ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

P. 3351/93

JAN DRENDA

DYSKOMFORT CIEPLNY W ŚRODOWISKACH PRACY KOPALŃ GŁĘBOKICH

GÓRNICTWO

Z. 213
GLIWICE
1993

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

NR 1205

P.3351/93

JAN DRENDA

DYSKOMFORT CIEPLNY W ŚRODOWISKACH PRACY KOPALŃ GŁĘBOKICH

GLIWICE 1993

OPINIODAWCY

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

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY - *Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski*
REDAKTOR DZIAŁU - *Prof. dr hab. inż. Walery Szuścik*
SEKRETARZ REDAKCJI - *Mgr Elżbieta Leśko*

REDAKCJA

Mgr Roma Łoś

REDAKCJA TECHNICZNA

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9508

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

Nakład 150+83 egz. Ark. wyd.7,5 Ark. druk. 8,375 Papier offset kl. III 70x100 80g
Oddano do druku 21.05.93 Podpisano do druku 29.07.93 Druk ukończ. w sierpniu 1993
Zam. 1535/93 Cena. 26.000,- zł

Skład, fotokopie, druk i oprawa
INTEC-GRAF, GLIWICE, ul. Bankowa 12

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP - TEZA I CEL PRACY 13

2. WYMIANA CIEPŁA POMIĘDZY CZŁOWIEKIEM A OTOCZENIEM - RÓWNOWAGA TERMICZNA ORGANIZMU LUDZKIEGO 16

2.1. CIEPŁO METABOLICZNE - WYDATEK ENERGETYCZNY PRACOWNIKA 16

2.2. BILANS CIEPLNY ORGANIZMU LUDZKIEGO 21

2.3. PODSTAWOWE SPOSOBY WYMIANY CIEPŁA MIĘDZY CZŁOWIEKIEM A OTOCZENIEM 23

2.3.1. Przewodzenie ciepła przez odzież 23

2.3.2. Konwekcja ciepła 25

2.3.3. Promieniowanie cieplne 26

2.3.4. Parowanie potu 30

2.3.5. Inne sposoby wydzielania ciepła z organizmu człowieka 32

2.4. KOMFORT CIEPLNY - RÓWNANIE KOMFORTU CIEPLNEGO FANGERA 33

2.5. OCENA KOMFORTU CIEPLNEGO PRACOWNIKÓW W ŚRODOWISKACH TERMICZNIE UMIARKOWANYCH - WSKAŹNIKI PMV I PPD 37

3. WSKAŹNIKI OCENY MIKROKLIMATU 39

3.1. WSKAŹNIKI FIZYCZNE 39

3.2. WSKAŹNIKI FIZJOLOGICZNE 45

3.3. PORÓWNANIE WZAJEMNEJ ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY NIEKTÓRYMI WSKAŹNIKAMI MIKROKLIMATU 47

4. BEZWYMIAROWY (PROCENTOWY) WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO 50

5. ANALIZA WPŁYWU PARAMETRÓW ŚRODOWISKA NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO PRACOWNIKA ... 54

5.1. WPŁYW TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI POWIETRZA NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO 54

5.2. WPŁYW PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU POWIETRZA NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO 55

5.3. WPŁYW ŚREDNIEJ TEMPERATURY PROMIENIOWANIA OTOCZENIA NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO .56

5.4. WPŁYW WYDATKU ENERGETYCZNEGO PRACOWNIKA NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO 62

5.5. WPŁYW OPORU CIEPLNEGO ODZIEŻY NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO 63

5.6. NOMOGRAM DO WYZNACZANIA WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO CZŁOWIEKA PRACUJĄCEGO W ŚRODOWISKU GÓRNICZYM 64

6. CZAS PRACY ROBOTNIKA W WARUNKACH DYSKOMFORTU CIEPLNEGO 66

6.1. CZAS PRACY I CZAS WYPOCZYNKU PODCZAS DNIÓWKI ROBOCZEJ 66

6.2. CZAS DNIÓWKI ROBOCZEJ 67

6.3. DOPUSZCZALNY CZAS EKSPOZYCJI CZŁOWIEKA W ŚRODOWISKU GORĄCYM 69

7. ZASTOSOWANIE WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO DO OCENY WARUNKÓW KLIMATYCZNYCH W ŚRODOWISKACH PRACY 70

7.1. PRZYKŁADY OCENY KLIMATYCZNYCH WARUNKÓW PRACY W ŚRODOWISKACH GÓRNICZYCH NA PODSTAWIE WSKAŹNIKA DYSKOMFORU CIEPLNEGO 70

7.2. WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO JAKO PARAMETR NORMOWANIA PRACY W GÓRNICTWIE I W GORĄCYCH DZIAŁACH PRZEMYSŁU 72

LITERATURA 74

STRESZCZENIE 78

ZESTAWIENIE RYSUNKÓW I NOMOGRAMÓW 85

CONTENTS

1. INTRODUCTION - THESIS AND PURPOSE OF THE PAPER 13

2. HEAT EXCHANGE BETWEEN A MAN AND ENVIRONMENT - THERMAL EQUILIBRIUM OF HUMAN BODY 16

2.1. METABOLIC HEAT PRODUCTION - WORKER ENERGY PRODUCTION 16

2.2. HEAT BALANCE OF HUMAN BODY 21

2.3. BASIC WAYS OF HEAT EXCHANGE BETWEEN A MAN AND ENVIRONMENT 23

2.3.1. Heat transfer by conduction through the clothing ... 23

2.3.2. Convective heat transfer 25

2.3.3. Thermal radiance 26

2.3.4. Evaporation of sweat 30

2.3.5. Other ways of heat transfer from human body 32

2.4. THERMAL COMFORT - FANGER'S THERMAL COMFORT EQUATION 33

2.5. THERMAL COMFORT EVALUATION IN MODERATE THERMAL ENVIRONMENTS - THE PMV AND THE PPD 37

3. MICROCLIMATE EVALUATION INDEXES 39

3.1. PHYSICAL INDEXES 39

3.2. PHYSIOLOGICAL INDEXES 45

3.3. COMPARISON OF MUTUAL RELATION BETWEEN SOME MICROCLIMATE INDEXES 47

4. DIMENSIONLESS (IN PERCENTAGE) INDEX OF THERMAL DISCOMFORT 50

5. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ENVIRONMENT PARAMETERS ON WORKER'S THERMAL DISCOMFORT INDEX 54

5.1. INFLUENCE OF AIR TEMPERATURE AND HUMIDITY ON THERMAL DISCOMFORT INDEX 54

5.2. INFLUENCE OF AIR FLOW VELOCITY ON THERMAL DISCOMFORT INDEX 55

5.3. INFLUENCE OF MEAN AMBIENT RADIANT TEMPERATURE ON THERMAL DISCOMFORT INDEX 56

5.4. INFLUENCE OF WORKER ENERGY PRODUCTION ON THERMAL DISCOMFORT INDEX 62

5.5. INFLUENCE OF CLOTHING INSULATION ON THERMAL DISCOMFORT INDEX 63

5.6. NOMOGRAM FOR EVALUATION OF THERMAL DISCOMFORT INDEX OF A MAN WORKING IN MINING ENVIRONMENT ... 64

6. WORK TIME OF A WORKER IN THERMAL DISCOMFORT CONDITIONS 66

6.1. WORK AND REST TIMES DURING A DAY'S WORK 66

6.2. TIME OF A DAY'S WORK 67

6.3. ADMISSIBLE EXPOSURE TIME OF A WORKER IN HOT ENVIRONMENT 69

7. ADAPTATION OF THERMAL DISCOMFORT INDEX FOR EVALUATION OF CLIMATIC CONDITIONS IN WORKING ENVIRONMENTS 70

7.1. EXAMPLES OF EVALUATIONS OF CLIMATIC WORKING CONDITIONS IN MINING ENVIRONMENTS BASED ON THERMAL DISCOMFORT INDEX 70

7.2. THERMAL DISCOMFORT INDEX AS A PARAMETER FOR WORK TIME ESTIMATIONS IN MINING AND HOT BRANCHES OF INDUSTRY 72

BIBLIOGRAPHY 74

SUMMARY 78

LIST OF FIGURES AND NOMOGRAMS 85

Содержание

1. Введение – тезис и цель работы 13
2. Обмен тепла между человеком и окружающей средой – термическое равновесие человеческого организма 16
2.1. Метаболические тепло – расход энергии рабочего 16
2.2. Тепловой баланс человеческого организма 21
2.3. Основные способы теплового обмена между человеком и окружающей средой 23
2.3.1. Проводимость тепла через одежду 23
2.3.2. Конвекция тепла 25
2.3.3. Тепловое излучение 26
2.3.4. Испарение пота 30
2.3.5. Другие способы выделения тепла из человека 32
2.4. Тепловой комфорт – уравнение теплового комфорта FANGERA. . 33
2.5. Оценка теплового комфорта рабочих в климатических умеренных средах – показатели PMV и PPD 37
3. Показатели оценки микроклимата 39
3.1. Физические показатели 39
3.2. Физиологические показатели 45
3.3. Сравнение взаимной зависимости между некоторыми показателями микроклимата 47
4. Безразмерный (процентный) показатель теплового дискомфорта 50
5. Анализ влияния параметров среды на показатель теплового дискомфорта рабочего 54
5.1. Влияние температуры и влажности воздуха на показатель теплового дискомфорта 54
5.2. Влияние скорости движения воздуха на показатель теплового дискомфорта 55
5.3. Влияние средней температуры излучения окружающих стен на показатель теплового дискомфорта 56
5.4. Влияние энергетических затрат рабочего на показатель теплового дискомфорта 62
5.5. Влияние теплового сопротивления одежды на показатель теплового дискомфорта 63
5.6. Номограмма для определения показателя теплового дискомфорта рабочего работающего в горной среде 64

6. Время работы рабочего в условиях теплового дискомфорта 66
6.1. Время работы и время отдыха в течение рабочего дня 66
6.2. Время рабочего дня 67
6.3. Допустимое время экспозиции рабочего в горячей среде . . .69
7. Применение показателя теплового дискомфорта для оценки климатических условий в рабочих средах 70
7.1. Примеры оценки климатических условий работы в горных средах на основании показателя теплового дискомфорта . . 70
7.2. Показател теплового дискомфорта как параметр нормирования работы в горном деле и горячих отраслях промышленности 72

Литература 74
Резюме 78
Составление рисунков и номограм 85

ZESTAWIENIE OZNACZEŃ

A - pole powierzchni ..... [m^2]

A_{Du} - pole powierzchni ciała ludzkiego nie okrytego odzieżą [m^2]

A_{ef} - efektywne pole powierzchni ciała ludzkiego okrytego lub nie okrytego odzieżą ..... [m^2]

ATE - Amerykańska Tmperatura Efektywna ..... [$°C$]

BTE - Belgijska Temperatura Efektywna ..... [$°C$]

CET - Skorygowana Temperatura Efektywna ..... [$°C$]

E_{req} - ciepło parowania wymagane dla zapewnienia bilansu cieplnego na jednostkę powierzchni ciała ludzkiego [W / m^2]

f_{cl} - stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego .....

f_{ef} - współczynnik efektywnego pola powierzchni promieniowania .....

HSI - (Heat Stress Index) współczynnik obciążenia termicznego Beldinga-Hatcha

I_{cl} - opór cieplny odzieży ..... [clo]

K - ciepło konwekcji na jednostkę powierzchni ciała ludzkiego ..... [W / m^2]

L - ciepło zużyte na wykonanie pracy ..... [W]

M - przyrost metabolizmu przyjmowany w przybliżeniu jako wydatek energetyczny człowieka ..... [W / m^2]

$M_{śr}$ - średni przyrost metabolizmu przyjmowany w przybliżeniu jako średni wydatek energetyczny człowieka ..... [W / m^2]

$P4SR$ - wskaźnik obciążenia termicznego Mc Ardlego .....

PMV - Przewidywana Średnia Ocena (Predicted Mean Vote) ....

PPD - Przewidywany Odsetek Niezadowolonnych (Predicted Percentage of Dissatisfied) .....

p - ciśnienie atmosferyczne ..... [hPa]

p_0 - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu [Pa][$mmHg$]

p_{sk} - ciśnienie nasyconej pary wodnej w temperaturze skóry człowieka ..... [Pa][$mmHg$]

Q - ilość ciepła wewnętrznego wytwarzanego w organizmie (wydatek energetyczny) ..... [W]

Q_M - ciepło metaboliczne człowieka ..... [W]

Q_C - zmiana entalpii ciała ludzkiego ..... [W]

Q_k - wymiana ciepła przez konwekcję ..... [W]

Q_P - wymiana ciepła przez przewodzenie ..... [W]

Q_S - wymiana ciepła przez promieniowanie ..... [W]

Q_V - utrata ciepła przez parowanie potu ..... [W]

Q_{df} - utrata ciepła przez dyfuzyjne parowanie wody przez skórę ..... [W]

Q_{jw} - jawna utrata ciepła przez oddychanie ..... [W]

Q_{ut} - utajona utrata ciepła przez oddychanie ..... [W]

r - ciepło parowania wody ..... [J / kg]

S - ciepło promieniowania na jednostkę powierzchni ciała ludzkiego ..... [W / m^2]

t - temperatura ..... [°C]

t_{cl} - temperatura powierzchni odzieży ..... [°C]

T_{cl} - temperatura powierzchni odzieży ..... [°K]

t_g - temperatura poczernionej kuli ..... [°C]

$T_{p1}; T_{p2}, ..., T_{pn}$ - temperatury powierzchni ścian otoczenia .. [°C]

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

Tpr - średnia temperatura promieniowania otoczenia ..... [°K]

t_{nw} - temperatura wilgotna naturalna powietrza ..... [°C]

t_r - temperatura zastępcza francuska ..... [°C]

t_{re} - temperatura rektalna ..... [°C]

t_{sk} - średnia temperatura powierzchni skóry ciała ludzkiego ..... [°C]

t_s - temperatura sucha powietrza (suchy termometr psychrometru) ..... [°C]

t_w - temperatura wilgotna powietrza (wilgotny termometr psychrometru) ..... [°C]

t_{zk} - temperatura zastępcza komfortu cieplnego ..... [°C]

w - prędkość przepływu powietrza ..... [m / s]

$WBGT$ - wskaźnik WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) ..... [°C]

α_k - współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję ..... [W / m^2K]

β - współczynnik przenikania masy pary wodnej przez skórę ..... [$kg / (m^2 \cdot s \cdot N / m^2)$]

δ - wskaźnik dyskomfortu cieplnego .....

ε - względna zdolność emisji promieniowania cieplnego .....

η - współczynnik sprawności mechanicznej (sprawność ruchowa pracownika) ..... [%]

σ_0 - emisja ciała doskonale czarnego (stała Stefana-Boltzmanna) ..... $[W / m^2K^4]$

φ - wilgotność względna powietrza .....[%]

$\varphi_{p1}; \varphi_{p2}; ...; \varphi_{pn}$ - współczynniki kierunkowe promieniowania

1. WSTĘP - TEZA I CEL PRACY

Mikroklimat środowiska jest określany poprzez zespół parametrów fizycznych powietrza i otoczenia mających wpływ na samopoczucie przebywającego w nim człowieka. Do podstawowych parametrów fizycznych powietrza należą: temperatura, wilgotność i prędkość przepływu. Parametrem otoczenia, a więc powierzchni skał otaczających dane wyrobisko, jest średnia temperatura promieniowania otoczenia. Mikroklimat można podzielić na gorący, ciepły, umiarkowany, chłodny, zimny itp. w zależności od przedziałów wartości parametrów, które go określają . Każdy z wymienionych powyżej parametrów powietrza i otoczenia posiada istotny wpływ na klimat w środowisku pracy, dlatego dla prawidłowego jego oznaczenia należy analizować sumaryczny wpływ kilku lub wszystkich jego parametrów. Do tego celu służą wskaźniki mikroklimatu, których wyznaczono dotychczas bardzo wiele [4,10,26,30,35,42,46,48], a do najważniejszych z nich należą: temperatura efektywna amerykańska i belgijska, temperatura zastępcza francuska, wskaźnik WBGT, temperatura zastępcza komfortu wg Cuprum, wartość katastopni itp.

Szerszym pojęciem od mikroklimatu są tzw. klimatyczne warunki pracy panujące w danym środowisku. Mówimy o dobrych, złych, trudnych lub niebezpiecznych warunkach klimatycznych. W celu scharakteryzowania warunków klimatycznych w danym miejscu pracy lub przebywania ludzi należy oprócz mikroklimatu uwzględnić ważny parametr związany z samym organizmem człowieka, a mianowicie: wydatek energetyczny organizmu ludzkiego. Wydatek energetyczny pracownika zależy przede wszystkim od rodzaju i intensywności pracy i jest przedstawiany w formie liczbowej w [*kcal / h*] lub w [W / m^2] powierzchni ciała ludzkiego [4,5,8,10,20,26,30,46,48]. Do określenia klimatycznych warunków pracy ludzi służą wskaźniki obejmujące mikroklimat i wydatek energetyczny pracownika. Do najważniejszych z nich należą: wskaźnik obciążenia termicznego Beldinga i Hatcha (HSI), wskaźnik obciążenia termicznego organizmu wg Mc Ardlego (P4SR), wartości odniesienia wskaźnika WBGT.

Ważną grupę wskaźników stanowią parametry samego organizmu zwane wskaźnikami fizjologicznymi. Wskaźniki te określają stopień wydolności fizycznej oraz stan bezpieczeństwa cieplnego organizmu. Do wskaźników tych należą: temperatura wewnętrzna organizmu mierzona w odbytnicy, częstotliwość uderzeń serca, ilość wydzielanego potu w jednostce czasu, temperatura powierzchni skóry itp.

Warunki klimatyczne w środowisku o danym mikroklimacie będą odczuwane przez różnych ludzi w różny sposób, głównie ze względu na rodzaj czynności, jakie wykonują. Człowiek wykonujący ciężką pracę określi warunki klimatyczne danego środowiska jako trudne, człowiek odpoczywający przebywający w tym samym miejscu – jako przyjemne. Warunki klimatyczne panujące w tym samym środowisku, w którym istnieje stały, niezmienny mikroklimat, w odczuciu tych dwóch pracowników będą różne.

Warunki pracy to pojęcie jeszcze bardziej ogólne, uwzględniające warunki klimatyczne, a także takie właściwości środowiska, jak: skład atmosfery, zapylenie, hałas, wibracje itp.

Analizując wpływ wyżej wymienionych czynników na samopoczucie pracowników w danym środowisku, możemy wprowadzić pojęcia komfortu i dyskomfortu pracy, w ogólnym, szerokim znaczeniu, oraz komfortu cieplnego i dyskomfortu cieplnego pracy w odniesieniu do klimatycznych warunków pracy.

Człowiek powinien pracować w warunkach komfortu cieplnego, w których odczuwałby stan zadowolenia z parametrów cieplnych środowiska. Praca w warunkach dyskomfortu cieplnego jest dopuszczalna dzięki bardzo dużym możliwościom termoregulacyjnym organizmu ludzkiego. Istnieje jednak pewna granica dyskomfortu określona jako dyskomfort 100-procentowy, powyżej którego praca jest niebezpieczna dla zdrowia i powinna być zabroniona.

W niniejszej pracy, w celu określenia stanu dyskomfortu cieplnego odczuwanego przez pracownika w danym środowisku, wprowadzono wielkość zwaną wskaźnikiem dyskomfortu cieplnego pracownika "δ". Wskaźnik dyskomfortu cieplnego jest wielkością bezwymiarową lub procentową. Określa on, w jakim stopniu

klimatyczne warunki pracy w danym środowisku różnią się od warunków komfortowych oraz warunków dopuszczalnych pod względem bezpieczeństwa termicznego człowieka. Wskaźnik dyskomfortu cieplnego uwzględniający zarówno parametry mikroklimatu panującego w danym środowisku, jak również stan obciążenia energetycznego człowieka podczas pracy, czyli wydatek energetyczny, pozwala określić wpływ poszczególnych parametrów fizycznych powietrza i otoczenia na zmianę (poprawę lub pogorszenie) warunków klimatycznych danego środowiska, a tym samym na sposób wyboru metody poprawy warunków klimatycznych.

Celem niniejszej pracy jest więc ocena warunków klimatycznych w środowiskach kopalń oraz analiza skuteczności i efektów poprawy tych warunków na podstawie wskaźnika dyskomfortu cieplnego pracownika. W pracy podano również propozycję normowania czasu pracy w środowiskach gorących polegającą na określeniu czasu pracy oraz czasu przymusowego odpoczynku podczas dniówki roboczej, jak również ograniczenia czasu przebywania pracowników w danym środowisku, czyli skracania czasu roboczodniówki.

2. WYMIANA CIEPŁA POMIĘDZY CZŁOWIEKIEM A OTOCZENIEM - RÓWNOWAGA TERMICZNA ORGANIZMU LUDZKIEGO

2.1. CIEPŁO METABOLICZNE - WYDATEK ENERGETYCZNY PRACOWNIKA

Organizm człowieka, wskutek procesów przemiany materii, wytwarza ciepło zwane ciepłem metabolicznym. Wielkość wytworzonego ciepła metabolicznego w jednostce czasu nazywamy przyrostem metabolizmu "Q_M". Ciepło metaboliczne, zgodnie z I zasadą termodynamiki, zostaje przekształcone na pracę wykonywaną przez człowieka "L" oraz ciepło wewnątrzustrojowe "Q".

$$Q_M = Q + L \quad [W] \tag{2.1}$$

Q_M - ciepło metaboliczne człowieka,
Q - ciepło wewnętrzne (wydatek energetyczny),
L - ciepło zużyte na wykonanie pracy.

Energia cieplna zużytkowana na pracę mechaniczną L stanowi małą część całkowitego ciepła metabolizmu Q_M [4,10,20,26,42, 46,49]. Dla pracy bardzo ciężkiej dochodzi maksymalnie do 20%, natomiast w stanie wypoczynku lub lekkiej pracy przyjmuje się ją równą zeru. Stosunek ciepła zużytego na pracę mechaniczną do ciepła metabolizmu nazywa się sprawnością ruchową pracownika [10]

$$\eta = \frac{L}{Q_M} \tag{2.2}$$

η - sprawność ruchowa pracownika, czyli współczynnik sprawności mechanicznej w [%].

Ciepło wewnętrzne organizmu zwane również wydatkiem energetycznym równa się więc :

$$Q = Q_M(1 - \eta) \quad [W] \tag{2.3}$$

Bardzo często przyrost metabolizmu człowieka lub wydatek energetyczny wyraża się w stosunku do powierzchni ciała ludzkiego, czyli

$$\frac{Q}{A_{Du}} = \frac{Q_M}{A_{Du}}(1 - \eta) \quad [W/m^2] \tag{2.4}$$

gdzie: A_{Du} - pole powierzchni ciała ludzkiego.

Pole powierzchni ciała ludzkiego można obliczyć opierając się na wzorze empirycznym Du Boisa [4] w zależności od wzrostu i masy ciała. Można również bez popełnienia większego błędu przyjąć stałą wartość powierzchni ciała dorosłego mężczyzny, która wynosi 1,8m^2.

Wielkość wytwarzanego ciepła metabolicznego, a tym samym i wielkość wydatku energetycznego, zależy od rodzaju i intensywności pracy. Rozróżnia się pojęcie tzw. podstawowej wielkości przemiany materii przyjmowanej dla człowieka podczas snu, równej 40W/m^2. Wydatek energetyczny pracownika wykonującego krótkotrwałą bardzo ciężką pracę lub sportowca biorącego udział w zawodach może być 10-krotnie większy.

W literaturze [4,10,26,46,48] podane są tabele wydatków energetycznych pracowników wykonujących konkretne czynności lub wydatki energetyczne związane z różnymi zawodami, miejscami pracy, będące wartościami średnimi w ciągu dniówki roboczej. Tabela 1 przedstawia wydatki energetyczne górników opracowane na podstawie badań ZOZ GIG w Katowicach dla różnych prac górniczych w przodku [11,33]. Wydatki energetyczne według ZOZ GIG podane są w $[kcal/min]$ i wyznaczone dla czynności krótkotrwałych, dlatego dokonano przeliczenia tych jednostek na $[W/m^2]$.

W tabeli 2 podane są wydatki energetyczne całkowite dla poszczególnych stanowisk pracy w kopalni wyznaczone w ciągu 7,5-godzinnej zmiany roboczej wg Instytutu Medycyny Pracy w Sosnowcu oraz ZOZ GIG w Katowicach. Wartości te również zostały podane w $[W/m^2]$. Z danych tych wynika, że zakres wydatków energetycznych wyznaczonych dla poszczególnych czynności górnika wynosi: 85÷255 W/m^2, natomiast dla poszczególnych stanowisk pracy wyznaczonych w czasie 7,5-godzinnej zmiany roboczej: 120÷240 W/m^2.

Tabela 1

(Kobza, Wieprzycki, Brzyska - ZOZ GIG Katowice)
Wydatek energetyczny górników zatrudnionych w kopalniach węgla kamiennego

	Czynności	Wartości skrajne (kcal/min) brutto	Wartości średnie (kcal/min) brutto	Wartości średnie (W/m^2) brutto
1.	Obsługa kombajnu	3,4 - 4,4	3,9	150
2.	Konserwacja kombajnu	2,2 - 2,8	2,7	104
3.	Wykonywanie pasów podsadzki	6,0 - 6,3	6,2	240
4.	Wiercenie i strzelanie wnęk	5,1 - 5,8	5,4	209
5.	Czyszczenie trasy za kombajnem	5,2 - 5,5	5,3	205
6.	Przekładka podnośnika	1,9 - 3,0	2,8	108
7.	Przesuwanie obudowy mechanicznej	2,0 - 2,4	2,2	85
8.	Urabianie wnęk	5,2 - 6,9	6,6	255
9.	Droga dojścia i powrót	3,0 - 4,4	3,5	135

Tabela 2

(Spioch, Nowara - Instytut Medycyny Pracy Sosnowiec)
Wydatek kaloryczny na niektórych stanowiskach pracy w górnictwie węgla kamiennego w ciągu 7,5-godzinnej zmiany roboczej

	Czynności	Wydatek całkowity (kcal/7,5 godz)	Wydatek całkowity (W/m^2)
1.	Ładowacz na ścianie	2790	240
2.	Rurarz	2400	206
3.	Ładowacz na chodniku	2350	202
4.	Górnik strzałowy w chodniku	2250	193
5.	Pracownik brygady transportu	2070	178
6.	Wiertacz	1990	171
7.	Tamiarz	1890	162
8.	Górnik strzałowy na ścianie	1980	170
9.	Rabunkarz	1770	152
10.	Pomocnik kombajnisty	1630	140
11.	Kombajnista	1400	120
12.	Kombajnista	1710	150*
13.	Górnik brygady kombajnowej	2159	185*

* - dane według badań ZOZ GIG Katowice

W zależności od wielkości wydatku energetycznego dokonuje się klasyfikacji pracy na lekką, umiarkowaną, ciężką. Klasyfikacja taka została przedstawiona w tabeli 3 na podstawie normy PN-85/N-08011. Analizując wielkości wydatków energetycznych, które niewiele różnią się od całkowitego przyrostu metabolizmu w jednostce czasu, można wyciągnąć wniosek, że w kopalniach w przodkach zmechanizowanych praca górników jest umiarkowana (umiarkowany przyrost metabolizmu), w przodkach niezmechanizowanych jest pracą ciężką (duży przyrost mtabolizmu). Średnie przyrosty metabolizmu przyjęte w dalszej analizie wynoszą dla pracy umiarkowanej $\frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$, dla pracy ciężkiej $\frac{Q_M}{A_{Du}} = 230\ W/m^2$. Lehmann [24,11] dla pracy średniej i ciężkiej całego ciała przyjmuje nieco wyższe wartości, a mianowicie 193 W/m^2 i 253 W/m^2. Fanger natomiast [10], nie precyzując stopni ciężkości pracy, określa stopnie wydatku energetycznego przyjmując wielkość 116 W/m^2 jako średni wydatek energetyczny oraz 175 W/m^2 jako duży wydatek energetyczny. Porównując jednak te wielkości z wydatkami energetycznymi w tabelach 1 i 2 dla poszczególnych czynności, należy uznać wydatek energetyczny równy 116 W/m^2 za odpowiadający pracy lekkiej, a wydatek 175 W/m^2 - pracy umiarkowanej.

Szerokie przedziały wartości przyrostu metabolizmu, jakie odpowiadają pracy lekkiej, umiarkowanej i ciężkiej wg tabeli 3, pozwalają pominąć stosunkowo mały wpływ sprawności ruchowej organizmu, a tym samym pozwalają przyrównać pojęcie przyrostu metabolizmu z wydatkiem energetycznym człowieka.

Tabela 3

Klasyfikacja poziomów metabolizmu (wydatków energetycznych) wg PN-85/N-08011

Klasa	Zakres przyrostu metabolizmu i wydatku energetycznego w odniesieniu do jednostki powierzchni skóry M [W/m²]	Wartość średnia przyrostu metabolizmu (wydatku energetycznego) $M_{śr}$ [W/m²]	Przykłady
Wypoczynek	M < 65	65	Wypoczynek
Praca lekka	65 < M < 130	100	Praca siedząca - lekka praca ręczna Pozycja stojąca - frezowanie, skręcanie drobnej armatury, chodzenie z prędkością 3,5 km/h
Praca umiarkowana	130 < M < 200	165	Praca wykonywana dłońmi i rękami z napięciem mięśni : - manewrowanie ciężarówką, - łączenie pojazdów, tynkowanie, manipulowanie materiałami o średnim ciężarze, popychanie i ciągnienie lekkich wózków, chodzenie z prędkością od 3,5 do 5,5 km/h
Praca ciężka	200 < M < 260	230	Intensywna praca rąk i korpusu - transportowanie ciężkich materiałów, struganie, piłowanie, kopanie, szuflowanie, chodzenie z prędkością od 5,5 do 7,0 km/h
Praca bardzo ciężka	M > 260	290	Bardzo intensywna praca wykonywana w tempie bliskim maksymalnemu

2.2. BILANS CIEPLNY ORGANIZMU LUDZKIEGO

Człowiek należy do istot stałocieplnych, tj. utrzymujących stałą temperaturę ustroju, co powoduje, że każdy nadmiar wytworzonego w organizmie ciepła jest z niego wydalany dzięki mechanizmowi termoregulacji. Wytwarzane na skutek procesów metabolicznych ciepło wewnętrzne organizmu musi być z niego wydalane, aby utrzymać stałą temperaturę rektalną (wewnętrzną). Na sposób i wielkość wydzielania ciepła z organizmu do otoczenia poważny wpływ ma klimat środowiska, co wiąże się również z samopoczuciem człowieka, a więc komfortem i dyskomfortem pracy.

