ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Jan DRENDA

INTERPRETACJA GEOMETRYCZNA WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO





GÓRNICTWO z. 227

GLIWICE 1996



POLITECHNIKA ŚLĄSKA zeszyty naukowe nr 1326

GÓRNICTWO

Zeszyt dwieście dwudziesty siódmy

INTERPRETACJA GEOMETRYCZNA WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Gliwice

1996

OPINIODAWCY

Prof. dr hab. med. Franciszek M. Spioch Prof. dr hab. inż. Józef Wacławik

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY		Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski
REDAKTOR DZIAŁU	_	Dr hab. inż. Franciszek Plewa
SEKRETARZ REDAKCJI		Mgr Elżbieta Leśko

REDAKCJA

Mgr Aleksandra Kłobuszowska

REDAKCJA TECHNICZNA Alicja Nowacka

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9508

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 200+43+10 egz. Zam. 10.05.1996 Ark.wyd. 4 Ark.druk.3.125 Druk ukończono w czerwcu 1996 Papier offset 80g Cena 4.00 zł

Fotokopie, druk i oprawę wykonał "OM" Gliwice, ul. Niedbalskiego 14

SPIS TREŚCI

0	ZNACZENIA	6
1.	KLIMATYCZNE WARUNKI PRACY	9
2.	 KOMFORT CIEPLNY 2.1. Równanie komfortu cieplnego wg Fangera 2.2. Wykresy komfortu cieplnego Fangera 2.2.1. Krzywe komfortu cieplnego 2.2.2. Powierzchnie komfortu cieplnego 	12 12 13 13 16
3.	GRANICE BEZPIECZEŃSTWA TERMICZNEGO MIKROKLIMATU GORĄCEGO	18 18 19 27 27 27
4.	 OBSZAR I PRZESTRZEŃ DYSKOMFORTU CIEPLNEGO	31 31 33
5.	WEKTOR'DYSKOMFORTU CIEPLNEGO	35
6.	WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO	38
7.	UPROSZCZONY SPOSÓB OBLICZANIA WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO	U 42
8.	NOMOGRAMY SŁUŻĄCE DO WYZNACZANIA WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO	45
Lľ	TERATURA	46

CONTENTS

SIG	GNIFICATIONS
1.	CLIMACTIC WORK CONDITIONS
2.	THERMAL COMFORT 11 2.1. Equation of thermal comfort after Fanger 11 2.2. Fanger's diagrams of thermal comfort 12 2.2.1. Thermal comfort curves 12 2.2.2. Surface area of thermal comfort 15
3.	LIMITS OF THERMAL SAFETY OF HOT MICROCLIMATE 17
	 3.1. Reference values of the WBGT index - boundary values of micro- climate indexes
4.	AREA AND SPACE OF THERMAL DISCOMFORT 30 4.1. Definition of area and space of thermal discomfort safe for human health 30 4.2. Zoning planes of thermal discomfort space 32
5.	THERMAL DISCOMFORT VECTOR
6.	THERMAL DISCOMFORT INDEX
7.	SIMPLIFIED METHOD FOR THE CALCULATION OF THERMAL DISCOMFORT INDEX
8.	NOMOGRAMS USED FOR THE DETERMINATION OF THERMAL DISCOMFORT INDEX
BI	BLIOGRAPHY 45
AI	BSTRACT

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ	6
1. КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТРУДА	9
 ТЕПЛОВОЙ КОМФОРТ	12 12 13 13 16
 ІІРЕДЕЛЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРЯЧЕВОГО МИКРОКЛИМАТА Величины отнесения показателя WBGT – предельные значения показателей микроклимата Уравнение предельного теплового дискомфорта 	18 18 19
 3.3. Диаграммы предельного теплового дискомфорта	27 27 27
 4. ОБЛАСТЬ И ПРОСТРАНСТВО ТЕПЛОВОГО ДИСКОМФОРТА 4.1. Формулировка области и пространства теплового дискомфорта безопасного для здоровья	31 31 33
5. ВЕКТОР ТЕПЛОВОГО ДИСКОМФОРТА	35
6. ПОКАЗАТЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ДИСКОМФОРТА	38
7. УПРОЩЕННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕПЛОВОГО ДИСКОМФОРТА	42
8. НОМОГРАММЫ, СЛУЖАЩИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕПЛОВОГО ДИСКОМФОРТА	45
ЛИТЕРАТУРА	46
РЕЗЮМЕ	50

OZNACZENIA

Cdf	-	utrata ciepła przez dyfuzję pary wodnej przez skórę	$[W/m^2]$
Cjw	-	jawna utrata ciepła przez oddychanie	$[W/m^2]$
C _{ut}	-	utajona utrata ciepła przez oddychanie	$[W/m^2]$
D	-	wektor dyskomfortu cieplnego	-
E	-	utrata ciepła przez parowanie potu w warunkach	
		komfortu cieplnego	$[W/m^2]$
Ereq	-	ciepło parowania potu wymagane dla zrównoważenia	
		bilansu cieplnego organizmu	$[W/m^2]$
Emax	-	maksymalne ciepło parowania potu	$[W/m^2]$
ET	-	efektywna temperatura amerykańska	[°C]
ETgran	-	graniczna efektywna temperatura amerykańska	[°C]
ETkomf	-	efektywna temperatura amerykańska w warunkach	
		komfortu cieplnego	[°C]
Icl	-	opór cieplny odzieży	[clo]
К	-	ciepło konwekcji pomiędzy ciałem ludzkim a powietrzem	$[W/m^2]$
K'	-	ciepło konwekcji pomiędzy ciałem ludzkim a powietrzem	
		w warunkach granicznego dyskomfortu cieplnego	$[W/m^2]$
М	-	wydatek energetyczny pracownika	$[W/m^2]$
Po	-	prężność pary wodnej w temperaturze t _s	[Pa]
p _o [/]	-	prężność pary wodnej w temperaturze t ¹ _s , w warunkach	
		granicznego dyskomfortu cieplnego ($ET = ET_{gran}$)	[Pa]
Pon	-	prężność pary wodnej nasyconej w temperaturze t _s	[Pa]
P _{sk}	-	prężność pary wodnej nasyconej w temperaturze	
		powierzchni skóry człowieka	[Pa]
S	-	ciepło promieniowania pomiędzy ciałem ludzkim	
		a otoczeniem	$[W/m^2]$
S [/]	-	ciepło promieniowania pomiędzy ciałem ludzkim	
		a otoczeniem w warunkach granicznego dyskomfortu	
		cieplnego (ET = ET_{gran})	$[W/m^2]$
ts	-	temperatura powietrza mierzona termometrem suchym	[°C]
t's	-	temperatura powietrza (termometr suchy) w warunkach	
		granicznego dyskomfortu cieplnego (ET = ET_{gran})	[°C]
t _w	-	temperatura powietrza mierzona termometrem wilgotnym	[⁰ C]
tpr	-	średnia temperatura promieniowania otoczenia	[°C]

t _{sk}	-	średnia temperatura powierzchni ciała ludzkiego (skóry)	[°C]
w	-	prędkość powietrza	[m/s]
WBGT	-	wskaźnik wilgotnego termometru naturalnego	[°C]
WBGT _{odn}	-	wartość odniesienia wskaźnika wilgotnego termometru	
		naturalnego	[°C]
α _k	-	współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję	$[W/m^2K]$
φ	-	wilgotność względna powietrza	[%]
δ	-	wskaźnik dyskomfortu cieplnego	
δ	-	wskaźnik dyskomfortu cieplnego obliczony metodą uprosz	czoną
ζ	-	stosunek ciepła parowania E _{rea} (wymagane ciepło parowa	nia) do
		maksymalnego ciepła parowania E _{max}	

1. KLIMATYCZNE WARUNKI PRACY

Do podstawowych problemów bezpieczeństwa pracy w górnictwie należą warunki klimatyczne panujące w kopalni. Zależą one od wielu czynników, a mianowicie: od parametrów mikroklimatu, rodzaju i intensywności pracy, ubioru i aklimatyzacji pracownika.

Najwłaściwszymi warunkami pracy człowieka są warunki komfortu cieplnego, w których pracownik odczuwa zadowolenie z parametrów cieplnych otoczenia. Bezpieczna jest również praca w warunkach dyskomfortu cieplnego wtedy, gdy nie zostaną przekroczone dopuszczalne parametry fizjologiczne organizmu, takie jak: temperatura wewnętrzna (rektalna), częstotliwość uderzeń serca, ilość wydzielonego potu.

