiem temperatury powietrza niż centralne części ciała (Muncey i Holden, 1959 [100]).

Charakter odczuć związanych z dyskomfortem lokalnym zależy od ogólnego stanu termicznego organizmu ludzkiego. Jeśli dana osoba znajduje się w stanie termicznie neutralnym, to na ogół jest dość odporna na wpływy dyskomfortu lokalnego. Jeśli natomiast odczuwa chłód, to znacznie gorzej znosi lokalne oziębianie ciała. Stąd wniosek, że jeśli pracownik przebywający w warunkach chłodnych będzie ubrany w odzież, która zapewni mu ogólne odczucia cieplne "termoneutralnie" lub "lekko ciepło", to fakt ten powinien zminimalizować odczucia dyskomfortu lokalnego, tj. chłodu w peryferyjnych obszarach ciała.

2.4. Praca w obniżonej temperaturze otoczenia

Stres zimna jest silnym bodźcem dla układu nerwowego. Jego dłuższe działanie powoduje, że człowiek staje się nadmiernie pobudliwy. Upośledzona zostaje zdolność koncentracji, a wskutek tego możliwość wykonywania skomplikowanej pracy umysłowej (Bowen, 1967 [12]).

W niskiej temperaturze otoczenia dłonie i palce oziębiają się nawet o kilkanaście stopni (Wyndham i in. 1964 [158]). Pojawia się sztywność w stawach wskutek gęstnienia mazi stawowej, co znacznie pogarsza zręczność dłoni. Clark (1961 [28]) i Newburgh (1968 [104]) obserwowali to zjawisko przy spadku temperatury palców do 12-16°C. Helström (1965 [60]) nawet przy temperaturze 20°C.

W chłodzie pogarsza się również czułość palców, co jest szczególnie widoczne przy temperaturze skóry niższej niż 6°C (Provins i Morton 1960 [128]). Chłód oziębiający poniżej 27°C głębiej położone mięśnie powoduje znaczne zmniejszenie ich siły. Jeśli temperatura nerwu spadnie poniżej 9°C, zahamowane zostaje przewodzenie neuronowe (McIntyre, 1980 [91]). Wszystkie te czynniki wywołują znaczne ograniczenie zdol-

ności wykonywania precyzyjnej pracy w niskich temperaturach otoczenia (Fox, 1967 [45], Provins i Clarke, 1960 [127]). W niektórych wypadkach utrata sprawności sięga 70% (Meese i in. 1984 [97]).

Obniżenie temperatury kończyn zależy od temperatury otoczenia, izolacyjności cieplnej odzieży oraz rodzaju wykonywanej pracy. Dlatego też w literaturze spotyka się różne graniczne wartości temperatur powietrza, przy których pojawia się znaczne upośledzenie zręczności. Na podstawie badań przeprowadzonych w ostatnich latach proponuje się, aby podczas wykonywania lekkiej pracy temperatura powietrza nie była niższa niż 10°C (Lewis i in. 1983 [79]).

W przemyśle, gdzie ze względu na charakter produkcji pracownicy są narażeni na ciągły chłód (np. hale produkcyjne chłodni), należy zapewnić im taką ochronę cieplną ciała, aby cyrkulacja krwi w obszarach peryferyjnych była prawidłowa.

3. BADANIA KOMFORTU CIEPLNEGO NA CHŁODNYCH I TERMONEUTRALNYCH STANOWISKACH PRACY

3.1. Metoda

Główne czynniki wpływające na odczucia cieplne ludzi dzielą się na dwie grupy. Pierwsza z nich to wielkości fizyczne charakteryzujące środowisko (temperatura, wilgotność i prędkość ruchu powietrza oraz temperatura promieniowania otoczenia). Druga grupa to wielkości fizyczne i fizjologiczne charakteryzujące człowieka (aktywność ruchowa, izolacyjność cieplna odzieży oraz indywidualne własności organizmu ludzkiego).

W ramach niniejszej pracy badania prowadzące do poznania relacji między wymienionymi czynnikami a komfortem cieplnym lub stopniem dyskomfortu wykonano w warunkach przemysłowych. Przyjęto, że termoneutralne stanowiska pracy - to takie stanowiska, na których nie są potrzebne żadne środki ochrony termicznej. Natomiast na stanowiskach chłodnych wymagana jest odzież chroniąca przed zimnem.

3.1.1. Badania laboratoryjne

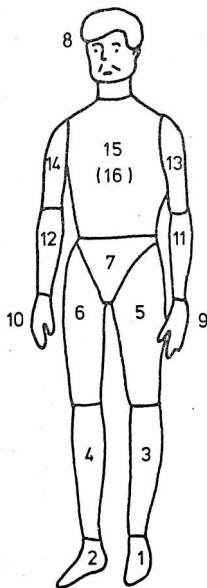
Badania laboratoryjne przeprowadzono w komorze klimatycznej Duńskiego Uniwersytetu Technicznego (kwiecień-lipiec 1981 r.). Dokładny opis komory przedstawiono w pracy Kjerulfa-Jensena i in. (1975 [74]). Badania te stanowiły fragment programu "Własności termiczne odzieży roboczej", finansowanego przez Europejskie Zjednoczenie Węgla i Stali (European Coal and Steel Union) (Olesen i in. 1982 [123]).

Badano izolacyjność cieplną czterech następujących zestawów odzieży roboczej:

- a) szortów,
- b) lekkiej odzieży roboczej (majtki, koszula bawełniana z długimi rękawami, bawełniane spodnie, bawełniane skarpety, buty skórzane),
- c) normalnej odzieży roboczej (jak w punkcie b, ponadto podkoszulka bawełniana z krótkimi rękawami (T-shirt) i bluza bawełniana),
- d) grubej odzieży roboczej (jak w punkcie c, ponadto ocieplacz pod bluzę i spodnie (nylon/poliester), grube wełniane skarpety zamiast bawełnianych, drewniaki zamiast skórzanych butów).

Badania prowadzono dla trzech różnych aktywności ruchowych: postawy siedzącej, stojącej i jazdy na cykloergometrze z częstotliwością 40 cykli na minutę.

Pomiary podstawowej izolacyjności odzieży przeprowadzono na ruchomym ogrzewanym manekinie, wykonanym w Duńskim Uniwersytecie Technicznym. Zewnętrzną powierzchnię manekina stanowi dwumilimetrowa warstwa włókna szklanego, wzmocnionego poliestrem. Wmontowane stawy w barkach, biodrach i kolanach pozwalają manekinowi stać, siedzieć w fotelu i pedałować na rowerze (z zastosowaniem zewnętrznego źródła energii). Ciepło do skóry manekina dostarczane jest drutami konstantanowymi, przyklejonymi do wewnętrznej powierzchni warstwy włókna szklanego. Ciało manekina jest podzielone na 16 części, z których każda ma odrębne ogrzewanie i system kontroli (rys. 2).



Dokładny opis budowy manekina przedstawiono w pracy Olesena i in. (1982 [123]). Ponieważ manekin jest ogrzewany do stałej temperatury wewnętrznej T_i , zależność (3) opisująca izolacyjność podstawową przyjmie postać (w clo):

$$I_{cl} = \frac{T_i - T_o}{0,155 Q} - I_a/f_{cl} - I_s. \quad (5)$$

gdzie

T_i - temperatura wewnętrzna manekina - 36,5°C,
 I_s - izolacyjność "skóry" manekina - 0,348 clo.

Rys. 2. Ogrzewany ruchomy manekin służący do pomiarów izolacyjności cieplnej odzieży (Olesen i in. 1980 [123])

Fig. 2. Movable thermal manikin for clothing insulation measurements (Olesen et al. 1982 [123])

Podczas badań posłużono się metodą zastosowaną wcześniej przez Emborga (1980 [32]), polegającą na utrzymywaniu stałej wartości izolacyjności cieplnej warstwy powietrza przylegającego do zewnętrznej powierzchni odzieży I_a . Izolacyjność tę określono na początku eksperymentu za pomocą nagiego manekina w cło ($f_{cl} = 1$):

$$I_a = \frac{T_i - T_{on}}{0,155 Q_{mn}} - I_s, \quad (6)$$

gdzie

T_{on} - temperatura operatywna dla nagiego manekina, °C,

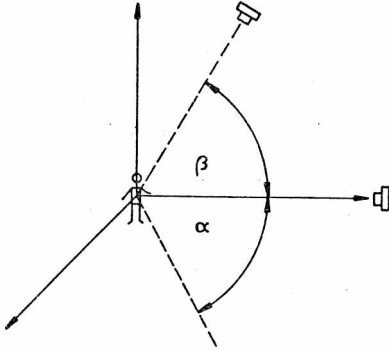
Q_{mn} - utrata ciepła z nagiego manekina, $W \cdot m^{-2}$.

Badanie izolacyjności warstwy powietrza I_a przeprowadzono dla trzech wymienionych wydatków energetycznych oraz dla różnych gradientów temperatur między powierzchnią skóry a otoczeniem.

Utrzymanie stałej wartości I_a uzyskano przez zmianę temperatury operatywnej w komorze tak, aby utrata ciepła z jednostki powierzchni ubranego manekina (Q_m/f_{cl}) była taka sama jak utrata ciepła z jednostki powierzchni skóry manekina w teście bez odzieży (Q_{mn}), tj. $42 W \cdot m^{-2}$ dla postawy siedzącej, $48 W \cdot m^{-2}$ dla stojącej i $70 W \cdot m^{-2}$ dla jazdy na cykloergometrze. Podane wartości zostały określone z równania komfortu Fangera i odpowiadają utracie ciepła suchego u człowieka wykonującego takie same czynności. W trakcie badań, oprócz utraty ciepła z manekina, mierzono również temperaturę powierzchni skóry (termistorami) i powierzchni odzieży (termometrem bezkontaktowym).

Do przeprowadzenia eksperymentu konieczne było wcześniejsze określenie współczynnika zwiększania powierzchni przez odzież, ($f_{cl} = A_{cl}/A_{Du}$) W tym celu zastosowano metodę fotograficzną, opisaną przez Seppanena i in. (1972 [133]). Metodę tę, na podstawie analizy wyników Fangera (1970 [35]), rozszerzono o dodatkowe kąty pomiaru. Ostatecznie więc mierzono rzuty powierzchni manekina nagiego i ubranego w różne zestawy odzieżowe dla dziewięciu kierunków w poziomie (opisanych kątem α) i dwóch kierunków w pionie (opisanych kątem β), rys.3. W tym celu użyto dwóch aparatów fotograficznych (jeden w poziomie, drugi pod kątem $\beta = 60^\circ$) oraz obracającej się tarczy poziomej, na której umieszczono manekina. Procedurę tę zastosowano dla manekina stojącego i siedzącego. Rzuty powierzchni manekina mierzono planimetrem na papierze fotograficznym wielkości 24x30 cm. Współczynnik f_{cl} obliczono ze wzoru:

$$f_{cl} = \frac{\sum_{\alpha, \beta} A_{cli}}{\sum_{\alpha, \beta} A_{ni}}, \quad (7)$$



gdzie

$\sum_{\alpha, \beta} A_{cl1}$ - suma rzutów powierzchni ubranego manekina dla 18 kierunków ustawienia aparatu fotograficznego,

$\sum_{\alpha, \beta} A_{n1}$ - suma rzutów powierzchni nagiego manekina dla 18 kierunków ustawienia aparatu fotograficznego.

Rys.3. Ustawienie dwóch aparatów fotograficznych w trakcie wykonywania zdjęć do pomiaru współczynnika f_{cl} : wartości kąta β : 0° i 60° ; wartości kąta α : 0° ; $11,25^\circ$; $33,75^\circ$; 45° ; $56,25^\circ$; $67,5^\circ$; $78,75^\circ$; 90°

Fig. 3. Cameras set up for measuring the area factor f_{cl} ; β : 0° and 60° ; α : 0° ; $11,25^\circ$; $33,75^\circ$; 45° ; $56,25^\circ$; $67,5^\circ$; $78,75^\circ$; 90°

Dla jazdy na cycloergometrze przyjęto, że f_{cl} jest średnią z wartości współczynników zwiększenia powierzchni dla postawy stojącej i siedzącej.

3.1.2. Badania przemysłowe

Badania przemysłowe wykonano w ramach programu międzyresortowego MR-II/19 "Efektywność wykorzystania surowców i energii w produkcji żywności", temat: "Elementy i wnętrza budynków a oszczędność energii i komfort cieplny ludzi" (Cena i in. 1982 [25], Śliwowski i Śliwińska 1983 [143], Grzeszczyk i in. 1984 [56], Grzeszczyk i in. 1985 [57]).

Badania przeprowadzono w halach produkcyjnych trzech typowych chłodni (A - Legnica, B - Opole, C - Elk) i w rozlewniach trzech browarów (D - Leżajsk, E - Warka, F - Poznań) w sezonie letnim i zimowym. Mierzono tam wielkości fizyczne charakteryzujące mikroklimat, tj. temperaturę T_a , wilgotność RH i prędkość ruchu v_a powietrza oraz średnią temperaturę promieniowania otoczenia T_r . Jednocześnie badano odczucia cieplne pracowników: ogólne Y i z poszczególnych obszarów ciała Y_1 (dłonie, stopy, głowa, tułów). Posługiwano się w tym celu skalą Bedforda:

strefa dyskomfortu spowodowanego ciepłem	}	7 - za gorąco
		6 - za ciepło
strefa komfortu cieplnego	}	5 - przyjemnie ciepło
		4 - komfortowo (ani za ciepło, ani za zimno)
		3 - przyjemnie chłodno
strefa dyskomfortu spowodowanego zimnem	}	2 - za chłodno
		1 - za zimno

Osoba badana wskazywała na skali swoje odczucia cieplne. Przyjęto, że strefa komfortu obejmuje trzy centralne punkty na skali Bedforda (3,4,5), natomiast strefa dyskomfortu zimna - dolną część tej skali (punkty 1 i 2), a strefa dyskomfortu ciepła jej część górną (punkty 6 i 7). Ponadto mierzono temperaturę skóry na czole każdego respondenta. Określono również czynniki osobowe wpływające na komfort cieplny, tj. izolacyjność cieplną odzieży I_{cl} oraz wydatek energetyczny M stosownie do wykonywanej czynności.

Izolacyjność odzieży roboczej noszonej przez pracowników określano metodą Sprague'a i Munson (1984 [137]) stosując wzór:

$$I_{cl} = 0,727 \sum I_{cli} + 0,113, \text{ clo} - \text{ dla ubrania męskiego}, \quad (8a)$$

$$I_{cl} = 0,770 \sum I_{cli} + 0,05, \text{ clo} - \text{ dla ubioru żeńskiego}, \quad (8b)$$

gdzie I_{cli} jest izolacyjnością poszczególnych części ubioru w clo.

Podczas określania wartości I_{cli} posługiwano się wynikami badań Seppanena i in. (1972 [133]), McCullough i in. (1982 [83]), McCullough i in. (1983 [85]), McCullough i Wyona (1983 [86]) oraz własnych badań laboratoryjnych. Zestawienie wartości izolacyjności cieplnej najczęściej noszonej odzieży roboczej podano w tab. 1.

Tabela 1
Izolacyjność odzieży noszonej przez pracowników
badanych hal produkcyjnych

Numer	Odzież	Izolacyjność I_{cli}	
		clo	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
1	2	3	4
1	podkoszulek: bez rękawów	0,06	0,009
	krótkie rękawy	0,09	0,014
	długie rękawy	0,13	0,020
2	halka	0,19	0,029
3	kalesony	0,20	0,031
4	rajstopy, pończochy	0,01	0,002
5	majtki	0,05	0,008
6	biustonosz	0,03	0,005
7	koszula lub bluzka: lekka z długimi rękawami	0,20	0,031
	średnia z długimi rękawami	0,25	0,039
	gruba z długimi rękawami (jeśli z krótkimi rękawami lub bez rękawów, to należy odjąć 10% izola-	0,29	0,045

1	2	3	4
	cyjności)		
8	kamizelka: cienka	0,15	0,023
	gruba	0,29	0,045
9	sweter: cienki	0,17	0,026
	średni	0,27	0,042
	gruby	0,37	0,057
	(jeśli z golfem, to dodać 7% wartości izolacyjności)		
10	spodnie: cienkie	0,26	0,040
	średnie	0,29	0,045
	grube	0,32	0,050
11	spódnica: cienka	0,15	0,023
	gruba	0,22	0,034
12	sukienka: cienka	0,17-0,22	0,026-0,034
	gruba	0,63-0,70	0,098-0,109
13	ubranie robocze cienkie: bluza	0,22	0,034
	spodnie	0,26	0,040
14	ubranie ocieplane: kufajka	0,60	0,093
	spodnie	0,50	0,078
15	spodnie dresowe: lekkie	0,26	0,040
	średnie	0,35	0,054
	grube	0,44	0,068
16	bluza od dresu: lekka	0,27	0,042
17	fartuch: cienki	0,22	0,034
	gruby	0,30	0,047
18	czapka	0,06	0,009
19	rękawiczki z dzianiny lub ocieplane dzianiną	0,03	0,005
20	skarpety: grube, wełniane	0,04	0,006
	bawełniane i in.	0,03	0,005
21	półbuty, pantofle	0,04	0,006
22	buty wysokie (filcowe lub gumofilcowe)	0,08	0,012

Wydatek energetyczny określano metodą Pandolfa i in. (1977 [124], Garga i in. (1978 [49]) oraz Lehmana (1966 [78])). Przyjęto, że w hali produkcyjnej chłodni (sortowanie owoców mrożonych, pyz itp.) wykonuje się lekką pracę obu rąk w pozycji stojącej, lekko pochylonej. Na pracę wykorzystuje się 75% czasu. Natomiast w rozlewni browaru wykonywana

jest praca średnia obu ramion w pozycji stojącej, wyprostowanej. Przeznacza się na to ok. 67% czasu.

W sumie w sezonie letnim i zimowym przebadano 110 osób.