Podstawowymi drogami wymiany ciepła między organizmem a otoczeniem są :

- konwekcja,
- promieniowanie,
- parowanie potu.

Dwie pierwsze z nich nazywamy pasywnymi sposobami wydzielania ciepła z organizmu do otoczenia. Parowanie potu natomiast jest sposobem aktywnym będącym reakcją samoobrony organizmu w celu wydzielenia nadmiaru ciepła do otoczenia.

Istnieją jeszcze inne mniej znaczące sposoby wydzielania ciepła z organizmu, a mianowicie:

- dyfuzja pary wodnej przez skórę,
- jawne ciepło oddychania,
- utajone ciepło oddychania.

Wymienione wyżej sposoby należą do aktywnych metod wydzielania ciepła z organizmu ludzkiego.

Bilans cieplny organizmu ludzkiego można więc napisać w postaci następującego równania :

$$Q_c = Q \pm Q_k \pm Q_s \pm Q_p - Q_v - Q_{df} - Q_{jw} - Q_{ut} \qquad (2.5)$$

Znak + oznacza zysk ciepła, znak – utratę ciepła przez organizm w zależności od parametrów mikroklimatu. Przy zrównoważonym bilansie cieplnym wartość $Q_c = 0$. Przy zmianie entalpii ciała ludzkiego, gdy następuje akumulacja ciepła, wartość Q_c jest

dodatnia, gdy następuje zmniejszenie ciepła w organizmie, wartość Q_c jest ujemna.

Q_c - zmiana entalpii ciała ludzkiego,

Q - ilość ciepła wytwarzanego w organizmie zależna od wydatku energetycznego jako różnica między całkowitym ciepłem metabolicznym Q_M a ciepłem zużytym na pracę mechaniczną,

Q_k - wymiana ciepła przez konwekcję,

Q_s - wymiana ciepła przez promieniowanie,

Q_p - wymiana ciepła przez przewodzenie,

Q_v - utrata ciepła przez parowanie potu,

Q_{df} - utrata ciepła przez dyfuzyjne parowanie wody przez skórę,

Q_{jw} - jawna utrata ciepła przez oddychanie,

Q_{ut} - utajona utrata ciepła przez oddychanie.

Układ termoregulacyjny człowieka umożliwia utrzymanie bilansu cieplnego organizmu w dość szerokich granicach parametrów mikroklimatu. W środowiskach gorących następuje intensywne pocenie, przyspieszenie oddechów, tętna, rozszerzenie naczyń skórnych i wzrost przepływu krwi, co powoduje podwyższenie temperatury powierzchni skóry. W środowiskach chłodnych lub zimnych, gdy utrata ciepła powoduje obniżenie średniej temperatury ciała i podrażnienie receptorów zimna, następuje skurcz naczyń skórnych i zmniejszenie przepływu krwi, wzrost napięcia mięśni (termogeneza bezdrżeniowa), z kolei drżenie mięśni (termogeneza drżeniowa). W warunkach dyskomfortu cieplnego zwiększa się wydatek energetyczny pracowników w porównaniu z warunkami komfortu, wykonujących taką samą pracę.

2.3. PODSTAWOWE SPOSOBY WYMIANY CIEPŁA MIĘDZY CZŁOWIEKIEM A OTOCZENIEM

2.3.1. Przewodzenie ciepła przez odzież

Przewodzenie ciepła u człowieka występuje pomiędzy ciałem ludzkim a przylegającą do niego odzieżą. Jest więc transportem ciepła wewnętrznego przez odzież do jej powierzchni, z której następnie jest ono oddawane do powietrza lub otoczenia. Odzież posiadająca właściwości izolacyjne zmniejsza prędkość oddawania ciepła od człowieka do otoczenia w środowiskach chłodnych. W środowiskach gorących, gdy robotnicy pracują bez odzieży, przewodzenie ciepła nie występuje.

W analizie przewodzenia ciepła przez odzież wprowadzono wielkość zwaną oporem cieplnym odzieży I_{cl} [4,10,11,26,46]. Wielkość tę określającą opór przepływu ciepła przez warstwy odzieży pomiędzy powierzchnią ciała ludzkiego a zewnętrzną powierzchnią odzieży podaje się w jednostkach "*clo*" , gdzie 1 *clo* = 0,155 m^2K/W.

W tabeli 4 podano opory cieplne niektórych zestawów odzieży wg Fangera [10].

Przenikanie ciepła ze skóry do zewnętrznej powierzchni odzieży okrywającej ciało można wyrazić następującym wzorem [10]

$$Q_p = A_{Du} \cdot \frac{t_{sk} - t_{cl}}{0{,}18\, I_{cl}} \qquad \left[\frac{kcal}{h}\right] \tag{2.6}$$

$$Q_p = A_{Du} \cdot \frac{t_{sk} - t_{cl}}{0{,}155\, I_{cl}} \qquad [W] \tag{2.7}$$

gdzie: A_{Du} - powierzchnia ciała ludzkiego przyjmowana 1,8 m^2 ,

t_{sk} - temperatura powierzchni skóry [°C] ,

t_{cl} - temperatura powierzchni odzieży [°C] ,

I_{cl} - opór cieplny odzieży [clo].

Tabela 4

Oporność cieplna różnych zestawów odzieży wg Fangera [10]

		I_{cl} [clo]	f_{cl} *
1.	Bez odzieży	0	1,0
2.	Szorty	0,1	1,0
3.	Szorty, koszula z krótkimi rękawami, skarpetki	0,35	1,05
4.	Lekkie ubranie letnie : długie spodnie, koszula z krótkimi rękawami	0,5	1,1
5.	Lekka odzież robocza : szorty, bawełniana koszulka, spodnie robocze, koszula	0,6	1,1
6.	Typowy ubiór roboczy	1,0	1,15
7.	Typowy ubiór roboczy + + płaszcz bawełniany	1,5	1,15
8.	Ciężki tradycyjny europejski ubiór roboczy	1,5	1,15 -1,2
9.	Ubranie polarne	3 - 4	1,3 - 1,5

f_{cl} * - stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego. Współczynnik ten nie ma zastosowania przy przewodzeniu ciepła, należy go uwzględniać przy konwekcji i promieniowaniu.

Wartości oporu cieplnego odzieży I_{cl} wyznaczone są dla odzieży suchej. Zwilżenie odzieży na skutek wydzielania potu przez człowieka spowoduje wzrost przenikania ciepła przez odzież, a więc zmniejszenie się oporu cieplnego I_{cl}. Na zmianę wartości I_{cl} wpływa również prędkość powietrza. Przy większej prędkości powietrza przepływa ono przez materiał odzieżowy powodując zwiększone straty ciepła. Zmiana wartości oporności cieplnej I_{cl} pod wpływem prędkości powietrza jest pozorna i spowodowana konwekcją wymuszoną.

2.3.2. Konwekcja ciepła

Konwekcja albo unoszenie jest jednym z głównych sposobów wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem. Polega ona na przepływie ciepła z powierzchni ciała ludzkiego lub powierzchni odzieży do powietrza.

Rozróżniamy konwekcję naturalną oraz wymuszoną. Konwekcja naturalna polega na tym, że ruch cząsteczek płynu (gazu) występuje pod wpływem sił grawitacyjnych oddziałujących na poszczególne cząsteczki, które ulegając ogrzaniu lub ochłodzeniu zmieniają swoją gęstość. Konwekcja wymuszona występuje wtedy, gdy cząsteczki płynu, pary lub gazu poruszają się pod wpływem pewnego źródła ruchu, na przykład pompy, wentylatora, strumienicy itp.

Wymiana ciepła przez konwekcję zachodzi wtedy, gdy istnieje różnica temperatur pomiędzy powierzchnią ciała ludzkiego a powietrzem. Człowiek może oddawać ciepło do powietrza przez konwekcję, gdy temperatura powierzchni jego ciała, lub powierzchni jego odzieży, jest wyższa od temperatury powietrza, lub przyjmować ciepło, gdy temperatura powietrza jest wyższa od temperatury ciała ludzkiego.

Ogólny wzór na wymianę ciepła przez konwekcję pomiędzy dwoma ciałami fizycznymi, ciałem stałym i powietrzem ma postać

$$Q_k = \alpha_k \cdot A(t_1 - t_2) \ , \qquad (2.8)$$

gdzie: Q_k - ilość energii cieplnej w jednostce czasu (moc cieplna) wymienianej przez konwekcję,

α_k - współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję,

A - powierzchnia ciała wymieniającego ciepło z powietrzem,

$t_1 - t_2$ - różnica temperatur pomiędzy powierzchnią ciała stałego a powietrzem.

Współczynnik α_k zależy od rodzaju i chropowatości powierzchni wymieniającej ciepło z powietrzem, a także od charakteru samej konwekcji, to znaczy, czy jest to konwekcja naturalna czy wymuszona.

Fanger [10] dla wymiany ciepła pomiędzy ciałem ludzkim a powietrzem podaje następujące zależności :

$$Q_k = A_{Du} \cdot f_{cl} \cdot \alpha_k \cdot (t_{sk} - t_s) \qquad (2.9)$$

gdzie: f_{cl} - stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego (tabela 4),

t_{sk} - temperatura powierzchni skóry lub odzieży (wartość średnia),

t_s - temperatura powietrza (termometr suchy).

Współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję α_k określono wzorami

- dla konwekcji swobodnej

$$\alpha_k = 2,39\ (t_{sk} - t_s)^{0,25} \quad \left[W / m^2K\right] \qquad (2.10)$$

- dla konwekcji wymuszonej

$$\alpha_k = 12,1\sqrt{w} \quad \left[W / m^2K\right] \qquad (2.11)$$

gdzie: w - prędkość powietrza w $\left[m / s\right]$.

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

$$\alpha_k = 2,39\ (t_{sk} - t_s)^{0,25} \quad \text{dla} \quad 2,39\ (t_{sk} - t_s)^{0,25} > 12,1\sqrt{w}$$

oraz

$$\alpha_k = 12,1\sqrt{w} \quad \text{dla} \quad 2,39\ (t_{sk} - t_s)^{0,25} < 12,1\sqrt{w} \qquad (2.12)$$

2.3.3. Promieniowanie cieplne

Promieniowanie cieplne zwane również promieniowaniem podczerwonym jest to wymiana ciepła pomiędzy dwoma ciałami w postaci fal elektromagnetycznych. Fale energii cieplnej promieniowania podczerwonego mogą być emitowane, pochłaniane lub odbijane przez dane ciało. Zdolność do emisji, pochłaniania lub odbijania promieniowania cieplnego mają ciała stałe, ciecze i gazy wieloatomowe, w tym również para wodna. Gazy dwuatomowe

znajdujące się w powietrzu, jak tlen, azot i gazy szlachetne całkowicie przepuszczają promieniowanie cieplne.

Każde ciało stałe, ciecz lub gaz wieloatomowy emituje ze swojej powierzchni promieniowanie podczerwone, jeżeli jego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego. Zdolność do emisji promieniowania cieplnego jest ściśle związana ze zdolnością do jego pochłaniania. Powierzchnie czarne (w sensie radiacyjnym) posiadają dużą zdolność do emisji i pochłaniania energii cieplnej przez promieniowanie. Powierzchnie błyszczące, polerowane posiadają małą zdolność do emisji i pochłaniania promieniowania cieplnego, natomiast dużą zdolność odbijania tego promieniowania.

Wymianę ciepła pomiędzy dwoma powierzchniami ciał drogą promieniowania określa równanie Stefana-Boltzmanna:

$$Q_s = \varepsilon \cdot \sigma_0 \, A_{ef} (T_{cl}^4 - T_{pr}^4) \qquad (2.13)$$

gdzie: ε - względna zdolność emisji promieniowania ciała ludzkiego okrytego odzieżą lub nie okrytego,

σ_0 - emisja ciała doskonale czarnego (stała Stefana-Boltzmanna) równa $5,67 \cdot 10^{-8} \left[W / m^2 K^4 \right]$,

$T_{pr} = t_{pr} + 273$ - średnia temperatura promieniowania otoczenia,

$T_{cl} = t_{cl} + 273$ - temperatura powierzchni odzieży lub ciała ludzkiego nie okrytego odzieżą,

A_{ef} - efektywne pole powierzchni ciała ludzkiego okrytego lub nie okrytego odzieżą.

Zdolność emisji promieniowania "ε", zwana również współczynnikiem emisyjności, dla ciała ludzkiego i odzieży jest stosunkowo duża. Przyjmuje wartości od $0,95 \div 1$. Zaleca się więc brać wartość średnią $\varepsilon = 0,97$.

Efektywne pole powierzchni ciała ludzkiego "A_{ef}" jest to ta część powierzchni, która wymienia ciepło na drodze promieniowania bezpośrednio z otoczeniem. Jest ona mniejsza od całkowitej powierzchni ciała ludzkiego okrytego lub nie okrytego odzieżą ze względu na nierównomierności powierzchni danego ciała. "A_{ef}" określa się wzorem [10] :

$$A_{ef} = f_{ef} \cdot f_{cl} \cdot A_{Du}, \qquad (2.14)$$

gdzie: f_{ef} - współczynnik efektywnego pola powierzchni promieniowania. Jest to stosunek efektywnego pola powierzchni ciała ludzkiego, które jest okryte odzieżą do całkowitego pola powierzchni ciała nie okrytego odzieżą. Współczynnik ten wyznaczony na podstawie pomiarów [10] przyjmuje się jako równy 0,71.

f_{cl} - stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego - tabela 4.

A_{Du} - pole powierzchni ciała nie okrytego odzieżą (powierzchnia Du Bois).

Podstwiając wartości znane $\varepsilon, \sigma_0, A_{ef}$ do równania 2.13 otrzymujemy:

$$Q_s = 3{,}96 \cdot 10^{-8} A_{Du} f_{cl} \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{pr} + 273)^4 \right] \ [W] \qquad (2.15)$$

Ważnym parametrem we wzorach 2.13 i 2.15 jest średnia temperatura promieniowania otoczenia t_{pr}. Średnią temperaturę promieniowania należy odnosić do dowolnego ciała znajdującego się w wyrobisku (kuli, płaszczyzny, człowieka). Ponieważ rozpatrujemy człowieka w środowisku górniczym, średnią temperaturę promieniowania będziemy określać w stosunku do człowieka stojącego lub siedzącego w przodku eksploatacyjnym. Według definicji [3,6,10,31] średnią temperaturą promieniowania dla człowieka znajdującego się w określonej pozycji w danym punkcie pomieszczenia nazywamy jednorodną temperaturę otoczenia o czarnych powierzchniach, które powodowałyby straty ciepła przez promieniowanie równe stratom występującym w danym środowisku.

Średnią temperaturę promieniowania otoczenia danego pomieszczenia, w którym przebywa człowiek w określonej stałej pozycji, stojącej lub siedzącej, można obliczyć znając temperatury otaczających ścian i tak zwane współczynniki kierunkowe promieniowania φ_p według wzoru :

$$T_{pr}^4 = \varphi_{p1} T_{p1}^4 + \varphi_{p2} T_{p2}^4 + \cdots + \varphi_{pn} T_{pn}^4, \qquad (2.16)$$

gdzie : $T_{p1}; T_{p2}; \cdots T_{pn}$ - temperatury powierzchni ścian otoczenia,

$\varphi_{p1}; \varphi_{p2}; \cdots \varphi_{pn}$ - współczynniki kierunkowe promieniowania pomiędzy człowiekiem a ścianami otoczenia.

Suma współczynników kierunkowych promieniowania w zamkniętym otoczeniu jest równa jedności

$$\varphi_{p1} + \varphi_{p2} + \cdots + \varphi_{pn} = 1 \qquad (2.17)$$

Przyjmując założenie, że temperatury ścian otoczenia są sobie równe, możemy równanie 2.16 znacznie uprościć. Wyłączając w równaniu 2.16 temperaturę powierzchni ścian przed nawias, otrzymujemy

$$T_{pr}^4 = T_{pn}^4 (\varphi_{p1} + \varphi_{p2} + \cdots + \varphi_{pn}) \qquad (2.18)$$

gdzie : $T_{pn} = T_{p1} = T_{p2} = \cdots = T_{pn}$

Z równania 2.17 otrzymujemy:

$$T_{pr}^4 = T_{pn}^4 \qquad (2.19)$$

lub

$$T_{pr} = T_{pn} \qquad (2.20)$$

Jeżeli temperatury ścian otoczenia są sobie równe, to średnia temperatura promieniowania otoczenia w odniesieniu do człowieka jest równa temperaturze ścian. W tym przypadku średnia temperatura promieniowania otoczenia nie zależy od pozycji, jaką zajmuje człowiek ani od jego usytuowania w danym środowisku.

Wartości współczynników promieniowania otoczenia w odniesieniu do przebywającego w nim człowieka podane są w szerokiej literaturze [6,10,19,22,28,31,50]. Pozwalają one na wyznaczenie średniej temperatury promieniowania otoczenia, w przypadku gdy temperatury otaczających ścian nie są równe, lub gdy istnieje

jakieś źródło promieniowania lub pochłaniania promieniowania cieplnego o wysokiej i niskiej temperaturze.

W przodkach górniczych, zarówno korytarzowych jak i ścianowych, temperatury powierzchni ścian ociesów, spągu lub stropu nie różnią się zbytnio między sobą i są zbliżone (nieco wyższe) do temperatury powietrza. Wyjątkami mogą być niektóre powierzchnie urządzeń elektrycznych pracujących w kopalni, jak kombajny lub napędy przenośników oraz środowiska w pobliżu czynnych pól pożarowych, na przykład podwyższone temperatury ociosów lub powierzchni tamy pożarowej.

Na podstawie własnych obserwacji wykonanych w przodkach kopalń głębokich (Zabrze-Bielszowice, Pokój, Rudna), pomimo wysokiej temperatury pierwotnej górotworu powyżej 40°, temperatury powierzchni ociosów w przodkach, spągu i stropu mierzone pirometrem różniły się nie więcej niż o 1° pomiędzy sobą oraz nie więcej niż o 2° od temperatury powietrza mierzonej termometrem suchym. Temperatura w tych przodkach mierzona termometrem kulowym Vermona, który uwzględnia promieniowanie cieplne otoczenia, nie różniła się od temperatury powietrza mierzonej termometrem suchym. Z obserwacji tych można wyciągnąć wniosek, że temperatury powierzchni ociosów wyrobiska lub urobku w przodku oraz temperatura powietrza wyrównują się bardzo szybko wskutek wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie z innymi powierzchniami. Temu zjawisku obniżania się temperatur nowo odkrywanych powierzchni wyrobiska sprzyja również zraszanie kombajnowe zrówno na ścianie, jak i w chodniku.

Reasumując, można więc przyjąć założenie, że średnia temperatura promieniowania otoczenia w przodkach górniczych jest równa temperaturze powietrza.

2.3.4. Parowanie potu

Bardzo ważnym sposobem wydzielania nadmiaru ciepła z organizmu jest parowanie potu. Pocenie się człowieka, według poglądów wielu badaczy [4,10,11,26,22,34,51], jest objawem dyskomfortu cieplnego. W warunkach komfortu człowiek nie

powinien się pocić, czyli pot nie powinien być widoczny na skórze. Para wodna może wydzielać się z organizmu przez skórę jedynie dzięki tzw. zjawisku dyfuzji (rozdział 2.3.5).

W trudnych warunkach klimatycznych występujących w środowisku, gdy wymiana ciepła między człowiekiem a otoczeniem poprzez konwekcję i promieniowanie jest utrudniona, parowanie potu stanowi dla organizmu jedyny sposób pozbycia się ciepła metabolizmu, a tym samym nie dopuszczenia do przegrzania organizmu. W procesie parowania potu istotną rolę odgrywa wilgotność powietrza. Właśnie w środowiskach gorących wpływ wilgotności powietrza na intensywność chłodzenia organizmu jest bardzo duży, podczas gdy w warunkach komfortu jest nieistotny ([10] oraz rys. 1,2,3). Pot wydzielający się z organizmu może ulegać parowaniu wtedy, kiedy istnieje różnica pomiędzy prężnością pary wodnej nasyconej dla temperatury powierzchni ciała ludzkiego a prężnością pary wodnej występującej w powietrzu w danym środowisku. W skrajnym przypadku, gdy prężność pary wodnej w powietrzu jest równa prężności pary wodnej nasyconej w temperaturze równej temperaturze skóry ciała ludzkiego, wymiana ciepła przez parowanie potu ustaje. Przypadek taki wystąpi, gdy temperatura powietrza jest równa temperaturze powierzchni ciała ludzkiego oraz wilgotność względna jest równa 100%. Jeżeli więc temperatura powietrza jest mniejsza od temperatury ciała ludzkiego, to chociażby wilgotność powietrza "φ" wynosiła 100%, parowanie potu istnieje, gdyż bezpośrednio przylegająca do ciała ludzkiego warstwa powietrza (warstwa przyścienna) podnosząc swą temperaturę zmniejsza swą wilgotność względną i tym samym uzyskuje możliwość przyjęcia pary wodnej z powierzchni ciała ludzkiego.

W warunkach komfortu cieplnego wydzielanie potu przez organizm jest umiarkowane i zależy od wydatku energetycznego człowieka. Zakłada się, że [10] podczas odpoczynku człowiek nie wydziela potu, natomiast podczas pracy wydzielona ilość potu zostaje całkowicie odparowana do powietrza.

Na podstawie badań empirycznych Fanger stwierdził, że ilość ciepła wydzielonego z organizmu człowieka przez parowanie potu w warunkach komfortu wynosi

$$Q_v = 0,42\ A_{Du}\left(\frac{Q}{A_{Du}} - 58,15\right)\ \left[W\right], \qquad (2.21)$$

gdzie : $\frac{Q}{A_{Du}}$ - wydatek energetyczny pracującego człowieka,

A_{Du} - powierzchnia ciała ludzkiego.

Równanie 2.21 jest jednym z warunków komfortu cieplnego.

2.3.5. Inne sposoby wydzielania ciepła z organizmu człowieka

Dodatkowymi oraz mniej istotnymi sposobami wydzielania ciepła z organizmu człowieka do otocznia są:

- dyfuzja pary wodnej przez skórę,
- jawne ciepło oddychania,
- utajone ciepło oddychania.

Wielkość dyfuzji pary wodnej przez skórę nie podlega kontroli układu termoregulacji organizmu. Występuje ona, gdy istnieje różnica pomiędzy ciśnieniem nasyconej pary wodnej w temperaturze skóry i ciśnieniem cząstkowym pary wodnej w otaczającym powietrzu.

Równanie opisujące straty ciepła wskutek dyfuzji pary wodnej przez skórę ma następującą postać:

$$Q_{df} = r\,\beta\,A_{Du}(p_{sk} - p_0), \qquad (2.22)$$

gdzie : Q_{df} - straty ciepła wskutek dyfuzji pary wodnej przez skórę [W],

r - ciepło parowania wody [J/kg],

β - współczynnik przenikania masy pary wodnej przez skórę $[kg/(m^2 \cdot s \cdot N/m^2)]$,

p_{sk} - ciśnienie nasyconej pary wodnej przy temperaturze skóry [Pa],

p_0 - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w otaczającym powietrzu [Pa].

Do obliczania wielkości Q_{df} w warunkach komfortu cieplnego Fanger [10] proponuje empiryczny wzór:

$$Q_{df} = 3,05 \cdot 10^{-3}\ A_{Du}(256\ t_{sk} - 3360 - p_0) \qquad (2.23)$$

Jawne i utajone ciepło oddychania związane jest z konwekcją i odparowaniem wody w warstwie śluzowej pokrywającej drogi oddechowe. Jawne ciepło oddychania wydzielane jest na skutek

tego, że temperatura powietrza wydychanego jest wyższa od temperatury powietrza wdychanego. Utajone ciepło oddychania związane jest ze wzrostem zawartości pary wodnej w powietrzu wydychanym w stosunku do powietrza wdychanego, który to wzrost nastąpił wskutek odebrania ciepła na drogach oddechowych z organizmu. Empiryczne równania określające wielkość jawnego i utajonego ciepła oddychania w warunkach komfortu cieplnego mająpostać [10]:

$$Q_{jw} = 0{,}0014\ Q_M(34 - t_s) \quad [W] \qquad (2.24)$$

$$Q_{ut} = 17 \cdot 10^{-6}\ Q_M(5867 - p_0) \quad [W] \qquad (2.25)$$

gdzie :

Q_{jw} - jawne ciepło oddychania,

Q_{ut} - utajone ciepło oddychania,

Q_M - ciepło metaboliczne organizmu,

t_s - temperatura powietrza,

p_0 - prężność pary wodnej w powietrzu.

2.4. KOMFORT CIEPLNY - RÓWNANIE KOMFORTU CIEPLNEGO FANGERA

Komfort cieplny to stan zadowolenia człowieka z warunków cieplnych otoczenia. Praca w warunkach komfortu cieplnego jest najbardziej wydajna i bezpieczna pod względem obciążenia termicznego organizmu. Na stan komfortu cieplnego wpływają wszystkie podstawowe parametry fizyczne środowiska pracy, czyli powietrza i otoczenia, oporność cieplna odzieży oraz wydatek energetyczny pracownika zależny od rodzaju i intensywności pracy.

Fanger na podstawie badań własnych oraz korzystając z obszernej literatury [10] wyznaczył równanie komfortu cieplnego i na jego podstawie sporządził wykresy komfortu cieplnego, które znalazły szerokie zastosowanie w praktyce.

Punktem wyjścia do wyznaczenia równania komfortu cieplnego przez Fangera było określenie trzech podstawowych warunków

komfortu cieplnego. Pierwszym koniecznym warunkiem dla odczuwania komfortu cieplnego przez człowieka poddanego w ciągu długiego czasu oddziaływaniu danego mikroklimatu jest uzyskanie stanu równowagi cieplnej organizmu, czyli spełnienie równania bilansu cieplnego organizmu 2.5. Jest to oczywiście warunek niewystarczający. Wewnątrzustrojowy system termoregulacji organizmu ludzkiego jest dość skuteczny i zapewnia uzyskanie stanu równowagi cieplnej w szerokim zakresie wartości zmiennych parametrów środowiska. W związku z tym Fanger wprowadził dwa dodatkowe warunki komfortu cieplnego. Warunkami tymi są parametry fizjologiczne, a mianowicie zmienność temperatury skóry oraz utrata ciepła przez parowanie potu na skórze.

Temperatura skóry człowieka przebywającego w warunkach komfortu cieplnego jest funkcją wydatku energetycznego. Temperaturę tę oblicza się wg równania:

$$t_{sk} = 35,7 - 0,028\frac{Q}{A_{Du}} \qquad (2.26)$$

Z powyższego równania wynika, że w warunkach komfortu cieplnego w miarę wzrostu wydatku energetycznego pracownika temperatura skóry obniża się.

Ciepło wyparowanego potu przez człowieka pracującego w komfortowych warunkach klimatycznych również zależy od wydatku energetycznego wg równania 2.21. (podanego w rozdziale 2.3.4)

$$Q_V = 0,42\ A_{Du}(\frac{Q}{A_{Du}} - 58,15)\ [W] \qquad (2.21)$$

Podstawiając do równania bilansu cieplnego organizmu ludzkiego 2.5 znane zależności wszystkich jego składników, czyli poszczególnych wielkości wymiany ciepła (rozdział 2.3) oraz uwzględniając drugi i trzeci warunek komfortu cieplnego równania 2.26 i 2.21, Fanger wyprowadził równanie komfortu cieplnego w następującej postaci:

$$\frac{Q_M}{A_{Du}}(1-\eta)-3,05\cdot10^{-3}\left[5733-6,99\frac{Q_M}{A_{Du}}(1-\eta)-p_0\right]-0,42$$
$$\left[\frac{Q_M}{A_{Du}}(1-\eta)-58,15\right]-17\cdot10^{-6}\frac{Q_M}{A_{Du}}(5867-p_0)-0,0014\frac{Q_M}{A_{Du}}(34-t_s)=$$
$$=3,96\cdot10^{-8}\ f_{cl}\left[(t_{cl}+273)^4-(t_{pr}+273)^4\right]+f_{cl}\alpha_k(t_{cl}-t_s) \qquad (2.27)$$

Występująca w powyższym wzorze temperatura powierzchni odzieży "t_{cl}" została wyznaczona również z równania bilansu cieplnego organizmu człowieka 2.5 uwzględniając przewodzenie ciepła przez odzież (rozdział 2.3.1).

Temperaturę powierzchni odzieży określa wzór :

$$t_{cl}=35,7-0,028\ \frac{Q_M}{A_{Du}}(1-\eta)-0,155\ I_{cl}\{\frac{Q_M}{A_{Du}}(1-\eta)+$$
$$-3,05\cdot10^{-3}[5733-6,99\frac{Q_M}{A_{Du}}(1-\eta)-p_0]-0,42[\frac{Q_M}{A_{Du}}(1-\eta)-58,15]+$$
$$-17\cdot10^{-6}\frac{Q_M}{A_{Du}}(5867-p_0)-0,0014\frac{Q_M}{A_{Du}}(34-t_s)\} \qquad (2.28)$$

Jeżeli opór cieplny odzieży I_{cl} jest równy zeru, czyli człowiek jest nie ubrany, temperatura t_{cl} jest równa temperaturze powierzchni skóry t_{sk} i wzór 2.28 przyjmuje postać wzoru 2.26, co znacznie upraszcza obliczenia.

Współczynnik konwekcji α_k obliczony jest z równania 2.10 dla konwekcji swobodnej lub z równania 2.11 dla konwekcji wymuszonej.

Stosując równanie komfortu cieplnego 2.27, można obliczać dla dowolnego rodzaju odzieży i dowolnego rodzaju czynności (wydatku energetycznego) wszystkie kombinacje temperatury i wilgotności powietrza, średniej temperatury promieniowania oraz względnej prędkości przepływu powietrza, które tworzyć będą optymalny komfort cieplny dla ludzi znajdujących się w ustalonych warunkach cieplnych.

Równanie komfortu 2.27 jest stosunkowo złożone, dlatego bezpośrednie zastosowanie zyskały wykresy komfortu cieplnego Fangera [10]. Wykresy te dla niektórych przyjętych założeń pokazano na rysunkach 1,2 i 3,4. Wykresy przedstawiane są w układzie współrzędnych temperatur termometru suchego "t_s" i temperatur termometru wilgotnego "t_w". Na wykresach pokazane

są proste skośne będące izoliniami wilgotności względnej "φ" oraz krzywe komfortu cieplnego (linie pogrubione), których parametrem jest prędkość powietrza.