Środowiska pracy w zależności od mikroklimatu dzielimy na środowiska gorące, ciepłe, umiarkowane, chłodne i zimne. W niniejszym opracowaniu rozpatrywano jedynie środowska ciepłe i gorące, które obecnie stanowią poważny problem i zagrożenie dla zdrowia w kopalniach głębokich, hutach oraz innych gorących działach przemysłu.

Do określenia mikroklimatu w danym środowisku stosuje się, oprócz podania wartości parametrów podstawowych powietrza i otoczenia, wielkości nazywane wskaźnikami mikroklimatu, które uwzględniają łączny wpływ kilku parametrów podstawowych na mikroklimat. Do najważniejszych z nich należą: temperatura efektywna amerykańska ET (oznaczana w Polsce przez ATE), temperatura zastępcza francuska t_r , temperatura efektywna belgijska BET, temperatura zastępcza komfortu cieplnego t_{zk} , katastopnie, wskaźnik WBGT. Większość wymienionych powyżej wskaźników wyznacza się na podstawowych, jak temperatury powietrza (termometr suchy i wilgotny) i prędkości przepływu powietrza. Natężenie chłodzenia powietrza wyrażone w katastopniach mierzymy katatermometrem. Wskaźnik WBGT obliczamy na podstawie pomiarów parametrów pośrednich powietrza i otoczenia, a mianowicie: temperatury termometru kulowego (globalnego) oraz temperatury mokrego termometru naturalnego [5,9,11,18,20,22].

Oprócz wspomnianych wyżej wskaźników mikroklimatu, opracowano również szereg wskaźników klimatycznych warunków pracy uwzględniających wydatek energetyczny pracownika zależny od rodzaju i intensywności pracy, opór cieplny odzieży i aklimatyzację. Do najważniejszych wskaźników warunków klimatycznych

Tabela 1

Wartości odnicsienia wskaźnika obciążenia termicznego WBGT dla ludzi ubranych l_{cl}=0,6 clo (koszula z krótkim rękawem, spodnie)* w zależności od rodzaju pracy (przyrostu metabolizmu) i stopnia aklimatyzacji

Q	Przyrost metabolizmu w odniesieniu do jednostki	м	/artości odni	esienia WBGT	
voucal pracy	M [W/m ²]	osoba zaaklimaty w środowisku gc WBGT [°C	zowana orącym C]	osoba niezaaklii środowisku WBGT	matyzowana w i gorącym ' [^o C]
Odpoczynek	M ≤ 65	33		32	
Praca lekka	65 < M ≤ 130	30		29	
Praca umiarkowana	130 < M ≤ 200	28		26	
		ruch powietr	Za	ruch pov	vietrza
Praca ciężka	200 < M ≤ 260	nieodczuwalny oc 25	lczuwalny 26	nieodczuwalny 22	odczuwalny 23
Praca bardzo ciężka	M > 260	23	25	18	20

10

*) W przypadku innego zestawu odzieży wartości odniesienia wskaźnika WBGT ulegają zmianie: + 2°C

- szorty + 2ºC - marynarka - 2ºC należą: wskaźnik obciążenia termicznego (HSI) według Beldinga-Hatcha [1], (P4SR) według McArdlego [11], wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ [3] oraz tzw. wartości odniesienia wskaźnika WBGT (tab.1) [22]. Wartości wskaźników warunków klimatycznych panujących w danym środowisku w zależności od rodzaju wykonywanej pracy można odczytać z tablic lub nomogramów [1,3,4,6,18,22].

W niniejszym opracowaniu przedstawiono matematyczną interpretację wskaźnika dyskomfortu cieplnego. Zdefiniowano linie, obszar i przestrzeń dyskomfortu cieplnego bezpiecznego dla zdrowia. Wprowadzono pojęcie wektora dyskomfortu cieplnego. Przyjęto definicję, że geometryczną postacią wskaźnika dyskomfortu cieplnego jest stosunek miar wektora warunków klimatycznych i wektora dyskomfortu cieplnego.

2. KOMFORT CIEPLNY

2.1. Równanie komfortu cieplnego wg Fangera

Stanem odczuwania komfortu cieplnego przez człowieka pracującego w danym środowisku zajmował się P.O.Fanger [5], który na podstawie bilansu cieplnego organizmu ludzkiego wyprowadził równanie komfortu cieplnego. Równanie to podane jest w postaci funkcji wielu zmiennych, którymi są parametry mikroklimatu w miejscu pracy, wydatek energetyczny pracownika, opór cieplny odzieży.

Ogólna postać równania komfortu cieplnego, opartego na bilansie cieplnym organizmu ludzkiego, wygląda następująco:

$$M - C_{dt} - E - C_{in} - C_{dt} = K + S$$
(2.1)

gdzie:

M	-	wydatek energetyczny pracownika określony jako różnica	
		całkowitego ciepła metabolizmu i ciepła zużytego na wy-	
		konanie pracy mechanicznej [5],	$[W/m^{2}],$
C _{df}	-	utrata ciepła przez dyfuzję pary wodnej przez skórę,	[W/m ²],
E	-	utrata ciepła przez parowanie potu,	[W/m ²],
C _{iw}	-	jawna utrata ciepła przez oddychanie,	$[W/m^2],$
C _{ut}	-	utajona utrata ciepła przez oddychanie,	$[W/m^2],$
Κ	-	wymiana ciepła przez konwekcję,	$[W/m^2],$
S	-	wymiana ciepła przez promieniowanie,	$[W/m^2].$

Szczegółowe równanie komfortu cieplnego Fangera podane jest w pracy [5]. Lewa strona równania komfortu cieplnego przedstawia różnicę wydatku energetycznego pracownika oraz ilości ciepła oddawanego do otoczenia przez dyfuzję pary wodnej przez skórę, umiarkowane parowanie potu i oddychanie. Prawą stronę równania stanowi suma ciepła konwekcji, jaka występuje pomiędzy powierzchnią ciała ludzkiego a powietrzem oraz ciepła promieniowania pomiędzy powierzchnią ciała ludzkiego a powierzchniami ścian otoczenia. Te dwa ostatnie sposoby wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem są najistotniejsze w warunkach komfortu cieplnego. Mogą one przybierać, w zależności od parametrów otoczenia, wartości dodatnie lub ujemne. Z równania komfortu cieplnego Fangera możemy uzyskać dowolną kombinację wartości poszczególnych jego zmiennych, które zapewniają odczucie komfortu cieplnego przez człowieka. Wpływ zmian parametrów mikroklimatu, wydatku energetycznego czy odzieży na komfort cieplny przedstawiono graficznie na wykresach, wyznaczając tzw. krzywe komfortu cieplnego.

2.2. Wykresy komfortu cieplnego Fangera

2.2.1. Krzywe komfortu cieplnego

Najczęściej stosowanymi wykresami przedstawiającymi krzywe komfortu cieplnego wg Fangera są wykresy sporządzone w następujących układach współrzędnych:

- a) (t_s; t_w) temperatura sucha i wilgotna powietrza,
- b) (t_s; t_{pr}) temperatura sucha powietrza i średnia temperatura promieniowania otoczenia.

Na rysunkach 2.1 i 2.2 przedstawione są krzywe komfortu cieplnego wg Fangera w wyżej wymienionych układach współrzędnych. Wykresy te sporządzone zostały przy uwzględnieniu następujących założeń:

Wykres 2.1. - wydatek energetyczny $M = 165 [W/m^2]$ (praca umiarkowana), opór cieplny odzieży $I_{cl} = 0$ clo (człowiek nie ubrany), $t_s = t_{pr}$ (temperatura powietrza jest równa średniej temperaturze promieniowania otoczenia).

Wykres 2.2. - dla M = 165 [W/m²], $I_{cl} = 0$ clo, stała wilgotność względna powietrza $\varphi = 50\%$.

Parametrem krzywych komfortu cieplnego na obydwu wykresach jest prędkość przepływu powietrza.

Wykresy Fangera służą do oceny komfortu cieplnego w środowiskach pracy. Jeżeli parametry mikroklimatu, wydatek energetyczny pracownika oraz opór cieplny odzieży wskazują, że punkt odpowiadający tym warunkom leży na krzywej komfortu cieplnego, to w tym środowisku istnieje komfort cieplny. Gdy punkt usytuowany jest na prawo od krzywej komfortu, środowisko oceniane jest jako ciepłe, gdy na lewo - jako chłodne.