3.2. Wyniki

3.2.1. Badania laboratoryjne

Zestawy odzieży roboczej badane w komorze mikroklimatycznej przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2

Badane zestawy odzieży roboczej

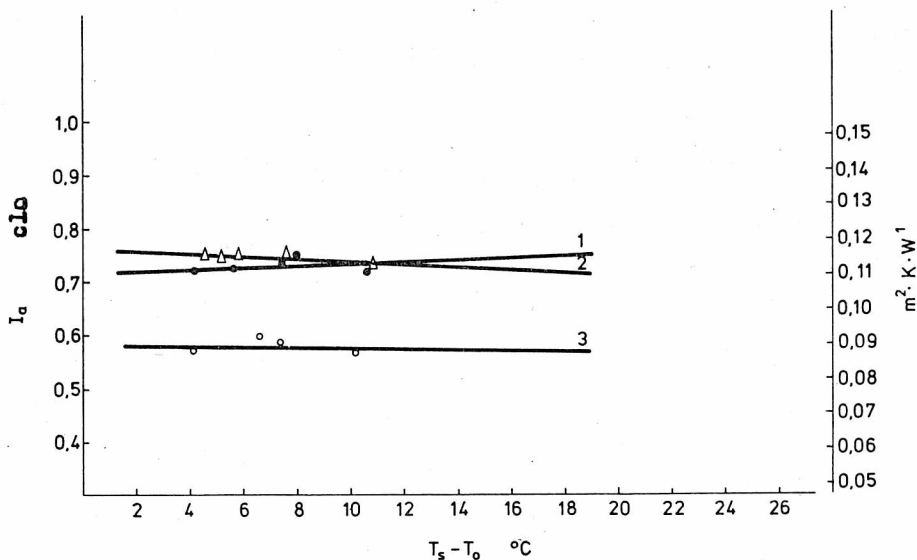
Numer	Opis zestawu
1	majtki, szorty
2	majtki, bawełniana koszula z długimi rękawami, bawełniane spodnie, bawełniane skarpety, skórzane buty
3	majtki, podkoszulek z krótkim rękawem, bawełniana koszula z długimi rękawami, bawełniane spodnie, bawełniana bluza, bawełniane skarpety, buty skórzane
4	majtki, podkoszulek z krótkimi rękawami, bawełniana koszula z długimi rękawami, spodnie i bluza, ocieplacz pod spodnie i bluzę (nylon/poliester), wełniane skarpety, drewniaki

Na rysunku 4 przedstawiono zależność izolacyjności cieplnej warstwy powietrza I_a od gradientu temperatur między manekinem a otaczającym go środowiskiem. W tabeli 3 podano wartości I_a , które miały być utrzymywane na stałym poziomie podczas badań izolacyjności odzieży.

Tabela 3

Wartości izolacyjności cieplnej warstwy powietrza przylegającego do odzieży I_a w zależności od postawy i aktywności; H_D - utrata ciepła suchego

Postawa, aktywność	I_a	
	clo	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
siedząca $H_D = 42 W \cdot m^{-2}$	0,75	0,116
stojąca $H_D = 48 W \cdot m^{-2}$	0,72	0,112
jazda na cykloergometrze $H_D = 70 W \cdot m^{-2}$	0,58	0,090



Rys.4. Zależność między izolacyjnością cieplną warstwy powietrza przylegającego do manekina I_a a gradientem temperatur od powierzchni manekina do otoczenia $\Delta T = T_s - T_o$, gdzie T_o jest temperaturą operatywną; 1-postawa stojąca, 2-postawa siedząca, 3-jazda na cycloergometrze
 Fig.4. The surface resistance I_a versus temperature difference $\Delta T = T_s - T_o$ between surface of the manikin and surroundings; T_o - operative temperature; 1-standing manikin, 2-sitting manikin, 3-manikin on a bicycle

Wartości współczynników f_{cl} (mierzone metodą fotograficzną) dla poszczególnych zestawów odzieżowych przedstawiono w tab. 4.

Tabela 4

Wartości współczynników f_{cl} dla badanych zestawów odzieży

Postawa, aktywność	f_{cl}			
	zestaw 1	zestaw 2	zestaw 3	zestaw 4
siedząca	1,01	1,25	1,28	1,32
stojąca	1,05	1,23	1,26	1,34
jazda na cycloergometrze	1,03	1,24	1,27	1,33

Otrzymane z pomiarów wyniki izolacyjności cieplnej odzieży przedstawiono w tab. 5.

Tabela 5

Wartości izolacyjności cieplnej badanych zestawów odzieżowych I_{cl}

Postawa, aktywność	I_{cl}							
	zestaw 1		zestaw 2		zestaw 3		zestaw 4	
	clo	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	clo	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	clo	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	clo	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
siedząca	0,01	0,002	0,66	1,102	0,82	0,127	1,25	0,194
stojąca	0,08	0,012	0,73	0,113	0,96	0,149	1,52	0,236
jazda na cykloergo- metrze	0,08	0,012	0,6	0,093	0,76	0,118	1,31	0,203

3.2.2. Badania przemysłowe

Wyniki badań mikroklimatu, odczuć cieplnych, izolacyjności cieplnej odzieży oraz temperatury skóry na czole pracowników na poszczególnych stanowiskach pracy przedstawiono w tab. 6-9. Ponieważ w browarze D w sezonie letnim temperatura powietrza wynosiła $30^{\circ}C$, grupę wyników dotyczących tego obiektu wyeliminowano z opracowań statystycznych. Wartości średnie mierzonych wielkości umieszczono w aneksie 3.

Tabela 6

Mikroklimat na stanowiskach pracy

Mikro- klimat	Sezon, obiekt					
	lato			zima		
	A	B	C	A	B	C
	Chłodnie					
$T_a, ^{\circ}C$	17,8	14,8	19,2	3,5	2,4	-0,8
$T_g, ^{\circ}C$	18,9	17,1	17,8	4,0	3,5	-0,5
$v_a, m \cdot s^{-1}$	0,16	0,30	0,22	0,50	0,43	0,22
RH, %	71	90	72	88	82	99
	D	E	F	D	E	F
	Browary					
$T_a, ^{\circ}C$	-	22,7	22,5	18,4	16,0	13,2
$T_g, ^{\circ}C$	-	24,1	24,1	19,4	17,6	14,0
$v_a, m \cdot s^{-1}$	-	0,50	0,35	0,15	0,17	0,20
RH, %	-	66	66	70	90	67

T_a - temperatura powietrza, T_g - temperatura termometru kulistego,
 v_a - prędkość ruchu powietrza, RH - wilgotność względna powietrza.

Tabela 7

Średnia ocena komfortu cieplnego Y według skali Bedforda

Rodzaj obiektu	Obiekt	Lato		Zima	
		Y	odchylenie standardowe	Y	odchylenie standardowe
Chłodnie	A	4,3	1,2	2,3	1,3
	B	3,9	0,9	1,4	0,6
	C	5,6	0,9	2,7	0,9
Browary	D	-	-	4,4	0,8
	E	5,1	0,9	3,8	1,0
	F	5,8	0,7	3,3	1,0

Tabela 8

Średnie wartości izolacyjności cieplnej odzieży I_{cl}

Rodzaj obiektu	Obiekt	Lato				Zima			
		I_{cl}	s	I_{cl}	s	I_{cl}	s	I_{cl}	s
		clo		$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$		clo		$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	
Chłodnie	A	0,78	0,16	0,121	0,025	1,48	0,31	0,229	0,048
	B	0,90	0,12	0,140	0,019	1,45	0,11	0,225	0,017
	C	0,76	0,16	0,118	0,025	1,83	0,26	0,284	0,040
Browary	D	-	-	-	-	0,94	0,11	0,146	0,017
	E	0,66	0,12	0,102	0,019	1,16	0,27	0,180	0,042
	F	0,58	0,13	0,090	0,020	0,85	0,13	0,132	0,020

s - odchylenie standardowe

Tabela 9

Średnie wartości temperatury skóry na czole T_{cz} , °C

Rodzaj obiektu	Obiekt	Lato		Zima	
		T_{cz} °C	odchylenie standardowe	T_{cz} °C	odchylenie standardowe
Chłodnie	A	33,8	0,9	31,6	1,9
	B	32,6	0,9	30,3	1,8
	C	34,5	1,0	32,9	1,4
Browary	D	-	-	34,8	0,6
	E	34,8	0,6	33,9	0,6
	F	34,8	1,2	33,1	0,6

Średnie wartości wydatku energetycznego obserwowane podczas badań wynoszą $110 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ dla pracowników chłodni i $116 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ dla pracowników browarów.

W celu przeprowadzenia oceny warunków komfortu cieplnego pracowników w poszczególnych obiektach obliczono też odsetek niezadowolonych (analogicznie do PPD Fanger'a, 1970 [35]), tzn. odsetek takich pracowników, których odczucia ciepłe mieściły się poza trzema centralnymi punktami na skali Bedford'a. Wyniki przedstawiono w tab. 10.

Tabela 10

Odsetek niezadowolonych ze środowiska termicznego

Rodzaj obiektu	Obiekt	Odsetek niezadowolonych, %	
		lato	zima
Chłodnie	A	33	71
	B	17	100
	C	67	36
	D	-	0
Browary	E	45	20
	F	67	25

Analizie statystycznej poddano następujące wielkości: izolacyjność odzieży I_{cl} , temperaturę skóry na czole T_{cz} oraz odczucia ciepłe Y . Mikroklimat ulegał niewielkim wahaniom w poszczególnych obiektach. Traktowano go więc jako ustalony, badając jedynie zależność między temperaturą powietrza T_a i wielkościami Y , T_{cz} i I_{cl} .

Na wstępie testem serii sprawdzono, że otrzymana próba jest próbą losową.

Analizę wyników pomiarów przeprowadzono w czterech grupach: chłodnie latem, chłodnie zimą, browary latem i browary zimą. Dla tych czterech grup postawiono hipotezę, że rozkłady badanych wielkości I_{cl} i Y w obserwowanym zakresie można przybliżyć rozkładem normalnym. Wyniki zastosowanego testu Kołmogorowa przedstawiono w tab. 11.

Otrzymane wartości statystyki Kołmogorowa λ są niższe niż odpowiednia wartość krytyczna $\lambda_{0,01} = 1,358$.

Zmienną Y traktowano jako zmienną typu ciągłego skupioną na odcinku $[1,7]$, której wartości podano z dokładnością do części całkowitej.

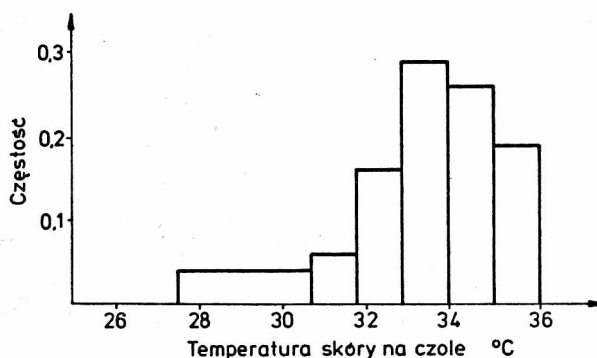
Do zweryfikowania hipotezy, że rozkład T_{cz} jest rozkładem normalnym, zestawiono test zgodności χ^2 , rozpatrując łącznie wszystkie zmierzone wartości T_{cz} . Zbiór wartości T_{cz} zgrupowano w sześciu klasach

Tabela 11

Zaobserwowane wartości statystyki Kolmogorowa λ
dla izolacyjności odzieży I_{cl} i odczuć ciepłych Y

Rodzaj obiektu	I_{cl}	Y
Chłodnie - lato	0,656	1,29
Chłodnie - zima	0,580	1,06
Browary - lato	0,441	0,86
Browary - zima	0,850	1,09

i przedstawiono w postaci histogramu (rys. 5). Wartość statystyki χ^2 wynosiła 3,44. Wartość krytyczna przy $\alpha = 0,05$ i trzech stopniach swobody jest równa $\chi^2_{0,05} = 7,815$.



Rys.5. Histogram zbioru wartości temperatury skóry na czole, T_{cz}
Fig.5. Frequency bar chart of forehead skin temperature T_{cz}

Zatem na podstawie przeprowadzonych testów przyjęto hipotezę, że I_{cl} , T_{cz} i Y można traktować jako zmienne o rozkładach normalnych.

Wnioskowanie dotyczące porównania średnich izolacyjności odzieży I_{cl} , odczuć ciepłych ogólnych Y , odczuć ciepłych z obszaru dłoni i stóp Y_5 i Y_6 , a także temperatury skóry na czole T_{cz} , przeprowadzono porównując wariancje za pomocą statystyki Snedecora F , a następnie wyznaczono wartości statystyki Studenta (dla hipotezy o równości wariancji) lub testu Welcha i Aspin (w razie odrzucenia hipotezy o równości wariancji) i porównywano je z wartością krytyczną dla danego testu (poziom istotności $\alpha = 0,05$). We wszystkich omówionych testach stosowano prawostronny obszar krytyczny, zatem jeśli obliczona wartość statystyki-

ki była nie mniejsza niż wartość krytyczna, hipotezę o równości porównywanych wielkości odrzucono. Wyniki wnioskowań przedstawiono w tab. 12-14 i 17.

Tabela 12

Porównywanie średnich wartości izolacyjności odzieży
w poszczególnych obiektach

Porównywane obiekty przemysłowe	Lato	Zima
	Wniosek dotyczący I_{cl}	
A - B	różnica nieistotna [*]	różnica nieistotna
C - A	różnica nieistotna	różnica istotna
C - B	różnica istotna	różnica istotna
D - E	-	różnica istotna
D - F	-	różnica nieistotna
E - F	różnica nieistotna	różnica nieistotna [*]

* - różnice te są istotne na poziomie $\alpha = 0,1$.

Tabela 13

Porównywanie wartości średnich odczuć ciepłych Y
w poszczególnych obiektach

Porównywane obiekty	Lato	Zima
	Wniosek dotyczący Y	
A - B	różnica nieistotna	różnica nieistotna
A - C	różnica istotna	różnica nieistotna
B - C	różnica istotna	różnica istotna
D - F	-	różnica istotna
F - E	różnica nieistotna [*]	różnica nieistotna
E - D	-	różnica nieistotna

* - różnica istotna dla $\alpha = 0,1$.

Tabela 14

Porównywanie wartości średnich temperatury skóry na czole T_{cz}
w poszczególnych obiektach

Porównywane obiekty	Lato	Zima
	Wniosek dotyczący T_{cz}	
A - B	różnica istotna	różnica nieistotna
A - C	różnica nieistotna	różnica nieistotna ^M
B - C	różnica istotna	różnica istotna
F - D	-	różnica istotna
F - E	różnica nieistotna	różnica istotna
E - D	-	różnica istotna

^M - różnica istotna dla $\alpha = 0,01$.

W celu zbadania możliwości przewidywania stanu termicznego wprowadzono dwa przydatne do tego celu wskaźniki. Pierwszy z nich to IREQ - Required Clothing Insulation - czyli izolacyjność niezbędna do zachowania równowagi cieplnej organizmu przy temperaturze skóry $T_s = 30^{\circ}\text{C}$ i jej wilgotności $\omega = 0,06$ (Holmer 1984 [61], aneks 1). Według autorów wskaźnika odczucia ciepła człowieka będącego w opisanym stanie równowagi termicznej są nie gorsze niż "za chłodno", czyli 2 w skali Bedforda (na ogół zawierają się między punktem 2 a 4 w skali Bedforda). Wartości wskaźnika IREQ obliczono dla warunków hal produkcyjnych chłodni zimą. Wyniki przedstawiono w tab. 15 wraz z wielkościami fizycznymi charakteryzującymi mikroklimat tych hal, średnimi wartościami izolacyjności cieplnej odzieży obserwowanymi w tych warunkach oraz średnimi wartościami odczuć cieplnych ludzi.

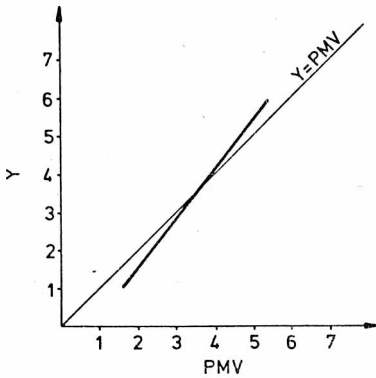
Tabela 15

Wartości wskaźnika IREQ dla hal produkcyjnych chłodni zimą oraz odpowiadające im średnie wartości izolacyjności cieplnej odzieży I_{cl} , odczuć cieplnych Y i elementów mikroklimatu

Obiekt	T_a $^{\circ}\text{C}$	T_g $^{\circ}\text{C}$	v_a $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	IREQ clo	I_{cl} clo	Y
A	3,5	4,0	0,16	1,44	1,48	2,3
B	2,4	3,5	0,30	1,54	1,45	1,4
C	-0,8	-0,5	0,22	1,75	1,83	2,7

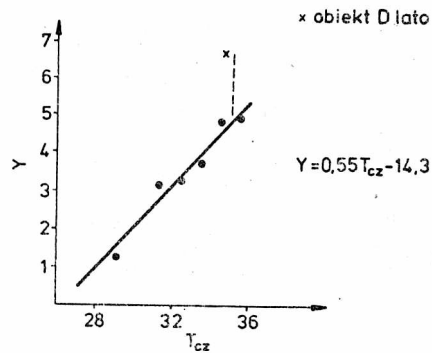
Drugim wskaźnikiem, o znacznie szerszym zakresie zastosowania, jest PMV - przewidywana średnia oceny komfortu Fangera (1970 [35], aneks 2). Obliczono jej wartości dla warunków termicznych każdego respondenta. Porównanie przewidywanej średniej oceny z faktyczną oceną odczuć cieplnych podawaną przez pracowników przedstawiono na rys. 6.

W trakcie przeprowadzonych pomiarów przeanalizowano również przydatność temperatury skóry na czole T_{cz} jako fizjologicznego wskaźnika stanu termicznego człowieka. Zależność wartości tego wskaźnika i odczuć cieplnych Y przedstawiono na rys. 7.



Rys.6. Zależność odczuć cieplnych Y od przewidywanej średniej oceny PMV u pracowników badanych obiektów

Fig.6. Relation between thermal sensations Y of workers and Predicted Mean Vote PMV



Rys.7. Zależność odczuć cieplnych Y od temperatury skóry na czole T_{cz} u pracowników badanych obiektów. Punkty reprezentują wartości średnie Y dla poszczególnych klas T_{cz} przedstawionych na rys. 5

Fig.7. Relation between thermal sensations Y of workers and their forehead skin temperature T_{cz}

Badano także dyskomfort lokalny, odczuwany szczególnie często przez pracowników chłodni zimą. Wyniki lokalnych odczuć cieplnych przedstawiono w tab.16, a ich porównanie dla poszczególnych obiektów w tab. 17.

W celu określenia roli peryferyjnych obszarów ciała w odczuciach cieplnych ludzi, zbadano korelacje odczuć ogólnych Y i odczuć z poszczególnych obszarów ciała Y_i . Optymalne funkcje opisujące zależność ogólnych odczuć cieplnych od odczuć z poszczególnych obszarów ciała są opisane wzorami (9) i (10) odpowiednio dla chłodni i browarów.

Dla chłodni:

$$Y = 0,447 + 0,480 Y_5 + 0,204 Y_6 + 0,001 Y_7 + 0,248 Y_8 \quad (9)$$

współczynnik korelacji wielokrotnej $R = 0,84$,

$F = 27,4$, $F_{kryt} = 5,71$, zależność istotna

dyspersja resztowa = 0,94

dyspersja całkowita = 1,72.

Dla browarów:

$$Y = -1,11 + 0,095 Y_5 - 0,014 Y_6 + 0,378 Y_7 + 0,743 Y_8 \quad (10)$$

współczynnik korelacji wielokrotnej $R = 0,83$

$F = 22,3$, $F_{kryt} = 5,72$, zależność istotna

dyspersja resztowa = 0,69

dyspersja całkowita = 1,24.