Powyższe wykresy sporządzone są dla pewnych przyjętych założeń wstępnych, a mianowicie:

- dla ludzi nie ubranych $I_{cl} = 0$ oraz $f_{cl} = 1$
- dla założenia, że średnia temperatura promieniowania otoczenia jest równa temperaturze powietrza

$$t_{pr} = t_s$$

- oraz dla następujących wydatków energetycznych pracownika

rys. 1 $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 65\ W/m^2$ - odpoczynek,

rys. 2 $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 100\ W/m^2$ - praca lekka,

rys. 3 $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$ - praca umiarkowana (przodki zmechanizowane),

rys. 4 $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 230\ W/m^2$ - praca ciężka (przodki niezmechanizowane).

Wykresy komfortu cieplnego Fangera mogą być oczywiście sporządzone w innym układzie współrzędnych parametrów powietrza i otoczenia. Na rysunkach 5, 6 i 7 krzywe komfortu cieplnego przedstawione są w układzie współrzędzych (t_s;t_{pr}), czyli temperatura termometru suchego jako oś odcietych i średnia temperatura promieniowania otoczenia jako oś rzędnych. Przyjęto również następujące założenia:

- ludzie nie ubrani, czyli $I_{cl} = 0$ oraz $f_{cl} = 1$,
- wydatek energetyczny równy $\frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$, co odpowiada pracy umiarkowanej (przodek zmechanizowany),
- wilgotność powietrza "φ" dla poszczególnych wykresów wynosi
  rys. 5 - $\varphi = 100\%$,
  rys. 6 - $\varphi = 50\%$,
  rys. 7 - $\varphi = 0\%$.

Parametrem krzywych komfortu cieplnego na rysunkach 5,6 i 7 jest prędkość przepływu powietrza.

Jeżeli parametry fizyczne powietrza oraz wydatek energetyczny pracownika odpowiadają punktom leżącym na krzywych komfortu cieplnego, to stan klimatyczny danego środowiska stanowi komfortowe warunki pracy. Gdy nie leżą na krzywych komfortu cieplnego, w środowiskach tych panuje dyskomfort cieplny, czyli są one odczuwane jako zbyt ciepłe lub zbyt chłodne.

2.5. OCENA KOMFORTU CIEPLNEGO PRACOWNIKÓW W ŚRODOWISKACH TERMICZNIE UMIARKOWANYCH - WSKAŹNIKI PMV I PPD

Fanger w swojej pracy [10] nad badaniem komfortu cieplnego odczuwanego przez człowieka wprowadził dwa wskaźniki określające liczbowo stan termiczny środowiska i stan niezadowolenia pracowników z warunków cieplnych otoczenia. Wskaźnikami tymi są PMV (predicted mean vote - przewidywana ocena średnia) oraz PPD (predicted percentage of dessatisfied - przewidywany odsetek niezadowolonych). Wskaźniki te w późniejszych latach stały się przedmiotem normy międzynarodowej (ISO 7730-1984) i polskiej (PN-85/N-08013).

Wskaźnik PMV oblicza się za pomocą równania podanego w Normie [49] i jest oparty na równowadze cieplnej ciała ludzkiego. Wskaźnik PMV przewiduje średnią ocenę wrażenia cieplnego w siedmiostopniowej skali ocen i można go obliczyć na podstawie oceny ciepła metabolicznego (wydatku energetycznego) człowieka, jego odzieży (oporność cieplna w clo) i parametrów środowiska: temperatury powietrza, średniej temperatury promieniowania, względnej prędkości powietrza i cząstkowego ciśnienia pary wodnej.Wartość PMV oznacza:

PMV = 0 – komfort cieplny,
PMV = +1 – dość ciepło,
PMV = +2 – ciepło,
PMV = +3 – gorąco,
PMV = −1 – dość chłodno,

PMV = −2 – chłodno,
PMV = −3 – zimno.

Wskaźnik PPD określa przewidywany odsetek niezadowolonych odczuwających nadmierne gorąco lub nadmierne zimno. Wskaźnik PPD można określić na podstawie wskaźnika PMV. Przy wskaźniku PMV = 0 liczba niezadowolonych wynosi 5%, przy PMV = (+0,5) i (−0,5) odsetek niezadowolonych wynosi 10%, przy PMV = (+1) i (−1) wynosi 25%, przy PMV = (+2) i (−2) - wynosi 80% i przy PMV = (+3) i (−3) - wynosi 100%. W celu zapewnienia komfortu termicznego wskaźnik PPD powinien być niższy niż 10%, co odpowiada wartościom $-0,5 < PMV < +0,5$.

Do analizy środowisk pracy skonstruowano przyrząd, który mierzy wskaźniki PMV i PPD. Przyrząd ten nazywa się Comfy-Test [42].

W niniejszej pracy w rozdziale 7., w którym przeprowadzono analizę klimatyczną środowisk pracy, wyznaczono również wskaźniki PMV i PPD. Wielkości tych wskaźników porównano więc z wielkościami innych wskaźników określających warunki klimatyczne w miejscach pracy.

3. WSKAŹNIKI OCENY MIKROKLIMATU

3.1. WSKAŹNIKI FIZYCZNE

Wskaźnikami mikroklimatu stosowanymi do tej pory do oceny warunków klimatycznych w kopalniach są: temperatura efektywna amerykańska ATE, siła chłodząca powietrza zwana również wartością Kata, efektywna temperatura belgijska BTE, francuska temperatura zastępcza (temperatura rezultatu t_r), temperatura komfortu cieplnego wg Cuprum, wskaźnik WBGT.

Wskaźniki te przedstawiają wzajemną zależność kilku podstawowych parametrów mikroklimatu, jak temperatury powietrza, wilgotności, prędkości przepływu itp. Służą one do oceny i porównywania warunków klimatycznych w środowiskach pracy, jak również przybliżonego określania warunków komfortowych oraz granicznych, bezpiecznych dla zdrowia i życia pracowników. Ze względu na swoją prostą formę, łatwą do pomiarów i obliczeń, są często stosowane, pomimo to że nie uwzględniają tak ważnego parametru, jakim jest wydatek energetyczny pracownika.

Amerykańska temperatura efektywna ATE wg Yaglou jest najczęściej stosowanym wskaźnikiem określającym mikroklimat w miejscu pracy. Odczytuje się ją z wykresu (rys. 8a, 8b lub 9) na podstawie pomierzonych parametrów, a mianowicie: temperatury powietrza - termometrem suchym i wilgotnym oraz prędkości przepływu powietrza. Wykres temperatury efektywnej ATE został sporządzony na podstawie badań eksperymentalnych. Według definicji amerykańska temperatura efektywna jest to taka temperatura nieruchomego i nasyconego powietrza, które posiada taką samą zdolność chłodzącą jak powietrze o danych pomierzonych parametrach.

Temperatura efektywna amerykańska ATE wykorzystywana jest do określania norm klimatycznych, między innymi w górnictwie amerykańskim i niemieckim.

Według normy amerykańskiej praca w ciągu 8 godzin jest dopuszczalna, gdy efektywna temperatura amerykańska jest mniejsza od 28°C. Gdy 28°C < ATE < 32°C, praca powinna być skrócona do 6 godzin oraz zmniejszona intensywność pracy lub norma produkcyjna. Powyżej temperatury efektywnej 32°C praca jest zabroniona. W górnictwie niemieckim obowiązuje norma [53], według której, z wyjątkiem kopalń soli, wielkość temperatury efektywnej amerykańskiej 30°C (w wyjatkowych wypadkach 32°C) stanowi granicę dopuszczalnej pracy górników. Normalna praca powinna się odbywać do 28°C temperatury suchej powietrza lub ATE < 25°C. W przedziale temperatur t_s > 28°C lub ATE > 25°C oraz ATE < 30°C obowiązują skrócone czasy pracy. W kopalniach soli, gdy temperatura sucha powietrza jest niższa od 28°C, można pracować osiem godzin. Gdy 28°C < t_s < 52°C wystepują skrócone czasy pracy. Powyżej temperatury suchej t_s > 52°C oraz temperatury wilgotnej t_w > 27°C praca jest zabroniona.

Najstarszym wskaźnikiem mikroklimatu jest tzw. wartość Kata, parametr mierzony katatermometrem Hilla [4,10,12,37]. Wartość Kata określa natężenie chłodzenia powietrza lub siłę chłodzącą powietrza wyrażoną w katastopniach. Rozróżniamy katastopnie suche i wilgotne uzyskane z pomiarów katatermometrem suchym i wilgotnym. Polska norma klimatyczna (Dziennik Ustaw PRL z dnia 18 VIII 1969 r. Rozporządzenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 1 VIII 1969 r. w sprawie bezpieczeństwa higieny pracy par. 75 pkt. 1 i 2) uwzględnia wielkość katastopni wilgotnych dla określenia czasu pracy w środowisku górniczym. Norma ta podaje, że normalna praca w ciągu 8 godzin może być prowadzona, gdy sucha temperatura powietrza będzie niższa od 28°C oraz natężenie chłodzenia wyższe od 11 katastopni wilgotnych. W przedziale temperatur powietrza 28°C ÷ 33°C praca powinna być skrócona do 6 godzin, a powyżej temperatury 33°C praca jest zabroniona z wyjatkiem akcji ratowniczej.

W górnictwie belgijskim obowiązuje wskaźnik mikroklimatu zwany efektywną temperaturą belgijską BTE [4,12,37] wg Bidlota Ledenta. Wskaźnik ten uwzględnia jedynie dwa parametry powietrza, a mianowicie temperaturę suchą i wilgotną.

Efektywną temperaturę belgijską oblicza się ze wzoru

$$BTE = 0{,}1\ t_s + 0{,}9\ t_w \leq 31°C \quad [°C] \tag{3.1}$$

We Francji obowiązuje wskaźnik zwany temperaturą zastępczą (temperatura rezultatu) t_r. Temperaturę zastępczą określa się wzorem

$$t_r = 0{,}3\ t_s + 0{,}7\ t_w - w \quad [°C] \tag{3.2}$$

gdzie: w - prędkość przepływu powietrza w m/s.

Temperatura zastepcza t_r uwzględnia więc oprócz temperatury suchej i wilgotnej powietrza również jego prędkość przepływu. Według przepisów francuskich praca nie powinna być prowadzona, gdy temperatura zastępcza $t_r > 28°C$ [37].

Pod koniec lat 80 na podstawie przeprowadzonych badań w kopalniach miedzi na zlecenie zakładów Badawczo-Projektowych Miedzi "Cuprum" we Wrocławiu [35] zaproponowano wskaźnik mikroklimatu zwany temperaturą zastępczą komfortu cieplnego t_{zk}. Temperatura zastępcza komfortu cieplnego wg Cuprum jest modyfikacją francuskiej temperatury zastepczej t_r. Określona jest wzorem

$$t_{zk} = 0{,}6\ t_w + 0{,}4\ t_s - w \tag{3.3}$$

W projekcie oceny warunków klimatycznych [35] przy zastosowaniu temperatury komfortu cieplnego t_{zk} przyjmuje się graniczne wartości tej temperatury w zależności od wydatku energetycznego, czyli od stopnia uciążliwości pracy. Dopuszczalne graniczne wartości temperatury zastępczej komfortu cieplnego wynoszą:

- dla pracy lekkiej $t_{zk} \leq 30°C$,
- dla pracy umiarkowanej $t_{zk} \leq 28°C$,
- dla pracy ciężkiej $t_{zk} \leq 26°C$,
- dla pracy bardzo ciężkiej $t_{zk} \leq 25°C$.

Projekt powyższy zakłada, że czas pracy powinien być skrócony, jeżeli temperatura t_{zk} jest większa od wartości granicznych oraz praca powinna być zabroniona, gdy $t_{zk} \geq 32°C$, z wyjątkiem akcji ratowniczych.

Mikroklimat w pomieszczeniach z wentylacją naturalną, a więc wewnątrz lub na zewnątrz budynków, określa wskaźnik WBGT. Wskaźnik ten wyznacza się na podstawie Międzynarodowej Normy ISO 7243-1982, która od 1985 r. obowiązuje rónież w Polsce pod nazwą PN-85/N-08011. "Wyznaczanie obciążeń termicznych działających na człowieka w środowisku pracy, oparte na wskaźniku WBGT".

Wskaźnik WBGT wiąże dwa parametry, a mianowicie: temperaturę wilgotną naturalną t_{nw} i temperaturę poczernionej kuli t_g . W pewnych warunkach środowiska, gdy wystepuje nasłonecznienie, również temperaturę powietrza t_s (temperaturę suchą). Relacja między powyższymi parametrami przedstawia się następująco:

- wewnątrz i na zewnątrz budynków bez nasłonecznienia

$$WBGT = 0,7\ t_{nw} + 0,3\ t_g\ , \qquad (3.4)$$

- na zewnątrz budynków z nasłonecznieniem

$$WBGT = 0,7\ t_{nw} + 0,2\ t_g + 0,1\ t_s\ , \qquad (3.5)$$

gdzie: t_{nw} - temperatura wilgotna naturalna w °C mierzona termometrem wilgotnym stacjonarnym,

t_g - temperatura poczernionej kuli w °C mierzona termometrem umieszczonym w kuli o średnicy 15 cm o czarnych ściankach (termometr Vernona),

t_s - temperatura powietrza w °C mierzona termometrem suchym osłoniętym od wpływu promieniowania słonecznego.

Wskaźnik WBGT zależny jest od takich parametrów otoczenia, jak temperatura powietrza, wilgotność, średnia temperatura promieniowania ścian. Nie wchodzi w skład wskźnika WBGT prędkość powietrza, chociaż może mieć wpływ na wskazania termometru wilgotnego i kulistego.

Wartości odniesienia wskaźnika WBGT ustalone zostały doświadczalnie przez przyjęcie maksymalnej dopuszczalnej temperatury wewnętrznej człowieka 38°C mierzonej w odbytnicy u osób narażonych na działanie gorąca. Przekroczenie temperatury rektalnej 38°C jest dla organizmu szkodliwe i praca w takich warunkach powinna być przerwana.

Wartości odniesienia wskaźnika WBGT zamieszczono w tabeli 5 na podstawie Normy PN-85/N-08011.

Powyższe wartości odniesienia reprezentują średni wpływ gorąca na człowieka w ciągu dość długiego czasu pracy. Wartości podane w tabeli 5 odnoszą się do osób zdrowych zaaklimatyzowanych lub niezaaklimatyzowanych, ubranych w standardowe ubranie robocze o wskaźniku izolacji termicznej $I_{cl} = 0,6$ *clo* (koszula flanelowa, spodnie). W przypadku innych typów odzieży stosuje się poprawki do wskaźnika WBGT w °C

- szorty (bez odzieży) + 2 °C,
- marynarka – 2 °C.

Powyższa norma zaleca normowanie czasu pracy i odpoczynku w ciągu godziny w zależności od wielkości przekroczenia wartości odniesienia wskaźnika WBGT, gdy wartość WBGT w miejscu wypoczynku jest równa lub bardzo bliska wartości WBGT na stanowisku pracy.

Dla środowiska, w którym występuje powietrze nieruchome i nasycone oraz temperatura powietrza równa się temperaturze promieniowania otoczenia, wskaźnik WBGT jest równy temperaturze efektywnej amerykańskiej, belgijskiej, temperaturze zastępczej francuskiej oraz wskaźnikowi komfortu cieplnego wg Cuprum.

Tabela 5

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

Rodzaj pracy	Przyrost metabolizmu w odniesieniu do powierzchni skóry M [W/m²]	Wartości odniesienia WBGT			
		Osoba zaaklimatyzowana w środowisku gorącym WBGT [°C]		Osoba niezaaklimatyzowana w środowisku gorącym WBGT [°C]	
Odpoczynek	M ≤ 65	33		32	
Praca lekka	65 < M < 130	30		29	
Praca umiarkowana	130 < M < 200	28		26	
Praca ciężka	200 < M < 260	Ruch powietrza		Ruch powietrza	
		nieodczuwalny	odczuwalny	nieodczuwalny	odczuwalny
		25	26	22	23
Praca bardzo ciężka	M > 260	23	25	18	20

* W przypadku innego zestawu odzieży wartości odniesienia wskaźnika WBGT ulegają zmianie :

1) szorty (I_{cl}=0 clo) + 2 °C

2) marynarka (I_{cl}=1 clo) – 2 °C

Wartości odniesienia wskaźnika WBGT obowiązują więc również w tych warunkach dla wymienionych wskaźników mikroklimatu.

W środowiskach, w których średnia temperatura promieniowania otoczenia nie jest równa temperaturze powietrza (dodatkowe źródło promieniowania cieplnego), do oceny obciążenia cieplnego stosuje się tzw. skorygowaną temperaturę efektywną CET. Oznacza się ją z nomogramu (rys. 8 i 9), w którym zamiast temperatury powietrza wstawia się wartość temperatury mierzonej termometrem kulowym (globalnym) Vernona. Wskazania termometru globalnego odzwierciedlają tzw. temperaturę odczuwalną, uwarunkowaną procesami napromieniowania i konwekcji.

3.2. WSKAŹNIKI FIZJOLOGICZNE

Wskaźniki fizjologiczne mikroklimatu określają w sposób bezpośredni lub pośredni obciążenie fizjologiczne organizmu ludzkiego spowodowane pracą w środowiskach gorących. Do wskaźników tych należą: temperatura rektalna, częstotliwość tętna, średnia temperatura powierzchni skóry, ilość wydzielanego potu, wskaźnik obciążenia termicznego Beldinga-Hatcha (HSI), wskaźnik obciążenia termicznego P4SR wg Mc Ardlego i inne [2,4, 10,20,26,25,37,42]. Wyżej wymienione wskaźniki służą przede wszystkim do określenia granicznych parametrów fizjologicznych organizmu ludzkiego w warunkach dużego obciążenia termicznego. Wśród wielu badaczy występują jednak duże różnice w wynikach granicznych parametrów fizjologicznych. Tak na przykład dopuszczalna temperatura wewnętrzna organizmu mierzona w odbytnicy wynosi 38,3 °C wg Ladellego i Brünera oraz 38,9 °C u Humpreysa czy Wyndhama [39]. Również w przyjmowaniu dopuszczalnej częstotliwości tętna występują różnice od 115 min^{-1} u Brünera do 140 min^{-1} u Humpreysa czy Ladellego [30].

Temperatura powierzchni skóry odgrywa istotną rolę w procesach wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem oraz ulega dużym wahaniom w zależności od warunków klimatycznych. Temperaturę powierzchni skóry oznacza się na podstawie pomiarów temperatury w różnych miejscach powierzchni skóry

i w zależności od liczby miejsc pomiarów na podstawie odpowiednich wzorów oblicza się średnią ważoną temperaturę skóry [26,37,47]. Jako dopuszczalną górną granicę średniej temperatury skóry Liese podaje wartość 35 °C [26].

Wielu badaczy za podstawę analizy obciążenia termicznego organizmu bierze ilość wydzielonego i wyparowanego potu. Maksymalne wielkości wydzielania potu przyjmowane są od 600 g/h (Smith) do 1000 i 1100 g/h (Belding-Hatch, Givoni, Mc Ardle [29,30]).

Belding i Hatch, Mc Ardle i inni [2,26,30] skonstruowali nomogramy do oceny obciążenia termicznego organizmu biorąc za podstawę wielkość wydzielanego potu przez człowieka przebywającego w różnych środowiskach klimatycznych i wykonującego pracę o różnym wydatku energetycznym. Najbardziej znanymi wskaźnikami obciążenia termicznego organizmu są: HSI (Heat-Stress-Index) wg Beldinga i Hatcha oraz wskaźnik P4SR wg Mc Ardlego jako wskaźnik przewidywanej ilości wydzielonego potu w ciągu 4 godzin pracy [2,20,30].

Wskaźnik HSI określa się z wykresu (rys. 10) na podstawie przeprowadzonych na stanowisku pracy pomiarów temperatury powietrza mierzonej termometrem kulistym Vernona, temperatury powietrza mierzonej termometrem suchym i wilgotnym, prędkości ruchu powietrza i wydatku energetycznego pracownika. Wskaźnik HSI Beldinga i Hatcha stosowany jest do oceny warunków mikroklimatu na stanowiskach gorących. Wartości wskaźnika HSI oznaczone są liczbami w zakresie od 0 do 200. Zerowa wartość wskaźnika HSI oznacza brak obciążenia termicznego organizmu. Wartość wskaźnika HSI = 100 oznacza maksymalne obciążenie termiczne organizmu, jakie mogą znieść tylko młodzi, zaaklimatyzowani do pracy w gorącu pracownicy.

Wskaźnik HSI oraz wartości odniesienia wskaźnika WBGT nazywamy wskaźnikami lub wielkościami obciążenia termicznego organizmu, gdyż podają one zależność pomiędzy parametrami fizycznymi otoczenia, rodzajem i wielkością wysiłku fizycznego w stosunku do jakiegoś podstawowego wskaźnika fizjologicznego organizmu. Wskaźnik HSI bierze za podstawę maksymalnego obciążenia termicznego ilość wydzielonego potu (1000 g/h),

natomiast wartości odniesienia wskaźnika WBGT - temperaturę rektalną równą 38°C.

3.3. PORÓWNANIE WZAJEMNEJ ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY NIEKTÓRYMI WSKAŹNIKAMI MIKROKLIMATU

W układzie współrzędnych (t_s, t_w) temperatura termometru suchego i termometru wilgotnego (rys. 11 i 12) przedstawiono przebiegi izolinii wskaźników mikroklimatu, a mianowicie temperatury efektywnej amerykańskiej ATE, temperatury efektywnej belgijskiej BET, temperatury zastępczej francuskiej t_r, temperatury komfortu cieplnego wg Cuprum oraz wskaźnika HSI. Przyjęto dwie stałe graniczne wartości temperatur: efektywnej amerykańskiej, belgijskiej, temperatury francuskiej oraz temperatury komfortu wg Cuprum, 28°C i 32°C, uwzględniając dodatkowo trzy prędkości powietrza w_1 = 0 m/s; w_2 = 1 m/s; w_3 = 3 m/s. Wskaźnik HSI wyznaczono z nomogramu na rys. 10 dla wydatku energetycznego M = 165 W/m^2 (praca umiarkowana) przyjmując warunki klimatyczne określone przez ATE = 28°C oraz 32°C. Izolinie HSI przedstawiają wielkości HSI = 100 dla trzech wyżej wymienionych prędkości powietrza. Wykresy sporządzono dla ludzi nie ubranych i ubranych.

Na rysunku 11 pokazano przebiegi izolinii stałych wartości temperatur efektywnych i zastępczych mikroklimatu równych 28°C oraz HSI = 100 dla trzech różnych prędkości przepływu powietrza 0 m/s; 1 m/s i 3 m/s. Na rysunku 12 przedstawiono przebiegi izolinii stałych wartości temperatur efektywnych i zastępczych mikroklimatu równych 32°C oraz HSI = 100 dla trzech różnych prędkości przepływu powietrza 0 m/s; 1 m/s i 3 m/s. Na obydwu rysunkach zaznaczono również izolinie temperatur termometru suchego równych 28°C i 33°C charakteryzujące polską normę klimatyczną.

Z analizy przebiegu izolinii parametrów mikroklimatu (rysunki 11 i 12) można wyciągnąć wniosek, że wykres stałej temperatury efektywnej amerykańskiej ATE wyznacza wartości parametrów fizycznych powietrza najbardziej zbliżone do wartości

średnich. Wskaźnik ATE jest tym samym najbardziej właściwy, jeżeli chodzi o ocenę wpływu mikroklimatu na organizm człowieka. Izolinie temperatury zastępczej francuskiej t_r oraz temperatury komfortu cieplnego wg Cuprum niewiele odbiegają od izolinii ATE dla dużych wilgotności powietrza φ, dla małych wilgotności powietrza obserwuje się już większą różnicę. Izolinie temperatury efektywnej belgijskiej BTE znacznie odbiegają od izolinii temperatury efektywnej amerykańskiej ATE, co świadczy o małej przydatności tego wskaźnika do analizy warunków klimatycznych.

Z powyższej analizy przebiegu izolinii stałych wartości wskaźników mikroklimatu można wyciągnąć wniosek, że temperatura efektywna amerykańska w sposób wystarczająco dokładny, a przede wszystkim bezpieczny charakteryzuje środowisko, w którym występują trudne warunki klimatyczne. Wartości graniczne wskaźnika WBGT (tabela 5), które dla powietrza nieruchomego, nasyconego oraz przy równości temperatury powietrza z temperaturą promieniowania ociosów, równają się temperaturze efektywnej amerykańskiej, mogą być brane jako wartości graniczne dla temperatur efektywnych amerykańskich w całym ich przebiegu, to znaczy dla zmiennej wilgotności i prędkości powietrza. Założenie to jest zgodne z definicją temperatury efektywnej amerykańskiej ATE, czyli

$$WBGT_{odniesienia} = ATE_{graniczna}$$

Według badań Wenzla [37,38,41] linie stałego obciążenia termicznego organizmu w warunkach wysokich temperatur nie są prostymi. Na rys. 11 przedstawiono krzywą Wenzla (krzywa E) dla wydatku energetycznego 290 W (161 W/m^2) oraz prędkości przepływu powietrza 0,3 m/s. Krzywa ta, według Vossa [37], dla wysokich wilgotności powietrza posiada przebieg izolinii temperatury wilgotnej, dla wilgotności średnich - przebieg izolinii temperatury efektywnej amerykańskiej wg Yaglou, natomiast dla małych wilgotności powietrza posiada przebieg izolinii temperatury termometru suchego. Uwzględniając badania Wenzla, w niniejszej pracy analizę przebiegu temperatury efektywnej ATE, jako wskaźnika obciążenia termicznego organizmu, przepro-

wadzono w zakresie wilgotności powietrza od 100% do 20%. Dla wilgotności mniejszych od 20% przyjęto, że izolinia temperatury efektywnej amerykańskiej przechodzi w izolinię temperatury suchej powietrza.

Według nowszych badań Wenzla przeprowadzonych z grupą 13 zaaklimatyzowanych mężczyzn [39], krzywe obciążenia termicznego organizmu ludzkiego oznaczone jako krzywe stałej temperatury rektalnej, wykazują dużą zgodność przebiegu z izoliniami granicznych wartości temperatur efektywnych amerykańskich w przedziale wilgotności względnych powietrza od 100% do 20%. Na rys. 12 pokazano przebiegi dwóch krzywych Wenzla E_1 i E_2 dla temperatur rektalnych 37,6°C i 38°C, przy założeniu, że wydatek energetyczny pracowników równa się W=131 W/m^2 oraz prędkość przepływu powietrza w=0,3 m/s. Kształt i położenie tych krzywych w układzie współrzędnych t_s i t_w potwierdzają słuszność wcześniej przyjętych założeń dotyczących ustalenia granicy bezpiecznej tolerancji mikroklimatu przez człowieka.

4. BEZWYMIAROWY (PROCENTOWY) WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Dyskomfort cieplny w przeciwieństwie do komfortu cieplnego jest to stan niezadowolenia człowieka z warunków cieplnych otoczenia. Rozróżniamy dyskomfort panujący w środowiskach ciepłych, jak i chłodnych. Ze względu na występujące w kopalniach zagrożenie klimatyczne z powodu wysokich temperatur przez pojęcie dyskomfortu cieplnego rozumieć będziemy dyskomfort środowisk ciepłych. Komfort oraz dyskomfort cieplny określić można przez parametry fizyczne powietrza i otoczenia oraz wydatek energetyczny pracownika. Jeżeli parametry środowiska nie odpowiadają punktom leżącym na krzywych komfortu cieplnego Fangera (rys. 1÷7), to w środowisku tym panują warunki dyskomfortowe. Dyskomfort cieplny dzieli się na bezpieczny i niebezpieczny dla zdrowia i życia człowieka. Dyskomfort bezpieczny to taki dyskomfort, w którym wskaźniki mikroklimatu WBGT i ATE nie osiągają wartości odniesienia ustalonych na podstawie oceny wskaźników fizjologicznych organizmu ludzkiego. Warunki klimatyczne, dla których wskaźniki WBGT lub ATE mikroklimatu przewyższają wartości odniesienia są już niebezpieczne dla zdrowia, czyli występuje dyskomfort niebezpieczny.

W układzie współrzędnych (t_s t_w) warunki klimatyczne wywołujące dyskomfort cieplny bezpieczny można graficznie przedstawić w formie powierzchni pomiędzy krzywą komfortu cieplnego Fangera a charakterystyką (prostą) amerykańskiej temperatury efektywnej (rys. 13). Dyskomfort niebezpieczny leży na prawo od linii granicznej wskaźnika amerykańskiej temperatury efektywnej .

Na rys. 14 przedstawiono krzywe komfortu cieplnego Fangera dla ludzi nie ubranych w układzie współrzędnych temperatura efektywna ATE oraz wilgotność powietrza φ. Parametrem krzywych jest wydatek energetyczny pracownika obejmujący wypoczynek, pracę lekką, umiarkowaną i ciężką. Podczas kreślenia tego wykresu poszczególne krzywe komfortu cieplnego Fangera zależne od prędkości przepływu powietrza (rys. od 1 do 4)

układały się w charakterystyczne wiązki zlewając się ze sobą. Odchylenia temperatur efektywnych dla poszczególnych wiązek krzywych przy danej wilgotności względnej powietrza nie były większe od 5%. Stąd też, metodą aproksymacji, dla każdego wydatku energetycznego pracownika wyznaczono jedną prostą komfortu cieplnego niezależną od prędkości przepływu powietrza (rys. 14). Linie te (pogrubione) są odcinkami zawartymi pomiędzy wilgotnościami powietrza $0<\varphi<100\%$ dla nastepujących wydatków energetycznych $M = 65\ W/m^2$; $100\ W/m^2$; $165\ W/m^2$; $200\ W/m^2$. Na wykresie tym podobnie jak na rysunku 13 można przedstawić obszary dyskomfortu, jaki panuje w danym środowisku. Rys. 15 przedstawia odcinek komfortu cieplnego dla wydatku energetycznego $M = 165\ W/m^2$ (praca umiarkowana) oraz prostą pionową stałej temperatury efektywnej amerykańskiej ATE=28°C stanowiącą graniczną temperaturę efektywną dla bezpiecznej pracy ze względu na mikroklimat. Obszar na lewo od odcinka komfortu cieplnego stanowi dyskomfort występujący w środowiskach chłodnych, obszar pomiędzy odcinkiem komfortu a prostą pionową temperatury efektynej 28°C jest obszarem dyskomfortu cieplnego bezpiecznego dla zdrowia, natomiast obszar na prawo od linii temperatury efektywnej 28°C jest obszarem dyskomfortu cieplnego niebezpiecznego dla zdrowia. Wykresy przedstawione na rys. 14 i 15 są sporządzone przy założeniu, że temperatura powietrza jest równa temperaturze promieniowania otoczenia.