- Krzywe komfortu cieplnego Fangera w układzie współrzędnych $(t_{s}; t_{w})$ dla wydatku energetycznego M = 165 W/m², ludzi nie ubranych, niezaaklimatyzowanych, przy założeniu, że $t_{\rm s}=t_{\rm pr}$ Rys. 2.1.
 - Fanger's curves of thermal comfort in the coordinate system (t_{s_i} , t_w), for energey expenditure M = 165 W/m², for undressed and not acclimatized people, assuming that $t_{\rm s} = t_{\rm pr}$ Fig. 2.1.



- Rys. 2.2. Krzywe komfortu cieplnego Fangera w układzie współrzędnych $(t_s; t_{pr})$ dla wydatku energetycznego M = 165 W/m², wilgotności względnej powietrza φ = 50%, ludzi nieubranych, niezaaklimatyzowanych
- Fig. 2.2. Fanger's curves of thermal comfort in the coordinate system $(t_s; t_{pr})$ for energy expenditure M = 165 W/m², relative humidity of air $\varphi = 50\%$, for undressed and not acclimatized people



2.2.2. Powierzchnie komfortu cieplnego

Gdy rozpatrywać będziemy łączny wpływ na warunki klimatyczne trzech zmiennych parametrów środowiska (t_s , t_w , t_{pr}), to równanie komfortu cieplnego pozwoli wyznaczyć powierzchnie komfortu cieplnego, których parametrem pozostanie prędkość przepływu powietrza.

Powierzchnia komfortu cieplnego dla prędkości w=1 m/s przedstawiona jest na rysunku 2.3 w przestrzennym kartezjańskim układzie współrzędnych (t_s , t_w , t_{pr}) (temperatura sucha, temperatura wilgotna, temperatura promieniowania otoczenia). Na wykresie tym mogą być również pokazane powierzchnie komfortu dla innych prędkości przepływu powietrza tworząc zbiór powierzchni. Przekrój tych powierzchni komfortu cieplnego płaszczyzną $t_s=t_{pr}$, czyli płaszczyzną prostopadłą do płaszczyzny (0; t_s ; t_{pr}) obejmującą oś t_w i tworzącą z osiami t_s i t_{pr} kąty równe 45°, utworzy nam wykres krzywych komfortu cieplnego przedstawiony na rys.2.1. Przecinając natomiast powierzchnie komfortu cieplnego (rys.2.3) płaszczyzną stałej wilgotności względnej powietrza , np. $\varphi = 50\%$, otrzymamy wykres krzywych komfortu cieplnego przedstawiony na rys.2.2. Przez płaszczyznę stałej wilgotności należy rozumieć płaszczyznę prostopadłą do płaszczyzny $t_{pr}=0$ i przechodzącą przez izolinię stałej wilgotności powietrza φ . Izolinie stałej wilgotności powietrza φ pokazane na rys.2.1. można traktować, bez popełnienia większego błedu, jako linie proste.

3. GRANICE BEZPIECZEŃSTWA TERMICZNEGO MIKRO-KLIMATU GORĄCEGO

3.1. Wartości odniesienia wskaźnika WBGT - graniczne wartości wskaźników mikrolimatu

Ważnym zagadnieniem dla bezpieczeństwa termicznego człowieka w środowiskach gorących jest określenie granicznych wartości wskaźnikow mikroklimatu w miejscu pracy. Zagadnienie to jest przedmiotem normy międzynarodowej ISO 7243-1982, która od 1985 roku obowiązuje również w Polsce pod nazwą PN-85/N-08011, "Wyznaczanie obciążeń termicznych działających na człowieka w środowisku pracy, oparte na wskaźniku WBGT". W normie tej podane są wartości odniesienia wskaźnika WBGT gwarantujące bezpieczeństwo termiczne pracowników.

Wartości odniesienia wskaźnika WBGT są granicznymi wartościami dla warunków klimatycznych, w których jeszcze nie dojdzie do przekroczenia bezpiecznej dla zdrowia temperatury wewnętrznej człowieka równej 38°C. Zależą one od wydatku energetycznego, związanego z rodzajem i intensywnością pracy, ubioru i aklimatyzacji. W tabeli 1 podano wartości odniesienia wskaźnika WBGT wg normy ISO 7243–1982 dla ludzi ubranych (opór cieplny odzieży $I_{cl}=0,6$ clo - koszula z krótkimi rękawami, spodnie), zaaklimatyzowanych i niezaaklimatyzowanych, w zależności od wydatku energetycznego, czyli przyrostu metabolizmu. Wartości odniesienia wskaźnika WBGT powinny być korygowane w przypadku innego zestawu odzieży. Dla ludzi rozebranych (szorty), gdy $I_{cl}=0,1$ clo, wartość wskaźnika WBGT należy powiększyć o 2°C, natomiast przy normalnej odzieży roboczej, gdy $I_{cl}=1$ clo, pomniejszyć o 2°C.

Ponieważ wskaźnik WBGT nie jest wyznaczony na podstawie parametrów podstawowych mikroklimatu [3,5,15,18], nie można przebiegu jego zmienności przedstawić na wykresach w układach współrzędnych t_s , t_w , t_{pr} , a tym samym porównać go z funkcją komfortu cieplnego Fangera lub wykresami innych wskaźników mikroklimatu. Z tego też powodu wartości odniesienia wskaźnika WBGT przyjęto jako wartości graniczne efektywnej temperatury amerykańskiej ET.

 $WBGT_{odniesienia} = ET_{graniczne}$

Założenie to zostało przyjęte zgodnie z definicją temperatury efektywnej amerykańskiej, która sprowadza zdolność chłodzącą mikroklimatu do zdolności chłodzącej powietrza nieruchomego i nasyconego wilgocią w środowisku, w którym temperatura promieniowania jest równa temperaturze powietrza. W takim mikroklimacie wartości wskaźników ET i WBGT są równe.

Wenzel [19], który na podstawie swoich badań wyznaczył izolinie temperatury wewnętrzej człowieka w zależności od zmian parametrów mikroklimatu i wydatku energetycznego, wskazuje na dużą zgodność przebiegu izolinii temperatury efektywnej amerykańskiej dla człowieka nie ubranego z izolinią stałej temperatury wewnętrzej w przedziale wilgotności powietrza 100÷20%. Dla mniejszych wilgotności względnych powietrza niż 20% krzywa Wenzla przybiera kierunek zgodny z izolinią stałej temperatury suchej powietrza. Wilgotności powietrza poniżej 20% występują bardzo rzadko w wyrobiskach górniczych i tylko sporadycznie spotyka się je w kopalniach soli. W kopalniach węgla i rud występują duże i bardzo duże wilgotności względne powietrza.

Efektywną temperatura amerykańska ET dzieli się na [18] bazową temperaturę efektywną BET wyznaczoną dla ludzi nie ubranych i normalną temperaturę efektywną NET dla ludzi ubranych. Bazową efektywną temperaturę amerykańską, będącą aktualnie podstawą norm klimatycznych w niemieckim górnictwie, wyznacza się z nomogramu [17,18]. Przebiegi (izolinie) temperatur efektywnych amerykańskich (BET) w zależności od prędkości przepływu powietrza, temperatury suchej i wilgotnej pokazano na rys.3.1.

3.2. Równanie granicznego dyskomfortu cieplnego

W warunkach dyskomfortu cieplnego podstawowymi sposobami wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem są: konwekcja, promieniowanie i parowanie potu. Inne sposoby wymiany ciepła uwzględniane w równaniu komfortu cieplnego Fangera (2.1), jak dyfuzja pary wodnej lub oddychanie, mają bardzo małe znaczenie i można je pominąć.





Równanie bilansu ciepła organizmu ludzkiego w warunkach dyskomfortu cieplnego przedstawia się następująco:

$$M = K + S + E_{rea} \tag{3.1}$$

gdzie:

M	-	wydatek energetyczny człowieka, równy przyrostowi	
		metabolizmu ciała ludzkiego, zależny od rodzaju	
		i intensywności pracy,	[W/m ²],
K	-	ciepło konwekcji,	[W/m ²],
S	-	ciepło promieniowania,	[W/m ²],
Ereq	-	ciepło parowania potu wymagane dla zrównoważenia	
		bilansu cieplnego.	[W/m ²].