Tabela 16

Średnie odczucia cieplne z poszczególnych obszarów ciała Y_i
w skali Bedforda: Y_5 - dłonie, Y_6 - stopy, Y_7 - głowa, Y_8 - tułów

Obiekt	Zima				Lato			
	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8
A	1,3	1,3	4,0	3,3	4,8	5,5	5,7	4,9
B	1,0	1,0	2,0	1,3	3,8	4,0	4,0	3,9
C	2,2	2,6	3,4	3,1	4,8	4,8	4,8	4,9
D	4,8	4,5	4,6	4,6	-	-	-	-
E	3,0	3,3	4,0	4,0	4,6	4,3	5,3	5,7
F	3,2	4,1	4,6	4,1	4,3	5,1	5,4	5,1

Tabela 17

Porównywanie średnich wartości lokalnych odczuć ciepłych
w obszarze dłoni Y_5 i stóp Y_6 dla poszczególnych chłodzi zimą

Porównywane obiekty	Wniosek dotyczący Y_5	Wniosek dotyczący Y_6
A - B	różnica nieistotna	różnica nieistotna
B - C	różnica istotna	różnica istotna
A - C	różnica istotna	różnica istotna

Zbadanie istotności współczynników regresji wielokrotnej testem Studenta (tab. 18) wykazało, że we wzorze (9) jedynie współczynnik przy Y_5 jest istotny statystycznie, a we wzorze (10) współczynniki przy Y_7 i Y_8 są istotne statystycznie. Stąd wniosek, że największy wpływ na ogólne odczucia cieplne w chłodziach mają odczucia cieplne

z obszaru dłoni. Natomiast w browarach największy wpływ na ogólne odczucia ciepłe mają odczucia z obszaru tułowia, mniejszy - z obszaru głowy.

Tabela 18

Ocena istotności współczynników regresji

Współczynnik regresji	Wartość statystyki t	Wniosek
Chłodnie; wartość krytyczna $t_{0,05} = 2,01$		
A ₅	3,38	współczynnik istotny
A ₆	1,70	współczynnik nieistotny*
A ₇	0,005	współczynnik nieistotny
A ₈	1,53	współczynnik nieistotny
Browary; wartość krytyczna $t_{0,05} = 2,02$		
A ₅	0,92	współczynnik nieistotny
A ₆	0,20	współczynnik nieistotny
A ₇	2,56	współczynnik istotny
A ₈	5,37	współczynnik istotny

* współczynnik istotny na poziomie $\alpha = 0,1$

$t = \frac{A_i}{s/\sqrt{d_{ii}}}$, gdzie: d_{ii} - elementy diagonalne macierzy odwrotnej do macierzy współczynników układu równań normalnych $(X^T X)^{-1}$, s - dyspersja resztowa, A_i - współczynnik regresji wielokrotnej przy zmiennej Y_i .

4. KOMFORT CIEPLNY PRACOWNIKÓW W HALACH PRODUKCYJNYCH - DYSKUSJA

4.1. Mikroklimat badanych hal produkcyjnych

Mikroklimat pomieszczeń w istotny sposób zależy od ich przeznaczenia i sposobu eksploatacji, od rodzaju stosowanego ogrzewania lub ochładzania, cech termofizycznych przegród budowlanych, a także od klimatu lokalnego.

Warunki mikroklimatyczne w obiektach przemysłowych wynikają często z wymagań technologicznych realizowanej w nich produkcji. Dlatego też wielu pracowników przemysłu spożywczego zmuszonych jest do przebywania przez kilka godzin dziennie w warunkach, które są oceniane przez nich jako bardzo uciążliwe. Jak wykazały badania Fangera

(1976 [37]) oraz Fangera i in. (1977 [41]), nawet podczas regularnego przebywania w zimnym otoczeniu temperatura preferowana przez człowieka się nie zmienia. Chłodu człowiek nie może polubić. A na dodatek właśnie chłód w takich obiektach uważany jest przez pracowników za główną przyczynę wszelkich chorób i wypadków. Badania prowadzone w chłodniach moskiewskich (Repin, 1972 [130]) wykazały znacznie większą zachorowalność na grypy, infekcje kataralne, anginę itp. u pracowników technologicznych chłodni w porównaniu z pracownikami pomocniczymi, np. administracji.

W fazie planowania badań spodziewano się warunków chłodu i zimna w halach produkcyjnych chłodni oraz warunków chłodu i komfortu cieplnego w rozlewniach browarów. Ankieta przeprowadzona wśród brygadzystów, a dotycząca ogólnej, wieloletniej oceny mikroklimatu latem i zimą wykazała, że hale produkcyjne chłodni są określane jako lekko chłodne latem i za chłodne zimą, natomiast rozlewnie browarów jako lekko chłodne lub chłodne zimą i ciepłe latem.

Wyniki badań mikroklimatu (tab.6) wykazały, że w halach produkcyjnych chłodni zimą występowały warunki chłodu, ok. 0°C . Latem temperatura powietrza i temperatura promieniowania w nich wynosiła kilkanaście stopni Celsjusza. Chłodzenie więc w tych obiektach nie było wystarczające do zapewnienia produktom mrożonym właściwego środowiska. Wyjątek stanowiła chłodnia C, gdzie przygotowywano owoce do mrożenia i wysokość temperatury otoczenia nie miała już takiego znaczenia. W rozlewniach browarów zimą obserwowano warunki chłodu i warunki termoneutralne ($13-18^{\circ}\text{C}$). Natomiast latem temperatura otoczenia była najczęściej wyższa od optymalnej do zapewnienia komfortu cieplnego. Szczególnie występowało to w browarze D, gdzie badaniom w przeszklonej rozlewni towarzyszyło silne nasłonecznienie, podnosząc temperaturę powietrza do 30°C (aneks 3). Zresztą pracownicy wszystkich browarów skarżyli się, że nasłonecznienie latem jest zawsze zbyt uciążliwe.

W obu typach obiektów obserwowano, szczególnie zimą, stosunkowo dużą wilgotność względną powietrza (tab. 6). W warunkach dyskomfortu chłodnego może stać się to czynnikiem uciążliwym, gdyż powoduje zawilgocenie odzieży i pogorszenie jej izolacyjności. Przeprowadzona wśród pracowników ankieta wykazała, że większość pracowników odczuwała tę dużą wilgotność negatywnie i chciałaby, aby ją zmniejszyć.

Prędkość ruchu powietrza zmieniała się w zależności od sezonu i obiektu od $0,15$ do $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (tab. 6). Na podstawie wykonanych pomiarów i przeprowadzonej ankiety można stwierdzić, że w warunkach określanych jako chłodne i termoneutralne dopuszczalna prędkość nie powinna przekraczać $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (optymalna od $0,2$ do $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), nato-

miast w warunkach ciepła pracownicy lepiej by się czuli przy prędkości powietrza nieco wyższej niż $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Badania uciążliwości czynników mikroklimatycznych w przemyśle chłodniczym prowadził również Piontek (1978 [126]). Dowodzą one, że w typowych warunkach pracy przemysłu chłodniczego wartości parametrów mikroklimatu odbiegają od optymalnych. Jednakże ich ocena jedynie na podstawie temperatury efektywnej może się okazać niewystarczająca, gdyż nie uwzględnia izolacyjności cieplnej odzieży noszonej przez pracowników.

4.2. Ocena komfortu cieplnego pracowników

4.2.1. Subiektywna ocena środowiska termicznego

Uciążliwe warunki mikroklimatyczne, obserwowane w badanych obiektach przemysłowych, odbijają się w ocenach odczuć cieplnych Y pracowników (tab. 7) i w obliczonym odsetku niezadowolonych (tab. 10). Warunki najtrudniejsze z punktu widzenia fizjologii człowieka obserwowano w chłodniach zimą. Średnie odczucia ciepłe ludzi w tych obiektach wynosiły od 1,4 do 2,7 i nie mieściły się w strefie komfortu, tj. w obszarze trzech centralnych punktów w skali Bedforda, a odsetek niezadowolonych sięgał kilkudziesięciu procent. Powyższe wyniki wskazują na konieczność poprawy warunków pracy w tych obiektach.

Porównanie odczuć cieplnych, izolacyjności cieplnej odzieży i mikroklimatu w halach produkcyjnych obiektów B i C zimą wykazało istotną rolę odzieży w odczuwaniu komfortu. Mimo niższej temperatury otoczenia w chłodni C o ok. 3°C średnia ocena komfortu była tam wyższa o 1,3. Widać stąd, że niewielka, bo $0,3 \text{ clo}$ ($0,047 \text{ m}^2 \cdot \text{K}\cdot\text{W}^{-1}$), ale statystycznie istotna różnica w izolacyjności cieplnej odzieży na korzyść chłodni C (tab. 12), pozwala na znaczące poprawienie średnich odczuć cieplnych pracowników (tab. 13).

W trakcie badań prowadzonych w chłodniach zajmowano się przede wszystkim pracownikami chłodnych hal produkcyjnych. Istnieje jednak niemała grupa ludzi pracujących w warunkach o wiele bardziej uciążliwych. Są to wózkowi, wożący towar do pomieszczeń składowych i zamrażalniczych o temperaturze powietrza -25°C i -35°C oraz sztaplarze, układający towar w komorach i przebywający tam niejednokrotnie przez dłuższy czas. W celu porównania jednego ze sztaplarzy przebadano w taki sam sposób jak pozostałych respondentów. Posiadał on odzież o izolacyjności ok. $1,93 \text{ clo}$ ($0,299 \text{ m}^2 \cdot \text{K}\cdot\text{W}^{-1}$), a swoje odczucia ciepłe w pomieszczeniu składowym o temperaturze -30°C ocenił na 4 (komfortowo). Zaznaczył, że podobnie jak inni jego koledzy, komfort cieplny

reguluje sobie intensywność pracy. Z badań Cabanaca i LeBlanca (1983 [19]) wiadomo, że ludzie, jeśli mają możliwość takiego zachowania się, dostosowują swoją aktywność fizyczną do obniżonej temperatury otoczenia tak, aby utrzymać temperaturę wewnętrzną ciała na mniej więcej stałym poziomie. Jednak aktywność ta jest regulowana przez drugi równie ważny czynnik, a mianowicie pracę serca. Ludzie podświadomie nie dopuszczają, aby tętno przekroczyło wartość 120 uderzeń na minutę. Jest to swoisty fizjologiczny kompromis między zmęczeniem fizycznym a dyskomfortem spowodowanym zimnem, mający na celu uzyskanie maksymalnej przyjemności (komfortu cieplnego) kosztem jak najmniejszej przykrości (pracy fizycznej). Stąd wniosek, że komfort cieplny pracowników wykonujących ciężką pracę fizyczną jest problemem specyficznym, wymagającym odrębnych badań.

Odczucia ciepłe pracowników rozlewni w browarach w okresie zimowym mieszczą się w podanej strefie komfortu. Natomiast latem, z powodu dużego nasłonecznienia tych hal w trakcie badań, pracownicy określali swoje odczucia jako "przyjemnie ciepło" lub "za ciepło" (tab. 7). Ponieważ izolacyjność cieplna odzieży przy tego typu pracy jest określona pewnymi wymaganiami higienicznymi (fartuchy, czepki na włosy) obserwowanej jej minimalnej wartości nie można już zmniejszyć. Poprawienie warunków komfortu tych ludzi jest możliwe jedynie przez dokonanie zmian konstrukcyjnych w rozlewniach, przede wszystkim zmniejszenia przeszklenia lub zastosowanie klimatyzacji.

4.2.2. Obiektywna ocena środowiska termicznego. Przewidywanie stanu termicznego organizmu

Podstawowe wielkości wpływające na odczucia ciepłe ludzi dzielą się na dwie grupy: wielkości osobowe (aktywność ruchowa, izolacyjność cieplna odzieży) oraz wielkości środowiskowe (temperatura, wilgotność i prędkość powietrza oraz temperatura promieniowania). Z punktu widzenia oceny danego środowiska termicznego istotna jest możliwość przewidywania stanu termicznego ludzi w nim przebywających i ewentualnie wielkości streasu jakiemu podlegają.

Dotychczas opracowano wiele wskaźników łączących część lub wszystkie z wymienionych czynników. Ich opis można znaleźć w pracach Okołowicz-Grabowskiej (1976 [114], Tyczki 1976 [148], Gaggego i Nishiego 1977 [47] oraz McIntyre'a 1980 [91]). Niektóre z tych wskaźników odnoszą się przede wszystkim do obszarów komfortu cieplnego (np. temperatura subiektywna McIntyre'a 1976 [89]), inne do warunków gorąca (np. WBGT Jagloua i Minarda 1957 [164] czy wskaźnik stresu cieplnego HSI Beldinga i Hatcha, 1955 [8]). Najsłabiej reprezentowane są wskaźniki

odnoszące się do warunków zimna. Najczęściej dotychczas stosowany był wskaźnik WCI - Wind Chill Index - opracowany przez Siple'a i Passela (1945 [135]). Opisuje on prędkość utraty ciepła z jednolitrowego cylindra wody o temperaturze 33°C w funkcji temperatury i prędkości ruchu powietrza. Niestety odniesienie wartości wskaźnika WCI do efektów fizjologicznych (odczuć cieplnych) zostało opracowane dla odpowiednio ubranych badaczy Arktyki. Wskaźnik ten jest więc przeważnie używany do określania surowości warunków zimowych i związanego z tym ryzyka odmrożeń. Ostatnio Holmer (1984 [61]) zaproponował nowy wskaźnik stresu zimna, oparty na równaniu bilansu cieplnego człowieka, a więc wskaźnik łączący czynniki osobowe i środowiskowe. Nazywa się on IREQ - Required Clothing Insulation - czyli izolacyjność cieplna odzieży niezbędna do utrzymania równowagi cieplnej organizmu bez włączania dodatkowych mechanizmów termoregulacyjnych. Jest to izolacyjność, która pozwoli na zapewnienie odczuć cieplnych od "komfortowo" do "za chłodno", czyli od 4 do 2 w skali Bedforda.

W celu zbadania przydatności wskaźnika IREQ do badanych warunków przemysłowych obliczono jego wartość w niniejszej pracy dla warunków hal produkcyjnych chłodni zimą. Wyniki przedstawiono w tab. 15.

Porównanie wartości IREQ dla poszczególnych obiektów świadczy o tym, że środowiskiem o najtrudniejszym dla człowieka mikroklimacie powinna być hala produkcyjna chłodni C. Jednak w miarę odpowiedni dobór odzieży (tab. 8) złagodził wpływ tego środowiska na pracowników. Wynikiem była najwyższa średnia ocena odczuć cieplnych (tab. 7 i 13). Natomiast z badań w chłodni B wynika, że tylko jeden z pracowników miał odzież cieplejszą niż wymagana minimalna. Pozostali byli ubrani w odzież o izolacyjności mniejszej (1,34 - 1,47 clo, 0,208 - 0,228 m² · K · W⁻¹). W celu zachowania równowagi cieplnej u tych pracowników muszą zostać uruchomione dodatkowe mechanizmy termoregulacyjne, chroniące ustrój przed oziębieniem, tj. wzrost termoregulacyjnej produkcji ciepła i drżenie mięśniowe. Jest to zawsze związane z fizjologicznym obciążeniem ustroju, a więc ze stresem fizjologicznym. Zostało to wyrażone w średniej ocenie odczuć cieplnych podawanej przez pracowników. Wynosiła ona 1,4 w chłodni B, czyli mniej niż "za chłodno".

Z przedstawionych rozważań widać, że wskaźnik IREQ jest przydatny do oceny środowiska termicznego, a przede wszystkim do oceny wielkości stresu, jaki dane środowisko może wywołać. Ponieważ reakcje fizjologiczne organizmu i odpowiadające im uczucia są różne u różnych ludzi, wskaźnik IREQ nie może dokładnie określać jak należy się ubrać, aby osiągnąć stan komfortu cieplnego. Może natomiast stanowić wskazówkę do wstępnego wyboru odzieży odpowiedniej dla danych warunków.

Jednak ostateczny dobór izolacyjności, na przykład założenie dodatkowej kamizelki, należy pozostawić użytkownikowi. Wskaźnik IREQ w obecnej postaci nie może służyć do przewidywania stanu termicznego pracowników, co w badaniach komfortu cieplnego jest bardzo istotne.

W wyniku prowadzonych od ponad 50 lat badań bilansu i komfortu cieplnego ludzi powstały też wskaźniki kompleksowe, odnoszące się do większego obszaru warunków cieplnych, tj. od stresu zimna, poprzez warunki termoneutralne, do stresu gorąca. Wiadomo jednak, że im bardziej złożony wskaźnik, tym bardziej pracochłonne staje się jego wyznaczenie. Opracowano wprawdzie nomogramy i tabele do szybkiego wyznaczenia tych wskaźników, odnoszą się one jednak tylko do niektórych warunków. Najczęściej do małej izolacyjności cieplnej odzieży i wyższej temperatury powietrza.

Z grupy wskaźników kompleksowych, najchętniej dotychczas stosowana i polecana przez Międzynarodową Organizację Standaryzacji (ISO, 1984 [69]) jest przewidywana średnia ocena PMV (Fanger, 1970 [35]). Wskaźnik ten nie został jeszcze zatwierdzony dla pełnego zakresu aktywności fizycznej i izolacyjności odzieży. Z pewnością daje on dobre rezultaty dla małych aktywności i lekkiej odzieży. Dla innych warunków, jak uważają niektórzy autorzy (McIntyre, 1980 [91]), wskaźnik PMV nie jest wystarczająco dokładny. Rozbieżność między PMV a faktycznymi odczuciami obserwował również Cena i in. (1986 [26]) w badaniach komfortu cieplnego ludzi starszych. Dlatego też w trakcie badań komfortu cieplnego, prowadzonych w ramach niniejszych badań, oceniono przydatność wskaźnika PMV dla zwiększonej izolacyjności odzieży.

Obliczono wartość PMV dla wszystkich warunków, w jakich znajdowali się poszczególni pracownicy, uwzględniając izolacyjność ich odzieży. Zależność subiektywnych odczuć cieplnych Y podawanych przez pracowników i oceny obiektywnej, reprezentowanej przez PMV dla tych samych warunków, przedstawiono na rys. 6. Widoczne jest, że im bardziej środowisko różni się od termoneutralnego, tym większe są różnice między oceną przewidywaną a odczuciami cieplnymi. W warunkach najzimniejszych ocena subiektywna Y jest niższa od PMV o ok. 0,5, a w najcieplejszych - wyższa o tę samą wartość. Przyczyną obserwowanych różnic może być to, że wskaźnik PMV został opracowany na podstawie badań prowadzonych na grupie ludzi ubranych w odzież o izolacyjności 0,6 clo. Tymczasem takie samo zwiększenie obciążenia cieplnego będzie zupełnie inaczej odczuwane przez osobę ubraną lekko, a inaczej przez ubraną ciepło. Wraz ze wzrostem izolacyjności odzieży zmniejsza się jej przepuszczalność dla pary wodnej. Powoduje to wzrost wilgotności skóry, a w rezultacie zwiększone odczucie dyskomfortu. Czynnikiem ten

nie został uwzględniony w równaniu Fangera. Ponadto, jak zauważył McIntyre (1980 [91]), wzrost obciążenia cieplnego o pewną wartość (np. wzrost metabolizmu) spowoduje u osoby ubranej ciepło większy wzrost temperatury skóry i temperatury wewnętrznej ciała, niż u osoby ubranej lekko. A od wartości tych temperatur zależy odczucie ciepła. Opisane zjawiska tłumaczą rozbieżności między Y i PMV w obszarze dyskomfortu spowodowanego ciepłem (gruba odzież, zwiększona aktywność fizyczna). W warunkach zimna natomiast na różnicę między oceną przewidywaną a odczuciami subiektywnymi może mieć wpływ silny dyskomfort lokalny, odczuwany przez pracowników chłodni w obszarze rąk i stóp. Zwiększone oziębienie ciała w tych miejscach nie ma dużego znaczenia w ogólnym bilansie cieplnym, gdyż powierzchnia tych obszarów jest relatywnie mała (5% dłonie, 7% stopy). Nie będzie to więc uwidocznione w równaniu komfortu Fangera, a więc i w przewidywanej średniej ocenie. Ma jednak istotny wpływ na subiektywne odczucia cieplne Y . Problem ten zostanie omówiony w dalszej części pracy.