Określenie stanu dyskomfortu cieplnego u człowieka, czyli wielkości obciążenia termicznego organizmu człowieka można przeprowadzić wprowadzając pojęcie wskaźnika dyskomfortu cieplnego pracownika "δ".

Jeżeli w obszarze dyskomfortu cieplnego bezpiecznego umieścimy dowolny punkt A (rys. 13 oraz rys. 15) o określonych parametrach fizycznych powietrza oraz punkty B i C leżące, pierwszy na krzywej komfortu cieplnego Fangera dla tej samej prędkości i wilgotności powietrza co punkt A, a drugi na prostej granicznej temperatury efektywnej amerykańskiej przyjętej wg wartości odniesienia wskaźnika WBGT (tabela 5), to wskaźnik dyskomfortu cieplnego pracownika δ (w skrócie wskaźnik dys-

komfortu δ) jest to stosunek odcinka AB do CB (rys. 13 oraz rys. 15)

$$\delta = \frac{AB}{CB} \qquad (4.1)$$

Z rysunku 15 wynika, że stosunek tych odcinków jest równy stosunkowi odpowiednich różnic temperatur efektywnych dla tej samej wilgotności powietrza, czyli:

$$\delta = \frac{ATE_A - ATE_{komf.}}{ATE_{gran.} - ATE_{komf.}}, \qquad (4.2)$$

gdzie : ATE_A - efektywna temperatura amerykańska występująca w środowisku A o znanych parametrach fizycznych powietrza, odczytana z wykresu Yaglou (rys. 8 i 9),

$ATE_{komf.}$ - efektywna temperatura amerykańska określona dla parametrów fizycznych środowiska B, w których panują warunki komforu cieplnego. Temperaturę tę odczytujemy z wykresu Yaglou (rys. 8, 9) przyjmując parametry fizyczne powietrza z wykresów komfortu cieplnego Fangera,

$ATE_{gran.}$ - efektywna temperatura amerykańska graniczna, której wartość wzięta jest z tabeli 5 w zależności od wydatku energetycznego, stopnia aklimatyzacji pracownika i oporu cieplnego odzieży.

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego jest parametrem określającym wpływ warunków klimatycznych środowiska na samopoczucie pracownika oraz na cieplne bezpieczeństwo jego pracy. Jeżeli :

$\delta < 0$ - środowisko odczuwane jest jako chłodne,

$\delta = 0$ - komfort cieplny,

$0 < \delta < 1$ lub 100% - środowisko odczuwane jest jako zbyt ciepłe, lecz dyskomfort jest bezpieczny dla zdrowia,

$\delta \geq 1$ lub 100% - środowisko odczuwane jest jako zbyt ciepłe i dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia.

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego zależy od parametrów fizycznych mikroklimatu, od wydatku energetycznego pracownika, czyli rodzaju i intensywności pracy , od rodzaju odzieży oraz

stopnia aklimatyzacji. Określa on liczbowo lub procentowo, jak bardzo warunki klimatyczne panujące w danym środowisku pracy różnią się od warunków klimatycznych komfortu cieplnego oraz od warunków klimatycznych granicznych pod względem bezpieczeństwa cieplnego.

5. ANALIZA WPŁYWU PARAMETRÓW ŚRODOWISKA NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO PRACOWNIKA

5.1. WPŁYW TEMPERATURY I WILGOTNOŚCI POWIETRZA NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Wpływ temperatury i wilgotności powietrza na wskaźnik dyskomfortu cieplnego należy analizować wspólnie, ponieważ te dwa parametry powietrza są ściśle ze sobą związane. W większości przemian termodynamicznych powietrza, jakie zachodzą w wyrobiskach górniczych przy przepływie powietrza lub podczas jego ochładzania w chłodziarkach, zmiana temperatury powietrza powoduje zmianę jego wilgotności φ. Jedynie w powietrzu nasyconym spadek temperatury nie powoduje zmiany wilgotności φ, lecz jego osuszanie poprzez wykraplanie się mgły.

Przemiany termodynamiczne powietrza zachodzące w różnych środowiskach analizować można na wykresie (i,x) Molliera. Jeżeli na wykres ten zostaną naniesione izolinie wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla pewnych przyjętych założeń, to na wykresie takim można najlepiej przeanalizować wpływ zmian temperatury powietrza i jego wilgotności na wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ. Na rysunkach 16,17,18,19,20 pokazano wykresy (i,x) Molliera, na których naniesiono izolinie dyskomfortu cieplnego dla następujących założeń:

- prędkość powietrza 0,1 ;0,5 ;1 ;1,5 ;3 $\frac{m}{s}$,
- wydatek energetyczny pracownika $M = 165\ W/m^2$,
- człowiek bez odzieży $I_{cl} = 0$,
- temperatura powietrza jest równa temperaturze promieniowania otoczenia,
- temperatura odniesienia (graniczna) $ATE_{gran.} = 28°C$ dla ludzi niezaaklimatyzowanych oraz $ATE_{gran.} = 30°C$ dla ludzi zaaklimatyzowanych,
- ciśnienie atmosferyczne powietrza p=1000 hPa.

(Wykres (i,x) Molliera przyjęto dla ciśnienia atmosferycznego 1000 hPa. Zmiany ciśnienia atmosferycznego przy analizie wskaźnika dyskomfortu cieplnego są nieistotne i można je pominąć).

Na rys. 18 pokazano przemianę powietrza, jaka zachodzi w przodku, w którym stosuje się chłodzenie powietrza. Niech przemiana ta stanowi linię pionową od punktu E do F, w której występuje obniżenie temperatury powietrza od 34,2°C do 26,4°C przy stałej zawartości pary wodnej w powietrzu. W przodku tym na skutek chłodzenia powietrza poprawiamy warunki klimatyczne od stanu $\delta_E = 0,8$ do $\delta_F = 0,2$ (pracownicy zaaklimatyzowani). Stosując inny sposób chłodzenia powietrza zachodzący na przykład w komorze zraszającej, gdzie obniżeniu temperatury towarzyszy przyrost wilgoci przy stałej wartości entalpii, również występuje spadek wskaźnika dyskomfortu cieplnego. Opierając się na wykresach przedstawionych na rys. od 16 ÷ 20 w zależności od prędkości przepływu powietrza można prześledzić dowolną kombinację zmian temperatury powietrza i wilgotności określając wskaźnik dyskomfortu cieplnego, a tym samym stan poprawy lub pogorszenia się warunków klimatycznych w danym środowisku w odczuciu pracownika nie ubranego, wykonującego pracę umiarkowaną, zaaklimatyzowanego lub niezaaklimatyzowanego.

Podobne wykresy można sporządzić dla innych wydatków energetycznych pracownika, a mianowicie dla pracy ciężkiej, lekkiej lub odpoczynku. W opracowaniu zrezygnowano z podania tych wykresów ze względu na skonstruowanie ogólnego nomogramu (rozdział 5.6) uwzględniającego więcej parametrów wpływających na wskaźnik dyskomfortu cieplnego.

5.2. WPŁYW PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU POWIETRZA NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Kolejnym ważnym parametrem wpływającym na wskaźnik dyskomfortu cieplnego jest prędkość przepływu powietrza. Jej wpływ można prześledzić na wykresie służącym do wyznaczania wskaźnika δ w układzie współrzędnych (t_s, δ). Parametrem linii prostych na tym wykresie jest prędkość przepływu powietrza. W pracy podano 5 takich wykresów dla różnych wilgotności powietrza, a mianowicie δ=100%; 80%; 60%; 40%; 20%; oraz dla stałego wydatku energetycznego M=165 W/m^2 odpowiadającego pracy umiarkowanej. Są to rysunki 21 a,b,c,d,e. Na rysunku 21 b

pokazano przykład poprawy warunków klimatycznych przez zwiększenie prędkości przepływu powietrza. Rysunek ten sporządzony jest dla następujących założeń :

- wydatek energetyczny 165 W / m^2,
- wilgotność powietrza $\varphi = 80\%$,
- ludzie bez odzieży,
- ludzie niezaaklimatyzowani,
- temperatura powietrza jest równa temperaturze promieniowania.

Punkt A, dla którego parametry wynoszą $t_s = 29°C$; $w = 0,3\ m/s$; $\delta = 0,8$ (rys. 21 b) poprzez zwiększenie prędkości przepływu powietrza do 3 m/s, przy tej samej temperaturze i wilgotności przemieścił się do punktu A', dla którego parametry wynoszą $t_s = 29°C$; $w = 3\ m/s$; $\delta = 0,3$. Wystąpiła więc w tym środowisku wyraźna poprawa warunków klimatycznych. Ponieważ na omawianych wykresach izolinie stałej prędkości zwężają się w miarę wzrostu temperatury powietrza, poprawa warunków klimatycznych drogą wentylacyjną, a więc przez zwiększenie prędkości przepływu powietrza, dla wyższych temperatur jest mniej efektywna. Jeżeli temperatura powietrza wynosi 33°C (punkt B rys. 21 b), to przy prędkości 2 m/s występuje dyskomfort 100-procentowy. Dalsze zwiększenie prędkości przepływu powietrza w tym środowisku (przodku) chociaż dopuszczalne nie spowoduje dużej poprawy warunków klimatycznych, a jedynie nieprzyjemnie odczuwaną zbyt dużą jego prędkość (B'; $t_s = 33°C$, $w = 3\ m/s$, $\delta = 0,9$). W takim przypadku należałoby stosować klimatyzację, czyli obniżenie temperatury powietrza.

5.3. WPŁYW ŚREDNIEJ TEMPERATURY PROMIENIOWANIA OTOCZENIA NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

W górniczych środowiskch pracy, na przykład w przodkach ślepych i w ścianach, temperatura powietrza równa się średniej temperaturze promieniowania otoczenia. Nawet w przypadkach wysokich temperatur górotworu, bezpośrednio po odstrzeleniu urobku, temperatury powietrza i otoczenia bardzo szybko się wyrównują. Istnieją jednak miejsca w kopalni, w których może

wystąpić różnica tych temperatur, na przykład podczas tamowania lub aktywnego gaszenia pożaru endogenicznego. W miejscach takich, w których pracują ratownicy, temperatura powierzchni ścian górotworu jest wyższa od temperatury powietrza. Obniżenie średniej temperatury promieniowania otoczenia stosowano w kopalniach Donbasu przez montowanie w przodkach ślepych specjalnych ekranów chłodzonych wodą [1] w celu poprawy warunków klimatycznych.

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego, pozwalający dokonać oceny warunków klimatycznych, zależy od temperatury promieniowania otoczenia. Im wyższa temperatura otaczających ścian w pomieszczeniu, gdzie pracują ludzie, tym mniejsze wydzielanie ciepła z organizmu do otoczenia przez promieniowanie, a więc tym trudniejsze warunki klimatyczne.

Zagadnienie wpływu średniej temperatury promieniowania otoczenia przedstawiono graficznie na wykresach Fangera w układzie współrzędnych t_s-temperatura sucha i t_{pr}-średnia temperatura promieniowania otoczenia. Na rysunkach 22÷27 w podanym powyżej układzie współrzędnych $(t_s; t_{pr})$ naniesiono krzywe komfortu cieplnego Fangera. Są to krzywe oznaczone wskaźnikiem dyskomfortu $\delta = 0$. Wszystkie wykresy (rys. 22÷27) sporządzone są dla ludzi pracujących z wydatkiem energetycznym $M = 165\ W/m^2$ oraz bez odzieży $I_{cl} = 0$. Poszczególne wykresy różnią się przyjętą prędkością przepływu powietrza i wilgotnością względną. Prędkość przepływu powietrza przyjmuje wartości $0{,}5\ m/s$ i $1{,}5\ m/s$, wilgotność powietrza natomiast każdorazowo trzy wielkości, a mianowicie 20%, 50% i 100%.

Podstawowe założone parametry dla wykresów przedstawionych na rys. 22÷27 są więc następujące :

Rysunek 22 $w = 0,5\ m/s$ $\varphi \leq 20\%$
Rysunek 23 $w = 0,5\ m/s$ $\varphi = 50\%$
Rysunek 24 $w = 0,5\ m/s$ $\varphi = 100\%$
Rysunek 25 $w = 1,5\ m/s$ $\varphi \leq 20\%$
Rysunek 26 $w = 1,5\ m/s$ $\varphi = 50\%$
Rysunek 27 $w = 1,5\ m/s$ $\varphi = 100\%$

} $M = 165\ W/m^2$; $I_{cl} = 0$

Na wykresach tych zaznaczono również linię prostą o równaniu $t_s = t_{pr}$ (linia skośna), której miejsca geometryczne odpowiadają warunkom klimatycznym w środowiskach, gdzie temperatura promieniowania otoczenia jest równa temperaturze powietrza. Wartości odniesienia wskaźnika WBGT lub ATE określające graniczne i bezpieczne warunki klimatyczne są na tym wykresie punktami leżącymi na linii $t_s = t_{pr}$.

Punkt C (rys. 22) określa więc wartość wskaźnika ATE=28°C. Nanosząc na ten wykres punkty A i B, z których punkt A charakteryzuje warunki cieplne w danym środowisku oraz punkt B - - warunki komfortu cieplnego, wskaźnik dyskomfortu cieplnego będzie określony jako stosunek odległości punktu A od krzywej komfortu cieplnego Fangera (odc. AB) do odległości punktu C od tej krzywej (odc. CB), zgodnie z definicją (wzór 4.1).

Na wykresach (rys. 22,23,24,25,26,27) narysowano izolinie stałej wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ przeprowadzając obliczenia na podstawie bilansu cieplnego człowieka (wzór 2,5).

W obliczeniach wzór 2.5 został uproszczony przez pominięcie jawnego i utajonego ciepła oddychania, ciepła dyfuzji pary wodnej przez skórę (Q_{jw}, Q_{ut}, Q_{df}) jako wielkości małych, a więc nieistotnych. Przyjęto również stałą temperaturę rektalną organizmu oraz stałą temperaturę powierzchni skóry (35°C).

Uproszczony wzór na bilans cieplny organizmu przedstawiał się następująco:

$$M = \pm K \pm S + E_{req} \,, \qquad (5.1)$$

gdzie : $M = \frac{Q_M}{A_{Du}}$ wydatek energetyczny człowieka W / m^2,

$K = \frac{Q_K}{A_{Du}}$ ciepło konwekcji W / m^2,

$S = \frac{Q_S}{A_{Du}}$ ciepło promieniowania W / m^2,

$E_{req} = \frac{Q_V}{A_{Du}}$ ciepło parowania W / m^2.

Ciepło konwekcji i promieniowania obliczano ze wzorów 2.9 i 2.15. Wzór 5.1 służył więc do wyznaczenia ciepła parowania potrzebnego do zrównoważenia bilansu cieplnego organizmu w różnych warunkach klimatycznych.

Podstawowymi stanami klimatycznymi, dla których wyznaczono wielkość ciepła parowania E_{req} w warunkach dyskomfortu $\delta = 1$, były stany, w których temperatura powietrza była równa temperaturze promieniowania. Wielkości tych temperatur dla przyjętych parametrów (wydatku energetycznego "M", prędkości powietrza "w" oraz wilgotności powietrza "φ") wyznaczono z monogramów zamieszczonych na rys. 17 i 19.

Chcąc wyznaczyć izolinie stałego wskaźnika dyskomfortu cieplnego $\delta = 1$ dla zmiennych wartości temperatur powietrza i temperatur promieniowania otoczenia wybrano kryterium porównawcze warunków klimatycznych zapewniające niezmienność wskaźnika dyskomfortu cieplnego w odniesieniu do warunków, w których temperatury powietrza i promieniowania były równe. Tym kryterium został wybrany stosunek ciepła wydzielonego przez parowanie potu człowieka E_{req}, wyznaczonego ze wzoru 5.1, do maksymalnego ciepła parowania E_{max}, jakie może wydzielić człowiek w danych warunkach, gdy jego całe ciało pokryte jest potem. Wybrane powyższe kryterium porównywania warunków klimatycznych jest zgodne z kryterium zastosowanym przez Beldinga-Hatcha przy wyznaczaniu wskaźnika HSI (rozdz. 3.2).

Przyjęto więc założenie, że $E_{req} / E_{max} = const$ dla danych parametrów klimatycznych przy zmiennej temperaturze powietrza i średniej temperaturze promieniowania otoczenia.

Wyznaczeniem maksymalnej ilości ciepła przez parowanie potu z powierzchni ciała ludzkiego zajmowało się wielu autorów [20,27,34,51] opracowując wzory różniące się wynikami. W niniejszym opracowaniu przyjęto wzór Hainesa i Hatcha [20,23], który ma postać:

$$E_{max} = 19{,}5\ w^{0.38}(p_{sk} - p_o) \quad [kcal / h], \tag{5.2}$$

gdzie : w - prędkość przepływu powietrza $[m / s]$,

p_{sk} - prężność pary wodnej nasyconej dla temperatury powierzchni ciała ludzkiego [mmHg],

p_0 - prężność pary wodnej w powietrzu [mmHg].

W układzie jednostek SI wzór 5.2 ma postać:

$$E_{max} = 0{,}17\ w^{0.38}(p_{sk} - p_o) \quad [W] \tag{5.3}$$

gdzie : w - prędkość przepływu powietrza $[m / s]$,

p_{sk} - prężność pary wodnej nasyconej dla temperatury powierzchni ciała ludzkiego [Pa],

p_0 - prężność pary wodnej w powietrzu [Pa].

Nowsze wzory na E_{max} proponowane przez Mitchella i Stewarta [27,34] dają wyższe wartości od wzoru 5.2, mimo to kryterium porównawcze warunków klimatycznych przy zmiennych temperaturach t_s i t_{pr} i zastosowaniu różnych wzorów na E_{max} dawało te same przebiegi izolinii wskaźników dyskomfortu cieplnego $\delta = 1$ (rys. 22÷27).

Podczas obliczeń ilości ciepła wydzielonego przez parowanie potu z powierzchni ciała ludzkiego dla wielu różnych parametrów powietrza i otoczenia przy stałym wskaźniku dyskomfortu cieplnego $\delta = 1$ nie stwierdzono przekroczenia liczby 374 W / m^2, to znaczy ciepła wydzielonego przez odparowanie 0,55 litra wody (potu) z powierzchni $1\,m^2$ w ciągu godziny, czyli około 1 litra z powierzchni całego ciała w ciągu godziny. Oznacza to, że warunek bezpieczeństwa klimatycznego ze względu na parowanie potu był spełniony (rozdział 3.2. oraz Norma PN-88/N-08008-załącznik C).

Podobne wykresy jak na rys. 22÷27 można wykonać dla różnych prędkości powietrza, różnej wilgotności oraz wydatku

energetycznego, oporu cieplnego odzieży i aklimatyzacji. W opracowaniu zamieszczono jedyni 6 wykresów tego typu dotyczących ludzi nie ubranych, wydatku energetycznego 165 W/m^2, dla wilgotności 20%, 50% i 100% oraz prędkości powietrza 0,5m/s; 1,5m/s.

Na wykresach przedstawionych na rys. 22 do 27 można przeanalizować efekty poprawy warunków klimatycznych w miejscu pracy przez zmniejszenie średniej temperatury promieniowania otoczenia. Przykład: rys. 23.

W środowisku o parametrach: (punkt A) - temperatura termometru suchego $t_s = 35°C = t_{pr}$; wilgotność powietrza $\varphi = 50\%$; prędkość przepływu powietrza w=0,5m/s obniżono średnią temperaturę promieniowania otoczenia do wartości $t_{pr} = 10°C$ bez zmiany poprzednich parametrów (punkt A'). Uzyskano w ten sposób wyraźną poprawę warunków klimatycznych, ponieważ wskaźnik dyskomfortu cieplnego zmniejszył się od wartości $\delta = 1$, dla człowieka niezaaklimatyzowanego wykonującego pracę o wydatku energetycznym 165 W/m^2, do wartości $\delta = 0,5$. Taki sam efekt poprawy warunków klimatycznych można by uzyskać chłodząc powietrze do temperatury $t_s = 29,4°C$ przy teoretycznie niezmiennej wilgotności powietrza $\varphi = 50\%$, prędkości przepływu w=0,5m/s oraz równości temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania otoczenia $t_s = t_{pr}$ (punkt A'').

W praktyce obniżenie temperatury powietrza w danym środowisku, na przykład w przodku górniczym, przy zastosowaniu chłodziarek, prowadzi do wzrostu jego wilgotności φ. W związku z tym uzyskanie dyskomfortu cieplnego $\delta = 0,5$ wymagałoby obniżenia temperatury powietrza do wartości $t_s = 27,4°C$ przy wilgotności względnej $\varphi = 78\%$ oraz niezmiennej prędkości przepływu powietrza w=0,5m/s, i równości temperatury powietrza ze średnią temperaturą promieniowania ociosów. Wyniki tej analizy uzyskano z wykresu (i,x) Molliera przedstawionego na rys. 17.

5.4. WPŁYW WYDATKU ENERGETYCZNEGO PRACOWNIKA NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Wydatek energetyczny pracownika wpływa bezpośrednio na przebieg krzywych komfortu cieplnego Fangera oraz na wartości graniczne temperatury efektywnej ATE (rys. 1,2,3,4, tabela 5). Okoliczności te powodują również zależność wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ od wydatku energetycznego. Zależność tę w formie graficznej przedstawiono na rysunku 28, na którym wykreślono proste, będące izoliniami wydatku energetycznego pracownika w układzie współrzędnych: temperatura efektywna amerykańska ATE, wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ. Rozpatrywano cztery wartości wydatków energetycznych: 65 W/m^2, 100 W/m^2, 165 W/m^2, 230 W/m^2. Wykres na rys.28 sporządzony jest dla następujących założeń, a mianowicie dla ludzi bez odzieży oraz dla środowiska, w którym temperatura powietrza jest równa średniej temperaturze promieniowania otoczenia. Przebieg izolinii wydatku energetycznego zmienia się w zależności od wilgotności powietrza. Na rysunku 28 pokazano przebiegi tych izolinii dla trzech przyjętych wilgotności powietrza:

Rys. 28 a - wilgotność $\varphi = 20\%$,

Rys. 28 b - wilgotność $\varphi = 50\%$,

Rys. 28 c - wilgotność $\varphi = 100\%$.

W układzie współrzędnych (ATE i δ) izolinie wydatku energetycznego wyznaczone dla różnych prędkości powietrza tworzą charakterystyczne wiązki (linie przerywane). Taki układ charakterystyk wydatku energetycznego pozwolił wyznaczyć przebieg charakterystyki wypadkowej (linia ciągła), która z dostateczną dokładnością określa zależność wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ od wydatku energetycznego niezależnie od prędkości przepływu powietrza.

Współrzędną poziomą punktu charakterystyki wypadkowej dla danego wydatku energetycznego, czyli wartość ATE, w warunkach komfortu cieplnego ($\delta = 0$), obliczono jako średnią arytmetyczną współrzędnych poziomych punktów poszczególnych charakterystyk tworzących daną wiązkę (linie przerywane) prostych.

5.5. WPŁYW OPORU CIEPLNEGO ODZIEŻY NA WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Odzież, a ściślej jej opór cieplny wyrażony w jednostkach clo lub $\frac{m^2K}{W}$ (rozdział 2.3.1), również w sposób istotny wpływa na wskaźnik dyskomfortu cieplnego. Opór cieplny odzieży wpływa na przebieg krzywych komfortu cieplnego, wartości graniczne ATE, a również na przebieg izolinii wartości ATE na wykresach Yaglou.

Na rysunku 29 w układzie współrzędnych: temperatura efektywna amerykańska ATE oraz wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ przedstawiono wykresy funkcji, których parametrem jest opór cieplny odzieży o wartościach 0 i 1 clo. Przyjęto wydatek energetyczny pracownika $M = 165\ W/m^2$, osobę niezaaklimatyzowaną i zaaklimatyzowaną oraz $t_s = t_{pr}$.

Izolinie oporu cieplnego odzieży są liniami prostymi. Ich przebieg zależy od wilgotności powietrza φ (rys. 29 a,b,c). Izolinie oporu cieplnego odzieży podobnie jak izolinie wydatku enegetycznego przedstawione w układzie współrzędnych (ATE i δ) nie zależą od prędkości przepływu powietrza. Na rysunku 29 przedstawiono już charakterystyki wypadkowe oporu cieplnego odzieży. Przebiegi izolinii oporu cieplnego odzieży o wartościach zawartych pomiędzy 0 i 1 clo można wyznaczyć na podstawie interpolacji.

5.6. NOMOGRAM DO WYZNACZANIA WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO CZŁOWIEKA PRACUJĄCEGO W ŚRODOWISKU GÓRNICZYM

Na podstawie zależności wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ od różnych parametrów środowiska pracy oraz wydatku energetycznego i odzieży sporządzono nomogram pozwalający wyznaczyć wskaźnik dyskomfortu cieplnego pracownika, a tym samym ocenić stan jego bezpieczeństwa pracy w środowiskach ciepłych i gorących. Aby zapewnić dostateczną przejrzystość nomogramu, składa się on z dziewięciu stron opracowanych dla różych wilgotności względnych powietrza od 20%÷100%, a poszczególne strony nomogramu oznaczone są jako rysunki: 30a ($\varphi \leq 20\%$); 30b($\varphi = 30\%$); .... 30i($\varphi = 100\%$). Nomogram składa się z czterech części rozmieszczonych wokół przecinających się osi poziomej i pionowej. Swoim wyglądem przypomina więc układ współrzędnych podzielony na cztery ćwiartki.

W ćwiartce pierwszej (początkowej) wstawiono pełny wykres (i;x) Molliera dla powietrza wilgotnego, dzięki któremu można określić stan i właściwości fizyczne powietrza w danym środowisku. W drugiej ćwiartce wyznaczono izolinie prędkości powietrza, natomiast na osi poziomej zaznaczono wartości temperatury efektywnej amerykańskiej. W trzeciej ćwiartce zaznaczono izolinie wydatku energetycznego pracowników nie ubranych, zaaklimatyzowanych i niezaaklimatyzowanych., Linie ciągłe odnoszą się do ludzi niezaaklimatyzowanych, linie przerywane do zaaklimatyzowanych . W ćwiartce czwartej na osi poziomej znajdują się wielkości wskaźnika dyskomfortu cieplnego. Linia skośna w tej ćwiartce służy od odwzorowania padających na nią prostych odniesienia z ćwiartki trzeciej na oś poziomą wskaźnika dyskomfortu cieplnego.

Nomogramy sporządzone są dla stanów, kiedy temperatura powierzchni ścian otaczających wyrobisko równa się temperaturze powietrza jako najczęściej spotykanych w kopalni. Korzystanie z nomogramu jest następujące. Na wykresie (i;x) Molliera, czyli w I ćwiartce nomogramu, rys. 30g($\varphi = 80\%$), znajdujemy punkt A odpowiadający parametrom fizycznym powietrza w danym

środowisku. Dla punktu A odczytujemy wilgotność powietrza φ i dobieramy nomogram odpowiadający tej wilgotności. Z punktu A' prowadzimy odnoszącą poziomą do punktu B znajdującego się na izolinii prędkości powietrza, którą znamy z pomiarów. Z punktu B prowadzimy odnoszącą pionową do punktu C, który znajduje się na izolinii odpowiedniego wydatku energetycznego w obszarze ćwiartki III, dla człowieka zaaklimatyzowanego i nie ubranego. Z punktu C prowadzimy odnoszącą poziomą do punktu D w ćwiartce IV i z tego punktu odnoszącą pionową do osi wskaźnika dyskomfortu cieplnego (punkt E) odczytując wskaźnik dyskomfortu cieplnego.

6. CZAS PRACY ROBOTNIKA W WARUNKACH DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

6.1. CZAS PRACY I CZAS WYPOCZYNKU PODCZAS DNIÓWKI ROBOCZEJ

Z tabeli 5 podającej wartości odniesienia wskaźnika WBGT porównane z wartościami granicznymi temperatury efektywnej amerykańskiej wynika, że człowiek może przebywać w środowisku gorącym, lecz nie pracować tylko odpoczywać, gdy ATE=35°C (osoba zaaklimatyzowana, nie ubrana) oraz gdy ATE=34°C (osoba niezaaklimatyzowana, nie ubrana). Powyższe temperatury stanowią więc granicę przebywania człowieka w gorących środowiskach pracy ze względu na bezpieczeństwo termiczne organizmu. Dla pracujących ludzi wartości granicznych temperatur efektywnych są niższe i zależą od wydatku energetycznego pracownika, czyli przyrostu metabolizmu związanego z pracą. W czasie zmiany roboczej pracownik może wykonywać pracę w sposób ciągły lub z przerwami przeznaczonymi na wypoczynek. Średni wydatek energetyczny pracownika pracującego z przerwami jest równy średniej ważonej wydatków energetycznych podczas pracy i wypoczynku w zależności od czasu tych czynności. Norma PN-85/N-08011 przewiduje planowane przerwy w pracy przeznaczone na wypoczynek przyjmując za podstawę czasu (cykle praca--wypoczynek) jedną godzinę. Przyjęta podstawa czasu równa 1 godzinie oznacza, że każda godzina pracy w czasie dniówki roboczej powinna być w odpowiednim stosunku podzielona na czas pracy i czas wypoczynku w środowisku o tych samych, czyli niezmienionych parametrach klimatycznych.

Przyjmując więc procentowy podział godziny roboczej na pracę i wypoczynek, możemy dla danego wydatku energetycznego organizmu odpowiadającego rodzajowi pracy obliczyć średni wydatek energetyczny pracownika w czasie jednogodzinnej pracy oraz wartość odniesienia wskaźnika ATE.