Ciepła konwekcji i promieniowania we wzorze (3.1) mogą przybierać znaki dodatnie i ujemne, tzn. ciepło może wypływać od ciała ludzkiego lub do niego dopływać. Parowanie potu związane jest tylko z oddawaniem ciepła przez organizm do otoczenia. Jest to w wielu wypadkach jedyny sposób obrony organizmu ludzkiego przed przegrzaniem w gorących środowiskach.

Wielkości ciepła konwekcji dla człowieka nie ubranego [5] obliczamy ze wzoru:

$$K = \alpha_k \left(t_{sk} - t_s \right) \qquad [W/m^2]$$

(32)

gdzie:

 α_k - współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję dla konwekcji swobodnej

$$\alpha_{k} = 2,39 \ (t_{sk} - t_{s})^{0.25} \qquad [W/m^{2}K]$$
(3.3)

dla konwekcji wymuszonej

$$\alpha_k = 12, 1 \sqrt{w} \qquad [W/m^2K] \tag{3.4}$$

- t_{sk} średnia temperatura powierzchni ciała ludzkiego przyjmowana dla warunków granicznego dyskomfortu cieplnego $t_{sk}=35^{\circ}C$.
- w prędkość przepływu powietrza, [m/s].

W praktyce przy małej prędkości powietrza należy obliczyć wartości obydwu współczynników konwekcji (tj. konwekcji swobodnej i wymuszonej) i do dalszej analizy brać wartości większe.

Ciepło promieniowania obliczamy ze wzoru:

$$S = 3,96 \cdot 10^{-8} \left[(t_{rr} + 273)^4 - (t_{rr} + 273)^4 \right] \qquad [W/m^2]$$
(3.6)

gdzie:

t_{pr} - średnia temperatura promieniowania otoczenia, [°C].

Ciepło parowania potrzebne do zrównoważenia bilansu cieplnego obliczamy ze wzoru (3.1):

$$E_{reg} = M - K - S \tag{3.7}$$

Istnieje również pojęcie wielkości zwanej maksymalnym ciepłem parowania E_{max} jakie może być odprowadzone z ciała ludzkiego całkowicie pokrytego potem w danych warunkach mikroklimatu. Wielkość tego ciepła obliczono wg wzoru Hainesa i Hatcha [9,10]:

$$E_{\max} = 0,17 \cdot w^{0,38} \cdot (p_{sk} - p_o) \qquad [W]$$

12 01

lub po przeliczeniu na jeden metr kwadratowy powierzchni ciała ludzkiego:

$$E_{max} = 0.094 \cdot w^{0.38} \cdot (p_{ax} - p_{c}) \qquad [W/m^2]$$
(3.9)

gdzie:

p_{sk} - prężność pary wodnej nasyconej w temperaturze skóry ciała ludzkiego. [Pa].

po - prężnosć pary wodnej w powietrzu, [Pa].

Ważnym wskaźnikiem umożliwiającym porównywanie warunków klimatycznych granicznych w zależności od zmian parametrów mikroklimatu jest stosunek wymaganego ciepła parowania E_{reg} do maksymalnego ciepła parowania E_{max} .

$$=\frac{E_{req}}{E_{max}}$$
(3.10)

Parametr ζ należy wyznaczyć dla każdych granicznych wartości parametrów mikroklaniatu (t_s^l , φ , w) związanych z przyjętą graniczną temperaturą efektywną ET_{gran} (tabela 1) przy założeniu, że $t_s = t_{pr}$. W przypadku gdy średnia temperatura

promieniowania otoczenia nie jest równa temperatu zre powietrza, dla przyjętych stałych parametrów mikroklimatu, a mianowicie wilgotności powietrza φ oraz prędkości przepływu powietrza w, graniczną temperaturę powietrza t_s^l , wyznacza się zakładając, że $\zeta = \text{const.}$ Przyjęte założenia sformułować można w następujący sposób: "Warunki klimatyczne graniczne pod względem bezpieczeństa, określone dla danego wydatku energetycznego i stopnia aklimatyzacji pracownika przez graniczną temperaturę efektywną amerykańską będą porównywalne dla zmiennej temperatury promieniowania otoczenia i temperatury powietrza, jeżeli dla danej wilgotności i prędkości przepływu powietrza wskaźnik ζ będzie miał stałą wartość".

Równanie dyskomfortu granicznego po wprowadzeniu wskaźnika ζ przyjmie postać:

$$M = K + S + \zeta \cdot E_{\text{max}} \tag{3.11}$$

Warunkiem uzyskania granicznego dyskomfortu cieplnego jest:

- przyjęcie granicznej temperatury efektywnej amerykańskiej ET_{gran} w zależności od wydatku energetycznego, ubioru i aklimatyzacji;
- 2) przyjęcie stałej wartości wskaźnika ζ wyznaczonego dla danej temperatury efektywnej granicznej, wilgotności i prędkości przepływu powietrza w warunkach, gdy $t_s = t_{pr}$, dla przypadków, gdy t_{pr} i t_s nie będą sobie równe.

Voß podał wzór na obliczenie efektywnej temperatury amerykańskiej w postaci funkcji stopnia drugiego, trzech zmiennych t_s , t_w i w (temperatury suchej, temperatury wilgotnej i prędkości przepływu powietrza [17]). Wzór ten ma postać następującą:

$$ET = -1,2 - w (4,3 - 0,13w - 0,082t_s) - t_w (0,28 - 0,02t_w + 0,00484t_s) + + t_r (1,165 - 0,0104t_s)$$
(3.12)

Schäfer [14] podaje wzór na obliczenie temperatury efektywnej w postaci funkcji stopnia trzeciego uzyskując większą dokładność. Ze względu jednak na dużą dokłądność wzoru (3.12) w zakresie rozpatrywanych temperatur efektywnych od 26÷34°C oraz wilgotności powietrza od 20÷100%, przyjęto go do dalszej analizy.

Linie stałej temperatury efektywnej amerykańskiej przedstawione są na wykresie w układzie współrzędnych (t_s , t_w) (rys.3.1). Mają one kształt bardzo zbliżony do linii prostych, przebiegających pod różnymi kątami w stosunku do osi t_s w zależności od wartości temperatury efektywnej i prędkości powietrza.

Na tym samym wykresie przedstawione są również izolinie wilgotności względnej powietrza φ . Izolinie te wyznaczono z wykresu (i x) Molliera dla ciśnienia atmosferycznego 1000 hPa. Kształt izolinii stałej wilgotności względnej powietrza wskazuje, że mogą być one aproksymowane liniami prostymi. Na podstawie metody najmniejszych kwadratów wyznaczono równanie izolinii wilgotności powietrza φ o postaci:

$$t_{\rm m} = \left(\sqrt[3]{0.915\,\varphi} + 0.085 \right) t_{\rm s} + 4.66\,(\varphi - 1) \tag{3.13}$$

dla $0, 2 \le \varphi \le 1$

W przedziale temperatur suchych powietrza ($5 \le t_s \le 50^{\circ}$ C) i wilgotności względnej ($20 \le \varphi \le 100\%$) średni błąd temperatury wilgotnej powietrza obliczonej według wzoru (3.13) nie przekracza 2%.

Podstawiając wzór 3.13 do wzoru 3.12 możemy obliczyć temperaturę suchą powietrza dla warunków dyskomfortu granicznego przyjmując wartość ET_{gran} oraz wilgotność powietrza φ i prędkość przepływu powietrza w. Po wykonaniu powyższego podstawienia temperaturę suchą graniczną, oznaczoną przez t_s^{\prime} obliczamy z równania kwadratowego typu:

$$at'^{2} + bt' + c = 0$$
 (3.14)

czyli

$$\begin{bmatrix} 0,0104 + 0,00484 \xi - 0,02 \xi^{2} \end{bmatrix} t_{x}^{\prime 2} + \\ + \begin{bmatrix} 0,28 \xi - 0,1864 \xi (\varphi - 1) + 0,0225 (\varphi - 1) - 0,082w - 1,165 \end{bmatrix} t_{x}^{\prime} + \\ + 1,305 (\varphi - 1) - 0,4343 (\varphi - 1)^{2} - 0,13w^{2} + 4,3w + 1,2 + ET_{gran} = 0 \end{aligned}$$
(3.15)

gdzie

$$\xi = \sqrt[3]{0,915\varphi + 0,085} \tag{3.16}$$

Z dwóch pierwiastków równania kwadratowego (3.15) wybieramy jeden o ogólnej postaci:

$$t'_{x} = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a} \tag{3.17}$$

który wyznacza temperaturę suchą graniczną t.