Na podstawie wielkości fizycznych charakteryzujących mikroklimat i wielkości fizycznych charakteryzujących człowieka, wymienione dotychczas wskaźniki mogą służyć do przewidywania wpływu danego środowiska na przebywających w nim ludzi. W trakcie badań komfortu cieplnego istotna jest jednak możliwość pomiaru takiej reakcji fizjologicznej, która wyrażałaby obciążenie cieplne organizmu i była związana z faktycznymi odczuciami cieplnymi. Od dawna zwracano uwagę na temperaturę powierzchni skóry (Nishi i Ibamoto, 1969 [110], Olesen i Fanger, 1973 [118]). Jej rola w bilansie cieplnym ustroju jest istotna. Jak wykazały badania Olesena i in. (1972b [117]), średnia temperatura skóry preferowana przez człowieka nie zależy od izolacyjności odzieży i wynosi $33,5^{\circ}\text{C}$, jeśli nie wykonuje on pracy fizycznej. W zakresie temperatur otoczenia, pozwalających na uzyskanie stanu komfortu cieplnego, nie obserwuje się dużych różnic międzyosobniczych i wartość temperatury skóry jest ściśle związana ze stanem termicznym. Rozkład temperatury skóry, a więc stopień niejednorodności, zależy od izolacyjności odzieży i temperatury otoczenia (Olesen i Fanger, 1973 [118]). 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 warunkach przemysłowych nie jest to jednak możliwe. Stosunkowo łatwy jest natomiast pomiar temperatury skóry na czole. 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 i Kozłowski, 1970 [75]). Olesen i Fanger (1973 [118]) podają, że temperatura skóry na czole w stanie komfortu cieplnego przyjmuje wartości od 33 do 35°C. Podobne wyniki uzyskano w trakcie badań komfortu cieplnego mieszkańców budynków wielorodzinnych (Śliwowski, 1982 [141]).

Przydatność temperatury skóry na czole T_{cz} , jako wskaźnika stanu termicznego pracowników przemysłowych, oceniono w trakcie badań prowadzonych w halach produkcyjnych chłodni i browarów. Zbadano zależność odczuć cieplnych podawanych przez pracowników i wartości temperatury skóry na czole (rys. 7). Na rysunku tym, w celu pokazania tendencji zmian zależności Y i T_{cz} , zamieszczono również punkt uzyskany z badań w temperaturze otoczenia 30°C.

Widoczne jest, że dla warunków, w których ocena odczuć cieplnych zawarta jest między 1 a 5, zależność tych odczuć od temperatury skóry na czole jest liniowa. Jednak w wyższych temperaturach otoczenia lub wyższej aktywności fizycznej należy się spodziewać wzmocnienia aktywności gruczołów potowych. Colin i Houdas (1965 [29]) obserwowali zapoczątkowanie termoregulacyjnego wydzielania potu przy średniej temperaturze skóry 34°C. W związku z tym temperatura skóry na czole po przekroczeniu wartości zbliżonej do 34°C będzie najprawdopodobniej niewiele wzrastać lub pozostanie na nie zmienionym poziomie. Taki przebieg zmian temperatury skóry na czole został potwierdzony przez dodatkowy punkt pomiarowy, uzyskany w trakcie badań w warunkach ciepła (browar D, lato).

Z przeprowadzonej analizy wypływa wniosek, że wartość temperatury skóry na czole T_{cz} może służyć jako wskaźnik stanu termicznego organizmu jedynie w warunkach chłodu i w warunkach termoneutralnych. Należy przy tym zachowywać pewną jednolitość warunków pomiarowych, gdyż różnorodność fryzur i nakryć głowy może powodować wzrost odchylenia standardowego.

Na podstawie przeprowadzonych rozważań można stwierdzić, że dla warunków termoneutralnych i warunków chłodu najbardziej przydatną ocenę środowiska uzyskamy stosując przewidywaną średnią ocenę PMV. Jednak w miarę zwiększania się stopnia dyskomfortu spowodowanego zimnem różnica między PMV a faktycznymi odczuciami będzie się zwiększała, osiągając wartość 0,5 w dolnym obszarze skali Bedforda.

4.2.3. Dyskomfort lokalny

Definicja komfortu cieplnego podana przez ASHRAE nie dopuszcza odczuwania przez człowieka dyskomfortu lokalnego. Tymczasem w halach produkcyjnych chłodni specyfika pracy wymaga częstego kontaktu dłoni z produktami mrożonymi. Ponadto większość czynności wykonywana jest w pozycji stojącej, narażającej stopy na ciągły kontakt z zimną powierzchnią podłogi (przynajmniej w zimie). Enander i in. (1979 [33]) zauważyli, że temperatura stóp pracowników chłodni (sortowanie, pakowanie produktów mrożonych) spada do 20-25°C, a dłoni do 12-15°C. Tak niskiej temperaturze rąk towarzyszy już zeszywnienie palców. Widać więc, że na chłodnych stanowiskach pracy należy się liczyć z występowaniem odczuć dyskomfortu lokalnego. Ponadto z badań Repina (1972 [130]) wynika, że nieprawidłowemu krążeniu krwi w palcach rąk towarzyszy znaczne obniżenie czucia dotykowego u 41% badanych. Ma to wpływ na efektywność wykonywanej pracy.

Badania przeprowadzone w halach produkcyjnych chłodni i browarów potwierdzają przypuszczenia występowania dyskomfortu lokalnego u pracowników (tab. 16). W chłodniach zimę odczucia ciepła z obszaru rąk i stóp zawarte były w przedziale "za zimno-za chłodno". Natomiast latem, mimo takiego samego typu pracy, odczucia te zbliżone już były do komfortowych. Stąd wniosek, że kontakt z zimnymi powierzchniami nie w każdym wypadku będzie powodować wystąpienie dyskomfortu lokalnego.

Kończyny mają stosunkowo małą pojemność cieplną i stosunkowo dużą powierzchnię w odniesieniu do masy. Dlatego też spadek przepływu ciepła do ok. $8,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ podczas skurczu naczyń krwionośnych (w porównaniu do $83 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ podczas normalnego przepływu krwi) powoduje znaczący spadek temperatury palców u rąk i stóp. Ponieważ odczucia ciepła w warunkach zimnych są skorelowane z temperaturą skóry, więc zmiana odczuć od "przyjemnie chłodno" do "za zimno" jest spowodowana przede wszystkim zwężeniem naczyń krwionośnych. Stąd wniosek, że w takich warunkach utrzymanie w miarę normalnego przepływu krwi w kończynach jest bardzo istotne.

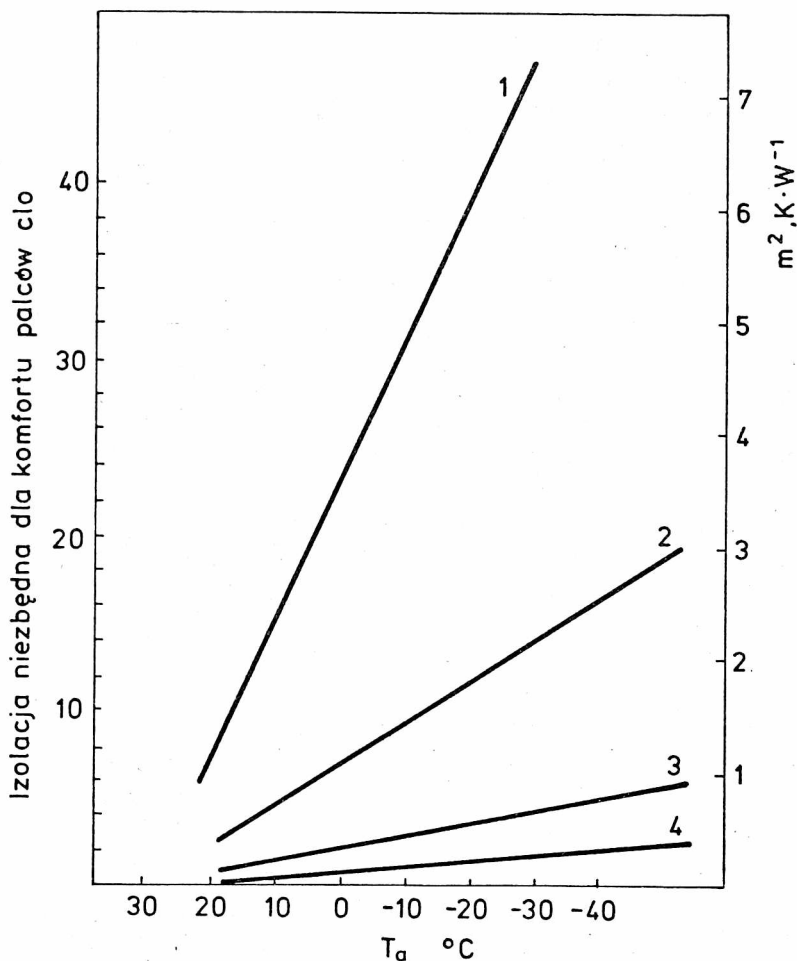
Palce składają się z części cylindrycznych i półsfery (opuszki). Od dawna znane są trudności w zapewnieniu prawidłowej izolacji cieplnej rur o małym przekroju. Zwiększanie grubości izolacji jest nieefektywne, gdyż zwiększa się powierzchnia utraty ciepła. Z badań w warunkach arktycznych wiadomo, że niemożliwe jest utrzymanie ciepłych rąk inaczej niż przez intensywną pracę, połączenie wspólną izolacją co najmniej całego ramienia i dłoni lub przez dostarczenie ciepła z zewnątrz.

Stworzenie wystarczająco ciepłej rękawiczki z palcami wydaje się nierealne. Jeśli przyjąć, że średni przekrój palca jest równy około 19 mm, a wymagana izolacyjność, przy normalnym przepływie krwi i $T_a = -25^{\circ}\text{C}$ jest równa 4 clo ($0,62 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), to grubość materiału o idealnych własnościach izolacyjnych wyniesie 8,5 cm. Jest to grubość zupełnie niepraktyczna dla rękawiczek. Jeśli uznać, że do przyjęcia dla palców jest grubość izolacji ok. 6,5 mm, to maksymalna izolacyjność lokalna w tym obszarze wyniesie 0,89 clo ($0,138 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), a dla opuszków palców tylko 0,71 clo ($0,11 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) (van Dilla i in. 1968 [31]). Maksymalna zmierzona izolacyjność rękawiczek z jednym palcem wynosi 1,5 clo ($0,232 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$).

Wartości izolacyjności lokalnej, niezbędnej do zapewnienia palcom warunków komfortu, przedstawiono na rys. 8. Wynika z niego, że praktycznie w temperaturze otoczenia niższej niż 10°C nie jest możliwe zapewnienie długotrwałego komfortu dłoniom człowieka w spoczynku za pomocą rękawiczek z palcami. Rękawiczki z jednym palcem przesuwają tę granicę o około 5°C .

Z rysunku 8 widać, że im mniejszy jest skurcz naczyń krwionośnych, tym mniejsze musi być izolacyjność rękawiczek, aby zapewnić dłoniom komfort cieplny. Izolacyjność ta staje się zupełnie realna, jeśli wystąpi rozszerzenie naczyń krwionośnych w skórze rąk. Fakt ten można wykorzystać do ochrony cieplnej peryferyjnych obszarów ciała. Ponieważ układ termoregulacji człowieka reaguje na ogólny bilans cieplny organizmu, należy przypuszczać, że im cieplejsza będzie odzież okrywająca centralne obszary ciała, tym mniejszy skurcz naczyń krwionośnych zaobserwuje się w obszarze dłoni i stóp oraz tym mniejszy będzie dyskomfort lokalny. Możliwy jest więc taki dobór izolacyjności cieplnej odzieży, że jego skutkiem będzie nawet rozszerzenie naczyń krwionośnych w obszarach peryferyjnych. Badania przeprowadzone w halach produkcyjnych chłodni potwierdzają powyższą tezę. U pracownic chłodni C zimę obserwowano wyższe odczucia cieplne z obszaru dłoni i stóp niż u pracownic innych obiektów (różnica istotna statystycznie), tab. 16 i 17. Różnicę tę można tłumaczyć jedynie wyższą izolacyjnością odzieży na tułowie u tych pracownic (tab. 12). Ochrona cieplna dłoni i stóp była u pracowników wszystkich obiektów poddana. Natomiast warunki mikroklimatyczne w chłodni C były najmniej korzystne ze względów fizjologicznych (tab. 6).

Zjawisko reakcji naczynioruchowej w peryferyjnych obszarach ciała na ogólny bilans cieplny organizmu obserwował też Spealman (1968 [136]). Wykazał on, że stopa zanurzona w zimnej wodzie będzie znacznie cieplejsza, jeśli ciało w całości będzie utrzymane ciepło (tab.19).



Rys. 8. Izolacja lokalna, niezbędna do zachowania komfortu cieplnego palców, w zależności od temperatury powietrza T_a i stopnia rozszerzenia naczyń krwionośnych (wg van Dilla i in. 1968 [31]); 1-skurcz maksymalny ($8,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 2-skurcz umiarkowany ($27,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 3-normalny przepływ krwi ($85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 4-rozszerzenie naczyń ($267 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 8. Clo values needed to maintain fingers thermal comfort for various air temperatures and conditions of peripheral circulation (van Dilla et al., 1968 [31]); 1-extreme vasoconstriction ($8.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 2-moderate vasoconstriction ($27.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 3-normal blood flow ($85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 4-vasodilation ($267 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

Również Siple (1968 [134]) twierdzi, że można ogrzać stopy bez zmiany obuwia, przez dodatkową izolację na tułowi. Zbliżoną opinię dotyczącą peryferyjnych obszarów ciała podaje Rewerski i in. (1972 [131]). Natomiast badania McIntyre'a i Griffithsa (1975a [92]) wykaza-

Tabela 19

Wartość średniej temperatury palucha T_p
w zależności od warunków eksperymentalnych

Warunki eksperymentalne	T_p , °C
Bardzo zimno, występowanie drżenia mięśniowego	11
Zimno, ale drżenie nie występuje	12
Komfortowo	20

ły, że dodanie wełnianego swetra podczas przebywania w umiarkowanym chłodziu wprawdzie podnosi ogólne odczucia ciepła o ok. 0,7 (w skali Bedforda) i odczucia ciepłe z dłoni o ok. 0,5, jednak nie zmienia ani stopnia dyskomfortu ogólnego, ani odczuć ciepłych z obszaru stóp. Również z doświadczeń Nevinsa i Feyerherma (1967 [101]), dotyczących wpływu chłodnych podłóg na komfort cieplny ludzi wynika, że obniżanie temperatury podłogi wpływa na dyskomfort stóp, mimo że warunki mikro-klimatu i izolacyjność odzieży pozwalały na utrzymanie odczuć komfortu ogólnego na nie zmienionym poziomie.

Analiza wyników badań własnych oraz prac wymienionych autorów pozwala wnioskować, że rozszerzenie naczyń krwionośnych w peryferyjnych obszarach ciała wystąpi wówczas, gdy reszta ciała będzie ciepło ubrana. Ciepło to znaczy tak, aby odczucia komfortu były nawet wyższe niż "komfortowe". Dopiero wówczas nadmiar ciepła kierowany jest do kończyn. Sytuację taką obserwowano w badanych obiektach latem. Wartość izolacyjności odzieży w odniesieniu do wykonywanej pracy i warunków mikroklimatu była wówczas taka, że ogólne odczucia ciepłe ludzi zawierały się najczęściej w górnej połowie skali Bedforda. I nie notowano skarg na występowanie dyskomfortu lokalnego. Natomiast dopóki odczuwany jest chociażby "lekki chłód", trudno jest zapewnić komfort narażonym na zimno dłoniom. A dodanie odzieży na tułów nie poprawia dyskomfortu w peryferyjnych obszarach ciała, co obserwowali w swoich badaniach McIntyre i Griffiths. Stąd wniosek, że odczucia dyskomfortu lokalnego w obszarze kończyn można zmniejszyć przez zastosowanie odpowiedniej odzieży ochronnej w obszarze tułowia.

W trakcie badań prowadzonych w halach produkcyjnych chłodni i browarów zbadano wpływ odczuć ciepłych z poszczególnych obszarów ciała na ogólne odczucia ciepła (równanie (9) i (10)). Okazało się, że w chłodniach, gdzie średnie odczucia zimą były zazwyczaj poniżej 4, a latem nie wyższe niż 4 (z wyjątkiem obiektu C latem, gdzie dopiero przygotowywano owoce do mrożenia), ogólne odczucia ciepłe Y są przede

wszystkim skorelowane z odczuciami cieplnymi z obszaru dłoni. Natomiast w browarach odczucia ciepłe ogólne są zależne przede wszystkim od odczuć cieplnych z obszaru tułowia, mimo iż wiele osób skarżyło się, zwłaszcza zimą, na dyskomfort stóp. Stąd wniosek, że im bardziej warunki termiczne odbiegają od komfortowych, tym bardziej odczucia ciepła są skorelowane z odczuciami dyskomfortu w peryferyjnych obszarach ciała. Potwierdzają to również wyniki badań Vokaca i in. (1971 [153]) oraz Gonzaleza i Nishiego (1978 [54]). W obu eksperymentach obserwowano związek między dyskomfortem ogólnym a dyskomfortem w obszarze kończyn. Działo się tak przypuszczalnie właśnie dlatego, że nie spełnione były warunki komfortu ogólnego. Izolacyjność odzieży była za mała dla stosowanych w badaniach temperatur powietrza.

Podczas omawiania peryferyjnych obszarów ciała nie należy zapominać o roli głowy w bilansie cieplnym człowieka. Rzadko się ludzie skarżą na odczucia zimna z tego obszaru. Jest to do przewidzenia, gdyż naczynia krwionośne tego obszaru mają słabą możliwość skurczu i temperatura skóry ulega niewielkim wahaniom. Ale właśnie dlatego w warunkach chłodnych jest to miejsce intensywnej utraty ciepła (do 50%). Odpowiednie nakrycie głowy, mimo że często pracownicy nie odczuwają takiej potrzeby, jest istotnym czynnikiem zachowania bilansu cieplnego organizmu.

Z podanych informacji wynika, że w środowiskach produkcyjnych, gdzie mikroklimat i aktywność fizyczna wymuszone są przez warunki technologiczne, główną możliwością stworzenia warunków komfortu cieplnego pracownikom jest prawidłowo dobrana odzież. Odpowiednio ciepłe ubranie tułowia pozwoli na zmniejszenie dyskomfortu w peryferyjnych obszarach ciała, a przez to na poprawienie ogólnych odczuć cieplnych pracowników na chłodnych stanowiskach pracy.