Wartości odniesienia (graniczne) wskaźnika ATE dla ludzi nie ubranych, zaaklimatyzowanych i niezaaklimatyzowanych oraz

ubranych w odzież o oporze 0,6 clo i 1 clo w zależności od cyklów pracy i wypoczynku podczas godziny roboczej, podano w tabeli 6. Wartości te wyznaczono z wykresów (rys.31 i rys.32) przedstawiających zależność granicznych wartości ATE od wydatku energetycznego pracownika dla ludzi zaaklimatyzowanych i niezaaklimatyzowanych. Wykresy te sporządzono opierając się na danych z tabeli 5 wg normy PN-85/N-08011. Krzywa I na obydwu wykresach odnosi się do ludzi bez odzieży, krzywa II - do ludzi, dla których opór cieplny odzieży wynosi 0,6 clo (koszula flanelowa z krótkimi rękawami i długie spodnie), krzywa III - do ludzi o oporze cieplnym odzieży 1 clo (koszula flanelowa z długimi rękawami, długie spodnie, bluza robocza). Rozszczepienie poszczególnych krzywych występujące przy wydatku energetycznym $M = 165\ W/m^2$ spowodowane jest zróżnicowaniem granicznej temperatury efektywnej amerykańskiej ATE w zależności od odczuwalnej i nieodczuwalnej prędkości przepływu powietrza. Wartości graniczne wskaźnika ATE oraz średni wydatek energetyczny pracownika podane w tabeli 6 powinny być dobierane dla wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego korzystając z zamieszczonych w pracy wykresów i nomogramów.

6.2. CZAS DNIÓWKI ROBOCZEJ

Aktualnie występują dniówki o pełnym i skróconym czasie pracy (8 godz. i 6 godz.). W górnictwie w pracach podziemnych dniówka robocza trwa 7,5 h i 6 h.

Czas trwania dniówki roboczej nie wpływa na wskaźnik dyskomfortu cieplnego oraz na klimatyczne warunki pracy odczuwane przez robotników. Jako podstawę obliczeniową czasu pracy przyjmuje się stosunkowo krótki okres pracy w ciągu zmiany, a mianowicie jedną godzinę. Jeżeli warunki klimatyczne, a więc wartość $ATE < ATE_{gran.}$ lub wskźnik dyskomfortu cieplnego ($\delta < 1$) pozwalają na ciągłą pracę o danym wydatku energetycznym w ciągu godziny, to praca taka może być wykonywana bez szkodliwego wpływu na organizm również w ciągu 6 i 8 godzin. Jeżeli natomiast warunki klimatyczne nie pozwalają na ciągłą pracę w czasie dniówki, to praca taka powinna być zakazana lub wpro-

wadzony powinien być planowany wypoczynek w każdej godzinie pracy. Podział każdej godziny dniówki na cykle praca-wypoczynek (tabela 6) zapewnia bezpieczeństwo pracy pracownikom ze względu na niedopuszczenie do przekroczenia temperatury wewnętrznej organizmu 38°C. Cykle praca-wypoczynek powinny występować w każdej godzinie pracy w ciągu zmiany 6- lub 8-godzinnej. Niedopuszczalne jest wykonywanie pracy bez przerw przeznaczonych na planowany wypoczynek przez kilka godzin kosztem skrócenia czasu dniówki. Takie postępowanie może prowadzić do przekroczenia bezpiecznego poziomu wartości wskaźników fizjologicznych organizmu, jak temperatury rektalnej (wewnętrznej), temperatury powierzchni skóry, częstotliwości tętna lub nadmiernej ilości wydzielonego potu.

Fizjolodzy przyjmują [4,24,26,29], że dzienna norma wydatku energetycznego dla pracownika w ciągu zmiany roboczej nie powinna przekraczać 2000*kcal*/8*h*. Przyjmując ponadto, że w środowiskach gorących, przy pracy w warunkach dyskomfortu występuje dodatkowe obciążenie termiczne organizmu polegające na przystosowywaniu się jego do trudnych warunków klimatycznych, skracanie czasu pracy do 6 godzin jest wskazane i uzasadnione. Wskazane i uzasadnione jest również stosowanie cykli (praca-wypoczynek) w czasie każdej godziny dniówki roboczej, przy czym znacznie korzystniejsze dla organizmu i regeneracji sił jest zorganizowanie tego wypoczynku w środowisku o parametrach komfortu cieplnego, czyli w komorach lub pomieszczeniach klimatyzowanych.

Wychodząc z założenia, że praca w środowiskach, dla których wskaźnik dyskomfortu cieplnego pracownika przewyższa wartość 1, jest zabroniona, powinno się stosować skrócony czas dniówki roboczej do 6 godzin już wtedy, gdy wskaźnik dyskomfortu δ jest zawarty pomiędzy 0,8 a 1.

Wartości graniczne temperatury efektywnej amerykańskiej ATE dla ludzi ubranych i nie ubranych, zaaklimatyzowanych i niezaaklimatyzowanych w zależności od wydatku energetycznego z uwzględnieniem pracy ciągłej i pracy z planowanymi przerwami

Tabela 6

Odzież	Rodzaj pracy	Charakter pracy podczas zmiany roboczej 8- lub 6-godz.	Wydatek energetyczny	Średni wydatek energet.	Wartość odniesienia (graniczna) ATE [°C] (ludzie zaaklimatyzowani)		Wartość odniesienia (graniczna) ATE [°C] (ludzie niezaaklimatyzowani)	
			M [W/m2]	$M_{śr}$ [W/m^2]	ATE_{gran} [°C]		ATE_{gran} [°C]	
spodnie, koszula flanelowa z długimi rękawami, bluza robocza) I_{cl} = 1 clo	Odpoczynek		M≤65		35		34	
	Praca lekka	praca ciągła	65 <M≤ 130	100	32		31	
		75% pracy, 25% wypoczynku	65 <M≤ 114	90	32,4		31,7	
		50% pracy, 50% wypoczynku	98 <M≤ 132	115	27,4		26,2	
		25% pracy, 75% wypoczynku	81 <M≤ 99	90	28,5		27,6	
	Praca ciężka				Nieodczuwalny ruch powietrza	Odczuwalny ruch powietrza	Nieodczuwalny ruch powietrza	Odczuwalny ruch powietrza
		praca ciągła	200 <M≤ 260	230	23	24	20	21
		75% pracy, 25% wypoczynku	166 <M≤ 211	188	25	25,3	22,8	23
		50% pracy, 50% wypoczynku	132 <M≤ 163	148	26,4	26,4	24,7	24,7
		25% pracy, 75% wypoczynku	99 <M≤ 114	106	27,7	27,7	26,6	26,6
	Praca bardzo ciężka	praca ciągła	M> 260		21	23	16	18
		75% pracy, 25% wypoczynku	M> 211		23,8	24,6	21,4	22
		50% pracy, 50% wypoczynku	M> 162		26	26	24,1	24,1
		25% pracy, 75% wypoczynku	M> 114		27,4	27,4	26,2	26,2

Wartości graniczne temperatury efektywnej amerykańskiej ATE dla ludzi ubranych i nie ubranych, zaaklimatyzowanych i niezaaklimatyzowanych w zależności od wydatku energetycznego z uwzględnieniem pracy ciągłej i pracy z planowanymi przerwami

Tabela 6

Odzież	Rodzaj pracy	Charakter pracy podczas zmiany roboczej 8- lub 6-godz.	Wydatek energetyczny	Średni wydatek energet.	Wartość odniesienia (graniczna) ATE [°C] (ludzie zaaklimatyzowani)		Wartość odniesienia (graniczna) ATE [°C] (ludzie niezaaklimatyzowani)	
			M [W/m2]	$M_{śr}$ [W/m^2]	ATE_{gran} [°C]		ATE_{gran} [°C]	
Ludzie nie ubrani I_{cl} = 0 clo	Odpoczynek		M≤65		35		34	
	Praca lekka	praca ciągła	65 <M≤ 130	100	32		31	
		75% pracy, 25% wypoczynku	65 <M≤ 114	90	32,4		31,7	
		50% pracy, 50% wypoczynku	65 <M≤ 98	82	33,0		32,5	
		25% pracy, 75% wypoczynku	65 <M≤ 81	73	34,3		33,2	
	Praca umiarkowana	praca ciągła	130 <M≤ 200	165	30		28	
		75% pracy, 25% wypoczynku	114 <M≤ 166	140	30,7		29,1	
		50% pracy, 50% wypoczynku	98 <M≤ 132	115	31,5		30,2	
		25% pracy, 75% wypoczynku	81 <M≤ 99	90	32,4		31,3	
	Praca ciężka				Nieodczuwalny ruch powietrza	Odczuwalny ruch powietrza	Nieodczuwalny ruch powietrza	Odczuwalny ruch powietrza
		praca ciągła	200 <M≤ 260	230	27	28	24	25
		75% pracy, 25% wypoczynku	166 <M≤ 211	188	29	29,2	26,8	27,3
		50% pracy, 50% wypoczynku	132 <M≤ 163	148	30,5	30,5	28,7	28,7
		25% pracy, 75% wypoczynku	99 <M≤ 114	106	31,7	31,7	30,5	30,5
	Praca bardzo ciężka	praca ciągła	M> 260		25	27	20	22
		75% pracy, 25% wypoczynku	M> 211		28	28,5	25,5	26
		50% pracy, 50% wypoczynku	M> 162		30	30	28,1	28,1
		25% pracy, 75% wypoczynku	M> 114		31,5	31,5	30,2	30,2
Ludzie ubrani (długie spodnie, koszula flanelowa z krótkimi rękawami) I_{cl} = 0,6 clo	Odpoczynek		M≤65		33		32	
	Praca lekka	praca ciągła	65 <M≤ 130	100	30		29	
		75% pracy, 25% wypoczynku	65 <M≤ 114	90	30,5		29,6	
		50% pracy, 50% wypoczynku	65 <M≤ 98	82	31		30,4	
		25% pracy, 75% wypoczynku	65 <M≤ 81	73	32		31,1	
	Praca umiarkowana	praca ciągła	130 <M≤ 200	165	28		26	
		75% pracy, 25% wypoczynku	114 <M≤ 166	140	28,6		27,1	
		50% pracy, 50% wypoczynku	98 <M≤ 132	115	29,4		28,2	
		25% pracy, 75% wypoczynku	81 <M≤ 99	90	30,5		29,6	
	Praca ciężka				Nieodczuwalny ruch powietrza	Odczuwalny ruch powietrza	Nieodczuwalny ruch powietrza	Odczuwalny ruch powietrza
		praca ciągła	200 <M≤ 260	230	25	26	22	23
		75% pracy, 25% wypoczynku	166 <M≤ 211	188	27	27,2	24,8	25,2
		50% pracy, 50% wypoczynku	132 <M≤ 163	148	28,4	28,4	26,8	26,8
		25% pracy, 75% wypoczynku	99 <M≤ 114	106	29,7	29,7	28,7	28,7
	Praca bardzo ciężka	praca ciągła	M> 260		23	25	18	20
		75% pracy, 25% wypoczynku	M> 211		25,8	26,5	23,4	24
		50% pracy, 50% wypoczynku	M> 162		28	28	26,2	26,2
		25% pracy, 75% wypoczynku	M> 114		29,4	29,4	28,2	28,2
Ludzie ubrani (długie spodnie, koszula flanelowa z długimi rękawami, bluza robocza) I_{cl} = 1 clo	Odpoczynek		M≤65		31		30	
	Praca lekka	praca ciągła	65 <M≤ 130	100	28		27	
		75% pracy, 25% wypoczynku	65 <M≤ 114	90	28,5		27,6	
		50% pracy, 50% wypoczynku	65 <M≤ 98	82	29,2		28,3	
		25% pracy, 75% wypoczynku	65 <M≤ 81	73	30,2		29,2	
	Praca umiarkowana	praca ciągła	130 <M≤ 200	165	26		24	
		75% pracy, 25% wypoczynku	114 <M≤ 166	140	26,6		25,1	
		50% pracy, 50% wypoczynku	98 <M≤ 132	115	27,4		26,2	
		25% pracy, 75% wypoczynku	81 <M≤ 99	90	28,5		27,6	
	Praca ciężka				Nieodczuwalny ruch powietrza	Odczuwalny ruch powietrza	Nieodczuwalny ruch powietrza	Odczuwalny ruch powietrza
		praca ciągła	200 <M≤ 260	230	23	24	20	21
		75% pracy, 25% wypoczynku	166 <M≤ 211	188	25	25,3	22,8	23
		50% pracy, 50% wypoczynku	132 <M≤ 163	148	26,4	26,4	24,7	24,7
		25% pracy, 75% wypoczynku	99 <M≤ 114	106	27,7	27,7	26,6	26,6
	Praca bardzo ciężka	praca ciągła	M> 260		21	23	16	18
		75% pracy, 25% wypoczynku	M> 211		23,8	24,6	21,4	22
		50% pracy, 50% wypoczynku	M> 162		26	26	24,1	24,1
		25% pracy, 75% wypoczynku	M> 114		27,4	27,4	26,2	26,2

6.3. DOPUSZCZALNY CZAS EKSPOZYCJI CZŁOWIEKA W ŚRODOWISKU GORĄCYM

Dopuszczalny czas ekspozycji człowieka w środowisku gorącym należy obliczać według normy PN-88/N-08008 pt.:"Analityczne określenie i interpretacja stresu cieplnego oparte na podstawie obliczenia wymaganej ilości potu", będącej tłumaczeniem normy międzynarodowej ISO 7933. Przedmiotem normy jest interpretacja stresu cieplnego, jaki działa na człowieka w środowisku gorącym. W normie podano opis metody obliczania równowagi termicznej organizmu oraz metody obliczania ilości potu, jaką człowiek powinien wydzielić, aby utrzymać równowagę termiczną swego ciała. Podstawowymi kryteriami w obliczeniach przyjęto wymaganą ilość potu, wymagane nawilgocenie skóry, maksymalną akumulację ciepła w organizmie oraz maksymalne, możliwe do przyjęcia, odwodnienie organizmu. Dla wszystkich powyższych parametrów wyznaczono wartości odniesienia. Podane w normie obliczenia pozwalają wyznaczyć dopuszczalny czas ekspozycji "DLE" człowieka w środowiskach gorących zarówno w stanie odpoczynku, jak i podczas pracy ciągłej lub z przerwami.

Metoda analitycznego określania stresu cieplnego zawarta w normie PN-88/N-08008 może być stosowana, jak podano w jej wstępie, jako uzupełnienie metody opartej na wskaźniku WBGT [48], gdy wartości uzyskane w wyniku tego pierwszego przybliżenia przekraczają określone wartości odniesienia.

W gorących środowiskach górniczych, dla których wprowadzony w niniejszej pracy wskaźnik dyskomfortu cieplnego $\delta \geq 1$, należy wykonać obliczenia dopuszczalnego czasu ekspozycji pracownika według normy PN-88/N-08008. W takich środowiskach konieczna może być bowiem praca ratowników górniczych w przypadku ratowania ludzi lub zmniejszenia strat ekonomicznych kopalni.

7. ZASTOSOWANIE WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO DO OCENY WARUNKÓW KLIMATYCZNYCH W ŚRODOWISKACH PRACY

7.1. PRZYKŁADY OCENY KLIMATYCZNYCH WARUNKÓW PRACY W ŚRODOWISKACH GÓRNICZYCH NA PODSTAWIE WSKAŹNIKA DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

W celu lepszego pokazania sposobu oceny warunków klimatycznych w kopalniach głębokich na podstawie wskaźnika dyskomfortu cieplnego przedstawiono trzy przykłady analizy mikroklimatu w przodkach ścianowych, chodnikowych i przekopach w kopalni węgla i miedzi.

Przykład I

Przodek ścianowy zmechanizowany, głębokość 950 m,	$t_s = t_{pr}$	
Temperatura powietrza	$t_s = 30°C$	
Temperatura termometru wilgotnego	$t_w = 27,2°C$	
Wilgotność powietrza	$\varphi = 80\%$	
Prędkość przepływu powietrza	$w = 1\ m/s$	
Ludzie bez odzieży	$I_{cl} = 0$	
Wydatek energetyczny	$M = 165\ W/m^2$	
Wskaźnik dyskomfortu cieplnego	$\delta = 0,72$	Ludzie niezaakl.
Wskaźnik dyskomfortu cieplnego	$\delta = 0,57$	Ludzie zaaklim.
Amerykańska temperatura efektywna	$ATE = 25,8°C$	
	$PMV = 2,66$	
	$PPD = 90\%$	

W przodku tym ($\delta < 0,8$) dopuszczalny jest 8-godzinny dzień pracy.

Przykład II

Przodek węglowy, ślepy. Drążony chodnik nadścianowy, wentylacja lutniowa tłocząca, głębokość 550 m, $t_s = t_{pr}$

Temperatura powietrza	$t_s = 27°C$
Temperatura termometru wilgotnego	$t_w = 25,6°C$
Wilgotność powietrza	$\varphi = 90\%$
Prędkość przepływu powietrza	$w = 0,3\ m/s$

Ludzie bez odzieży	$I_{cl} = 0$	
Wydatek energetyczny	$M = 165\ W / m^2$	
Wskaźnik dyskomfortu cieplnego	$\delta = 0,62$	Ludzie niezaakl.
Wskaźnik dyskomfortu cieplnego	$\delta = 0,50$	Ludzie zaaklim.
Amerykańska temperatura efektywna	$ATE = 24,8°C$	
	$PMV = 1,82$	
	$PPD = 70\%$	

W przodku tym może być 8-godzinny dzień pracy.

Przykład III

Przodek komorowy na głębokości 800 m,		
w kopalni miedzi,	$t_s = t_{pr}$	
Temperatura powietrza	$t_s = 31,6°C$	
Temperatura termometru wilgotnego	$t_w = 29,4°C$	
Wilgotność powietrza	$\varphi = 85\%$	
Prędkość przepływu powietrza	$w = 0,3\ m / s$	
Ludzie bez odzieży	$I_{cl} = 0$	
Wydatek energetyczny	$M = 165\ W / m^2$	
Wskaźnik dyskomfortu cieplnego	$\delta = 1,18$	Ludzie niezaakl.
Wskaźnik dyskomfortu cieplnego	$\delta = 0,94$	Ludzie zaaklim.
Amerykańska temperatura efektywna	$ATE = 29,2°C$	
	$PMV = 3,4$	
	$PPD = 100\%$	

Warunki klimatyczne bardzo trudne. Ze względu na zmniejszenie ryzyka przekroczenia dopuszczalnej wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego praca powinna być prowadzona z planowymi przerwami w każdej godzinie roboczodniówki. Obowiązywać powinien 6-godzinny dzień pracy. Pracować w tym przodku powinni tylko ludzie zaaklimatyzowani. Dla ludzi niezaaklimatyzowanych praca w tych warunkach jest niedopuszczalna, gdyż wskaźnik dyskomfortu cieplnego jest większy od 1.

7.2. WSKAŹNIK DYSKOMFORTU CIEPLNEGO JAKO PARAMETR NORMOWANIA PRACY W GÓRNICTWIE I W GORĄCYCH DZIAŁACH PRZEMYSŁU

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ uwzględniający parametry klimatyczne powietrza i otoczenia oraz obciążenie fizyczne i cieplne organizmu człowieka powinien być elementem określającym czas i rodzaj pracy w środowiskach gorących. Na podstawie tego wskaźnika może być przeprowadzone normowanie prac fizycznych. Podstawowym kryterium oceny warunków klimatycznych powinno być założenie, że praca w środowiskach gorących dopuszczalna jest tylko wtedy, gdy wskaźnik dyskomfortu cieplnego jest mniejszy od 1.

Dotychczasowa polska norma klimatyczna obowiązująca w kopalniach [rozdział 3.1.] nie uwzględnia wielu parametrów mających wpływ na warunki klimatyczne w przodkach, a mianowicie: wilgotności powietrza, prędkości przepływu powietrza, wydatku energetycznego pracowników, średniej temperatury promieniowania otoczenia, oporu cieplnego odzieży, stopnia aklimatyzacji pracowników. Z tego też powodu dla niektórych warunków klimatycznych panujących w przodkach kopalń głębokich jest zbyt rygorystyczna, dla innych zaś zbyt łagodna. Posiada ona jednak wielką i cenną zaletę, a mianowicie jest bardzo prosta do zrozumienia i bardzo łatwa do wyznaczenia. Istnieją jednak takie miejsca pracy, w których ze względu na dużą wilgotność i małą prędkość przepływu powietrza aktualna norma klimatyczna nie chroni człowieka przed niebezpieczeństwem termicznym, a dla środowisk w kopalniach soli (mała wilgotność powietrza), jest błędna.

Wprowadzenie do normy klimatycznej obowiązku określenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego i przeprowadzenie analizy warunków klimatycznych na podstawie tego wskaźnika znacznie uelastyczniłoby taką normę klimatyczną i uczyniłoby ją przydatną we wszystkich miejscach pracy, nawet w takich specyficznych środowiskach , jakimi są:

- kopalnie soli, gdzie występuje mała wilgotność powietrza,

- środowiska w pobliżu pól pożarowych, gdzie występują wysokie temperatury promieniowania otoczenia,
- środowiska górnicze, w których występują duże prędkości przepływu powietrza.

Proponuje się więc, by polska norma klimatyczna obowiązująca w górnictwie posiadała następującą treść :

- W środowiskach ciepłych, w których wskaźnik dyskomfortu cieplnego pracownika wyznaczony dla odpowiedniego rodzaju pracy przewyższa wartość jedności, praca powinna być zabroniona.

$\delta \geq 1$ - praca zabroniona

Jeżeli w środowiskach wskaźnik dyskomfortu cieplnego pracownika jest mniejszy od 1 - praca może być prowadzona bez względu na temperaturę suchą powietrza, przy czym gdy wskaźnik dyskomfortu cieplnego jest mniejszy od 0,8, praca może się odbywać w pełnym wymiarze czasu, gdy wskaźnik dyskomfortu cieplnego jest większy od 0,8 i mniejszy od 1, powinien obowiązywać skrócony czas pracy do 6 godzin.

Projekt nowej normy klimatycznej można więc napisać w postaci skróconej;

$\delta \geq 1$ - praca zabroniona,

$\delta < 1$ - praca dopuszczalna bez względu na temperaturę powietrza,

$0{,}8 \leq \delta < 1$ - skrócony czas pracy do 6 godzin,

$\delta < 0{,}8$ - normalny czas pracy.

Wyznaczenie wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ należy wykonywać w środowiskach, w których temperatura mierzona termometrem suchym jest większa od 25°C. W przedziale temperatur 28°C ÷ 33°C pomiary wskaźnika dyskomfortu cieplnego powinno się przeprowadzać co tydzień. Dla środowisk o temperaturze suchej większej od 33°C pomiar i obliczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego wskazane jest prowadzić codziennie lub w sposób ciągły.

LITERATURA

1. Andrjuszczenko W.N. - Normalizacja mikroklimatu w glubokoj szachtie. Donbas, Donieck 1976.
2. Belding H.S. and Hatch T.F. - Index for Evaluating Heat Stress in Terms of Resulting Physiological Strains. Heating, Piping & Air Conditioning, August 1955.
3. Buraczewski Cz. - Wymiana ciepła przez promieniowanie w komorze tworzącej układ otwarty wypełnionej gazem rzeczywistym o określonej emisji. PWN, Warszawa 1965.
4. Dobrzański I. - Normowanie pracy fizycznej w gorących działach przemysłu. Inst. Wyd. CRZZ, Warszawa 1975.
5. Drenda J. - Analiza optymalnych warunków klimatycznych w kopalni w oparciu o równanie komfortu cieplnego Fangera. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie, nr 2, 1976.
6. Drenda J. - Określenie i pomiar średniej temperatury promieniowania w wyrobisku górniczym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej z. 99, Gliwice 1979.
7. Drenda J. - Über eine Verfahrensweise zur Kühlung von Fahrerkabinen im Grubenwagen durch Dieselmotoren angetrieben. 4-th IBMT Sessien, United Kingdom, May 1985.
8. Drenda J. - Analiza i ocena dyskomfortu cieplnego pracowników w środowiskach kopalń głębokich. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej seria Górnictwo z. 188, Gliwice 1990.
9. Elsner N., Kraft G. - Lehrbuch der Heizungs-Lüftungs und Klimatechnik, Verlag T. Steinkopff Dresden tom II, 1973.
10. Fanger P.O. - Komfort cieplny. Wyd. Arkady, Warszawa 1974.
11. Fibinger W., Rogoziński A. - Koszt energetyczny pracy. Instytut Wydawniczy CRZZ, Warszawa 1977.
12. Frycz A. - Klimatyzacja kopalń. Wyd. Śląsk, Katowice 1969.
13. Frycz A., Drenda J. - Normirowanije prodołżitielnosti raboty w tiażołych klimaticzeskich usłowiach na głubokich szachtach. Zbiór referatów z "Sympozjum ve vede a technice". Hornicka Pribram, Przybram 1981.
14. Frycz A., Drenda J. - Ocena warunków klimatycznych w kopalni w oparciu o wskaźnik dyskomfortu cieplnego. Referat wygłoszony na Seminarium XV Tydzień Techniki ROW 1989 oraz opublikowany w Wiadomościach Górniczych nr 1, 1990.
15. Frycz A., Drenda J., Kolarczyk M., Magiera M. - Określenie zakresu i efektywności regulacji parametrów komfortu cieplnego w oddziałach eksploatacyjnych za pomocą zmian intensywności przewietrzania. Praca Instytutu Techniki Eksploatacji Złóż Politechniki Śląskiej, Gliwice 1988 (nie opublikowana).

16. Frycz A., Drenda J. - Wpływ ciepła promieniowania na komfort pracy górników. Referat wygłoszony na Międzynarodowej Sesji Biura Fizyki Cieplnej. Plowdiw 1983 (nie opublikowany).
17. Frycz A. - Zagadnienie regulacji temperatury ciała ludzkiego w warunkach klimatycznie trudnych. Przegląd Górniczy 1963, nr 7÷8.
18. Jones W. - Klimatyzacja. Arkady, Warszawa 1981.
19. Kącki E. - Termokinetyka. WNT, Warszawa 1966.
20. Klonowicz S., Kozłowski S. - Człowiek a środowisko termiczne. Państ. Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa 1970.
21. Kozłowski S. - Granice przystosowania. WP, Warszawa 1986.
22. Kollmar A., Liese A. - Die Strahlungsheizung. Wyd. 4 Oldenburg. München 1957.
23. Lambrechts J. - A critical comparison of specific cooling power and the wet kata thermometer in hot mining environment. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. December 1972.
24. Lehman G. - Praktyczna fizjologia pracy. PWT, Warszawa 1960.
25. Leithead C.S., Lind A.R. - Heat stress and heat disorders. Cassell-London 1964.
26. Łotach H. - Mikroklimat pomieszczeń roboczych. Inst. Wyd. CRZZ, Warszawa 1976.
27. Mitchell D., Whiller A. - Cooling power of underground environments. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, October 1971.
28. Ocisik M. - Słożnyj tiepłoobmien. Mir, Moskwa. Oldenburg 1976.
29. Rogoziński A. - Ciężka praca fizyczna. Inst. Wyd. CRZZ, Warszawa 1973.
30. Schulze J. - Untersuchungen über die grenze zumutbarer Belastungen des Menschen durch Klima und Arbeit im Steinkohlenbergbau. Glückauf Forschungshefte nr 4 1970.
31. Siegel R., Howell J. - Thermal radiation heat transfer. Mc Graw-Hill Book Company 1972.
32. Spioch F. - Wpływ mikroklimatu w kopalniach na stan zdrowia, wydajność i bezpieczeństwo pracy górników. Chłodnictwo z. 8-9, 1976.
33. Spioch F., Nowara M. - Wydatek energetyczny górników i pracowników przemysłu ciężkiego. Medycyna Pracy XXVI, 1975, 5.
34. Stewart J. - Heat transfer and limiting physiological critaria as a basis for the setting of heat stress limits. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, August 1981.
35. Turkiewicz W. - Propozycja nowego wskaźnika oceny warunków klimatycznych w kopalnich LGOM. Cuprum 1986 nr 3-4.

36. Vogt J., Candas J. i inni - Required sweat rate as an index of thermal strain in industry. Bioengineering Thermal Physiology and Comfort edited by Cena K. and Clark J. Volume 10, 1981.
37. Voß J. - Grubenklima. Verlag Glückauf GmbH, Essen 1981.
38. Wenzel H.G. - Physiologically equivalent combinations of elevated environmental temperature and air humidity, Mine Ventilation Congress, Johannesburg 1975.
39. 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).
40. Wenzel H.G., Forsthoff A. - Modification of Vernon's globe thermometer and its calibration in therms of physiological strain. Scand J Work Environ Health, 1989; 15(suppl 1).
41. Wenzel H.G. - Arbeit in sehr heißen, trockenen Klimaten: Bewertung der Belastung und Verfahren zur Reduktion der Beanspruchung des menschlichen Körpers. Zeitschrift gesamte Hygiene 36. 1990 Heft 6.
42. Wenzel H.G., Piekarski C. - Klima und Arbeit. Bayerisches Staatsministerium für Arbeit und Sozialordnung. 4 Aufl. München 1984.
43. Wenzel H.G. - Erkrankungen durch Einwirkungen von Hitze und Kälte. Georg Thieme Verlag Stuttgart. New York 1991.
44. Weuthen P. - Bewertung und Messung des Klimas oberhalb des Behaglichkeitsbereiches. Kältetechnik-Klimatisierung. 23 Jahrgang. Heft 11/1971.
45. Wiśniewski S. - Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979.
46. Ziobro E. - Praca w środowisku wysokich temperatur. Inst. Wyd. CRZZ, Warszawa 1972.

Normy i przepisy

47. ISO/DIS 9886 Ergonomics - Evaluation of thermal strain by physiological measurements, 1989-11-30.
48. PN-85/N-08011 (tłum. z ISO 7243-1982) Środowiska gorące. Wyznaczanie obciążeń termicznych działających na człowieka w środowisku pracy, oparte na wskaźniku WBGT.
49. PN-85/N-08013 (tłum. z ISO 7730-1984) Środowiska termiczne umiarkowane. Określenie wskaźników PMV, PPD i wymagań dotyczących komfortu termicznego.
50. PN-85/N-08016 (tłum. z ISO 7726-1985) Środowiska termiczne. Przyrządy i metody pomiaru wielkości fizycznych.
51. PN-88/N-08008 (tłum. z ISO 7933-1988) Środowiska gorące. Analityczne określenie i interpretacja stresu cieplnego oparte na podstawie obliczenia wymaganej ilości potu.

52. PN-90/N-08017 Środowiska gorące. Analityczne określenie i interpretacja stresu cieplnego w warunkach stosowania odzieży ochronnej na podstawie obliczania ilości potu.
53. Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung-KlimaBerg) Juni 1983.
54. Szczegółowe przepisy prowadzenia ruchu i gospodarki złożem w podziemnych zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny i brunatny. Ministerstwo Górnictwa i Energetyki. Katowice 1984.