Równanie (3.15) dla wilgotności względnej powietrza φ w przedziale 20÷100% i prędkości przepływu powietrza w przedziale 0,1÷3 m/s ma $\Delta > 0$ pozwałającą znaleźć rozwiązanie. Dla wilgotności około 0,58 (58%) współczynnik przy niewiadomej w stopniu drugim "a" jest równy zeru.

$$a = 0,0104 + 0,00484 \xi - 0,02 \xi^2 = 0 \tag{3.18}$$

W tej sytuacji równanie (3.15) staje się równaniem liniowym typu:

$$bt'_{e} + c = 0$$
 (3.19)

10 . 0

którego rozwiązaniem jest

$$t'_s = -\frac{c}{b}$$

$$t'_{s} = -\frac{1,305 (\varphi - 1) - 0,4343 (\varphi - 1)^{2} - 0,13w^{2} + 4,3w + 1,2 + ET_{gran}}{0,28 \xi - 0,1864 \xi (\varphi - 1) + 0,0225 (\varphi - 1) - 0,02w - 1,165}$$
(3.20)

Praktycznie rozwiązanie równania (3.15) poprzez wzór (3.20) można stosować dla wilgotności φ w przedziale 55÷60%.

Wyznaczenie temperatury t'_s , czyli temperatury, jaka występuje w warunkach dyskomfortu granicznego dla znanej wilgotności i prędkości powietrza oraz przy założeniu, że temperatura t'_s jest równa średniej temperaturze promieniowania, pozwala na wyznaczenie współczynnika ζ :

$$\zeta = \frac{M - K' - S'}{E_{\max}} = \frac{M - \alpha_k (t_{sk} - t'_s) - 3.96 \cdot 10^{-8} \left[(t_{sk} + 273)^4 - (t'_s + 273)^4 \right]}{0.094 w^{0.38} (p_{sk} - p'_o)}$$
(3.21)

gdzie:

 temperatura sucha obliczana dla granicznych, bezpiecznych dla zdrowia warunków klimatycznych,

 t_{sk} - średnia temperatura powierzchni ciała ludzkiego przyjmowana dla warunków granicznego dyskomfortu cieplnego $t_{sk} = 35^{\circ}C$,

 p_{sk} - prężność pary wodnej nasyconej w temperaturze skóry ciała ludzkiego $p_{35} = 5620$ Pa,

Wstawiając wzory 3.2, 3.6, 3.21 do równania 3.11 otrzymujemy równanie dyskomfortu cieplnego granicznego bezpiecznego dla zdrowia:

$$M = \alpha_{k} (35 - t_{s}) + 3,96 \cdot 10^{-8} [(35 + 273)^{4} - (t_{pr} + 273)^{4}] +$$

$$+ \frac{M - \alpha_{k} (35 - t_{s}') + 3,96 \cdot 10^{-8} [(35 + 273)^{4} - (t_{s}' + 273)^{4}]}{(5620 - p_{o}')} (5620 - p_{o})$$
(5620 - p)

gdzie:

α _k	-	obliczamy ze wzoru 3.3 lub 3.4,
ts/	-	obliczamy ze wzoru 3.17 lub 3.20,
Po	-	prężność pary wodnej w temperaturze t _s , [Pa],
		$p_{o} = \varphi p_{on} \tag{3.23}$
		$\varphi = f(t_s; t_w)$ obliczamy ze wzoru 3.13,
pon	•	prężność pary nasyconej w temperaturze t _s , [Pa],
P _o ¹	-	prężność pary wodnej w temperaturze t_s^l dla danej wilgotności φ [Pa], $p_0^l < 5620$ Pa,
φ	-	wilgotność powietrza wyznaczana na podstawie pomiarów \mathbf{t}_{s} i \mathbf{t}_{w} z
		tablic, nomogramów lub wzoru 3.13.

Równanie granicznego dyskomfortu cieplnego (3.22) pozwala wyznaczyć różne kombinacje zmian parametrów mikroklimatu (t_s ; t_w ; φ ; w), średniej temperatury promieniowania otoczenia t_{pr} oraz wydatku energetycznego M, dla granicznych pod względem bezpieczeństwa termicznego warunków klimatycznych pracy. Równanie 3.22 wyznaczone jest dla ludzi nie ubranych ($I_{cl} = 0$).

3.3. Wykresy granicznego dyskomfortu cieplnego

3.3.1. Krzywe granicznego dyskomfortu cieplnego bezpiecznego dla zdrowia

Krzywe bezpiecznego dla zdrowia dyskomfortu cieplnego nazywanego dyskomfortem granicznym można przedstawić graficznie w różnych układach współrzędnych zmiennych parametrów równania 3.22.

W układzie współrzędnych (t_s , t_w) dla przyjętego wydatku energetycznego M = 165 W/m², prędkości przepływu powietrza w = 0,1 m/s, 0,5 m/s, 1 m/s i 3 m/s oraz przy zalożeniu, że $t_s = t_{pr}$, wykresem granicznego dyskomfortu cieplnego są izolinie temperatury efektywnej amerykańskiej, zgodnie z przyjętą definicją, rys.3.1. (dla przedziału wilgotności względnej od 0,2 ÷ 1).

W układzie współrzędnych (t_s , t_{pr}) wykresem granicznego dyskomfortu cieplnego są krzywe pokazane na rys.3.2. Parametrem tych krzywych jest prędkość powietrza (0,3 m/s, 0,5 m/s, 1 m/s i 3 m/s). Wykres pokazany na rys.3.2 sporządzony został dla wydatku energetycznego M = 165 W/m² oraz wilgotności φ = 50%.

3.3.2. Powierzchnie granicznego dyskomfortu cieplnego bezpiecznego dla zdrowia

Równanie dyskomfortu cieplnego jest funkcją wielu zmiennych, a mianowicie: wydatku energetycznego, temperatury suchej i wilgotnej lub wilgotności względnej powietrza, średniej temperatury promieniowania otoczenia, prędkości powietrza, oporu cieplnego odzieży, aklimatyzacji. Przyjmując niektóre ze zmiennych jako wartości stałe, na przykład wydatek energetyczny M = 165 W/m², opór cieplny odzieży I_{cl} = 0 clo oraz ludzi niezaaklimatyzowanych, równanie 3.22 przedstawia w kartezjańskim układzie współrzędnych (t_s, t_w, t_{pr}) powierzchnie dyskomfortu granicznego, których parametrem jest prędkość powietrza. Przykładowy wykres



Rys. 3.2. Izolinie graniczne dyskomfortu cieplnego w układzie współrzędnych $(t_s; t_{pr})$ dla M = 165 W/m², φ = 50%, ludzi nie ubranych, niezaaklimaty-zowanych

Fig.3.2. Boundary isolines of thermal discomfort in the coordinate system $(t_s; t_{pr})$ for M = 165 W/m², φ = 50%, for undressed and not acclimatized people



powierzchni dyskomfortu cieplnego granicznego dla prędkości powietrza równej 1 m/s przedstawia rys.3.3.

Przekrój powierzchni dyskomfortu płaszczyzną $t_s = t_{pr}$ wyznacza izolinię stałej temperatury efektywnej amerykańskiej (rys.3.1.) dla prędkości w = 1 m/s, w przedziale wilgotności powietrza od 20% do 100%. Z kolei przekrój powierzchni dyskomfortu cieplnego (rys.3.3) płaszczyzną stałej wilgotności $\varphi = 50\%$ wyznaczy krzywą graniczną dyskomfortu cieplnego dla prędkości powietrza w = 1 m/s pokazaną na rys.3.2. Płaszczyzny przekrojów wykresu 3.3 pokazane są jako kłady na powierzchnie podstawowe przestrzennego układu współrzędnych. Rys.3.1 jest kładem płaszczyzny przekroju $t_s = t_{pr}$ na płaszczyznę (0; t_s ; t_w), a rys.3.2 jest kładem płaszczyzny przekroju (φ = const) na płaszczyznę (0; t_s ; t_{pr}).