W halach produkcyjnych chłodni istotna jest ponadto bezpośrednia ochrona cieplna rąk. Zastosowanie rękawiczek nie ma wprawdzie dużego wpływu na komfort cieplny dłoni, pozwala jednak na podniesienie temperatury palców o kilka stopni, a fakt ten będzie miał wpływ na zdolność wykonywania pracy. Zawsze jest też aktualny problem odpowiedniego doboru obuwia i skarpet, gdyż w pozycji stojącej szczególnie łatwo o przemarznięcie stóp. Ochrona cieplna peryferyjnych obszarów ciała jest w ogóle w warunkach chłodnych sprawą pierwszorzędnej wagi, gdyż odczucia ciepłe z tych obszarów znacząco wpływają na ogólne odczucia komfortu.

Celowe jest prowadzenie dalszych badań komfortu cieplnego pracowników w warunkach rzeczywistych, gdyż stwarzają one największą możli-

wość uzyskania wiarygodnych informacji dotyczących wpływu środowisk produkcyjnych na pracujących tam ludzi.

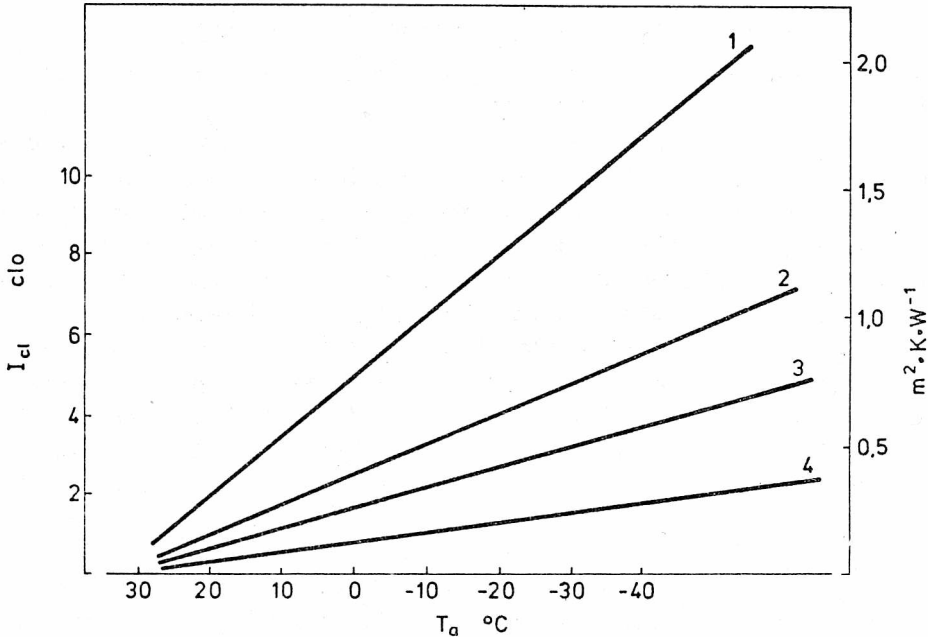
4.3. Rola odzieży w kształtowaniu komfortowego środowiska pracy

4.3.1. Odzież robocza

Ochronna odzież robocza powinna spełniać wiele podstawowych wymagań higienicznych. Powinna być lekka, miękka, wygodna, zapewniać maksymalną swobodę ruchów. Jej izolacyjność i przewodność należy dobrać odpowiednio do warunków środowiskowych oraz intensywności pracy. Tymczasem w praktyce zaniedbuje się często sprawę odzieży ochronnej w ogóle lub traktuje ją jako drugorzędną. Szczególnie zagadnienie odzieży chroniącej przed zimnem jest wciąż nie rozwiązane. Nie ma także ujednoczonych zaleceń dotyczących doboru izolacyjności odzieży w zależności od warunków mikroklimatu.

Odzież stosowana obecnie w chłodnych halach produkcyjnych pozostawia wiele do życzenia, zwłaszcza zimą. Można zauważyć, że jej izolacyjność nie jest dobra, co się zresztą wyraża w ocenie komfortu cieplnego γ (tab. 7). Średnie izolacyjności zimą wynosiły dla poszczególnych obiektów: 1,48; 1,45 i 1,83 clo (0,229; 0,225 i 0,284 $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), gdy tymczasem w celu długotrwałego utrzymania komfortu cieplnego w tych warunkach ($T_o = 2^\circ\text{C}$, $M = 110 \text{ W m}^{-2}$, $T_b = 33^\circ\text{C}$) niezbędną izolacyjność ocenia się na ok. 2,45 clo (0,380 $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), rys. 9. Polska norma dotycząca odzieży roboczej chroniącej przed zimnem jest dopiero w opracowaniu. W Instytucie Wzornictwa przemysłowego stworzono już jednak wstępne modele takiej odzieży. Centralny Instytut Ochrony Pracy zatwierdził dwa z nich: dla kierowcy wózka widłowego i dla pakowaczki-sortowaczki. Ich izolacyjność można ocenić na ok. 2,14 clo (0,332 $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) dla zestawu żeńskiego i 2,34 clo (0,363 $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) - dla męskiego. Jest to izolacyjność, która pozwoli na utrzymanie równowagi cieplnej organizmu, ale ocena komfortu będzie zapewne nieco niższa niż 4 w skali Bedforda, (tj. "przyjemnie chłodno" lub "za chłodno"). Ponieważ jednak odzież ta przewidywana jest do produkcji, niezbędny jest dokładny pomiar jej izolacyjności w warunkach pracy, a także badania komfortu cieplnego podczas jej zastosowania.

Jedną z przyczyn wciąż nie rozwiązanej sprawy odzieży w Polsce jest niewątpliwie trudność w określaniu izolacyjności cieplnej. Dotychczas w Polsce mierzy się przede wszystkim przewodność cieplną różnych warstw materiałów. Tymczasem ostateczna izolacyjność uszytego już ubrania zależy od wielu różnych czynników, a izolacyjność materiału jest tylko jednym z nich. Czynnikiem co najmniej tak samo istotnym jest



Rys.9. Izolacyjność cieplna odzieży I_{cl} niezbędna do zachowania komfortu cieplnego, w zależności od temperatury powietrza T_a i intensywności pracy (wg Beldinga 1968 [7]): 1-spokojna pozycja siedząca ($58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), 2-praca lekka ($116 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), 3-praca średnio ciężka ($175 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), 4-praca ciężka ($350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Fig.9. Total insulation I_{cl} required for comfort, against environmental air temperature T_a and activity (Belding, 1968 [7]): 1-sitting quietly ($58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), 2-light work ($116 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), 3-moderate work ($175 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), 4-hard work ($350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)

stopień dopasowania ubioru lub fason. W zależności od dopasowania, różnice w izolacyjności dla średnio grubych zestawów odzieżowych sięgają 30%. Na przykład izolacyjność spodni luźnych wynosi $0,34 \text{ clo}$ ($0,053 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$), podczas gdy dopasowanych tylko $0,24 \text{ clo}$ ($0,037 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$), bluza dwurzędowa ma izolacyjność $0,54 \text{ clo}$ ($0,084 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$), a jednorzędowa - $0,48 \text{ clo}$ ($0,047 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$). Spódnica o izolacyjności $0,28 \text{ clo}$ ($0,043 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$) po skróceniu o 15 cm ma izolacyjność $0,21 \text{ clo}$ ($0,033 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$), a po wydłużeniu o 15 cm - $0,34 \text{ clo}$ ($0,053 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$), McCullough i in. (1983 [85]). Stąd wniosek, że istotne jest określanie izolacyjności całego zestawu odzieży ochronnej, a nie tylko materiału, z którego jest uszyta.

4.3.2. Określanie izolacyjności cieplnej odzieży

Pomiary izolacyjności cieplnej na ludziach, a takie prowadzili Nishi i in. (1975 [108], 1976 [109]), Holmer i Elnäs (1979 [63]), Cena i in. (1980 [24]), są związane z licznymi uciążliwościami. Jedną z nich jest pomiar współczynnika konwekcji (w metodzie Nishiego), inną zaś - metabolizmu i utraty potu (w metodzie Holmera). Dlatego też najczęstszym sposobem określania izolacyjności odzieży jest zastosowanie manekina cieplnego (Seppanen i in. 1972 [133], Sprague i Munson, 1974 [137], Madsen, 1976 [81], Olesen i in. 1982 [123], Olesen i Madsen 1983 [120], McCullough i in. 1983 [85], 1985 [84], McCullough i Wyon, 1983 [86]). Jak wykazała analiza badań przeprowadzona przez Olesena i Nielsen (1984 [122]), wartości izolacyjności cieplnej mierzone na stojącym i chodzącym manekinie są porównywalne z odpowiednimi wartościami uzyskanymi z pomiarów na ludziach ubranych w te same zestawy odzieżowe.

Z bezpośredniego pomiaru utraty ciepła z manekina możemy otrzymać izolacyjność całkowitą I_t . Aby określić izolacyjność podstawową I_{cl} (równanie (3)), niezbędna jest znajomość izolacyjności granicznej warstwy powietrza I_a oraz współczynnik zwiększania powierzchni przez odzież f_{cl} .

Izolacyjność granicznej warstwy powietrza I_a , zmierzona dla różnych warunków temperatury operatywnej oraz postawy i aktywności manekina, przedstawiono na rys. 3. Jak widać I_a słabo zależy od różnicy temperatur między powierzchnią manekina a otoczeniem. Nieco różnie dla postawy stojącej i nieco spada dla siedzącej. Ta słaba zależność jest spowodowana prawdopodobnie konstrukcją komory klimatycznej - napływ powietrza z otworów w podłodze pokrywa się z kierunkiem konwekcji swobodnej. Nie pozwala to na wzrost grubości warstwy powietrza przylegającego do powierzchni ciała wraz ze wzrostem różnicy temperatur między tą powierzchnią a otoczeniem. Widoczny natomiast jest wpływ aktywności fizycznej na I_a , co jest zrozumiałe, gdyż powoduje ona silne zaburzenie warstwy granicznej powietrza. Izolacyjność I_a spada wówczas od ok. 0,72 clo ($0,112 \text{ m}^2 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$) dla postawy stojącej i 0,76 clo ($0,118 \text{ m}^2 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$) dla siedzącej, do około 0,58 clo ($0,090 \text{ m}^2 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$) dla jazdy na cykloergometrze.

Współczynnik zwiększenia powierzchni przez odzież f_{cl} zależy od wielu parametrów, takich jak: fason odzieży, jej dopasowanie, rodzaj materiału, sztywność i in. Znajomość współczynnika f_{cl} jest niezbędna w pomiarach izolacyjności odzieży na manekinie. Jednak jego pomiar metodą fotograficzną, jak uczyniono to w badaniach laboratoryjnych, jest bardzo czasochłonny. Analiza wyników wykazała (Olesen i in. 1982

[123]), że można tę metodę nieco uprościć. A mianowicie wystarczy określić f_{cl} dla sześciu kierunków opisanych kątami: $\beta = 0$ i 60° , $\alpha = 0^\circ$, 45° , 90° . Tak obliczona wartość średnia f_{cl} będzie się różniła od podanej w tab. 4 nie więcej niż o 2%.

Jednak nawet tak uproszczona metoda jest w dalszym ciągu zbyt pracochłonna, aby można ją było stosować w badaniach masowych. Dlatego też często się próbuje określać wartość f_{cl} na podstawie związanych z nim parametrów, np. I_{cl} . Pierwszą empiryczną zależność między f_{cl} a izolacyjnością odzieży (w jednostkach "clo") podał Goldman (1977 [51]):

$$f_{cl} = 1 + 0,15 I_{cl} \quad (11)$$

Później opracowano następujące wzory:

$$f_{cl} = 1 + 0,2 I_{cl} \quad \text{dla } I_{cl} < 0,5 \text{ clo}, \quad (12a)$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,1 I_{cl} \quad \text{dla } I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \quad (12b)$$

(Fanger, 1982 [38]),

$$f_{cl} = 1 + 0,26 I_{cl} \quad \text{dla pojedynczej sztuki, odzieży}, \quad (13a)$$

$$f_{cl} = 1 + 0,29 I_{cl} \quad \text{dla zestawów odzieżowych} \quad (13b)$$

(McCullough i in. 1983 [85], na podstawie danych Spragu'a i Munson),

$$f_{cl} = 1 + 0,43 I_{cl} \quad \text{dla pojedynczej sztuki odzieży}, \quad (14a)$$

$$f_{cl} = 1 + 0,34 I_{cl} \quad \text{dla całego ubioru} \quad (14b)$$

(McCullough i in. 1983 [85], na podstawie badań własnych),

$$f_{cl} = 1 + 0,26 I_{cl} \quad \text{dla całego ubioru}, \quad (15)$$

(Olesen i Nielsen, 1983 [121]).

Już na pierwszy rzut oka widoczne są duże różnice w zależnościach podanych przez różnych autorów. Ostatnie badania McCullough i in. (1985 [84]), przeprowadzone na dużej ilości odzieży wykazały, że zależność między f_{cl} a I_{cl} jest raczej słaba. W celu przybliżonego oszacowania autorzy sugerują wzór:

$$f_{cl} = 1 + 0,31 I_{cl}. \quad (16)$$

Należy się jednak w tym wypadku liczyć z błędem wpływającym na dokładność pomiaru izolacyjności odzieży.

Ponieważ zastosowanie manekina do pomiaru izolacyjności cieplnej ubiorów nie zawsze jest możliwe, ciągle istnieje zainteresowanie metodami uproszczonymi lub teoretycznymi. Wiele prac badawczych ostatniego okresu było poświęconych możliwościom określania izolacyjności cieplnej odzieży na podstawie jej cech fizycznych. Uzyskiwane wyniki nie są jednak jednolite. ASHRAE Standard (1981 [3]) proponuje, aby izolacyjność odzieży określać na podstawie jej ciężaru (w) zgodnie z zależnością $0,35 \text{ clo/kg}$. Tymczasem McCullough i Wyon (1983 [86]) oraz McCullough i in. (1983 [85], 1985 [84]) wykazali, że aczkolwiek istnieje dobra korelacja między ciężarem odzieży a jej izolacyjnością, to jednak bez dodatkowych informacji, dotyczących zwłaszcza rodzaju materiału, ciężar odzieży nie może służyć jako wskaźnik jej izolacyjności. Uzyskane przez autorów zależności wynosiły dla pojedynczych sztuk odzieży 1,00; 0,66 i 0,45 clo/kg, w zależności od grubości i ciężaru jednego metra kwadratowego materiału. Natomiast dla pełnych zestawów odzieżowych autorzy uzyskali w 1983 r. zależność $0,30 \text{ clo/kg}$, a w 1985 zależność $0,74 \text{ clo/kg}$. Różnica ta spowodowana była prawdopodobnie różnymi typami odzieży. Również Olesen (1985 [116]) w swoich badaniach obserwował istotną zależność izolacyjności cieplnej ubioru od jego ciężaru: $0,59 \text{ clo/kg}$ dla pojedynczej sztuki i $0,57 \text{ clo/kg}$ dla całego zestawu odzieżowego. Jednak zbyt duże odchylenia standardowe związane z tymi zależnościami nie pozwalają na zaakceptowanie tej metody. Z przedstawionych wyników można wyciągnąć wniosek, że ciężar odzieży nie może być dobrym wskaźnikiem jej izolacyjności.

Na podstawie ostatnich badań McCullough i in. (1985 [84]) podali metodę określania izolacyjności pojedynczej sztuki odzieży I_{cli} (clo) na podstawie grubości materiału d (mm) oraz stopnia pokrycia powierzchni ciała przez tę odzież f (%):

$$I_{cli} = 0,00790 \cdot f + 0,00131 \cdot d \cdot f - 0,0745 \quad (17)$$

Izolacyjność całego ubioru bez butów I_{cl} (clo) można przewidzieć na podstawie jego ciężaru w (kg) i stopnia pokrycia skóry przez warstwę odzieży:

$$I_{cl} = 0,225 \cdot w + (-0,00874 \cdot f_0) + (-0,00510 \cdot f_1) + 0,919 \quad (18)$$

gdzie f_0 - procent powierzchni ciała nie pokrytej odzieżą, f_1 - stopień pokrycia powierzchni ciała przez jedną warstwę odzieży.

Ci sami autorzy stworzyli również komputerowy model przewidujący dokładnie izolacyjność cieplną ubioru. Do jego wykorzystania jednak niezbędna jest stosunkowo duża liczba danych, takich jak: utrata ciepła z poszczególnych części ciała, ich powierzchnie i temperatury,

opory ciepłne poszczególnych warstw materiału i warstw powietrza między nimi itp. Wszystko to czyni tę metodę zbyt skomplikowaną, aby można było ją stosować w badaniach masowych.

W trakcie badań nie zawsze istnieje możliwość określania poszczególnych cech fizycznych odzieży. W takich wypadkach najbardziej przydatną metodą pozostaje określanie izolacyjności pojedynczych sztuk odzieży na podstawie wykazów przedstawionych w literaturze, a następnie obliczenie izolacyjności całego ubioru. Tak też uczyniono w badaniach prowadzonych w halach produkcyjnych chłodni i w rozlewniach browarów. Wybrano najczęściej wówczas stosowaną metodę Sprague'a i Munson (1974 [137]), wzór (8). Jak wykazały badania prowadzone na duńskim manekinie (Emborg, 1980 [32]), Olesen i in. (1982 [123]), wzór podany przez Sprague'a i Munson dokładniej przewidywał izolacyjność zestawów odzieżowych niż jego zmodyfikowana wersja zamieszczona w ASHRAE Standard (1981 [3]) (w clo):

$$I_{cl} = 0,82 \sum I_{cli} \quad (19)$$

W ostatnich dwóch latach pojawiły się następne wzory dotyczące obliczania izolacyjności cieplnej zestawów odzieżowych na podstawie znajomości izolacyjności cieplnej pojedynczych sztuk odzieży (w clo):

$$I_{cl} = 0,73 \sum I_{cli} + 0,17 \quad (20)$$

(Olesen, 1985 [116]),

$$I_{cl} = 0,82 \sum I_{cli} \quad (21)$$

jeśli wymuszone jest przejście przez początek układu współrzędnych (Olesen, 1985 [116]),

$$I_{cl} = 0,676 \sum I_{cli} + 0,117 \quad (22)$$

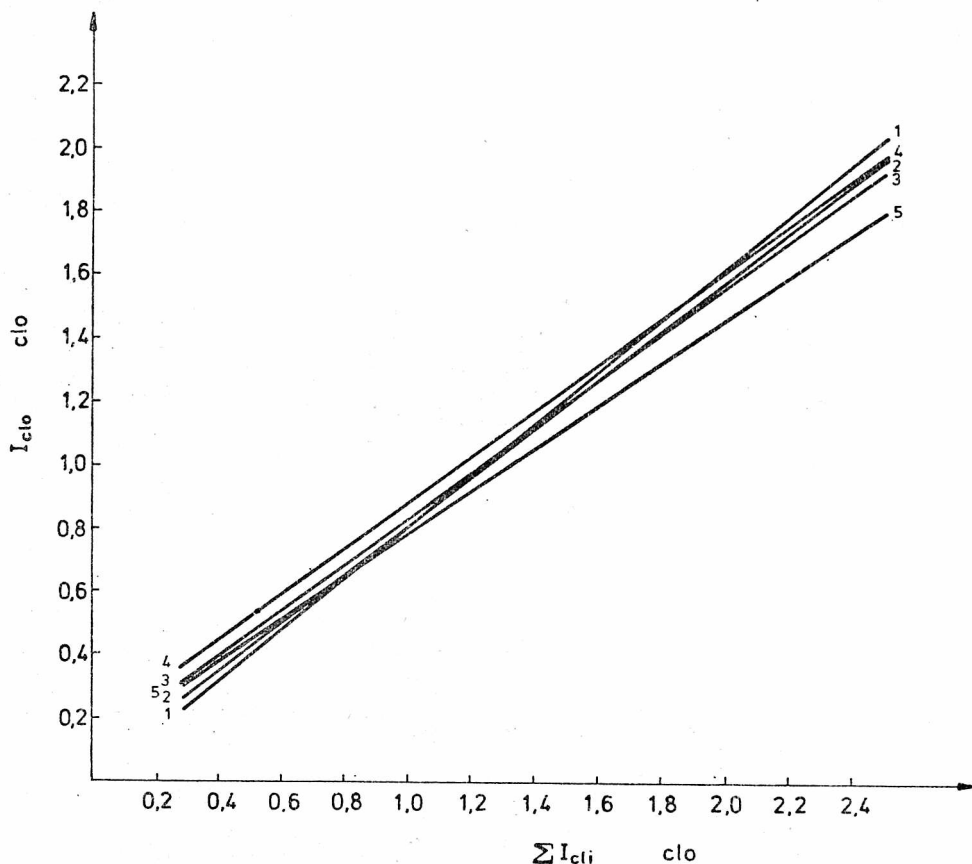
McCullough i in. (1985 [84]),

$$I_{cl} = 0,770 \sum I_{cli} \quad (23)$$

jeśli wymuszone jest przejście przez 0 (McCullough i in. 1985 [84]).