DYSKOMFORT CIEPLNY W ŚRODOWISKACH PRACY KOPALŃ GŁĘBOKICH

Streszczenie

W pracy podano nową metodę oceny warunków klimatycznych w środowiskach pracy opartą na bezwymiarowym wskaźniku dyskomfortu cieplnego δ. Wychodząc z równania bilansu cieplnego podano sposoby i wzory wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem uwzględniając parametry fizyczne powietrza i otoczenia, wydatek energetyczny pracownika, ubiór oraz stan aklimatyzacji. Przedstawiono podstawowe założenia teorii komfortu cieplnego Fangera zamieszczając równanie i krzywe komfortu cieplnego. Przyjmując graniczne dopuszczalne wartości wskaźnika WBGT, tzw. wartości odniesienia, według międzynarodowej normy ISO 7243-1982 i jej tłumaczenia na język polski PN 85/N-08011 oraz założenie, że w warunkach, gdy temperatura powietrza jest równa temperaturze promieniowania otoczenia, wskaźnik WBGT jest porównywalny z efektywną temperaturą amerykańską, zdefiniowano strefę dyskomfortu cieplnego jako obszar pomiędzy komfortem cieplnym panującym w danym środowisku reprezentowanym przez krzywą komfortu cieplnego a izolinią wartości odniesienia wskaźnika ATE (amerykańska temperatura efektywna). Dla małych wilgotności względnych powietrza ($\varphi < 20\%$) strefa dyskomfortu cieplnego została ograniczona do izolinii stałej temperatury termometru suchego, jaką przyjmowała niezmienna wartość odniesienia wskaźnika ATE dla wilgotności 20%. Założenie to zostało przyjęte opierając się na analogii do wyników badań prof. H.G. Wenzla.

Podano definicję wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ oraz zakres jego stosowania:

$\delta = 0$ - komfort cieplny,

$0 < \delta < 1$ - dyskomfort cieplny bezpieczny dla zdrowia,

$\delta \geq 1$ - dyskomfort cieplny niebezpieczny dla zdrowia.

Na wykresach i nomogramach pokazano zależności wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ od parametrów fizycznych powietrza, jak

temperatury, wilgotności i prędkości przepływu, od średniej temperatury promieniowania otoczenia, wydatku energetycznego, oporu cieplnego odzieży. Przedstawiono nomogramy zbiorcze służące do wyznaczania wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla człowieka nie ubranego.

Podano sposoby normowania czasu pracy i wypoczynku człowieka podczas dniówki roboczej prowadzące do zmniejszenia wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego.

Wywody teoretyczne poparto przykładami oceny warunków klimatycznych w środowiskach kopalnianych na podstawie wskaźnika dyskomfortu cieplnego.

Przedstawiono również projekt normy klimatycznej dla kopalń z uwzględnieniem wskaźnika dyskomfortu cieplnego w postaci:

$\delta \geq 1$ praca zabroniona,

$\delta < 1$ praca dopuszczalna,

$0{,}8 \leq \delta < 1$ skrócony czas pracy do 6 godzin,

$\delta < 0{,}8$ normalny czas pracy.

THERMAL DISCOMFORT IN WORKING ENVIRONMENTS OF DEEP MINES

Summary

In this dissertation a new method of evaluating climatic conditions in working environments based on the dimensionless index δ of thermal discomfort is described. Resulting from the thermal balance equation ways and formulas of heat transfer between a man and his environment including the air and the environment physical parameters, worker energy production, clothing and a state of acclimatization are given. Basic assumptions of Fanger's thermal comfort theory with the thermal comfort equation and curves are shown. Taking limiting admissible values of WBGT index, so-called reference value according to ISO standard 7243-1982 and its translation into Polish i.e. PN 85/N-08011 and assuming that in conditions of air temperature being equal to ambient radiant temperature, WBGT index is comparable to American Effective Temperature the area of thermal discomfort has been defined as the area between thermal comfort in the specific environment represented by the thermal comfort curve and the reference value isoline of ATE index (American Effective Temperature). For low relative humidities ($\varphi < 20\%$) thermal discomfort area has been limited to the constant temperature isoline of dry-bulb thermometer that invariable reference value of ATE has taken for 20% humidity. Acceptance of this assumption has been based on the analogy of the results of the studies by prof. H.G. Wenzel.

The definition of the thermal discomfort index δ and the range of its usage is provided:

$\delta = 0$ thermal comfort

$0 < \delta < 1$ thermal discomfort safe for health

$\delta \geq 1$ thermal discomfort dangerous for health.

Relationship between the thermal discomfort index δ and such air physical parameters as temperature, humidity and flow velocity to mean ambient radiant temperature, energy production, clothing insulation is shown on diagrams and nomograms.

Summary nomograms for calculating the thermal discomfort index of unclothed man are presented.

Methods of work and rest time estimation during a day's work leading to decreasing of the thermal discomfort index are explained.

Theoretical reasoning is supported by examples of climatic conditions evaluation in mining environment based on the thermal discomfort index.

The proposal of climatic standard for mines has been presented on the basis of the thermal discomfort index in the following form:

$\delta \geq 1$ work is forbidden
$\delta < 1$ work is permitted
$0,8 \leq \delta < 1$ reduced time of work up to 6 hours
$\delta < 0,8$ normal time of work.

ТЕПЛОВОЙ ДИСКОМФОРТ В РАБОЧИХ СРЕДАХ ГЛУБОКИХ ШАХТ

Резюме

В разработке представляется метод оценки климатических условий в рабочих средах основан на безразмерном показателе теплового дискомфорта. Исходя из уравнения теплового баланса даются способы и уравнения обмена тепла между человеком а окружающей средой, с учётом физических параметров воздуха и окружения (окружающих стен), энергетических затрат рабочего, одежды и степени акклиматизации.

Представляются основные положения теории теплового комфорта Фангера, с добавлением уравнения и кривых теплового комфорта. Принимая предельные, допустимые значения показателя WBGT, тн. относительные значения, за международной нормой ISO 7243–1982 и её переводом на польский язык PN 85/N–08011, а также предположение, что в условиях, когда температура воздуха равна температуре излучения окружающей среды, показатель WBGT равен эффективной американской температуре, определяется зона теплового дискомфорта, как пространство между тепловым комфортом существующим в данной среде представляемым кривой теплового комфорта и изолиней значения отнесения (предельного значения) показателя АТЭ (американской эффективной температурой). Для малых относительных влажностей воздуха (Ф<20%) зона теплового дискомфорта была ограничена до изолинии постоянной температуры сухого термометра какую принимало неизменное значение отнесения показателя АТЭ при влажности 20%. Предпосылка эта была принята на основании результатов испытаний Проф. H.G. Wenzla.

Представляется дефиниця показателя теплового дискомфорта δ а также область его применения:

$\delta = 0$ – тепловой комфорт

$0<\delta<1$ – тепловой дискомфорт безопасен для здоровья

$\delta \geq 1$ – тепловой дискомфорт опасен для здоровья

На графиках и номограммах указывается зависимость показателя теплового дискомфорта δ от физических параметров воздуха таких как: температура, влажность, скорость его движения, от средней температуры излучения окружающей среды, затрат энергии рабочего, теплового сопротивления одежды. Представляются совокупные номограммы служающиеся опеделению показателя теплового дискомфорта для человека неодетого.

Представляются методы нормирования времени работы и отдыха человека в течение рабочего дня приводящие к уменьшению значения показателя теплового дискомфорта.

Теоретические выводы сопровождаются примерами оценки климатических условий в шахтных средах на основании показателя теплового дискомфорта.

Даётся тоже проект климатической нормы для шахт с учётом показателя теплового дискомфорта.

$\delta \geq 1$ – работа запрещенная

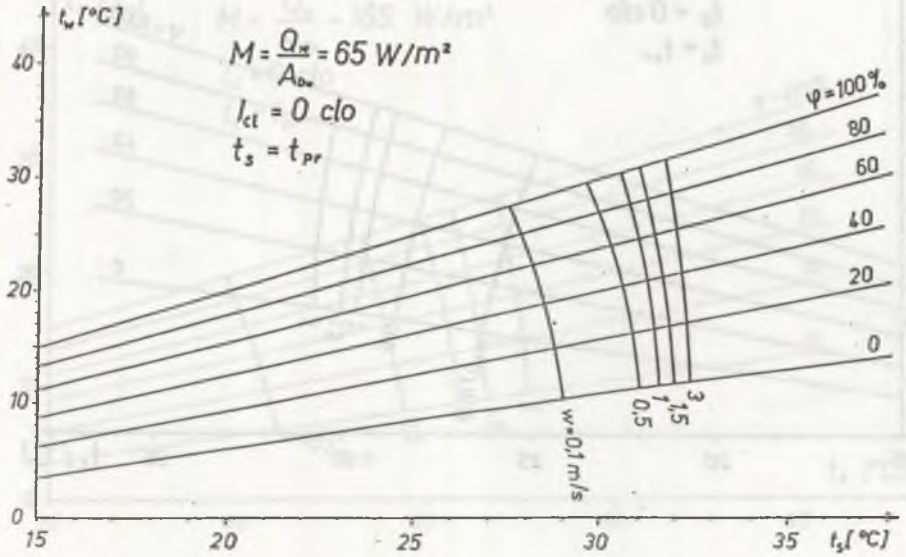
$\delta < 1$ – работа допустимая

$0{,}8 \leq \delta < 1$ – сокращенное время работы до 6 часов

$\delta < 0{,}8$ – нормальное время работы.

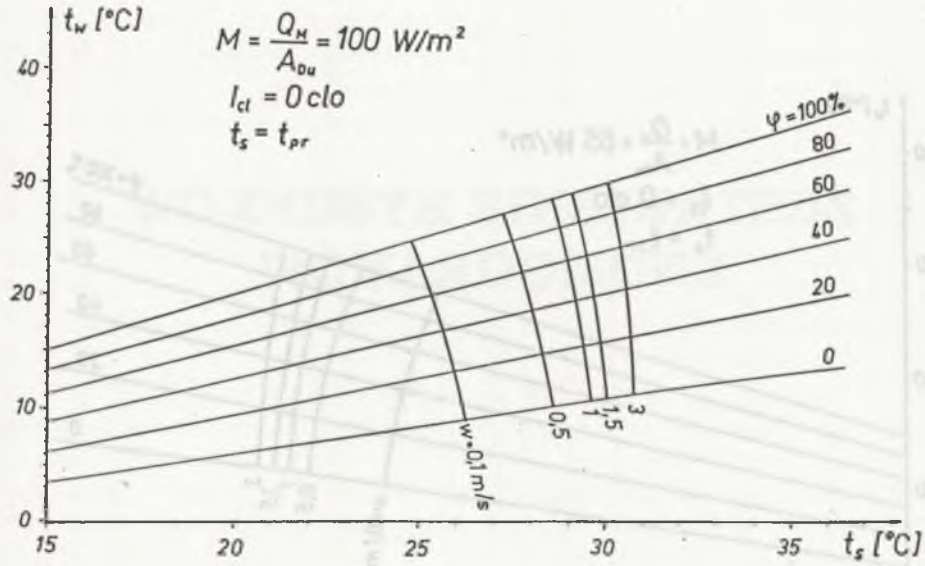
ТЕПЛОВОЙ ДИСКОМФОРТ В РАБОЧИХ СРЕДАХ ГЛУБОКИХ ШАХТ

ZESTAWIENIE RYSUNKÓW I NOMOGRAMÓW



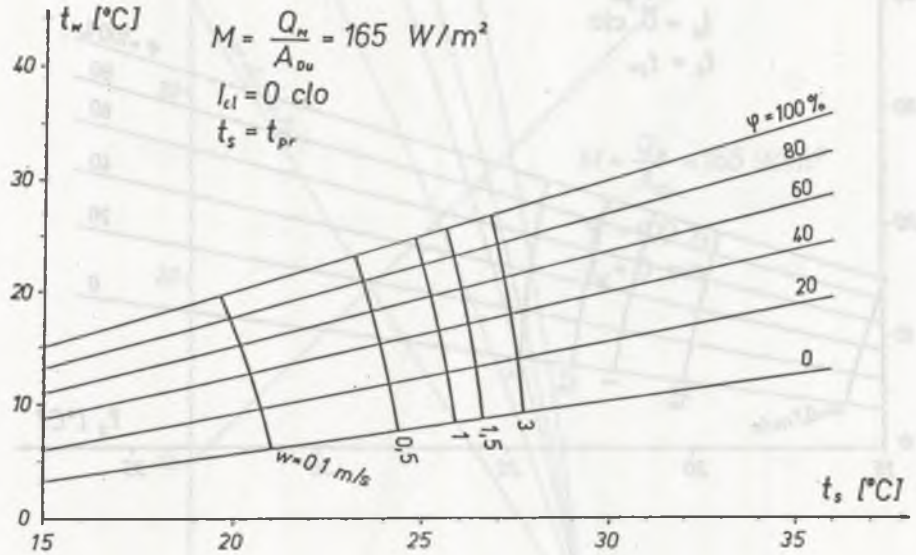
Rys. 1. Krzywe komfortu cieplnego Fangera w układzie współrzędnych temperatura termometru suchego i temperatura termometru wilgotnego (t_s,t_w) dla wydatku energetycznego $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 65\ W/m^2$ (odpoczynek), temperatury powietrza równej temperaturze promieniowania otoczenia (t_s=t_{pr}), człowieka nie ubranego (I_{cl}=0 clo)

Fig. 1. Fanger's thermal comfort curves in diagram representing relationship between: dry-bulb thermometer temperature and wet-bulb thermometer temperature (t_s,t_w) for energy production $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 65\ W/m^2$ (rest), air temperature is equal to ambient radiant temperature (t_s=t_{pr}), undressed man (I_{cl}=0 clo)



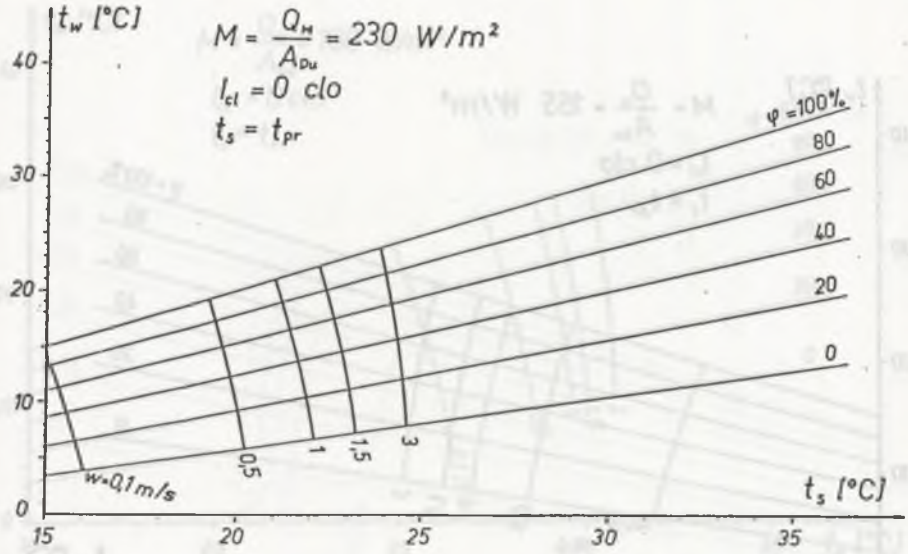
Rys. 2. Krzywe komfortu cieplnego Fangera w układzie współrzędnych temperatura termometru suchego i temperatura termometru wilgotnego (t_s,t_w) dla wydatku energetycznego $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 100\ W/m^2$ (praca lekka), temperatury powietrza równej temperaturze promieniowania otoczenia (t_s=t_{pr}), człowieka nie ubranego (I_{cl}=0 clo)

Fig. 2. Fanger's thermal comfort curves in diagram representing relationship between: dry-bulb thermometer temperature and wet-bulb thermometer temperature (t_s,t_w) for energy production $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 100\ W/m^2$ (easy work), air temperature is equal to ambient radiant temperature (t_s=t_{pr}), undressed man (I_{cl}=0 clo)



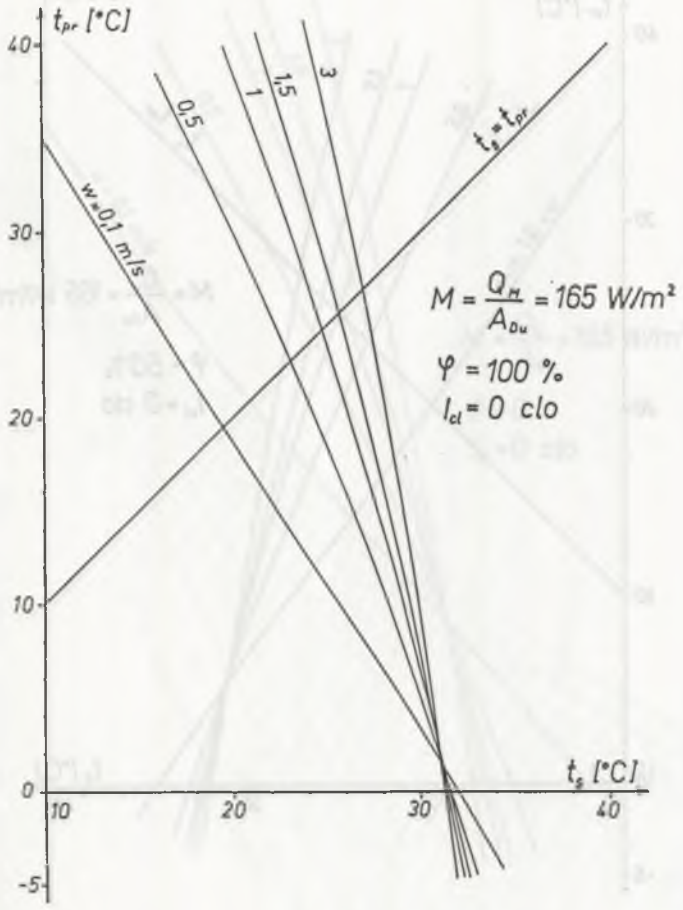
Rys. 3. Krzywe komfortu cieplnego Fangera w układzie współrzędnych temperatura termometru suchego i temperatura termometru wilgotnego (t_s,t_w) dla wydatku energetycznego $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$ (praca umiarkowana), temperatury powietrza równej temperaturze promieniowania otoczenia (t_s=t_{pr}), człowieka nie ubranego (I_{cl}=0 clo)

Fig. 3. Fanger's thermal comfort curves in diagram representing relationship between: dry-bulb thermometer temperature and wet-bulb thermometer temperature (t_s,t_w) for energy production $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$ (moderate work), air temperature is equal to ambient radiant temperature (t_s=t_{pr}), undressed man (I_{cl}=0 clo)



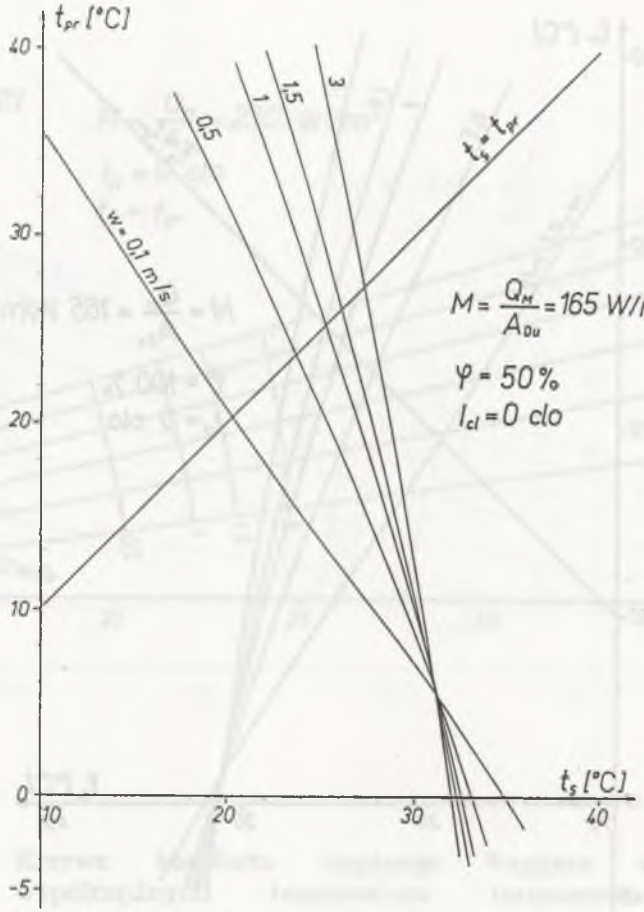
Rys. 4. Krzywe komfortu cieplnego Fangera w układzie współrzędnych temperatura termometru suchego i temperatura termometru wilgotnego (t_s,t_w) dla wydatku energetycznego $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 230\ W/m^2$ (praca ciężka), temperatury powietrza równej temperaturze promieniowania otoczenia (t_s=t_{pr}), człowieka nie ubranego (I_{cl}=0 clo)

Fig. 4. Fanger's thermal comfort curves in diagram representing relationship between: dry-bulb thermometer temperature and wet-bulb thermometer temperature (t_s,t_w) for energy production $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 230\ W/m^2$ (hard work), air temperature is equal to ambient radiant temperature (t_s=t_{pr}), undressed man (I_{cl}=0 clo)



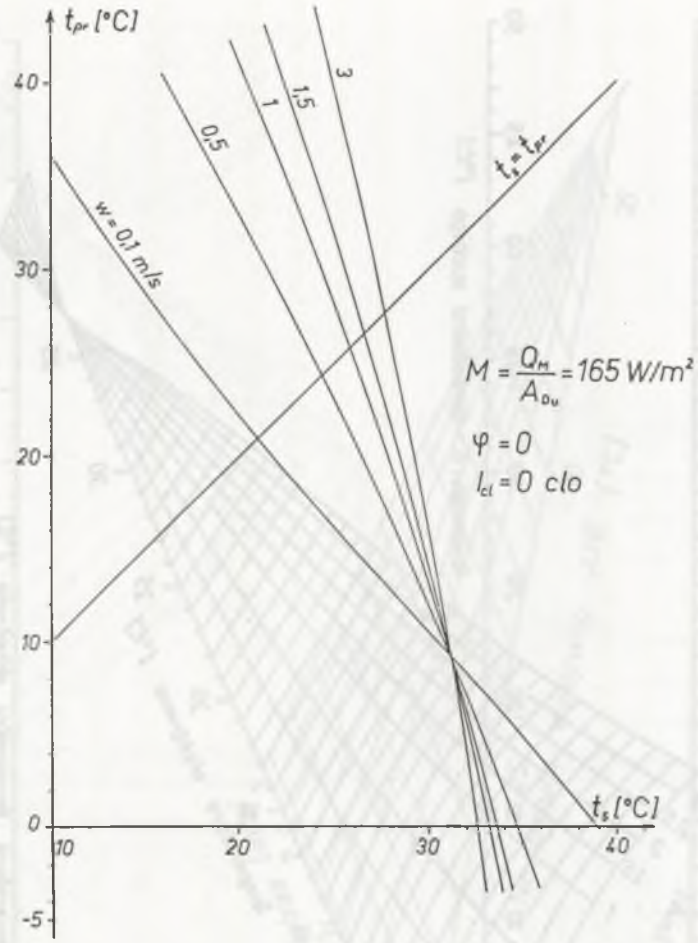
Rys. 5. Krzywe komfortu cieplnego Fangera w układzie współrzędnych temperatura powietrza i średnia temperatura promieniowania otoczenia (t_s,t_{pr}) dla wydatku energetycznego $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$ (praca umiarkowana), wilgotności powietrza $\varphi = 100\%$, człowieka nie ubranego (I_{Cl}=0 clo)

Fig. 5. Fanger's thermal comfort curves in diagram representing relationship between: air temperature and mean ambient radiant temperature (t_s,t_{pr}) for energy production $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$ (moderate work), relative humidity $\varphi = 100\%$, undressed man (I_{Cl}=0 clo)



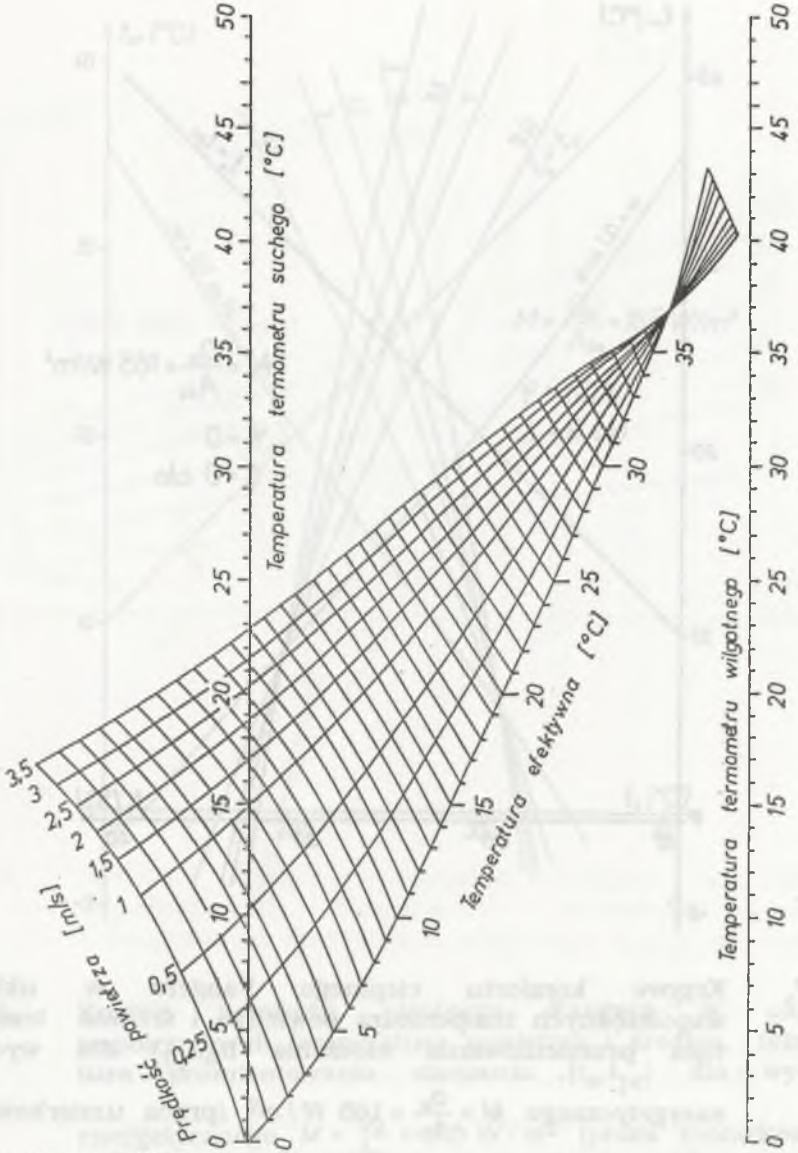
Rys. 6. Krzywe komfortu cieplnego Fangera w układzie współrzędnych temperatura powietrza i średnia temperatura promieniowania otoczenia (t_s,t_{pr}) dla wydatku energetycznego $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$ (praca umiarkowana), wilgotności powietrza $\varphi = 50\%$, człowieka nie ubranego (I_{cl}=0 clo)

Fig. 6. Fanger's thermal comfort curves in diagram representing relationship between: air temperature and mean ambient radiant temperature (t_s,t_{pr}) for energy production $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$ (moderate work), relative humidity $\varphi = 50\%$, undressed man (I_{cl}=0 clo)



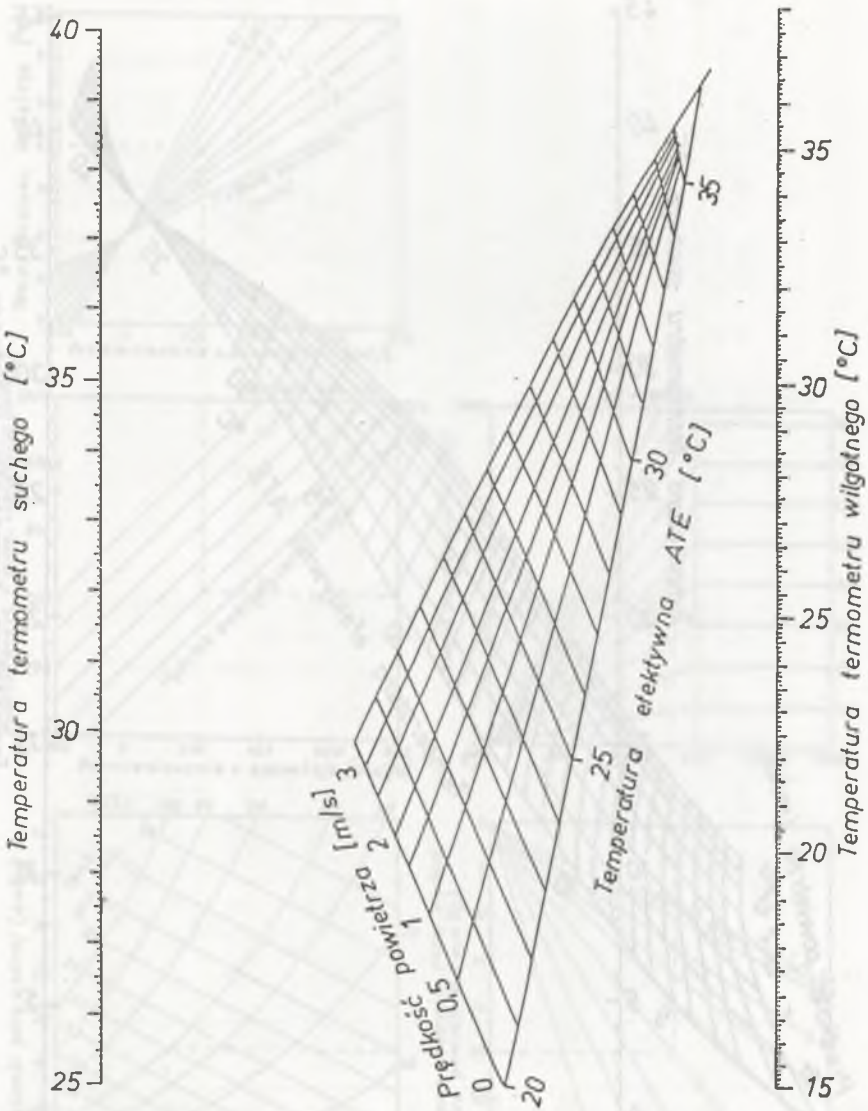
Rys. 7. Krzywe komfortu cieplnego Fangera w układzie współrzędnych temperatura powietrza i średnia temperatura promieniowania otoczenia (t_s,t_{pr}) dla wydatku energetycznego $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$ (praca umiarkowana), wilgotności powietrza $\varphi = 0\%$, człowieka nie ubranego (I_{cl}=0 clo)