4. OBSZAR I PRZESTRZEŃ DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

4.1. Definicja obszaru i przestrzeni dyskomfortu cieplnego bezpiecznego dla zdrowia

W układzie współrzędnych (t_s; t_w) wykreślamy izolinie stałej wilgotności względnej φ oraz według przyjętych założeń, krzywą komfortu cieplnego Fangera i izolinię granicznego dyskomfortu cieplnego (rys.4.1). Powstały obszar pomiędzy krzywą komfortu cieplnego, krzywą dyskomfortu granicznego (izolinia stałej efektywnej temperatury amerykańskiej) izoliniami stałej wilgotności względnej $\varphi = 100\%$ i $\varphi = 20\%$ oraz obszar pomiędzy krzywą komfortu cieplnego, izolinią stałej temperatury powietrza i izolinią wilgotności względnej $\varphi = 0$ nazywamy obszarem dyskomfortu cieplnego bezpiecznego dla zdrowia. Obszar ten przedstawiony jest na rys.4.1 dla następujących założeń:

- wydatek energetyczny $M = 165 \text{ W/m}^2$,
- człowiek nie ubrany $I_{cl} = 0$ clo,
- człowiek niezaaklimatyzowany $ET_{gran} = 28^{\circ}C$,
- prędkość powietrza w = 1 m/s,
- temperatura powietrza równa temperaturze promieniowania $t_s = t_{pr}$.

Obszar bezpiecznego dyskomfortu cieplnego dla wilgotności powietrza φ od 0 do 20% został zawężony na podstawie badań H.Wenzla [19], według których wyznaczone krzywe stałej temperatury rektalnej organizmu dla bardzo małych wilgotności mają przebieg stromy.

Wykres przedstawiony na rys.4.1 służy do graficznej analizy środowisk klimatycznych i warunków klimatycznych w nich panujących. Na podstawie pomiarów parametrów mikroklimatu t_s ; t_w w różnych miejscach pracy i naniesieniu na wykres (rys.4.1) punktów odpowiadających danym parametrom możemy określić komfort lub dyskomfort cieplny panujący w tych środowiskach. Jeżeli punkt A znajduje się w obszarze dyskomfortu bezpiecznego dla zdrowia, praca w takim środowisku jest dozwolona. Gdy punkt A^l znajduje się na prawo od izolinii granicznej dyskomfortu bezpiecznego, praca jest zakazana, ponieważ w tym środowisku występuje już dyskomfort niebezpieczny dla zdrowia (środowisko gorące). Jeżeli punkt A^n znajduje się na lewo od krzywej komfortu cieplnego, mamy



Fig. 4.1. Area of thermal discomfort safe for human health in the coordinate system for $(t_s; t_w)$ for $M = 165 \text{ W/m}^2$, w = 1 m/s, $t_{\rm s}=t_{\rm pr^{\prime}}$ for underssed and not acclimatized people do czynienia z dyskomfortem chłodnym, którego granice bezpieczeństwa w niniejszej pracy nie były analizowane.

W układzie współrzędnych (t_s, t_w, t_{pr}) możemy dokonać analizy przestrzeni dyskomfortu bezpiecznego dla zdrowia. Przestrzeń dyskomfortu cieplnego bezpiecznego dla zdrowia zawarta jest pomiędzy powierzchnią komfortu cieplnego, powierzchnią granicznego dyskomfortu cieplnego i płaszczyznami stałej wilgotności względnej powietrza $\varphi = 100\%$ i $\varphi = 20\%$ oraz dla wilgotności poniżej 20% pomiędzy powierzchnią komfortu cieplnego, powierzchnią prostopadłą do płaszczyzny (0, t_s, t_{pr}) przechodzącą przez krzywą utworzoną z przecięcia się powierzchni dyskomfortu cieplnego (wg równania 3.22) z płaszczyzną $\varphi = 20\%$ i płaszczyzną wilgotności względnej $\varphi = 0$.

Przestrzeń dyskomfortu cieplnego dla następujących założeń:

- wydatek energetyczny

 $M = 165 W/m^2$,

 $I_{cl} = 0 \text{ clo},$ ET_{gran} = 28°C,

w = 1 m/s,

- człowiek nie ubrany
- człowiek niezaaklimatyzowany

- prędkość powietrza

przedstawiono na rys.4.2.

4.2. Płaszczyzny podziału przestrzeni dyskomfortu cieplnego

Przestrzeń dyskomfortu cieplnego pokazana na rys.4.2 może być przecinana różnymi płaszczyznami, tworząc obszary dyskomfortu bezpiecznego dla zdrowia. W rozdziale drugim i trzecim dokonano podziału przestrzeni dyskomfortu cieplnego dwoma rodzajami płaszczyzn, a mianowicie płaszczyzną o równaniu $t_s = t_{pr}$, prostopadłą do płaszczyzny (0, t_s , t_{pr}) układu współrzędnych, przechodzącą przez oś (0; t_w) (rys.2.1; 3.1) i płaszczyzną będącą miejscem geometrycznym punktów o stałej wilgotności powietrza φ (rys.2.2; 3.2).

Rysunki 2.1; 2.2; 3.1; 3.2 przedstawiające krzywe komfortu cieplnego i granicznego dyskomfortu cieplnego powstały przez przecięcie wyżej wspomnianymi płaszczyznami kilku wzajemnie się przenikających przestrzeni dyskomfortu cieplnego odpowiadających różnym prędkościom przepływu powietrza.

W praktyce rozpatrywane mogą być dowolne przekroje przestrzeni dyskomfortu cieplnego, na podstawie których możliwe jest wyznaczenie krzywych komfortu cieplnego lub krzywych granicznych dyskomfortu cieplnego. Mogą to być na przykład płaszczyzny przekrojów o stałej temperaturze promieniowania, prostopadłe do płaszczyzny (0, t_s , t_{pr}) i prostopadłe do osi 0, t_{pr}).



165 W/m², w = 1 m/s, for undressed and not acclimatized people Fig. 4.2.

5. WEKTOR DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Podzielmy przestrzeń dyskomfortu płaszczyznami:

- 1) płaszczyzną o równaniu $t_{pr} = B \cdot t_s$, gdzie B jest dowolną liczbą rzeczywistą,
- płaszczyzną stałej wilgotności φ, przechodzącą przez linie stałej wilgotności o równaiu (3.13) i będącą równoległą do osi (0, t_{pr}).

W ten sposób możemy utworzyć nieskończenie wiele par przecinających się płaszczyzn, których krawędzie przecięcia się (linie proste) będą przechodziły przez wszystkie punkty przestrzeni dyskomfortu cieplnego.

Na linii prostej powstałej z przecięcia się powyższych płaszczyzn umieścimy wektor o początku leżącym na powierzchni komfortu cieplnego i końcu na powierzchni granicznego dyskomfortu cieplnego. Wektor taki nazwiemy wektorem dyskomfortu cieplnego (rys.5.1).

Przez każdy punkt znajdujący się w przestrzeni dyskomfortu cieplnego przechodzi tylko jeden wektor dyskomfortu cieplnego.

Linia prosta będąca kierunkiem wektora dyskomfortu cieplnego przechodzi przez dany punkt A o współrzędnych (t_{sA} ; t_{wA} ; t_{prA}) oraz przez punkt P, który dla wilgotności $\varphi = 1$ (100%) leży w początku układu współrzędnych, natomiast dla innych wilgotności $\varphi < 1$, punkt P leży na osi t_w po stronie wartości ujemnych o współrzędnych (0; 4,66 (φ -1); 0).

Równanie kierunku wektora dyskomfortu cieplnego (linii prostej) ma postać:

$$\frac{t_s - t_{sP}}{t_{sA} - t_{sP}} = \frac{t_w - t_{wP}}{t_{wA} - t_{wP}} = \frac{t_{pr} - t_{prP}}{t_{prA} - t_{prP}}$$
(5.1)

Jeżeli

$$t_{sP} = 0$$

$$t_{wP} = 4,66 (\varphi - 1)$$

$$t_{pIP} = 0$$

to równanie kierunku wektora przybiera postać:

$$\frac{t_s}{t_{xA}} = \frac{t_w - t_{wP}}{t_{wA} - t_{wP}} = \frac{t_{pr}}{t_{prA}}$$
(5.2)



- Rys. 5.1. Wektor dyskomfortu cieplnego w przestrzeni (układ współrzędnych t_s; t_w; t_{pr}). Założenia: M = 165 W/m², w = 1 m/s, $\phi = 40\%, t_w = t_{pr'}$ ludzie nie ubrani, niezaaklimatyzowani
- Vector of thermal discomfort in space (coordinate system t_s ; t_w ; t_{pr}). Assumptions: $M = 165 \text{ W/m}^2$, w = 1 m/s, $\varphi = 40\%$, $t_{\rm w}=t_{\rm pr}$ undressed and not acclimatized people Fig. 5.1.