Wzory (21) i (23) przy wymuszonym przejściu prostej regresji przez początek układu współrzędnych związane są z większym błędem, ale za to usuwają sztuczne zwiększenie wartości I_{cl} dla bardzo małych izolacyjności (np. w wypadku samych szortów).

Graficzną ilustrację wzorów określających izolacyjność cieplną odzieży I_{cl} przedstawiono na rys. 10. Widoczne jest, że największe wartości I_{cl} otrzymuje się ze wzoru Olesena, a najmniejsze ze wzoru McCullough i in. Różnice między nimi sięgają 0,16 clo ($0,025 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)



Rys. 10. Zależność izolacyjności ubioru I_{cl} od sumy izolacyjności poszczególnych fragmentów odzieży I_{cli} : 1-wzór ASHRAE: $I_{cl} = 0,82 \sum I_{cli}$; 2-wzór Sprague'a i Munson dla kobiet: $I_{cl} = 0,77 \sum I_{cli} + 0,05$, 3-wzór Sprague'a i Munson dla mężczyzn: $I_{cl} = 0,727 \sum I_{cli} + 0,113$, 4-wzór Olesena: $I_{cl} = 0,73 \sum I_{cli}$, 5-wzór McCullough i in.: $I_{cl} = 0,676 \sum I_{cli} + 0,117$

Fig. 10. Relation between clothing insulation I_{cl} and the sum of garments insulations I_{cli} : 1-ASHRAE formula: $I_{cl} = 0,82 \sum I_{cli}$, 2 - Sprague and Munson's formula for women: $I_{cl} = 0,77 \sum I_{cli} + 0,05$, 3-Sprague and Munson's formula for men: $I_{cl} = 0,727 \sum I_{cli} + 0,113$, 4-Olesen's formula: $I_{cl} = 0,73 \sum I_{cli}$, 5-McCullough's formula: $I_{cl} = 0,676 \sum I_{cli} + 0,117$

dla izolacyjności ubioru 1,6 clo ($0,248 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), a więc ok. 10%. Proste regresji przedstawiające równanie ASHRAE oraz Sprague'a i Munson, a także proste Olesena i McCullough, przechodzące przez początek układu współrzędnych (nie pokazane na rysunku), przyjmują w badanym obszarze wartości pośrednie. Różnice między wzorami różnych autorów mogą wynikać ze specyfiki stosowanej do badań odzieży lub z różnej

konstrukcji manekinów (kontrola temperatury wewnętrznej lub temperatury powierzchni skóry). Dalsze badania wykażą, który wzór zostanie uznany za najlepszy i będzie powszechnie stosowany. Tymczasem dla typowej odzieży, do określania jej izolacyjności, najlepszy wydaje się wzór Sprague'a i Munson lub ASHRAE.

W wyniku analizy przeprowadzonych ostatnio badań Olesen (1985 [116]) proponuje, aby do określania izolacyjności zestawu odzieżowego zastosować zamiast podstawowych - efektywne izolacyjności cieplne poszczególnych fragmentów odzieży $I_{cle\ i}$. Sposób ten ma tę zaletę, że podczas pomiarów izolacyjności poszczególniej sztuki odzieży na manekinie nie jest potrzebne żmudne wyznaczanie wartości współczynnika f_{cl} , a wzór opisujący izolacyjność całego ubioru ma prostą postać (w clo):

$$I_{cl} = \sum I_{cle\ i}, \quad (24)$$

Wydaje się, że sam problem wyznaczania współczynnika f_{cl} powinien skłonić badaczy do sprawdzenia tej zależności. Mogłaby ona stanowić bazę do opracowania dokładnej metody określania izolacyjności odzieży.

Badania Zhu i in. (1985 [165]) wykazały, że żaden z dotychczas stosowanych wzorów sumacyjnych nie jest wystarczająco dokładny dla odzieży jednowarstwowej i bardzo grubej wielowarstwowej, charakterystycznej dla ludności Chin zimą.

W odniesieniu do wszystkich powyższych wzorów sumacyjnych prawdziwe jest stwierdzenie, że najdokładniejsze określenie izolacyjności zestawu odzieżowego I_{cl} uzyska się, jeśli wartości I_{cli} lub I_{cle} zostaną zmierzone na manekinie. Mniej dokładne - jeśli wartości te zostaną określone na podstawie grubości materiału i stopnia pokrycia ciała odzieżą. Gdy wartości I_{cli} będziemy określać na podstawie tabel podanych w literaturze, wówczas, zwłaszcza dla odzieży nietypowej, błąd w określeniu izolacyjności ubioru I_{cl} może okazać się zbyt duży.

4.3.3. Wpływ postawy i aktywności fizycznej na izolacyjność cieplną odzieży

Izolacyjność ubioru zależy od ilości nieruchomego powietrza zawartego w warstwach odzieży i między nimi. Jest to związane z fasonem odzieży, jej dopasowaniem, rodzajem materiału. Można więc przewidywać, że wszelkie zmiany pozycji ciała, a wraz z nią warstw odzieży, będą wpływały na izolacyjność ubioru. Zjawisko to zaobserwowali w swoich badaniach Belding i in. (1974 [9]) oraz Nishi i in. (1975 [108]).

Badania laboratoryjne wykonane dla niniejszej pracy wykazały (tab. 5), że wartość izolacyjności cieplnej ubioru zmniejszała się w pozycji siedzącej od 8 do 18% w porównaniu z pozycją stojącą. Podobne

zmiany izolacyjności odzieży obserwowali Nielsen i in. (1985 [105]) w późniejszych badaniach prowadzonych na ludziach. Zmniejszenie I_{cl} jest najprawdopodobniej związane z kompresją odzieży na grzbiecie, pośladkach i udach w wyniku działania ciężaru ciała na te obszary w pozycji siedzącej. Ponadto obserwuje się przyciśnięcie warstw odzieży do ciała w obszarze kolan i bioder, a podciągnięcie nogawek spodni w tej pozycji odełzania kostki u nóg. Wszystkie te czynniki powodują zwiększone oddawanie ciepła w wymienionych obszarach ciała i związane z tym zmniejszenie izolacyjności ubioru.

Jak wspomniano już wcześniej, również intensywne ruchy ciała będą powodować zwiększoną wymianę ciepła przez konwekcję wewnątrz warstwy odzieży i przez jej otwory (rękawy, nogawki). Skutkiem tego będzie zmniejszenie jej izolacyjności cieplnej. Na zjawisko to zwrócili uwagę w swoich badaniach Belding i in. (1947 [9]), Nishi i in. (1975 [108]) oraz Vokac i in. (1973 [154]).

W badaniach laboratoryjnych przeprowadzonych na manekinie (tab.5) widoczne jest zmniejszenie izolacyjności podczas pedałowania, w porównaniu z pozycją stojącą, sięgające 20%. Ale w porównaniu z pozycją siedzącą różnica ta wynosiła ok. 10% (zestaw nr 2 i 3). Podczas pedałowania odzież na manekinie nie była tak ściśnięta w obszarze ud i pośladków, jak w pozycji siedzącej na fotelu. Ale ze to umieszczenie dłoni na kierownicy powoduje zapewne zmniejszenie izolacyjności odzieży w obszarze ramion i przedramion. Można więc uznać, że izolacyjność odzieży w obu pozycjach jest zbliżona lub może być nieco większa podczas nieruchomego siedzenia na cykloergometrze. Obserwowana różnica 0,06 clo ($0,009 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) do 0,1 clo ($0,016 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) jest wynikiem ruchów ciała i wymiany ciepła bezpośrednio przez otwory odzieży, tzw. "pumping effect". Dla zestawu nr 4 obserwowano zwiększenie izolacyjności podczas pedałowania w porównaniu z pozycją siedzącą. Jest to najprawdopodobniej związane z charakterystyką tego ubioru. Zastosowany tu ocieplacz ściśle obejmował nadgarstki i kostki, przeciwdziałając bezpośrednim ruchom powietrza w tym obszarze. A więc "pumping effect" musiał być znikomo mały.

W podobnych badaniach przeprowadzonych później na ludziach (Nielsen i in. 1985 [105]) obserwowano spadek izolacyjności o 30-36%. Większy spadek I_{cl} u ludzi w porównaniu z manekinem można wytłumaczyć tym, że ruchy ciała pedałówujących ludzi są swobodniejsze i obejmują większy obszar ciała. Manekin porusza jedynie nogami, tułów pozostaje praktycznie nieruchomy.

Pomiary prowadzone dla innego rodzaju aktywności, a mianowicie chodzenia na ruchomej bieżni, wykazały jeszcze większe zmiany izola-

cyjności. Wyniosły one 33% dla ubioru męskiego i 51% dla żeńskiego w badaniach na ludziach (Nielsen i in. 1985 [105]) i 35% - w badaniach na manekinie (Olesen i Madsen, 1983 [120]).

Vogt i in. (1983 [151], 1984 [152]) również badał wpływ aktywności fizycznej na zmiany izolacyjności odzieży w różnych warunkach otoczenia. Wykazał on, że zmiany I_{cl} zależą przede wszystkim od wymiany ciepła przez otwory (rękawy, nogawki), a znacznie mniej od ruchu powietrza wewnątrz warstw odzieży.

Jak wynika z przedstawionych wyników, izolacyjność odzieży w trakcie wykonywania pracy będzie się zmieniać. Na przykład siedzenie (kierowca wózka widłowego) lub wykonywanie intensywnych ruchów ciała (pakowaczka) może spowodować zmniejszenie izolacyjności odzieży nawet o kilkadziesiąt procent. Aby zapobiec ujemnym skutkom takich zmian izolacyjności, odzież chroniąca przed zimnem powinna ściśle obejmować nadgarstki, kostki u nóg, a także okolice bioder, zwłaszcza jeśli zewnętrzna warstwa odzieży jest dwuczęściowa. Dla ubioru stosowanego do pracy siedzącej (np. kierowca wózka) należy przewidzieć zwiększoną izolacyjność lokalną na udach i pośladkach przez dodatkowe warstwy materiału nie ulegające kompresji.

Prawidłowy dobór odzieży chroniącej przed zimnem jest bardzo istotny, gdyż właśnie w nim leży możliwość poprawy warunków komfortu cieplnego. Odpowiednio duża izolacyjność cieplna takiej odzieży poprawi ogólne odczucia cieplne pracowników, przez co powinna wpłynąć na zmniejszenie absencji chorobowej. Pozwoli także uniknąć nieprzyjemnych odczuć związanych z dyskomfortem lokalnym w peryferyjnych obszarach ciała.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Problem komfortu cieplnego pracowników jest istotny z punktu widzenia ich zdrowia i wydajności pracy. Konieczne więc są badania pogłębiające wiedzę na ten temat. Nie powinny się one jednak ograniczać do doświadczeń w komorach klimatycznych. Badania w warunkach rzeczywistych stwarzają największą możliwość uzyskania wiarygodnych informacji w tej dziedzinie.

Ze względu na złożoność zjawiska, badania komfortu cieplnego wymagają specyficznej metodyki pomiarowej, uwzględniającej wszystkie wielkości środowiskowe i osobowe, mające wpływ na odczucia cieplne

ludzi. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania komfortu cieplnego ludzi na chłodnych i termoneutralnych stanowiskach pracy na przykładzie wybranych działów przemysłu spożywczego.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Dla warunków termoneutralnych i warunków chłodu najbardziej przydatną obiektywną ocenę środowiska stanowi przewidywana średnia ocena PMV według Fanger'a. Jednak w miarę zwiększania się stopnia dyskomfortu spowodowanego zimnem, różnica między PMV a faktycznymi odczuciami będzie się zwiększała, osiągając wartość 0,5 w dolnym obszarze skali Bedford'a.

2. Temperatura skóry na czole jest prostym i przydatnym wskaźnikiem fizjologicznym stanu termicznego organizmu w warunkach chłodu i warunkach termoneutralnych, z zastrzeżeniem ujednoczenia pomiaru (czoła u badanych ludzi muszą być odsłonięte w jednakowym stopniu).

3. W warunkach chłodu, w odróżnieniu od warunków termoneutralnych, dyskomfort lokalny spowodowany zimnem w istotny sposób wpływa na ogólne odczucia cieplne ludzi. Należy więc dążyć do tego, aby był on zredukowany do minimum.

4. Wystarczająco ciepła odzież w centralnych obszarach ciała stwarza możliwość zapewnienia komfortu cieplnego w obszarze dłoni i stóp. W razie niedogrzanія tułowia lokalna izolacja cieplna, nawet najlepsza, nie wystarczy do zapewnienia odczuć komfortu cieplnego w peryferyjnych obszarach ciała.

5. Izolacyjność cieplna odzieży jest zależna od pozycji ciała (różne przyleganie odzieży). W pozycji siedzącej jej wartość zmniejsza się od 8 do 18% w porównaniu z pozycją stojącą.

6. W czasie wykonywania pracy fizycznej spadek izolacyjności cieplnej odzieży zależy od intensywności wykonywanych ruchów (wzmoczona wentylacja wewnątrz odzieży). Spadek ten może sięgać kilkudziesięciu procent. Jazda na cykloergometrze zmniejsza izolacyjność odzieży o 20%.

7. Odzież chroniąca przed zimnem powinna ściśle obejmować nadgarstki, kostki u nóg i okolice bioder, co ma zapobiec ujemnym skutkom zmniejszania się izolacyjności w trakcie wykonywania pracy. Podczas pracy siedzącej w warunkach chłodu należy zwiększyć izolacyjność lokalną odzieży w obszarze pośladków i ud.

8. Konieczne są dalsze badania komfortu cieplnego człowieka w warunkach rzeczywistych, gdyż pozwalają one na rozszerzenie wiedzy związanej z wpływem różnorodnych czynników na organizm ludzki.

LITERATURA

- [1] ASHRAE Handbook of Fundamentals, ch. 8, Physiological principles for comfort and health. New York 1985.
- [2] ASHRAE Standard 55-74, Thermal comfort conditions. New York 1974.
- [3] ASHRAE Standard 55-81, Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta 1981.
- [4] BANHIDI L., Thermal comfort surveys in public buildings. CIB W45 Symposium on Thermal Comfort and Moderate Heat Stress. Building Research Establishment, HMSO, 1972.
- [5] BEDFORD T., The warmth factor in comfort at work: a physiological study of heating and ventilation. Industrial Health Research Board Report No 76, HMSO London 1936.
- [6] BEHMANN F.W., The influence of climatic and textile factors on the heat loss in drying of moist clothing. [In:] *Biometeorology*, ed. S.W.Tromp, Pergamon Press, 1962.
- [7] BELDING H.S., Protection against dry cold. [In:] *Physiology of Heat Regulation and the Science of Clothing*, ed. Newburgh, L.H., Hafner Publishing Co., New York-London 1968.
- [8] BELDING H.S., HATCH T.F., Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain. *Heating, Piping and Air Conditioning*, 27:129-136, 1955.
- [9] BELDING H.S., RUSSEL H.D., DARLING R.C., FOLK G.E., Analysis of factors concerned in maintaining energy balance for dressed men in extreme cold: Effects of activity on the protective value and comfort of an arctic uniform. *Am.J.Physiol.*, 149:223-239, 1947.
- [10] BENZINGER T.H., The physiological basis for thermal comfort. [In:] *Indoor Climate: effects on human comfort, performance and health in residential, commercial and light industry buildings*. WHO Conference, Copenhagen 1978.
- [11] BERGLUND L.G., GAGGE A.P., Human response to thermal conditions maintained in an office by radiant ceiling, baseboard, forced air and floor heating systems. *ASHRAE Trans.*, 91(2B): 439-451, 1985.
- [12] BOWEN H.M., Diver performance and the effects of cold. Dunlap and Associates Inc., BSD 67-441, Connecticut 1967.
- [13] BREBNER D.F., KERSLAKE D.McK., WADDEL J.L., The diffusion of water vapour through human skin. *J.Physiol.*, 132: 225-231, London 1956.
- [14] BRECKENRIDGE J.R., Insulating effectiveness of metallized reflective layers in cold weather clothing systems. Technical Report No 2/78, April 1978 of US Army Research Institute of Environmental Medicine, O1760, Natick, Massachusetts 1978.
- [15] BRECKENRIDGE J.R., GOLDMAN R.F., Effect of clothing on bodily resistance against meteorological stimuli. [In:] *Progress in Human Biometeorology*, ed. J.F.Tromp: Sweits and Zeitlinger, Amsterdam 1977.
- [16] BUGUET A.G.C., LIVINGSTONE S.D., REED L.D., LIMMER R.E., Cold induced shivering in men with thermoneutral skin temperatures. *J.Appl.Physiol.*, 41: 142-145, 1976.
- [17] BUSKIRK E.R., THOMPSON R.H., WHEDON G.D., Metabolic response to cooling in the human: Role of body composition and particularly of body fat. [In:] *Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry*, vol. 3, part 3: *Biology and Medicine*, p. 429-442, 1963.
- [18] CABANAC M., Physiological role of pleasure. *Science*, 173: 1103-1107, 1971.