Prosta wyznaczona z równania 5.2 przecina powierzchnię komfortu cieplnego i granicznego dyskomfortu cieplnego w punktach stanowiących początek i koniec wektora dyskomfortu cieplnego. Rozwiązując układ równań składający się z równań (2.1, 3.22 oraz 5.2) otrzymamy współrzędne punktów przecięcia się prostej (5.2) z powierzchniami komfortu cieplnego i granicznego dyskomfortu cieplnego, punkty $B(t_{sB}; t_{wB}; t_{prB}) i C(t_{sC}; t_{wC}; t_{prC})$ oraz współrzędne lub miary wektora dyskomfortu cieplnego BC = D

$$\vec{D}\left[(t_{sC} - t_{sB}) ; (t_{wC} - t_{wB}) ; (t_{prC} - t_{prB})\right]$$
(5.3)

-- r

6. WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Wektor dyskomfortu cieplnego BC (rys.6.1) usytuowany w przestrzeni dyskomfortu bezpiecznego dla zdrowia łączy powierzchnię komfortu cieplnego (punkt B) z powierzchnią granicznego dyskomfortu cieplnego (punkt C). Punkt A określony przez parametry mikroklimatu i leżący na kierunku wektora dyskomfortu tworzy wektor BA, który nazwano wektorem warunków klimatycznych. Punkt A, w zależności od parametrów mikroklimatu, może leżeć w dowolnym miejscu na prostej będącej kierunkiem wektora BC, to znaczy może dzielić wektor BC lub być położony poza nim. Wskaźnikiem dyskomfortu cieplnego oznaczonego przez δ nazwano więc stosunek miar (współrzędnych) wektorów BA i BC

$$\delta = \frac{t_{sA} - t_{sB}}{t_{sC} - t_{sB}} = \frac{t_{wA} - t_{wB}}{t_{wC} - t_{wB}} = \frac{t_{prA} - t_{prB}}{t_{prC} - t_{prB}}$$
(6.1)

Bezwzględna wartość współczynnika δ jest również równa stosunkowi długości wektorów $|B\vec{A}|$ i $|B\vec{C}|$, czyli długości odcinków BA i BC

$$|\delta| = \frac{BA}{BC} = \frac{\sqrt{(t_{sA} - t_{sB})^2 + (t_{wA} - t_{wB})^2 + (t_{prA} - t_{prB})^2}}{\sqrt{(t_{sC} - t_{sB})^2 + (t_{wC} - t_{wB})^2 + (t_{prC} - t_{prB})^2}}$$
(6.2)

Ponieważ stosunek długości odcinków BA i BC jest równy stosunkowi ich rzutów na dowolną płaszczyznę i oś układu współrzędnych, stąd:

$$|\delta| = \frac{BA}{BC} = \frac{|t_{xA} - t_{xB}|}{|t_{sC} - t_{sB}|} = \frac{|t_{wA} - t_{wB}|}{|t_{wC} - t_{wB}|} = \frac{|t_{prA} - t_{prB}|}{|t_{prC} - t_{prB}|}$$
(6.3)

Jeżeli punkt A leży na wektorze \overrightarrow{BC} (co piszemy A $\epsilon \overrightarrow{BC}$), to wskaźnik dyskomfortu cieplnego przybiera wartości od $0 \div 1$, czyli $0 \le \delta \le 1$. Jeżeli ponadto A \equiv B to $\delta = 0$ oraz gdy A \equiv C to $\delta = 1$





Punkt A może leżeć również poza wektorem dyskomfortu cieplnego, ale powinien leżeć na jego kierunku. Rozróżniamy w tym przypadku dwie możliwości (rys.6.1):

- 1) punkt A^l leży bliżej punktu C niż punktu B (CA^l < BA^l),
- 2) punkt A" leży bliżej punktu B niż punktu C (CA" > BA").

W pierwszym przypadku wskaźnik dyskomfortu cieplnego obliczany wzorami 6.1, 6.2, 6.3 jest większy od 1. W drugim przypadku wskaźnik dyskomfortu cieplnego obliczany ze wzoru 6.1 jest mniejszy od 0.

Reasumując możemy napisać, że jeżeli punkt A ∉ BC oraz

$$CA' < BA' \rightarrow \delta = \frac{t_{sA'} - t_{sB}}{t_{sC} - t_{sB}} \quad \delta > 1$$

$$CA'' > BA'' \implies \delta = \frac{t_{sA''} - t_{sB}}{t_{sC} - t_{sB}} \qquad \delta < 0$$

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego służy do oceny warunków klimatycznych pod względem bezpieczeństwa pracy w danych środowiskach. Jest wielkością bczwymiarową.

Jeżeli:

δ = 0 - komfort cieplny,
 0 < δ < 1 - dyskomfort cieplny bezpieczny dla zdrowia (środowisko ciepłe),
 δ ≥ 1 - dyskomfort cieplny niebezpieczny dla zdrowia (środowisko gorące),
 δ < 0 - środowisko chłodne.

W środowiskach gorących, w których $\delta \ge 1$ praca powinna być zabroniona, ponieważ jest niebezpieczna dla zdrowia, istnieje możliwość przegrzania organizmu i udaru cieplnego. W środowiskach, w których panuje dyskomfort cieplny bezpieczny dla zdrowia $0 < \delta < 1$, praca jest dozwolona.

Warunki klimatyczne odpowiadające przedziałowi wskaźnika dyskomfortu δ od 0 \div 1 proponuje się podzielić na cztery grupy, a mianowicie:

0	$\leq \delta < 0,2$	- warunki klimatyczne korzystne (zbliżone do komfortu
		cieplnego),
0,2	$\leq \delta < 0,5$	- warunki klimatyczne zadowalające,
0,5	$\leq \delta < 0.8$	– warunki klimatyczne trudne,
0,8	$\leq \delta < 1$	- warunki klimatyczne bardzo trudne,

Dla środowisk górniczych, w których wskaźnik dyskomfortu $\delta \ge 0.5$ należy stosować metody poprawy warunków klimatycznych.

7. UPROSZCZONY SPOSÓB OBLICZANIA WSKAŹNIKA DYS-KOMFORTU CIEPLNEGO

Dla środowisk pracy, w których temperatura powietrza równa się średniej temperaturze promieniowania otoczenia, wskaźnik dyskomfortu cieplnego możemy w przybliżeniu wyznaczyć korzystając z temperatur efektywnych amerykańskich odczytywanych z nomogramu [3,17,18]. Temperatura efektywna amerykańska ET łączy w sobie trzy parametry podstawowe mikroklimatu, a mianowicie: temperaturę powietrza suchą i wilgotną oraz prędkość przepływu powietrza.

Jeżeli wprowadzimy układ współrzędnych z temperaturą efektywną amerykańską na osi odciętych i wilgotnością powietrza φ na osi rzędnych, uzyskamy obszar dyskomfortu cieplnego w formie trapezu (rys.7.1). Izolinie temperatury efektywnej amerykańskiej są na tym wykresie liniami pionowymi, izolinie wilgotności powietrza φ - liniami poziomymi, natomiast izolinia komfortu cieplnego wg Fangera dla wszystkich prędkości powietrza w przedziale 0,1 ÷ 3 m/s linią prostą skośną. Jeżeli w obszarze dyskomfortu bezpiecznego dla zdrowia umieścimy punkt A, to wektor dyskomfortu cieplnego przechodzący przez punkt A będzie miał kierunek poziomy zgodny z izolinią stałej wilgotności powietrza φ . Początek wektora dyskomfortu cieplnego będzie w punkcie B, a koniec w punkcie C (rys.7.1). Współrzędnymi wektora dyskomfortu są (ET_C – ET_B; $\varphi_C - \varphi_B$).

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego obliczamy ze wzoru:

$$\delta' = \frac{ET_A - ET_B}{ET_C - ET_B} = \frac{ET_A - ET_{konf.}}{ET_{gran.} - ET_{konf.}}$$
(7.1)

Wykorzystując pomiary wentylacyjne w miejscu pracy, na przykład pomiary temperatur powietrza t_s i t_w oraz prędkości przepływu powietrza, temperatury efektywne amerykańskie występujące we wzorze 7.1 można łatwo znaleźć z nomogramu Yaglou, wykresów komfortu cieplnego Fangera [3,5,17,18] i z tabeli granicznych wartości temperatur efektywnych porównywanych z wartościami odniesienia wskaźnika WBGT (tabela 1).