- [19] CABANAC M., LEBLANC J., Physiological conflict in humans: Fatigue vs. cold discomfort, *Am. J. Physiol.*, 244: R621-R628, 1983.
- [20] CENA K., CLARK J.A., Thermal insulation of animal coats and human clothing. *Phys. Med. Biol.*, 23:565-591, 1978a.
- [21] CENA K., CLARK J.A., Thermal resistance units. *J. Thermal Biology*, 3:173-174, 1978b.
- [22] CENA K., CLARK J.A., Transfer of heat through animal coats and clothing. *International Review of Physiology; Environment Physiology III*, vol. 20, ed. D. Robertshaw, University Park Press, Baltimore 1979.
- [23] CENA K., CLARK J.A., Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort. Elsevier Scientific Company, Amsterdam-Oxford-New York 1981.
- [24] CENA K., MICHALCZYK L., ŚLIWIŃSKA E., MADSEN T., Measurements of thermal insulation values for clothing ensembles. Presented at the Thermal Physiology, Satellite Meeting of XXVIIIth International Congress of Physiological Sciences, July 7-12, Pécs, 1980.
- [25] CENA K., ŚLIWIŃSKA E., ŚLIWOWSKI L., Elementy i wnętrza budynków a oszczędność energii i komfort cieplny ludzi. Etap I. Raporty Inst. Bud. Pwr., SPR 69/82, Wrocław 1982.
- [26] CENA K., SPOTILA J.R., AVERY H.W., Thermal comfort of the elderly is affected by clothing, activity and psychological adjustment. *ASHRAE Trans.*, 92(p.2), 1986.
- [27] CHRENKO F.A., Heated ceilings and comfort. *JIHVE*, 20:375-396, 21:145-154, 1953.
- [28] CLARK R.E., The limiting hand skin temperature for unaffected manual performance in the cold. *J. Appl. Physiol.*, 45:193-194, 1961.
- [29] COLIN J., HOUDAS Y., Initial of sweating in man after abrupt rise in environmental temperature. *J. Appl. Physiol.*, 20:984-990, 1965.
- [30] DANIELS F., Jr., BAKER P.T., Relationship between body fat and shivering in air at 15°C. *J. Appl. Physiol.*, 16:421-425, 1961.
- [31] DILLA (van) M., DAY R., SIPLE P.A., Special problems of hands. [In:] *Physiology of Heat Regulation and the Science of Clothing*, ed. L.H. Newburgh, Hafner Publishing Co., New York-London 1968.
- [32] EMBORG J., Haling af clo-vaerdier. Kursusarbejde ved Lab. for Varme- og Klimateknik, Danish Technical University, 1980.
- [33] ENANDER A., LJUNGBERG A.S., HOLMER I., Effects of work in cold stores on man. *Scand. j. work-environ. and health*, 5:195-204, 1979.
- [34] FANGER P.O., Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic comfort equation. *ASHRAE Trans.*, 73 (II), 1967.
- [35] FANGER P.O., Thermal Comfort. Analysis and Application in Environmental Engineering. Danish Technical Press, Copenhagen 1970 (wyd. polskie: *Komfort cieplny*. Arkady, Warszawa 1974).
- [36] FANGER P.O., The variability of man's preferred temperature from day to day. *Arch. Sci. Physiol.*, 27:A403-407, 1973.
- [37] FANGER P.O., Can exposure to cold cause people to prefer lower room temperatures? International Institute of Refrigeration, Australian National Committee, Joint meeting of commissions C2, D1, D2, Ds and E1, Melbourne, September 1976.
- [38] FANGER P.O., Thermal Comfort. R.E. Krieger, Malabar, Florida 1982.
- [39] FANGER P.O., BANNIDI L., OLESEN B.W., LANGKILDE G., Comfort limits for heated ceilings. *ASHRAE Trans.*, 86:141-156, 1980.
- [40] FANGER P.O., BREUM N.-O., JERKING E., Can colour and noise influence man's thermal comfort? *Ergonomics*, 20, 1977b.
- [41] FANGER P.O., HØJBJERRE J., THOMSEN J.O.B., Can winter swimming cause people to prefer lower room temperatures. *Int. J. Biometeor.* 21:44-50, 1977a.

- [42] FANGER P.O., IPSEN B.M., LANGKILDE G., OLESEN B.W., CHRISTENSEN N.K., TANABE S., Comfort limits for asymmetric thermal radiation, *Energy and Buildings*, 8:225-236, 1985.
- [43] FANGER P.O., LANGKILDE G., Interindividual differences in ambient temperatures preferred by seated persons. *ASHRAE Trans.*, 81(II): 140-147, 1975.
- [44] FANGER P.O., PEDERSEN C.J.K., Discomfort due to air velocities in spaces. Proceedings of the Meeting of Commission B1, B2 and E1, of the International Institute of Refrigeration, p.289-296, Belgrade 1977.
- [45] FOX W.F., Human performance in the cold. *Human Factors*, 9:203-220, 1967.
- [46] GAGGE A.P., BURTON A.C., BAZETT H.D., A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his thermal environment. *Science N.Y.*, 94:428-430, 1941.
- [47] GAGGE A.P., NISHI Y., Heat exchange between human skin surface and thermal environment. [In:] *Handbook of Physiology*, section 9: Reactions to environmental agents, ed. H.K.Lee, Bethesda, Maryland 1977.
- [48] GAGGE A.P., STOLWIJK J.A.J., SALTIN B., Comfort and thermal sensations and associated physiological responses during exercise at various ambient temperatures. *Environ. Res.*, 2:209-229, 1969.
- [49] GARG A., CHAFFIN D.B., HERRIN G.D., Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 39:661-674, 1978.
- [50] GOLDMAN R.F., Clothing design for comfort and work performance in extreme thermal environment. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, 36:531-544, 1974.
- [51] GOLDMAN R.F., Thermal comfort factors: concepts and definitions. [In:] *Clothing Comfort. Interaction of Thermal, Ventilation, Construction and Assessment Factors*. Hollies, N.R.S. and R.F. Goldman, ed. Ann Arbor, MI Ann Arbor Science Publishers Inc., 1977.
- [52] GOLDMAN R.F., Assessment to thermal comfort. *ASHRAE Trans.*, 84 (part I), 1978.
- [53] GOLDMAN R.F., CW protective clothing: The nature of its performance degradation and some potential solutions. *Proc. of the 13th Common Wealth Defence Conference on Operational Clothing and Combat Equipment*, Malaysia 1981.
- [54] GONZALEZ R.R., NISHI Y., Effects of cold environments on local thermal sensation, discomfort and clothing selection, *Research Paper 144, No 2384* (published in *ASHRAE Trans.*) manuscript, 1978.
- [55] GRIFFITHS I.D., McINTYRE D.A., Subjective responses to overhead radiation. *Human Factors*, 16:415-422, 1974.
- [56] GRZESZCZYK W., MARSZAŁEK K., NOWAK H., ŚLIWIŃSKA E., ŚLIWOWSKI L., Elementy i wnętrza budynków a oszczędność energii i komfort cieplny ludzi. Etap III. Raporty Inst.Bud.PWr., seria SPR 38/84, Wrocław 1984.
- [57] GRZESZCZYK W., MARSZAŁEK K., NOWAK H., ŚLIWIŃSKA E., ŚLIWOWSKI L., Elementy i wnętrza budynków a oszczędność energii i komfort cieplny ludzi. Etap IV. Raporty Inst. Bud. PWr., seria SPR 14/85 Wrocław 1985.
- [58] HARDY J.D., Skin temperature and physiological thermoregulation. [In:] *Physiological and Behavioral Temperature Regulation*, eds.: J.D.Hardy, A.P.Gagge, J.A.J.Stolwijk. Thomas, Springfield, Illinois 1970.
- [59] HARDY J.D., DuBOIS E.F., Regulation of heat loss from the human body. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 23:624-631, 1937.
- [60] HELLSTRÖM B., Local effects of acclimatisation to cold in man. Norwegian monographs on medical science, Universitetsforlaget, Oslo 1965.

- [61] HOLMER I., Required Clothing Insulation IREQ as an analytical index of cold stress. ASHRAE Trans., 90 (1B):1116-1128, 1984.
- [62] HOLMER I., ELNAS S., Bestämning of beklädningens värmeisolerande förmåga. 2 Undersöknings rapport 1979:28, Arbetsarkyddsstyrelsen arbetsmedicinska avdelning, Solna 1979 (Sweden).
- [63] HOLMER I., ELNAS S., Physiological evaluation of the resistance to evaporative heat transfer by clothing. Ergonomics, 24:63-74, 1981.
- [64] HONG S., NADEL E.R., Thermogenic control during exercise in a cold environment. J. Appl. Physiol., 47:1084-1089, 1979.
- [65] HOUGHTEN F.C., YAGLOU C.P., Determining lines of equal comfort. ASHVE Trans., 28:163-176 and 361-384, 1923.
- [66] HUMPHREYS M.A., Clothing and thermal comfort of secondary school children in summertime. CIB Commission W45 Symposium on Thermal Comfort and Moderate Heat Stress, 1972.
- [67] HUMPHREYS M.A., Field studies on thermal comfort compared and applied. Proc. of the Symposium on the Microclimate in Industry and Problems on the Realizations. Prague 1975.
- [68] IAMPINETRO P.F., VAUGHAN J.A., GOLDMAN R.F., KREIDER M.B., MASUCCI F., BASS D.E., Heat production from shivering. J. Appl. Physiol., 15:632-634, 1960.
- [69] ISO - International Organisation for Standardization: Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Standard ISO 7730, 1984.
- [70] JEQUIER E., GYGAX P.-H., PITTET P., VANOTTI A., Increased thermal body insulation: Relationship to the development of obesity. J. Appl. Physiol., 37:674-678, 1974.
- [71] JOHNSON K.G., CABANAC M., Human thermoregulatory behaviour during a conflict between cold discomfort and money. Physiol. Behav., 30:145-150, 1983.
- [72] KAWAKAMI K., MATSUMOTO S., TOKURA H., Effects of clothing and humidity upon vapour pressure of human skin and shirt surfaces. J. Human. Ergol., 13:37-42, 1984.
- [73] KEATINGE W.R., Survival in cold water. Blackwell Scientific Publications, Oxford 1969.
- [74] KJERULF-JENSEN P., FANGER P.O., NISHI Y., GAGGE A.P., A new type test chamber in Copenhagen and New Haven for common investigations of man's thermal comfort and physiological reactions. ASHRAE J., January, p. 65-68, 1975.
- [75] KLONOWICZ S., KOZŁOWSKI S., Człowiek a środowisko termiczne. PZWL, Warszawa 1970.
- [76] KOLLIAS J., BARLETT L., BERGSTEINOVA V., SKINNER J.S., BUSKIRK E.R., NICHOLAS W.C., Metabolic and thermal responses of women during cooling in water. J. Appl. Physiol., 36:577-580, 1974.
- [77] LeBLANC J., Subcutaneous fat and skin temperature. Can. J. Biochem. Physiol., 32:354-358, 1954.
- [78] LEHMANN G., Praktyczna fizjologia pracy. PZWL, Warszawa 1966.
- [79] LEWIS M., MEESE G.B., KOK R., The effects of moderate cold and heat stress on the potential work performance of industrial workers. Part. 4: Performance and physiological responses of trained workers in relation to eight environmental conditions. National Building Research Institute, Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, 1983, CSIR research report No 589.
- [80] LOFSTEDT B.E., The relation between skin temperature, blood flow and temperature sensation of the calf and foot, and local temperature exposure at different states of the whole body heat balance. [In:] Indoor climatic: Effects on human comfort, performance and health in residential, commercial and light industry buildings. WHO Conference, Copenhagen 1978.

- [81] MADSEN Th.L., Beskrivelse af termisk mannequin til måling beklædningens varmeisoleringssevne. Intern rapport, Lab. for Varmeisolering, DTH, 1976.
- [82] MADSEN Th.L., Limits for draught and asymmetric radiation in relation to human thermal well being. Int. Institute of Refrigeration, Proc. of the Meeting of Commission E1, Belgrade 1977.
- [83] McCULLOUGH E.A., ARPIN E.J., JONES B., KONZ S.A., ROHLES F.H., Heat transfer characteristics of clothing worn in hot industrial environments. ASHRAE Trans., 88(I): 1077-1094, 1982.
- [84] McCULLOUGH E.A., JONES B.W., HUCK J., A comprehensive data base for estimating clothing insulation. ASHRAE Trans., 91 (II), 1985.
- [85] McCULLOUGH E.A., JONES B.W., ZBIKOWSKI P.J., The effect of garment design on the thermal insulation of clothing. ASHRAE Trans., 89(II): 327-352, 1983.
- [86] McCULLOUGH E.A., WYON D.P., Insulation characteristics of winter and summer indoor clothing. ASHRAE Trans., 89 (II): 614-633, 1983.
- [87] McINTYRE D.A., Energy balance in rooms with surfaces of low emissivity. ECRC/N300, August, 1970.
- [88] McINTYRE D.A., Radiation draughts. Building Services Engineer, 43: 136-139, 1975.
- [89] McINTYRE D.A., Subjective temperature - a simple index of warmth. ECRC/M916, Electricity Research Council Centre, Chester, UK, 1976.
- [90] McINTYRE D.A., Three approaches to thermal comfort. ASHRAE Trans., 84: 101-109, 1978.
- [91] McINTYRE D.A., Indoor Climate. Applied Science Publishers Ltd. London 1980.
- [92] McINTYRE D.A., GRIFFITHS I.D., Effects of added clothing on warmth and comfort. Ergonomics, 18: 205-211, 1975a.
- [93] McINTYRE D.A., GRIFFITHS I.D., The effect of uniform and asymmetric thermal radiation on comfort. Proc. of the 6th International Congress of Climatistics CLIMA 2000, 1975b.
- [94] McNALL P.E. Jr., BIDDISON R.E., Thermal and comfort sensations of sedentary persons exposed to asymmetric radiant fields. ASHRAE Trans., 76(I): 123-136, 1970.
- [95] McNALL P.E., JAAX J., ROHLES F.H., NEVINS R.G., SPRINGER W., Thermal comfort (thermal neutrality) conditions for three levels of activity. ASHRAE Trans., 73: 3.1-3.14, 1967.
- [96] McNALL P.E., Jr., NEVINS R.G., Comfort and academic achievement in an air conditioned junior high school - a summary evaluation of the Pinnelas County experiment. ASHRAE Trans., 74, 1968.
- [97] MEESE G.B., KOK R., LEWIS M.I., WYON D.P., A laboratory study of the effects of moderate thermal stress on the performance of factory workers. Ergonomics, 27: 19-43, 1984.
- [98] MITCHELL J.W., GALVEZ T.L., HENGLE J., MYERS G.E., SIEBECKER K.L., Thermal response of human legs during cooling. J. Appl. Physiol., 29: 858-865, 1970.
- [99] MORRIS G.L., Thermal properties of textile materials. J. Text. Inst., 44: 7449-7476, 1953.
- [100] MUNCEY R.W., HOLDEN T.S., The influence of air temperature near the floor on the temperature and comfort of the human foot. Bldg. Res. Tech. Paper 5, CSIRO, Melbourne 1959.
- [101] NEVINS R.G., FEYERHERM A.M., The effect of floor surface temperature on comfort. Part IV - Cold floors. ASHRAE Trans., 73 (III): 2.1-2.3, 1967.
- [102] NEVINS R.G., MICHAELS K.B., FEYERHERM A.M., The effect of floor surface temperature on comfort. Part I - College age males. Part II - College age females. ASHRAE Trans., 70: 29-43, 1964.
- [103] NEVINS R.G., ROHLES F.H., SPRINGER W., FEYERHERM A.M., A temperature-humidity chart for thermal comfort of seated persons. ASHRAE Trans., 72: 209-291, 1966.

- [104] NEWBURGH L.H., Physiology of Heat Regulation and the Science of Clothing (facsimile of the 1949 edition) Hafner Publishing Co. New York-London 1968.
- [105] NIELSEN R., OLESEN B., FANGER P.O., Effect of physical activity and air velocity on the thermal insulation of clothing. Ergonomics, 28: 1617-1631, 1985.
- [106] NISHI Y., GAGGE A.P., Moisture permeation of clothing - A factor governing thermal equilibrium and comfort. ASHRAE Trans., 76: 137-145, 1970.
- [107] NISHI Y., GAGGE A.P., A psychrometric chart for graphical prediction of comfort and heat tolerance. ASHRAE Trans., 80 (II): 115-130, 1974.
- [108] NISHI Y., GONZALEZ R.R., GAGGE A.P., Direct measurement of clothing heat transfer properties during sensible and insensible heat exchange with the thermal environment. ASHRAE Trans., 81: 183-199, 1975.
- [109] NISHI Y., GONZALEZ R.R., NEVINS R.G., GAGGE A.P., Field measurement of clothing thermal insulation, Part 2. ASHRAE Trans., 82: 248-259, 1976.
- [110] NISHI Y., IBAMOTO K., Model skin temperature - an index of thermal sensation in cold, warm and humid environments. ASHRAE Trans., 75: 94-107, 1969.
- [111] NOSEK A., Badania i ocena środowiska cieplnego sal audytorijnych. Praca doktorska, nie publ., Inst. Bud. Pwr. Wrocław 1982.
- [112] O'CALLAGHAN P.W., PROBERT S.D., Thermal insulation provided by dry, single layer clothing materials. Appl. Energy, 2: 269-277, 1976.
- [113] O'CALLAGHAN P.W., PROBERT S.D., Thermal resistance behaviour of single and multiple layers of clothing fabrics under mechanical load. Appl. Energy, 3: 3-12, 1977.
- [114] OKOŁOWICZ-GRABOWSKA B., Komfort cieplny pomieszczeń ogrzewanych. Wyd. Pol. Warsz., Warszawa 1976.
- [115] OLESEN B.W., Thermal comfort requirements for floors. Proc. of the Meeting of Commission E1 (Air Conditioning) of the International Institute of Refrigeration, Belgrade 1977.
- [116] OLESEN B.W., A new simpler method for estimating the thermal insulation of a clothing ensemble. ASHRAE Trans., 91(II), 1985.
- [117] OLESEN S., BASSING J.S., FANGER P.O., Physiological comfort at sixteen combinations of activity, clothing, air velocity and ambient temperature. ASHRAE Trans., 78(II): 199-206, 1972b.
- [118] OLESEN B.W., FANGER P.O., The skin temperature distribution for resting man in comfort. Arch. Sci. Physiol., 27: A385-A393, 1973.
- [119] OLESEN S., FANGER P.O., JENSEN P.B., NIELSEN O.J., Comfort limits for man exposed to asymmetric thermal radiation. Proc. of CIB Symposium on Thermal Comfort. Building Research Station, London 1972a.
- [120] OLESEN B.W., MADSEN T.L., Measurements of the thermal insulation of clothings by a movable thermal manikin. Presented at the Int. Conference: Biophysical Evaluation of Protective Clothing. L'Institute Textile de France, July, Lyon 1983.
- [121] OLESEN B.W., NIELSEN R., Thermal Insulation of clothing measured on a movable thermal manikin and on human subjects. Technical Report. Technical University of Denmark, Lyngby 1983.
- [122] OLESEN B.W., NIELSEN R., A comparison of the thermal insulation measured on a thermal manikin and on human subjects. Proc. of Indoor Air '84, August, Stockholm 1984.
- [123] OLESEN B.W., SŁIWIŃSKA E., MADSEN T.L., FANGER P.O., Effect of body posture and activity on the thermal insulation of clothing: Measurement by a movable thermal manikin. ASHRAE Trans., 88: 791-805, 1982.

- [124] PANDOLF K.B., GIVONI B., GOLDMAN R.F., Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. *J. Appl. Physiol.*, 43: 577-581, 1977.
- [125] PEIRCE F.T., REES W.H., The transmission of heat through textile fabrics. *J. Textile Inst.*, 37: 181-204, 1946.
- [126] PIONTEK J., Badania uciążliwości czynników mikroklimatycznych i hałasu na stanowiskach roboczych w przemyśle chłodniczym. *Chłodnictwo*, vol. 13, nr 5, s.24-27, 1978.
- [127] PROVINS K.A., CLARKE R.S.J., The effect of cold on manual performance. *J. Occup. Med.*, 2: 169-175, 1960.
- [128] PROVINS K.A., MORTON R., Tactile discrimination and skin temperature. *J. Appl. Physiol.*, 15: 155-160, 1960.
- [129] RAMSEY J.D., Abbreviated guidelines for heat stress exposure. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 39: 491-495, 1978.
- [130] REPIN G.N., Gigiena truda i mery zaščity pri rabote na choolodilnikach. Moskva 1972.
- [131] REWERSKI W., KOZŁOWSKI S., KOROLKIEWICZ Z., WROBLEWSKI T.E., Termoregulacja. *Fizjologia, patofizjologia i farmakologia*. PZWL, Warszawa 1972.
- [132] ROHLES F.H. Jr., WOODS J.E., NEVINS R.G., The influence of clothing and temperature on sedentary comfort. *ASHRAE Trans.*, 79: 71-80, 1973.
- [133] SEPPANEN O., McNALL P.E., MUNSON D.M., SPRAGUE C.H., Thermal insulating values for typical indoor clothing ensembles. *ASHRAE Trans.*, 78(I): 120-130, 1972.
- [134] SIPLE P.A., Clothing and climate. [In:] *Physiology of Heat Regulation and the Science of Clothing*, ed. L.H. Newburgh. Hafner Publishing Co., New York-London 1968.
- [135] SIPLE P.A., PASSEL C.F., Measurements of dry atmosphere cooling in subfreezing temperatures. *Proc. Am. Philos. Soc.*, 89: 177-199, 1945.
- [136] SPEALMAN C.R., Wet cold. Laboratory and field studies. [In:] *Physiology of Heat Regulation and the Science of Clothing*, ed. L.H. Newburgh. Hafner Publishing Co., New York-London 1968.
- [137] SPRAGUE C.H., MUNSON D.M., A composite ensemble method for estimating thermal insulation values of clothing. *ASHRAE Trans.*, 80(I): 120-129, 1974.
- [138] ŚLIWIŃSKA E., ŁASZCZYŃSKA J., CENA K., Heat loss from patients during anaesthesia. [In:] *Recent Advances in Medical Thermology*. Plenum Publishing Co., New York 1982.
- [139] ŚLIWIŃSKA E., MICHALCZYK J., Wskaźniki biofizyczne stanu termicznego człowieka w warunkach chłodnych. I krajowe sympozjum na temat: Wpływ rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych na zdrowie człowieka. Warszawa 1980.
- [140] ŚLIWIŃSKA E., MICHALCZYK J., Metoda wyznaczania krytycznej temperatury otoczenia. *Chłodnictwo* nr 6, 1981.
- [141] ŚLIWOWSKI L., Komfort cieplny w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych. *Prace nauk. Inst. Bud. PWr.*, Nr 36, Wrocław 1982.
- [142] ŚLIWOWSKI L., CENA K., ŚLIWIŃSKA E., Indoor climate problems in Polish apartment blocks. [In:] *Passive and Low Energy Architecture*. Pergamon Press Ltd., Oxford-New York-Toronto-Sydney-Paris-Frankfurt 1983.
- [143] ŚLIWOWSKI L., ŚLIWIŃSKA E., Elementy i wnętrza budynków a oszczędność energii i komfort cieplny ludzi. Etap II. Raporty Inst. Bud. PWr., seria SFR 53/83, Wrocław 1983.
- [144] 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.
- [145] TIMBAL J., LONGLE M., BOUTELIER Ch., Mathematical model of man's tolerance to cold using morphological factors. *Aviat. Space Environ. Med.*, 47: 958-964, 1976.

- [146] TOKURA H., Effects of shirt material on thermoregulatory responses and clothing climate in sedentary and exercising women at warm and cold ambient temperatures. [In:] Objective measurement: applications to product design and process control. Eds. S.Kawabata, R.Postle, M.Niwa. Proc. IIIrd Japan-Australia Joint Symposium on Objective Measurements. Kyoto 1985.
- [147] TOKURA H., YAMASHITA Y., TOMIOKA S., The effect of moisture and water absorbancy of fibres on the sweating rates of sedentary man in hot ambient environments. [In:] Objective specification of fabric quality, mechanical properties and performance. Eds. S.Kawabata, R.Postle, M.Niwa. Proc.of Japan-Australia Joint Symposium on Objective Specification of Fabric Quality, Mechanical Properties and Performance. Kyoto 1982.
- [148] TYCZKA S., Biometeorologiczna charakterystyka środowiska atmosferycznego. Klimat i bioklimat. Metody badań. [W:] Biometeorologia człowieka. Red. J.Jankowiak. PZWL, Warszawa 1976.
- [149] VOGT J.J., CANDAS V., LIBERT J.P., DAULL F., Required sweat rate as an index of thermal strain in industry. [In:] Bioengineering. Thermal Physiology and Comfort, eds. K.Cena, J.A.Clark, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York 1980.
- [150] VOGT J.J., FOEHR R., Assessment of industrial work and heat stresses by use of continuous heart rate telemetry. Symposium on Physiological Requirements on the Microclimate in Industry and Problems of their Technical Realisations, Praha 1975.
- [151] VOGT J.J., MEYER J.P., CANDAS V., LIBERT J.P., SAGOT J.C., Pumping effect on thermal insulation of clothing worn by human subject. Ergonomics, 26: 963-974, 1983.
- [152] VOGT J.J., MEYER J.P., SAGOT J.C., CANDAS V., Basic effective and resultant clothing insulations. ASHRAE Trans., 90(1B): 1091-1098, 1984.
- [153] VOKAC Z., KÖPKE V., KEUL P., Effect of cooling of peripheral parts of the body on general thermal comfort. Textile Research Journal, 41: 827-833, 1971.
- [154] VOKAC Z., KÖPKE V., KEUL P., Assessment and analysis of the bellows ventilation of clothing. Textile Research Journal, 43: 474-482, 1973.
- [155] WILKERSON J.E., RAVEN P.B., HORVATH S.M., Critical temperature of unacclimatized male Caucasians. J. App. Physiol., 33: 451-455, 1972.
- [156] WINSLOW C.E.A., HERRINGTON L.P., GAGGE A.P., A new method of partitioned calorimetry. Am. J. Physiol., 116: 641-655, 1936.
- [157] WYNDHAM C.H., Tolerable limits of air conditioning for men at work in hot mines. Ergonomics, 5: 115-122, 1962.
- [158] WYNDHAM C.H., PLOTKIN R., MUNRO A., Physiological reactions to cold of men in the Antarctic. J. Appl. Physiol., 19: 593-597, 1964.
- [159] WYNDHAM C.H., WILLIAMS C.G., LOOTS H., Reactions to cold. J. Appl. Physiol., 24: 282-287, 1968.
- [160] WYON D.P., The effects of classroom temperature on school performance: Studies in the field. Nord. Hyg. Tid., XLX: 20-23, 1969.
- [161] WYON D.P., The effects of moderate heat stress on typewriting performance. Arch. Sci. Physiol., 27: 499-509, 1973.
- [162] WYON D.P., Human productivity in thermal environments between 65°F and 85°F (18-30°C). [In:] Energy Conservation Strategies in Buildings: Comfort, Acceptability and Health, ed. J.A.J. Stolwijk, New Haven-Connecticut 1978.
- [163] WYON D.P., LIDWELL O.M., WILLIAMS R.E.O., Thermal comfort during surgical operations. J. Hygiene, 66: 229-248, Cambridge 1968.

- [164] YAGLOU C.P., MINARD D., Control of heat casualties at military training centers. Amer. Med. Assoc. Arch. Industr. Health, 16: 302-316 and 405, 1957.
- [165] ZHU X.S., McCULLOUGH E.A., JONES B.W., Thermal insulation of layered Chinese clothing. ASHRAE Trans., 91(II), 1985.

Praca wpłynęła do Redakcji 1987.07.27, w ostatecznej formie 1987.12.28

THERMAL COMFORT OF WORKERS IN COOL AND THERMONEUTRAL WORKPLACES

Relations between different factors of thermal comfort in cool and thermoneutral environments were studied. The effect of local discomfort on general thermal sensations was determined. The role of protective clothing was also analysed.

Thermal comfort and local discomfort problems were studied at the work site on 110 workers in cold stores and breweries, both in summer and winter. Environmental factors of thermal comfort (microclimate variables) and human factors (metabolic heat production, thermal insulation of clothing) were determined.

The effect of body posture and activity on the thermal insulation of clothing was investigated in laboratory.

Statistically significant correlations between general and local thermal sensations were found. These depended on environmental conditions. In thermoneutral environments, general comfort votes depended mainly on the thermal sensations in upper body (trunk region). In cool environments, the local discomfort sensations from hands had a significant effect on general comfort votes (despite their small surface area). This indicated, that improvement of thermal sensations in peripheral parts of the body is necessary for comfort of workers.

Protection of peripheral parts of the body against cold (e.g. hands) can be helped by higher-than-necessary clothing insulation of central parts of the body. Consequently, thermal comfort sensations (local and general) in cool environments can, in general, be improved by proper protective clothing.

The results show that field studies are necessary in the investigation of thermal comfort. They give reliable information about complex physical and physiological phenomena connected with human thermal comfort.

ТЕРМИЧЕСКИЙ КОМФОРТ ЛЮДЕЙ НА ПРОХЛАДНЫХ И ТЕРМОНЕЙТРАЛЬНЫХ РАБОЧИХ МЕСТАХ

В настоящей работе определены зависимости между выбранными факторами, влияющими на термический комфорт людей. Особенное внимание уделено анализу влияния локального дискомфорта на общие термические ощущения, а также роль защитной одежды в формировании условий термического комфорта рабочих.

Исследования проведены в реальных условиях, т.е. в заводских цехах холодильных складов и разливающих пивоваренных заводов. Они охватывали 110 рабочих вышеуказанных объектов. Во время анализа условий термического комфорта учтены факторы среды (физические величины, характеризующие микроклимат) и личные (физическую активность и термоизоляционную способность одежды).

Проведены также лабораторные исследования влияния физической активности и положения человека на изменения термоизоляционной способности рабочей одежды. Их целью было определить характер изменений этой изоляционной способности во время работы.

В работе представлен анализ различных корреляций между показателями термического комфорта и локального дискомфорта и разными факторами, выступающими в реальных условиях, в отличие от похожих классических исследований, веденных, главным образом, в климатических камерах.

Обнаружены отчетливые корреляции между общими ощущениями тепла и ощущениями тепла из отдельных областей человеческого тела. Их форма зависит от термических условий окружающей среды. Чем более они отличаются от комфортабельных, тем более общие ощущения тепла зависят от степени дискомфорта в периферийных областях тела. Отсюда вывод, что для обеспечения рабочим оптимальных условий труда в прохладной среде, надо позаботиться об улучшении термических ощущений в области ладоней и стоп.

ANEKS 1

IREQ - Required Clothing Insulation (Holmer, 1984 [61])

IREQ jest to minimalna izolacyjność cieplna odzieży konieczna do utrzymania równowagi cieplnej organizmu ludzkiego, przy średniej temperaturze skóry \bar{T}_s , równej 30°C i jej minimalnej wilgotności $\omega = 0,06$ (nie występuje pocenie termoregulacyjne). Wartość IREQ uzyskamy rozwiązując układ równań:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{IREQ} = \frac{\bar{T}_s - \bar{T}_{cl}}{0,155(M - W - H_{res} - E)} , \\ \text{IREQ} = \frac{\bar{T}_s - \bar{T}_{cl}}{0,155(R + C)} . \end{array} \right.$$

gdzie

\bar{T}_s - średnia temperatura skóry, $\bar{T}_s = 30^{\circ}\text{C}$,

\bar{T}_{cl} - średnia temperatura powierzchni odzieży,

R - wymiana ciepła przez promieniowanie,

$$R = h_r f_{cl} (T_{cl} - T_r)$$

$$h_r = 4\epsilon\sigma[(T_{cl} + T_r)/2 + 273]^3 A_r/A_{Du}$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ - stała Stefana-Boltzmana,

$\epsilon = 0,97$ - współczynnik emisyjności,

$A_r/A_{Du} = 0,77$ - część powierzchni ciała biorąca udział w wymianie ciepła przez promieniowanie,

T_r - średnia temperatura promieniowania otoczenia, $^{\circ}\text{C}$,

C - wymiana ciepła przez konwekcję,

$$C = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,1 I_{cl} \quad (\text{dla } I_{cl} > 0,5 \text{ clo})$$

$$h_c = 3,5 + 5,2 [v_a + 0,0052 (M - 58)],$$

T_a - temperatura powietrza, $^{\circ}\text{C}$,

M - metaboliczna produkcja ciepła, $W \cdot m^{-2}$,

E - wymiana ciepła przez parowanie,

$$E = \omega E_{\max},$$

$$\omega = 0,06 - \text{minimalna wilgotność skóry,}$$

$$E_{\max} = (p_{sk,s} - p_a) / R_e,$$

$$R_e = 0,06(h_c^{-1} + 0,143 I_{cl}),$$

p_a - ciśnienie parcjalne pary wodnej w powietrzu, kPa,

$p_{sk,s}$ - ciśnienie pary wodnej nasyconej w temperaturze skóry T_s , kPa,

H_{res} - wymiana ciepła przez drogi oddechowe,

$$H_{res} = 0,0173 M(5,87 - p_a) + 0,0014 M(34 - T_a),$$

W - zewnętrzna praca mechaniczna, najczęściej $W = 0$.

Do obliczenia wartości wskaźnika IREQ niezbędna jest znajomość następujących wielkości fizycznych: T_a , T_r , v_a , RH, M.

ANEKS 2

PMV - Predicted Mean Vote (Fanger, 1970 [35])

PMV - przewidywana średnia ocena komfortu w siedmiopunktowej skali Bedforda (lub ASHRAE)

$$\begin{aligned} PMV = & (0,303 e^{-0,036 M} + 0,028) \{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \times \\ & [5733 - 6,99 (M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - \\ & - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0,0014 M (34 - T_a) - \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \}, \end{aligned}$$

gdzie

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028 (M - W) - 0,155 I_{cl} \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \times \right. \\ \left. [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4 + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)] \right\},$$

$$h_c = 2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25} \text{ dla } 2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25} > 12,1 \sqrt{v_{ar}},$$

$$h_c = 12,1 \sqrt{v_{ar}} \text{ dla } 2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_{ar}}$$

$$f_{cl} = 1,00 + 0,2 I_{cl} \quad \text{dla } I_{cl} \leq 0,5 \text{ clo,}$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,1 I_{cl} \quad \text{dla } I_{cl} > 0,5 \text{ clo,}$$

M - metaboliczna produkcja ciepła, $W \cdot m^{-2}$,

W - praca zewnętrzna, $W \cdot m^{-2}$, dla większości czynności równa 0,

I_{cl} - izolacyjność cieplna odzieży, clo (1 clo = $0,155 \text{ m}^2 \cdot K \cdot W^{-1}$),

f_{cl} - współczynnik zwiększenia powierzchni przez odzież,

T_a - temperatura powietrza, $^{\circ}C$,

T_r - średnia temperatura promieniowania otoczenia, $^{\circ}C$,

v_{ar} - względna prędkość powietrza, $m \cdot s^{-1}$,

$$v_{ar} = v_a + 0,0052 (M - 58),$$

v_a - prędkość ruchu powietrza, $m \cdot s^{-1}$,

p_a - ciśnienie parcjale pary wodnej w powietrzu, Pa,

h_c - współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$,

T_{cl} - temperatura powierzchni odzieży, $^{\circ}C$.

ANEKS 3

Wyniki pomiarów w browarze D latem (wartości średnie)

$$T_a = 30,0^{\circ}C,$$

$$T_g = 30,6^{\circ}C,$$

$$v_a = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

$$RH = 78\%$$

$$I_{cl} = 0,5 \pm 0,06 \text{ clo} \quad (0,078 \pm 0,009 \text{ m}^2 \cdot K \cdot W^{-1}),$$

$$T_{cz} = 34,7 \pm 0,4^{\circ}C,$$

$$Y = 6,8 \pm 0,7,$$

$$Y_5 = 6,8 \pm 0,7,$$

$$Y_6 = 6,4 \pm 1,1,$$

$$Y_7 = 7,8 \pm 0,0,$$

$$Y_8 = 7,0 \pm 0,0.$$

SPIS RZECZY

1. Wstęp	4
2. Człowiek w środowisku termoneutralnym i chłodnym	8
2.1. Regulacja gospodarki cieplnej ustroju	9
2.2. Odzież	11
2.3. Komfort cieplny	16
2.4. Praca w obniżonej temperaturze otoczenia	18
3. Badania komfortu cieplnego ludzi na chłodnych i termoneutralnych stanowiskach pracy	19
3.1. Metoda	19
3.2. Wyniki	25
4. Komfort cieplny pracowników w halach produkcyjnych - dyskusja..	35
4.1. Mikroklimat badanych hal produkcyjnych	35
4.2. Ocena komfortu cieplnego pracowników	37
4.3. Rola odzieży w kształtowaniu komfortowego środowiska pracy	48
Podsumowanie i wnioski	57
Literatura	59
Aneks 1	69
Aneks 2	70
Aneks 3	71

PRACE NAUKOWE INSTYTUTU BUDOWNICTWA

(wydane w latach 1986—1987)

Nr 45, Konferencje nr 12, <i>Badania konstrukcji budowlanych i inżynierskich</i> , Wrocław 1986	185,—
Nr 46, Konferencje nr 13, <i>Problemy naukowo-badawcze technologii mechanizacji organizacji i ekonomiki budownictwa</i> , Wrocław 1986	220,—
Nr 47, Monografie nr 19, E. Marcinkowska, <i>Problemy decyzyjne w projektowaniu obiektów i procesów budowlanych</i> , Wrocław 1986	100,—
Nr 48, Konferencje nr 14, <i>Wznoszenie, użytkowanie i rekonstrukcja obiektów betonowych</i> , Wrocław 1986	160,—
Nr 49, Konferencje nr 15, Kontra' 86. <i>Trwałość budowli i ochrona przed korozją</i> , Wrocław 1986	190,—
Nr 50, Monografie nr 20, M. Kamiński, <i>Badania naporu bezkohezyjnych materiałów sypkich w silosach</i> , Wrocław 1986	185,—
Nr 51, Konferencje nr 16, <i>Silosy — badania, projektowanie, budowa, użytkowanie</i> , Wrocław 1987	230,—
Nr 52, <i>Studia i Materiały</i> nr 15, A. Borcz, <i>Experimentally determined pressure exerted on walls and bottom in grain silos</i> , Wrocław 1987	100,—