Rys. 7.1. Obszar dyskomfortu cieplnego bezpiecznego dla zdrowia w układzie współrzędnych (ET; \$\overline{\phi}) dla założeń M = 165 W/m², w = 1 m/s, $t_s = t_{pr}$ ludzi nie ubranych, niezaaklimatyzowanych

Area of thermal discomfort safe for human health in the coordinate system (ET; φ) for assuming that M = 165 W/m², $w=1\ m/s, t_s=t_{pr},$ people are undressed and not acclimatized Fig. 7.1.

Porównując wyniki obliczeń wskaźników dyskomfortu cieplnego ze wzorów 6.1 i 7.1 stwierdzono, że różnica nie przekracza wielkości 0,05. Analizując próbę 40 wartości wskaźników dyskomfortu cieplnego obliczonych obydwoma wzorami zgodnie z testem Studenta [7], stwierdzono, że wartości zmiennych δ i δ^{l} nie różnią się istotnie. Z prawdopodobieństwem 0,999 można więc przyjąć, że $\delta = \delta^{l}$.

Uproszczoną metodę wyznaczania wskaźnika dyskomfortu cieplnego, gdy temperatura powietrza jest równa średniej temperaturze promieniowania otoczenia, można więc stosować w celu przeprowadzenia analizy warunków klimatycznych i bezpieczeństwa pracy w środowiskach ciepłych i gorących.

8. NOMOGRAMY SŁUŻĄCE DO WYZNACZANIA WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Do wyznaczania wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla danych warunków klimatycznych służą nomogramy. Nomogramy zamieszczone są w pracy [3] oraz w artykule [4]. W opracowaniu [3] podane są nomogramy zbiorcze, z których wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ można wyznaczyć na podstawie pomiarów temperatury powietrza suchej i wilgotnej, prędkości przepływu powietrza i wydatku energe-tycznego. Przyjmuje się w nich, że temperatura powietrza jest równa średniej temperaturze promieniowania oraz że człowiek jest bez odzieży. Oprócz nomo-gramów zbiorczych są podane również wykresy szczegółowe, z których można przeanalizować wpływ poszczególnych parametrów mikroklimatu, wydatku energetycznego, oporu cieplnego odzieży na wskaźnik dyskomfortu cieplnego.

LITERATURA

- 1. Belding H.S., Hatch T.F.: Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains. Heating, Piping and Air Conditioning 27, August 1955.
- Bronsztejn L.N., Siemiendiajew K.A.: Matematyka. Poradnik encyklopedyczny. PWN, Warszawa 1988.
- Drenda J.: Dyskomfort ciepłny w środowiskach pracy kopalń głębokich. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., s. Górnictwo, z. 213, Gliwice 1993.
- Drenda J.: Bewertung der klimatischen Arbeitsbedingungen mit Hilfe der Wärmediskomfortkoeffizienten. Glückauf-Forschungshefte nr 2, 1993.
- 5. Fanger P.O.: Komfort cieplny. Wyd. Arkady, Warszawa 1974.
- 6. Frycz A.: Klimatyzacja kopalń. Wyd. Śląsk, Katowice 1969.
- 7. Greń J.: Statystyka matematyczna modele i zadania. PWN, Warszawa 1984.
- 8. Janowski W.: Matematyka. PWN, Warszawa 1965.
- 9. Klonowicz S., Kozłowski S.: Człowiek a środowisko termiczne. PZWL, Warszawa 1970.
- Lambrechts I.: A critical comparison of specific cooling power and the wet kata thermometer in hot mining environment. Journal of the South Africa Institute of Mining and Metallurgy. December 1972.
- 11. Leithead C.S., Lind A.R.: Heat stress and head disorders. Cassell London 1964.
- 12. Mitchell D., Whiller A.: Cooling power of underground environments. Journal of the South Africa Institute of Mining and Metallurgy. October 1971.
- 13. Romaszewski S., Wrona W.: Matematyka wyższa dla studiów technicznych. PWN, Warszawa 1965.
- 14. Schäfer B.:Geometrische Bestimmung der Effektivtemperatur nach Yaglou. Glückauf-Forschungshefte, nr 1, 1994.
- 15. Spioch F.: Wpływ mikroklimatu w kopalniach na stan zdrowia, wydajność i bezpieczenstwo pracy górników. Chłodnictwo, nr 8-9, 1976.
- 16. Spioch F., Nowara M.: Wydatek energetyczny górników i pracowników przemysłu ciężkiego. Medycyna Pracy XXVI, nr 5, 1975.
- 17. Voß J.: Grubenklima. Verlag Glückauf GmbH, Essen 1981.
- Wenzel H.G., Piekarski C.: Klima und Arbeit. Bayerisches Staatsministerium f
 ür Arbeit und Sozialordnung. 4 Aufl. M
 ünchen 1984.

- Wenzel H.G., Mehnert C., Schwarzenau P.: Evaluation of tolerance limits for humans under heat stress and the problems involved. Scand. J.Work Environ. Health 1989, 15 (suppl.1).
- 20. Ziobro E.: Praca w środowisku wysokich temperatur. Instytut Wydawniczy CRZZ, Warszawa 1972.
- 21. ISO/DIS 9886 Ergonomics Evaluation of thermal strain by physiological measurements. 30.11.1989.
- 22. PN-85/N-08011 (tłum. z ISO 7243-1982) Środowiska gorące. Wyznaczanie obciążeń termicznych działających na człowieka w środowiskach pracy, oparte na wskaźniku WBGT.

INTERPRETACJA GEOMETRYCZNA WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Streszczenie

W monografii wprowadzono matematyczny model dyskomfortu cieplnego panującego w miejscach pracy. Wyznaczono równanie granicznego, bezpiecznego dla zdrowia dyskomfortu cieplnego. Wykorzystując równanie komfortu cieplnego Fangera oraz równanie granicznego dyskomfortu cieplnego, przedstawiono graficznie linie, obszary i przestrzenie dyskomfortu cieplnego bezpiecznego dla zdrowia. Obrazy te pokazano w przestrzennym układzie współrzędnych o osiach t_s - temperatura termometru suchego, t_w - temperatura termometru wilgotnego, t_{pr} - temperatura promieniowania otoczenia. Wprowadzono pojęcie wektora dyskomfortu cieplnego oraz wektora warunków klimatycznych. Zdefiniowano wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ jako stosunek miar wektorów warunków klimatycznych i dyskomfortu cieplnego. Wprowadzono również uproszczony sposób obliczania wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla środowisk, w których temperatura powietrza jest równa średniej temperaturze promieniowania otoczenia, który z wystarczającą dokładnością pozwala ocenić stan warunków klimatycznych i bezpieczeństwo termiczne w miejscu pracy.

GEOMETRICAL INTERPRETATION OF THE INDEX OF THERMAL DISCOMFORT

Abstract

The work presents a mathematical model of thermal discomfort existing at working places. The boundary equation of thermal discomfort safe for human health has been determined. Basing on Fanger's equation of thermal comfort and on boundary equation of thermal discomfort, the lines, areas and spaces of thermal discomfort safe for human health have been presented in the form of graphic diagrams. The diagrams were presented in a spatial coordinate system having the axes: t_s - temperature of dry thermometer, t_w - temperature of humid thermometer, t_{pr} - temperature of environment radiation. The work introduces the notions of thermal discomfort δ has been defined as a value ratio of the vectors of climactic conditions and thermal discomfort. Also, a simplified method for the calculation of thermal discomfort index has been presented, for the environments in which air temperature is equal to average temperature of environment radiation. The introduced index makes it possible to evaluate the state of climatic conditions as well as thermal safety at the working place with sufficient accuracy.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕПЛОВОГО ДИСКОМФОРТА

Резюме

В работе введена математическая модель теплового дискомфорта, господствующего в местах труда. Составлено уравнение предельного, безопасного для здоровья, теплового дискомфорта. Используя уравнение теплового комфорга Фангера, а также уравнение предельного теплового дискомфорта, автор графически представил линии, области и пространства теплового дискомфорта, безопасного для здоровья. Эти картины представлены в пространственной системе координат с осями: t, - температура сухого термометра, tw - температура влажного термометра, tw - температура излучения окружающей среды. Введены понятия вектора теплового дискомфорта и вектора климатических условий. Сформулирован показатель теплового дискомфорта б как соотношение мер векторов климатических условий и теплового дискомфорта. Введен также упрощенный метод определения показателя теплового дискомфорта для среды, в которой температура воздуха равна средней температуре излучения окружающей среды. Показатель этот с достаточной точностью позваляет оценить состояние климатических условий, а также термическую безопасность в месте труда.