Fig. 7. Fanger's thermal comfort curves in diagram representing relationship between: air temperature and mean ambient radiant temperature (t_s,t_{pr}) for energy production $M = \frac{Q_M}{A_{Du}} = 165\ W/m^2$ (moderate work), relative humidity $\varphi = 0\%$, undressed man (I_{cl}=0 clo)



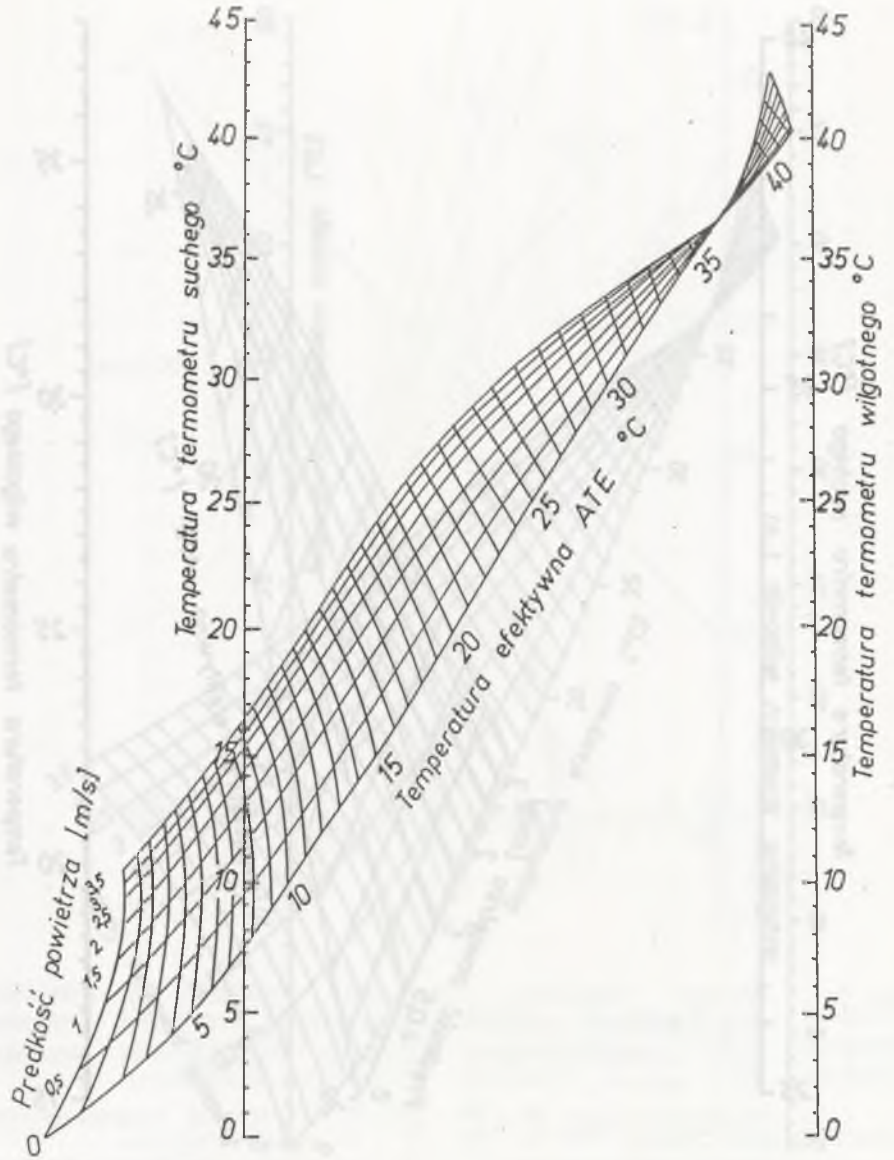
Rys. 8a. Nomogram do wyznaczania temperatur efektywnych amerykańskich (ATE) dla ludzi nie ubranych wg Yaglou

Fig. 8a. Nomogram for evaluating American Effective Temperatures (ATE) for unclothed men acc. to Yaglou



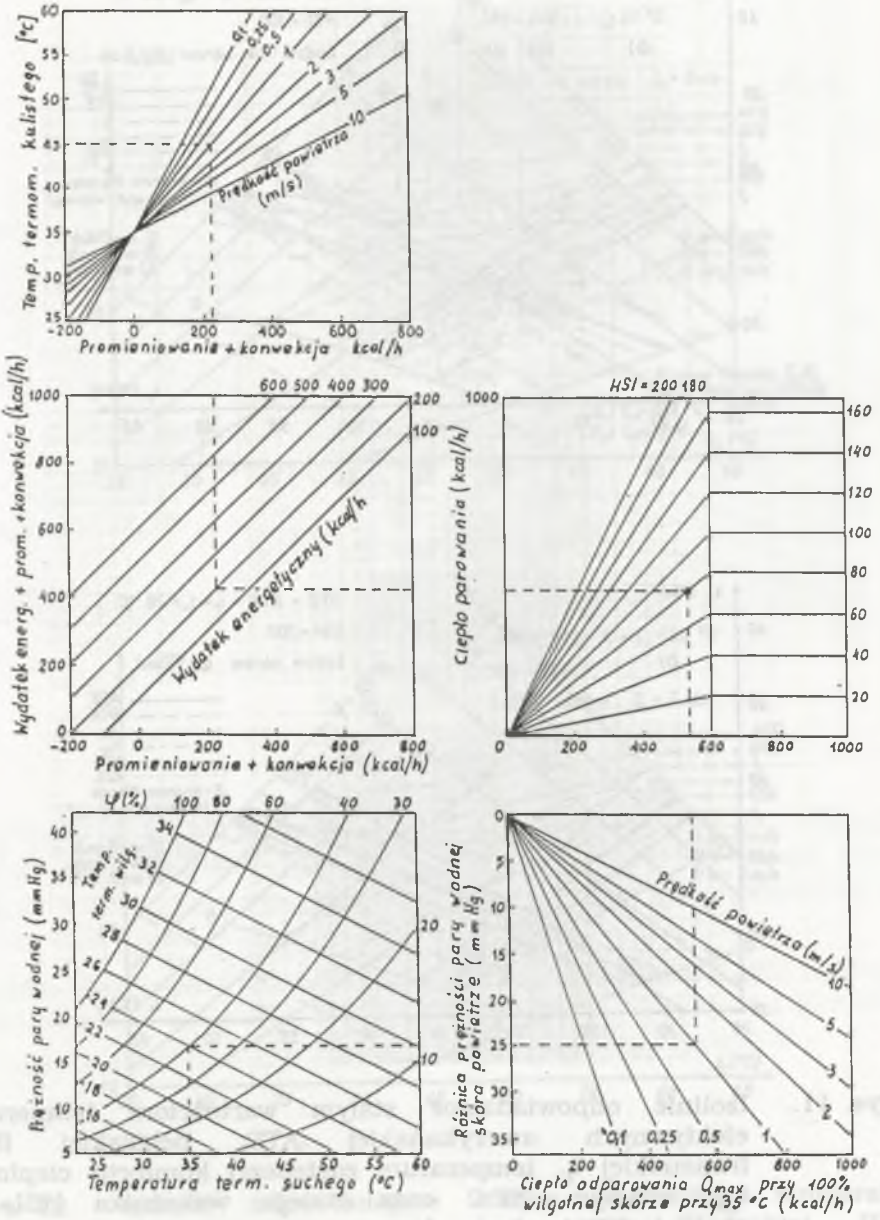
Rys. 8b. Nomogram do wyznaczania temperatur efektywnych amerykańskich (ATE) dla ludzi nie ubranych wg Yaglou (wycinek dla wysokich temperatur powietrza)

Fig. 8b. Nomogram for evaluating American Effective Temperatures (ATE) for unclothed men acc. to Yaglou (high air temperature sector)



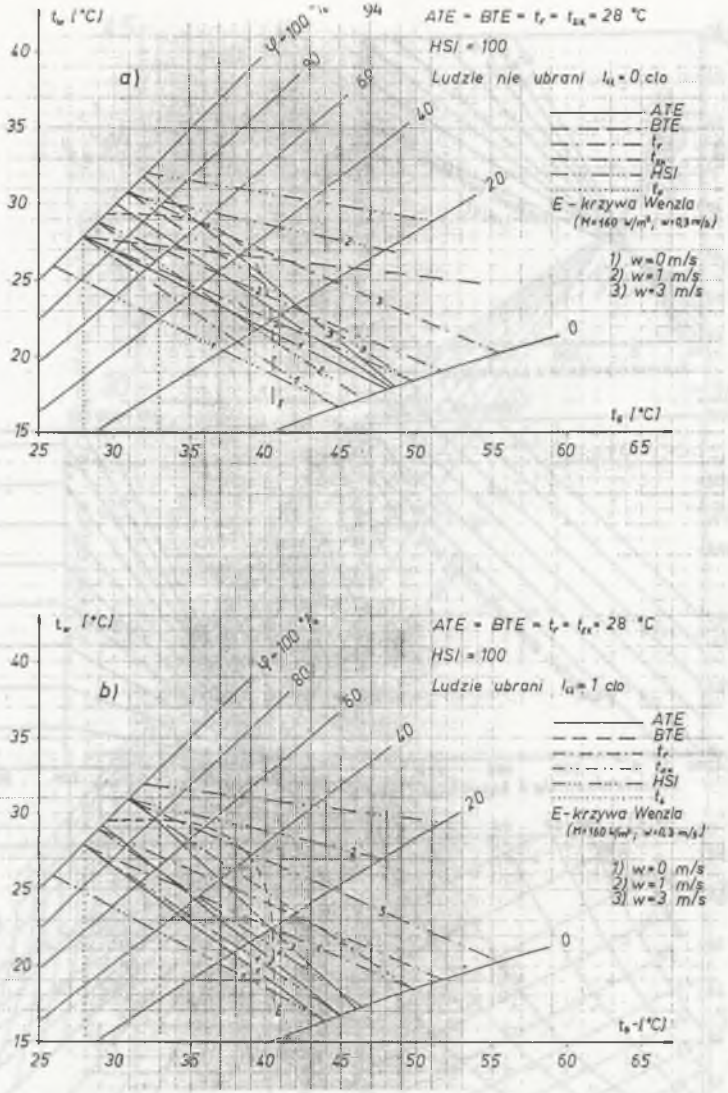
Rys. 9. Nomogram do wyznaczania temperatur efektywnych amerykańskich (ATE) dla ludzi ubranych w standardowe ubranie robocze (koszula, spodnie, bluza robocza) wg Yaglou

Fig. 9. Nomogram for evaluating American Effective Temperatures (ATE) for men in standard working clothes (shirt, trousers, working sweatshirt) acc. to Yaglou



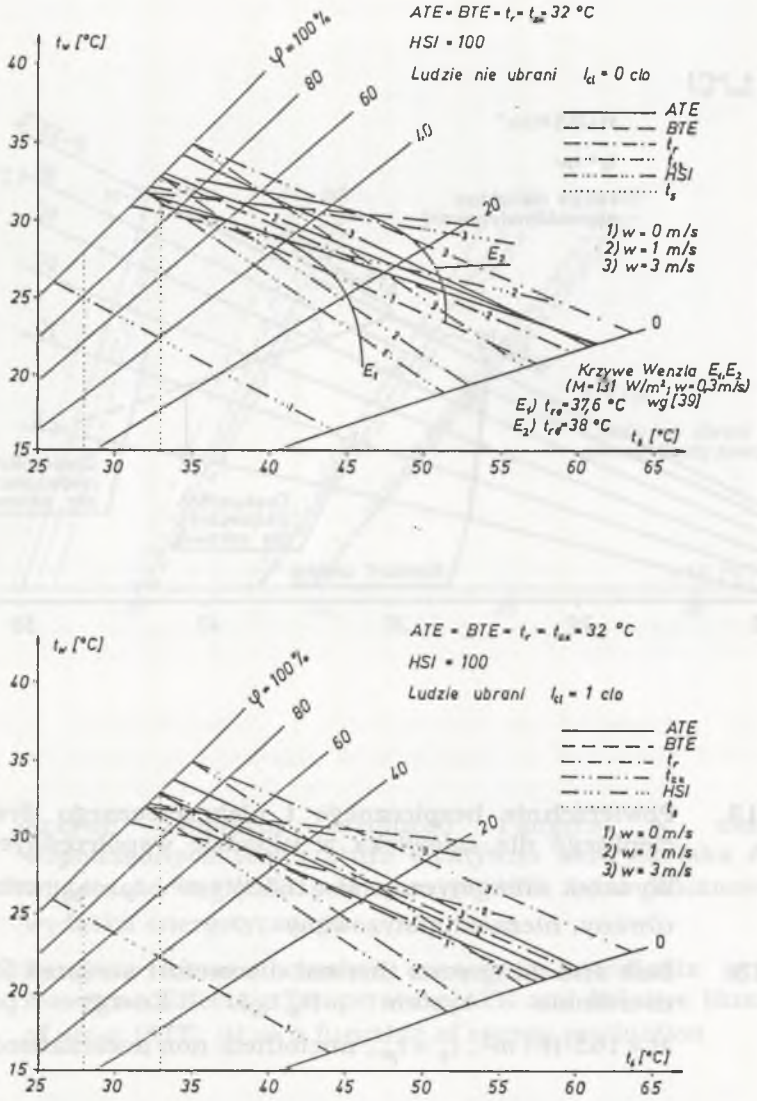
Rys. 10. Nomogram do wyznaczania wskaźnika HSI wg Beldinga i Hatcha

Fig. 10. Nomogram for evaluating HSI index according to Belding and Hatch



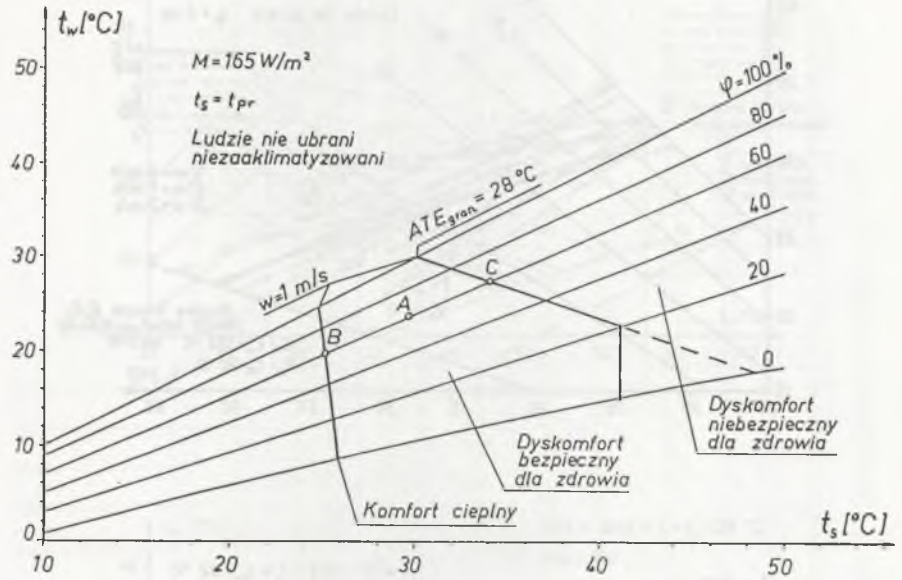
Rys. 11. Izolinie odpowiadające stałym wartościom temperatur efektywnych amerykańskiej ATE, belgijskiej BTE, francuskiej t_r, temperatury zastępczej komfortu cieplnego t_{zk}, równym 28°C oraz stałego wskaźnika HSI=100
a) dla ludzi nie ubranych
b) dla ludzi ubranych

Fig. 11. Isolines corresponding to constant values of American ATE, Belgian BTE, French t_r, substitute temperature of thermal comfort t_{zk}, equal to 28°C and constant HSI index = 100
a) for unclothed men
b) for clothed men



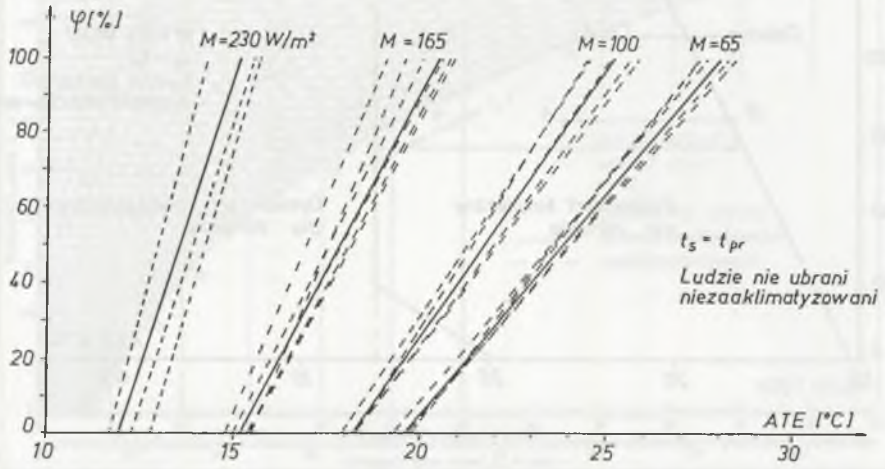
Rys. 12. Izolinie odpowiadające stałym wartościom temperatur efektywnych amerykańskiej ATE, belgijskiej BTE, francuskiej t_r, temperatury zastępczej komfortu cieplnego t_{zk}, równym 32°C oraz wskaźnika HSI=100

Fig. 12. Isolines corresponding to constant values of American ATE, Belgian BTE, French t_r, substitute temperature of thermal comfort t_{zk}, equal to 32°C and HSI index = 100



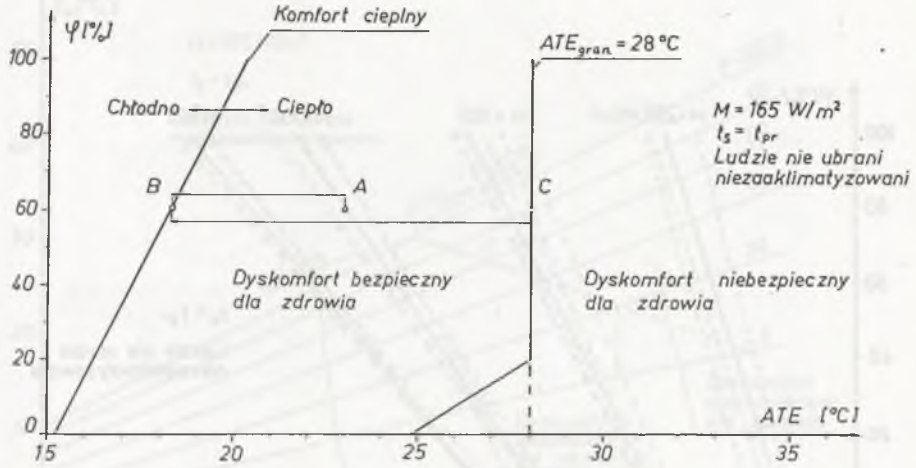
Rys. 13. Powierzchnie bezpiecznego i niebezpiecznego dyskomfortu cieplnego dla człowieka w układzie współrzędnych (t_S,t_W). Wydatek energetyczny $M = 165\ W/m^2$, $t_s = t_{pr}$, człowiek nie ubrany, niezaaklimatyzowany

Fig. 13. Safe and dangerous thermal discomfort surfaces for man in coordinate system (t_S,t_W). Energy production $M = 165\ W/m^2$, $t_s = t_{pr}$, unclothed, non acclimatized man



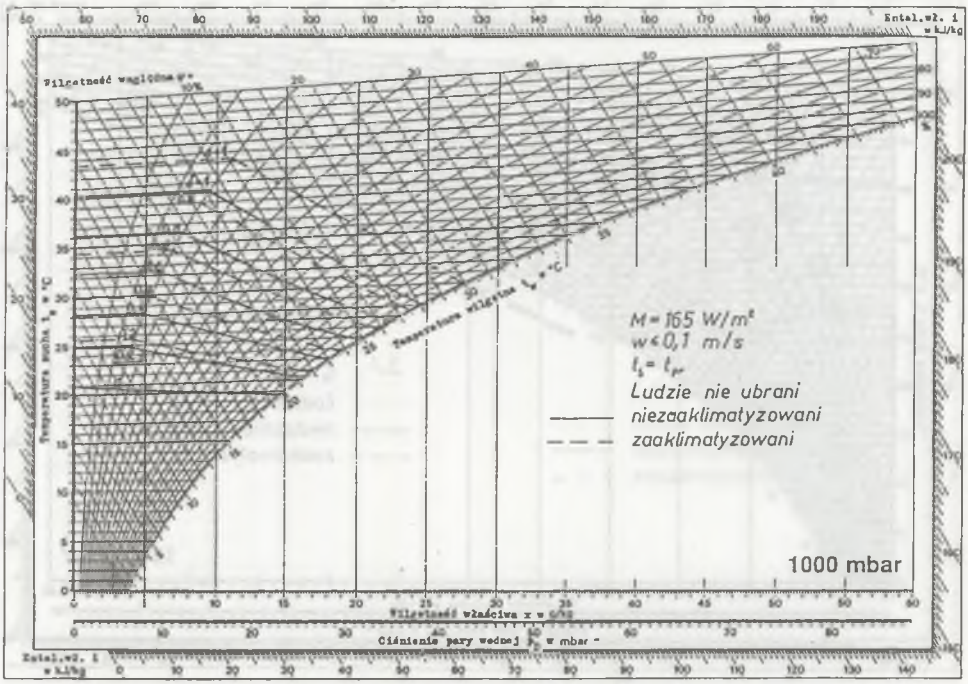
Rys. 14. Krzywe komfortu cieplnego Fangera w układzie współrzędnych temperatura efektywna amerykańska ATE i wilgotność względna powietrza φ (ATE; φ) w zależności od wydatku energetycznego

Fig. 14. Fanger's thermal comfort curves in coordinate system: American Effective Temperature ATE and Relative Humidity of air φ (ATE; φ) as a function of energy production



Rys. 15. Powierzchnie bezpiecznego i niebezpiecznego dyskomfortu cieplnego dla człowieka w układzie współrzędnych (ATE; φ). Wydatek energetyczny $M = 165\ W/m^2$, $t_s = t_{pr}$, człowiek nie ubrany i niezaaklimatyzowany

Fig. 15. Safe and dangerous thermal discomfort surfaces for man in coordinate system (ATE; φ). Energy production $M = 165\ W/m^2$, $t_s = t_{pr}$, unclothed, non acclimatized man

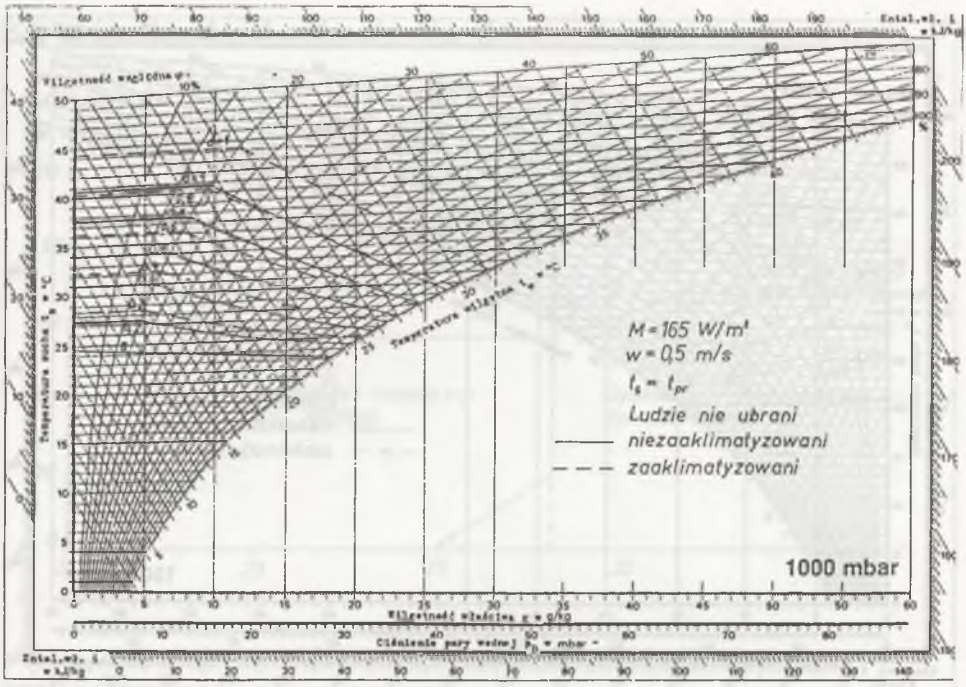


Rys. 16. Wykres i,x (Molliera) z naniesionymi izoliniami wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla następujących założeń:

- wydatek energetyczny $M = 165\ W / m^2$
- prędkość powietrza $w \leq 0{,}1\ m / s$
- $t_s = t_{pr}$
- ludzie nie ubrani $I_{cl} = 0\ clo$
- ludzie niezaaklimatyzowani $ATE_{gran.} = 28°C$
- ludzie zaaklimatyzowani $ATE_{gran.} = 30°C$

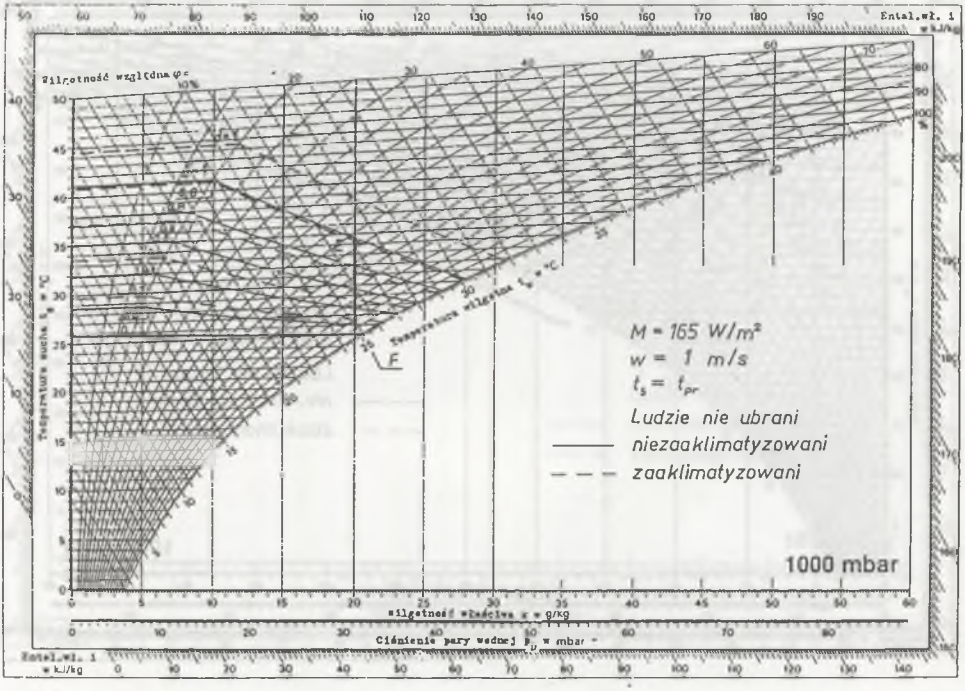
Fig. 16. Diagram i,x (Mollier's) with thermal discomfort index isolinies plotted for the following assumptions:

- energy production $M = 165\ W / m^2$
- air velocity $w \leq 0{,}1\ m / s$
- $t_s = t_{pr}$
- unclothed men $I_{cl} = 0\ clo$
- not acclimatized men $ATE_{lim.} = 28°C$
- acclimatized men $ATE_{lim.} = 30°C$



Rys. 17. Wykres I,x (Molliera) z naniesionymi izoliniami wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla następujących założeń:
- wydatek energetyczny $M = 165\ W / m^2$
- prędkość powietrza $w = 0,5\ m / s$
- $t_s = t_{pr}$
- ludzie nie ubrani $I_{cl} = 0\ clo$
- ludzie niezaaklimatyzowani $ATE_{gran.} = 28°C$
- ludzie zaaklimatyzowani $ATE_{gran.} = 30°C$

Fig. 17. Diagram I,x (Mollier's) with thermal discomfort index isolinies plotted for the following assumptions:
- energy production $M = 165\ W / m^2$
- air velocity $w = 0,5\ m / s$
- $t_s = t_{pr}$
- unclothed men $I_{cl} = 0\ clo$
- not acclimatized men $ATE_{lim.} = 28°C$
- acclimatized men $ATE_{lim.} = 30°C$

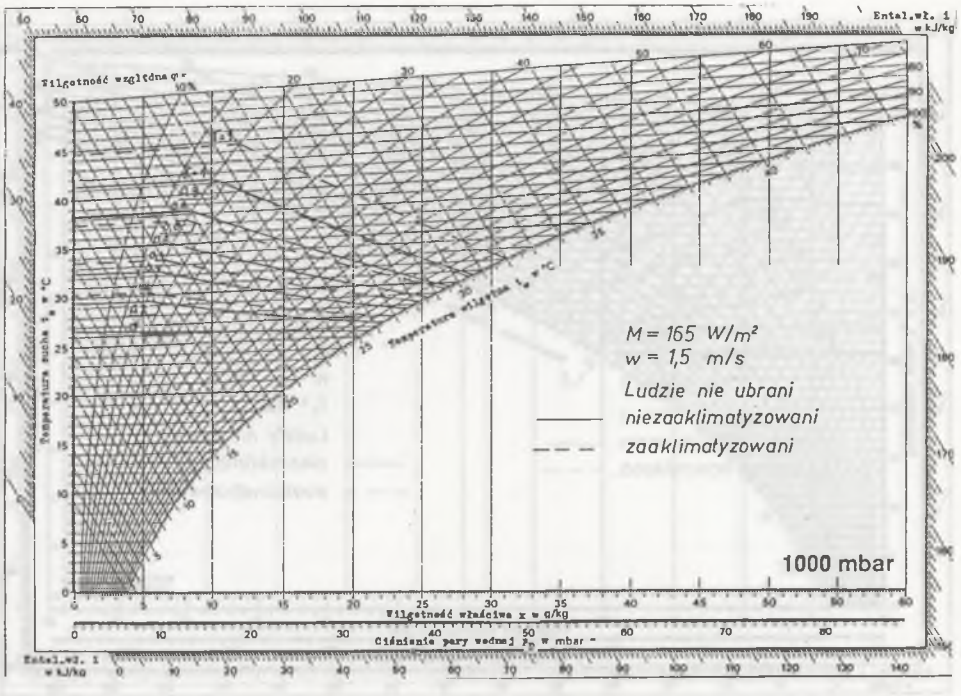


Rys. 18. Wykres i,x (Molliera) z naniesionymi izoliniami wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla następujących założeń:

- wydatek energetyczny $M = 165\ W / m^2$
- prędkość powietrza $w = 1\ m / s$
- $t_s = t_{pr}$
- ludzie nie ubrani $I_{cl} = 0\ clo$
- ludzie niezaaklimatyzowani $ATE_{gran.} = 28°C$
- ludzie zaaklimatyzowani $ATE_{gran.} = 30°C$

Fig. 18. Diagram i,x (Mollier's) with thermal discomfort index isolinies plotted for the following assumptions:

- energy production $M = 165\ W / m^2$
- air velocity $w = 1\ m / s$
- $t_s = t_{pr}$
- unclothed men $I_{cl} = 0\ clo$
- not acclimatized men $ATE_{lim.} = 28°C$
- acclimatized men $ATE_{lim.} = 30°C$

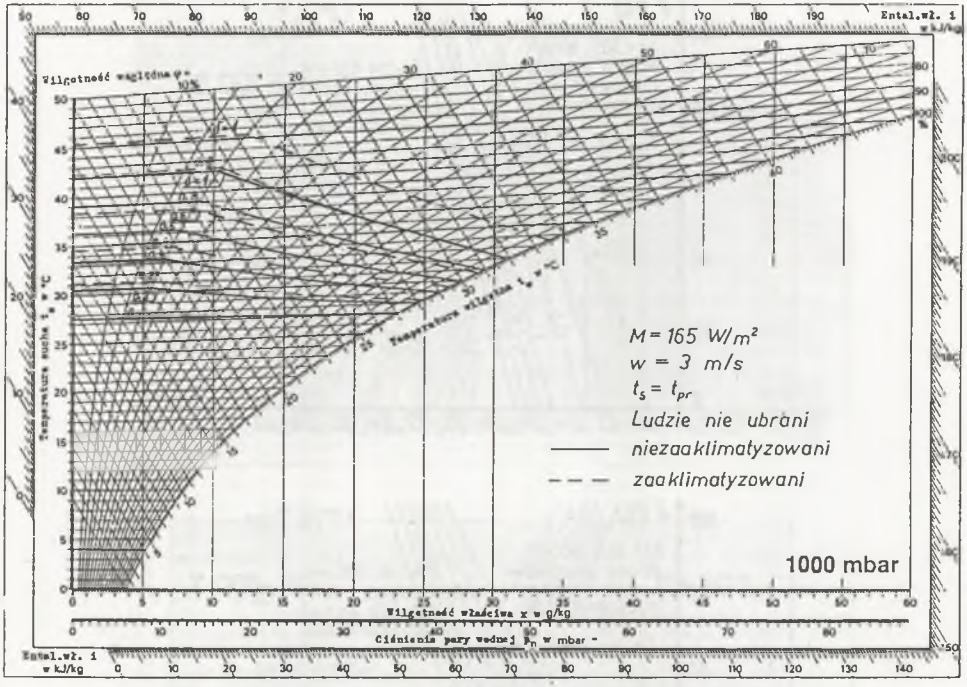


Rys. 19. Wykres i,x (Molliera) z naniesionymi izoliniami wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla następujących założeń:

- wydatek energetyczny $M = 165\ W / m^2$
- prędkość powietrza $w = 1,5\ m / s$
- $t_g = t_{pr}$
- ludzie nie ubrani $I_{cl} = 0\ clo$
- ludzie niezaaklimatyzowani $ATE_{gran} = 28°C$
- ludzie zaaklimatyzowani $ATE_{gran} = 30°C$

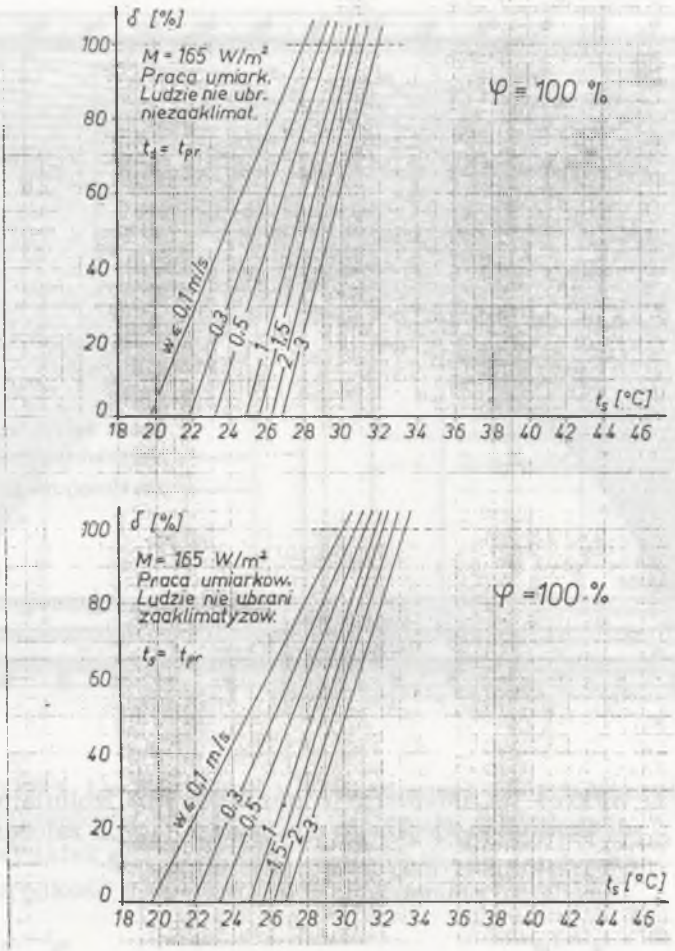
Fig. 19. Diagram i,x (Mollier's) with thermal discomfort index isolinies plotted for the following assumptions:

- energy production $M = 165\ W / m^2$
- air velocity $w = 1,5\ m / s$
- $t_g = t_{pr}$
- unclothed men $I_{cl} = 0\ clo$
- not acclimatized men $ATE_{lim.} = 28°C$
- acclimatized men $ATE_{lim.} = 30°C$



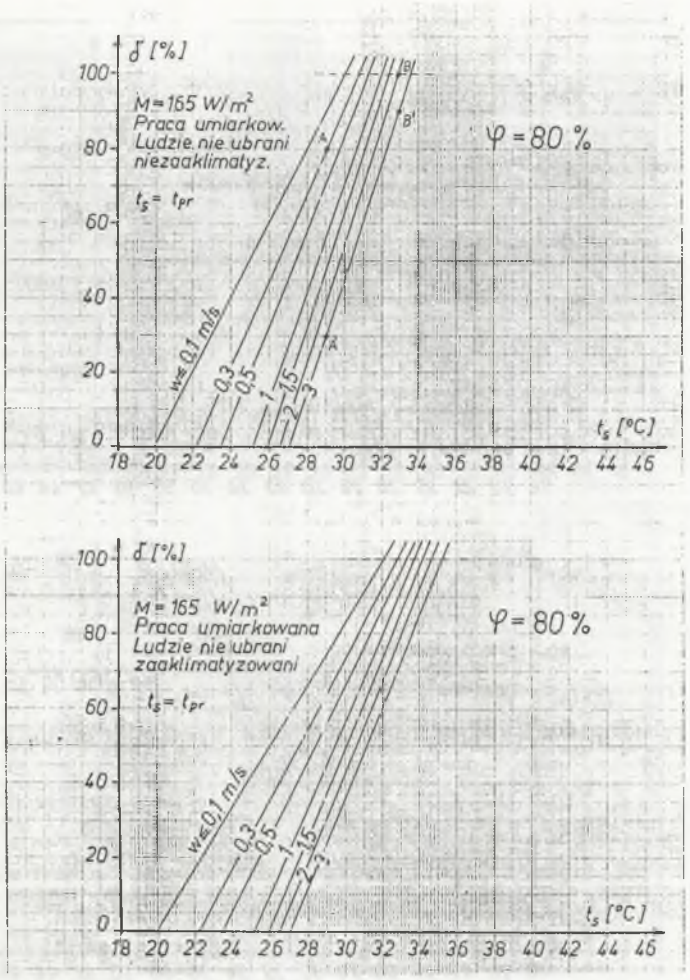
Rys. 20. Wykres i,x (Molliera) z naniesionymi izoliniami wskaźnika dyskomfortu cieplnego dla następujących założeń:
- wydatek energetyczny $M = 165\ W / m^2$
- prędkość powietrza $w = 3\ m / s$
- $t_s = t_{pr}$
- ludzie nie ubrani $I_{cl} = 0\ clo$
- ludzie niezaaklimatyzowani $ATE_{gran.} = 28°C$
- ludzie zaaklimatyzowani $ATE_{gran.} = 30°C$

Fig. 20. Diagram i,x (Mollier's) with thermal discomfort index isolinies plotted for the following assumptions:
- energy production $M = 165\ W / m^2$
- air velocity $w = 3\ m / s$
- $t_s = t_{pr}$
- unclothed men $I_{cl} = 0\ clo$
- not acclimatized men $ATE_{lim.} = 28°C$
- acclimatized men $ATE_{lim.} = 30°C$



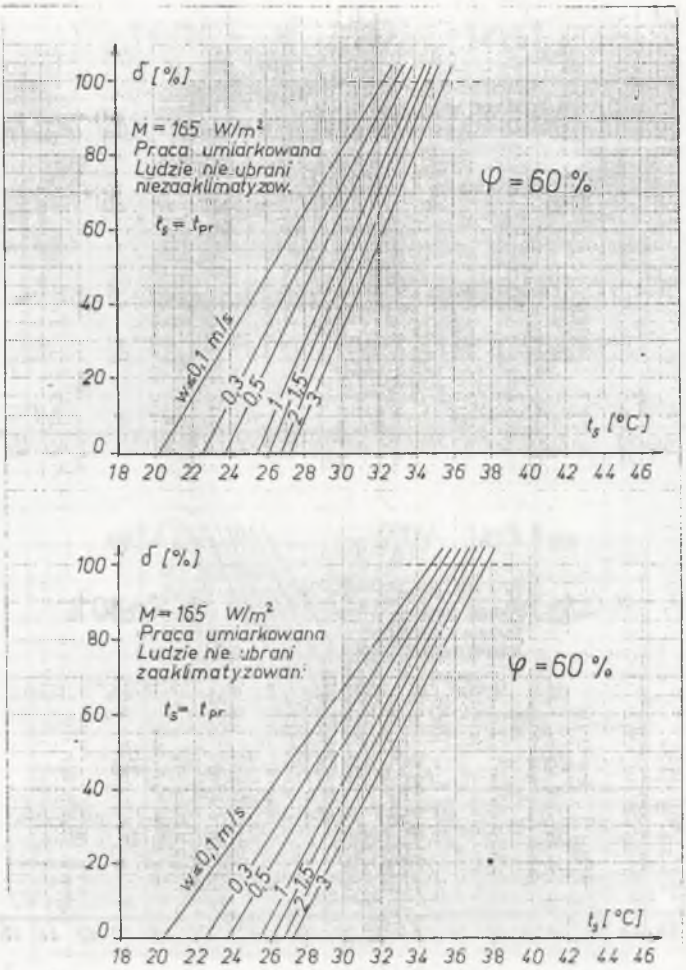
Rys. 21a. Zależność wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ od temperatury powietrza i prędkości przepływu powietrza przy stałej wilgotności względnej $\varphi = 100\%$ dla:
wydatku energetycznego pracownika $M = 165\ W/m^2$, ludzi niezaaklimatyzowanych $ATE_{gran.} = 28°C$ i zaaklimatyzowanych $ATE_{gran.} = 30°C$, ludzi nie ubranych $I_{cl} = 0$, temperatury $t_s = t_{pr}$

Fig. 21a. Thermal discomfort index δ as a function of air temperature and air flow velocity for constant relative humidities $\varphi = 100\%$ for : worker energy production $M = 165\ W/m^2$, not acclimatized men $ATE_{lim.} = 28°C$ and acclimatized men $ATE_{lim.} = 30°C$, unclothed men $I_{cl} = 0$, temperatures $t_s = t_{pr}$



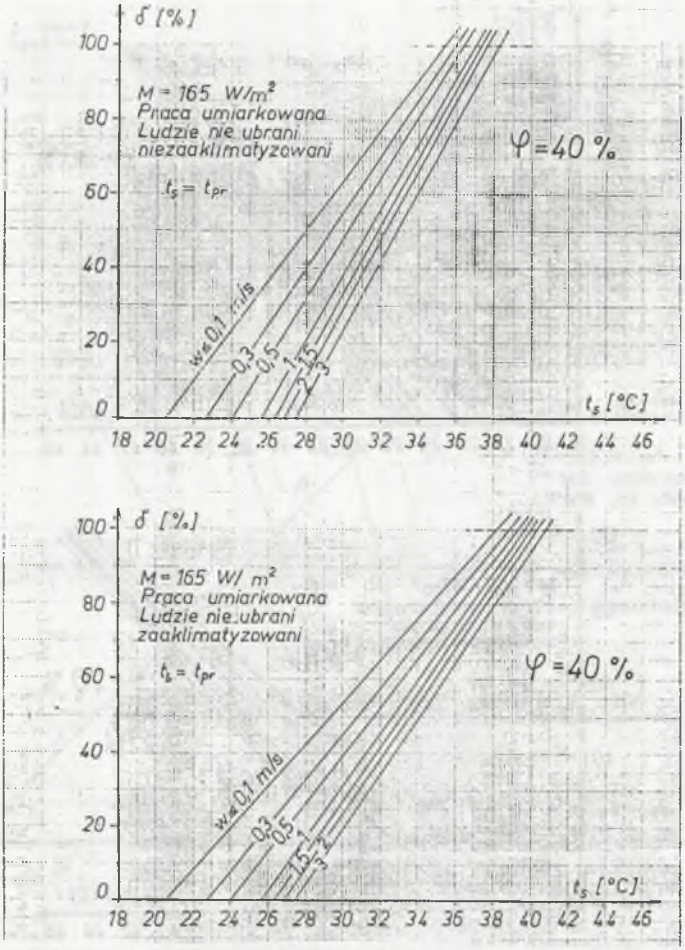
Rys. 21b. Zależność wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ od temperatury powietrza i prędkości przepływu powietrza przy stałej wilgotności względnej $\varphi = 80\%$ dla:
wydatku energetycznego pracownika $M = 165\ W/m^2$, ludzi niezaaklimatyzowanych $ATE_{gran.} = 28°C$ i zaaklimatyzowanych $ATE_{gran.} = 30°C$, ludzi nie ubranych $I_{cl} = 0$, temperatury $t_s = t_{pr}$

Fig. 21b. Thermal discomfort index δ as a function of air temperature and air flow velocity for constant relative humidities $\varphi = 80\%$ for : worker energy production $M = 165\ W/m^2$, not acclimatized men $ATE_{lim.} = 28°C$ and acclimatized men $ATE_{lim.} = 30°C$, unclothed men $I_{cl} = 0$, temperatures $t_s = t_{pr}$



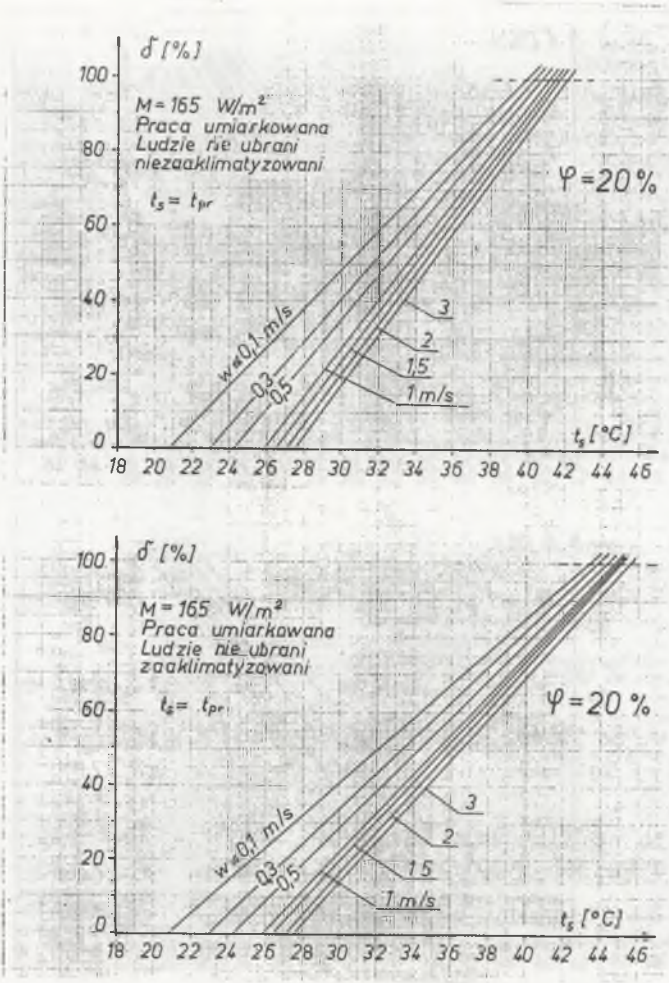
Rys. 21c. Zależność wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ od temperatury powietrza i prędkości przepływu powietrza przy stałej wilgotności względnej $\varphi = 60\%$ dla:
wydatku energetycznego pracownika $M = 165\ W/m^2$, ludzi niezaaklimatyzowanych $ATE_{gran.} = 28°C$ i zaaklimatyzowanych $ATE_{gran.} = 30°C$, ludzi nie ubranych $I_{cl} = 0$, temperatury $t_s = t_{pr}$

Fig. 21c. Thermal discomfort index δ as a function of air temperature and air flow velocity for constant relative humidities $\varphi = 60\%$ for : worker energy production $M = 165\ W/m^2$, not acclimatized men $ATE_{lim.} = 28°C$ and acclimatized men $ATE_{lim.} = 30°C$, unclothed men $I_{cl} = 0$, temperatures $t_s = t_{pr}$



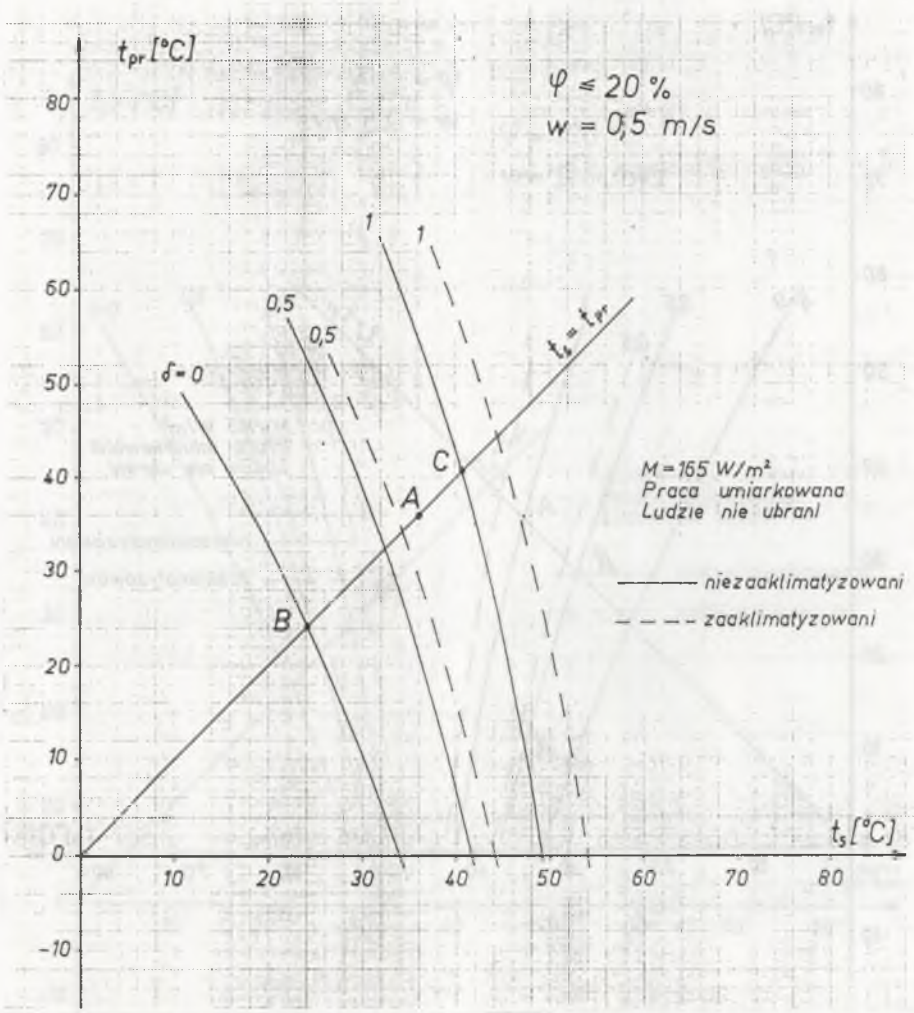
Rys. 21d. Zależność wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ od temperatury powietrza i prędkości przepływu powietrza przy stałej wilgotności względnej $\varphi = 40\%$ dla: wydatku energetycznego pracownika $M = 165\ W/m^2$, ludzi niezaaklimatyzowanych $ATE_{gran.} = 28°C$ i zaaklimatyzowanych $ATE_{gran.} = 30°C$, ludzi nie ubranych $I_{cl} = 0$, temperatury $t_s = t_{pr}$

Fig. 21d. Thermal discomfort index δ as a function of air temperature and air flow velocity for constant relative humidities $\varphi = 40\%$ for : worker energy production $M = 165\ W/m^2$, not acclimatized men $ATE_{lim.} = 28°C$ and acclimatized men $ATE_{lim.} = 30°C$, unclothed men $I_{cl} = 0$, temperatures $t_s = t_{pr}$



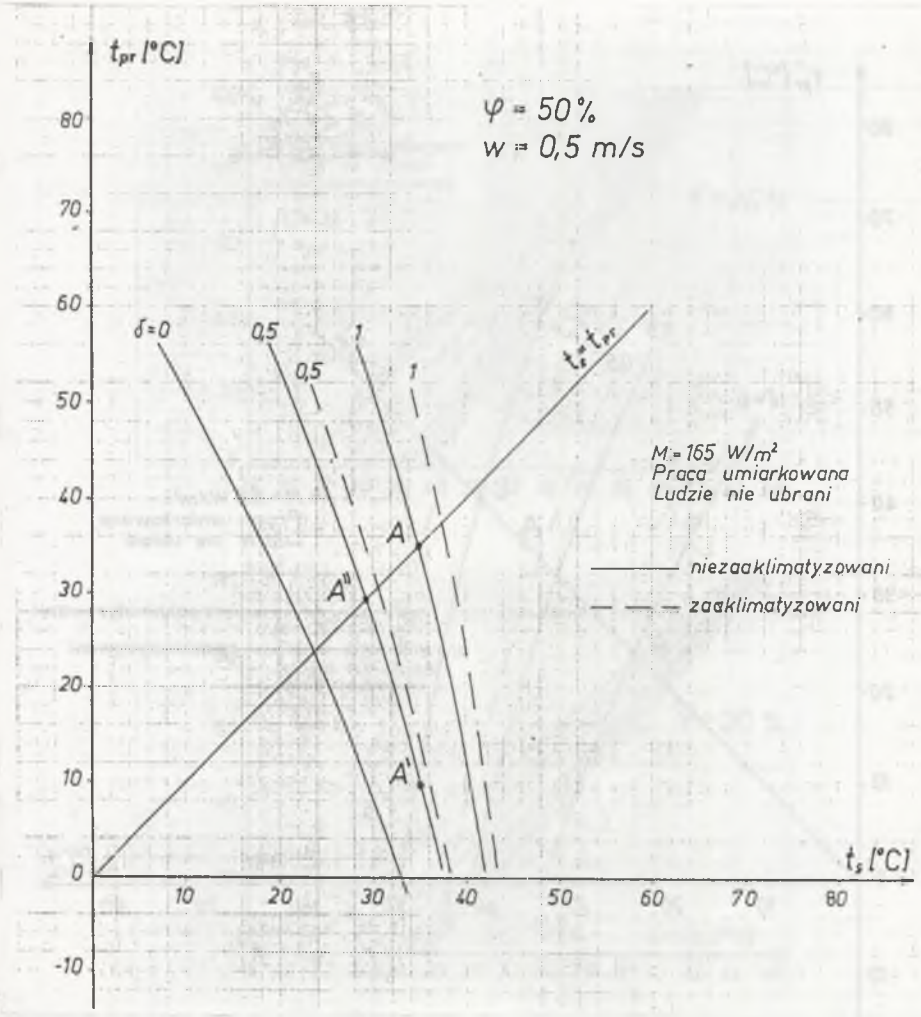
Rys. 21e. Zależność wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ od temperatury powietrza i prędkości przepływu powietrza przy stałej wilgotności względnej $\varphi = 20\%$ dla:
wydatku energetycznego pracownika $M = 165\ W/m^2$, ludzi niezaaklimatyzowanych $ATE_{gran.} = 28°C$ i zaaklimatyzowanych $ATE_{gran.} = 30°C$, ludzi nie ubranych $I_{cl} = 0$, temperatury $t_s = t_{pr}$

Fig. 21e. Thermal discomfort index δ as a function of air temperature and air flow velocity for constant relative humidities $\varphi = 20\%$ for : worker energy production $M = 165\ W/m^2$, not acclimatized men $ATE_{lim.} = 28°C$ and acclimatized men $ATE_{lim.} = 30°C$, unclothed men $I_{cl} = 0$, temperatures $t_s = t_{pr}$



Rys. 22. Przebieg izolinii dyskomfortu cieplnego δ w zależności od temperatury powietrza t_s i średniej temperatury promieniowania otoczenia t_{pr}, dla człowieka nie ubranego, niezaaklimatyzowanego i zaaklimatyzowanego, wykonującego pracę o wydatku energetycznym $M = 165\ W / m^2$
- wilgotność względna powietrza $\varphi \leq 20\%$
- prędkość przepływu powietrza w=0,5 m/s

Fig. 22. Thermal discomfort isolines course as a function of air temperature t_s and mean ambient radiant temperature t_{pr} for unclothed, not acclimatized and acclimatized man, performing work of energy production $M = 165\ W / m^2$
- air relative humidity $\varphi \leq 20\%$
- air flow velocity w=0,5 m/s

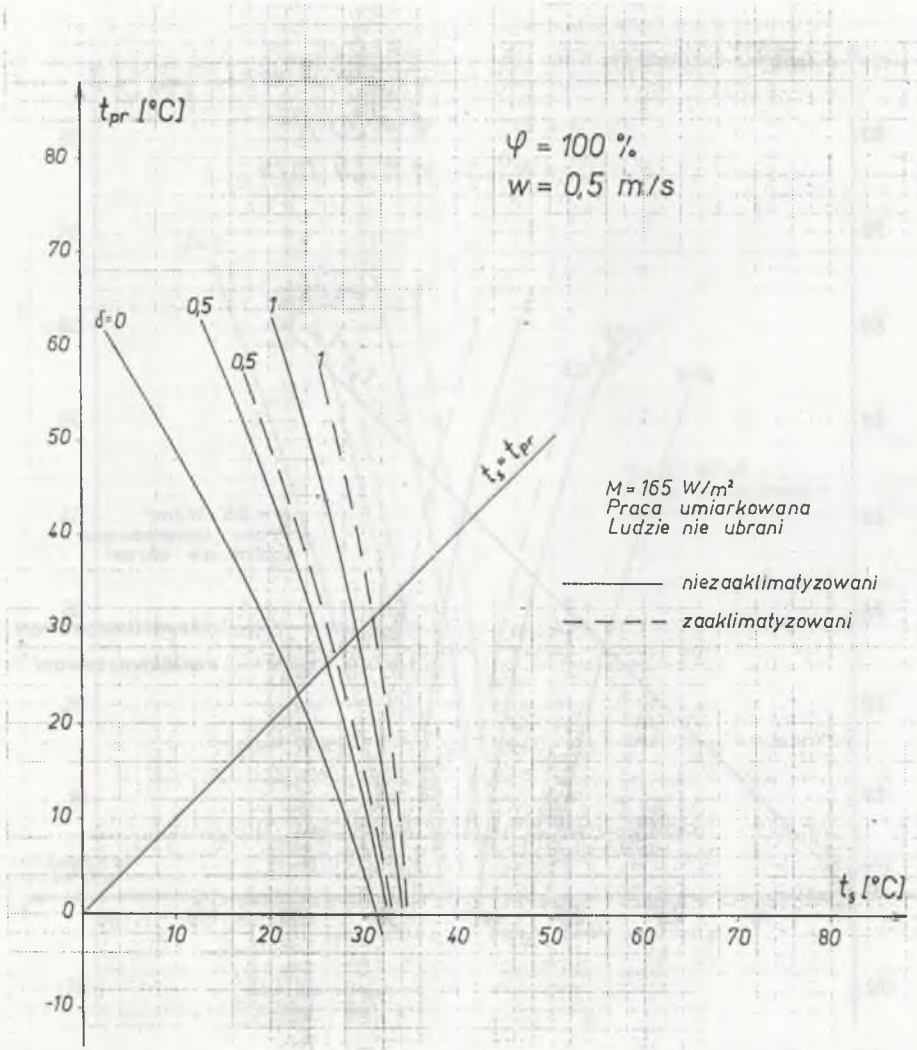


Rys. 23. Przebieg izolinii dyskomfortu cieplnego δ w zależności od temperatury powietrza t_s i średniej temperatury promieniowania otoczenia t_{pr}, dla człowieka nie ubranego, niezaaklimatyzowanego i zaaklimatyzowanego, wykonującego pracę o wydatku energetycznym $M = 165\ W/m^2$

- wilgotność względna powietrza $\varphi = 50\%$
- prędkość przepływu powietrza $w = 0{,}5\ m/s$

Fig. 23. Thermal discomfort isolines course as a function of air temperature t_s and mean ambient radiant temperature t_{pr} for unclothed, not acclimatized and acclimatized man, performing work of energy production $M = 165\ W/m^2$

- air relative humidity $\varphi = 50\%$
- air flow velocity $w = 0{,}5\ m/s$

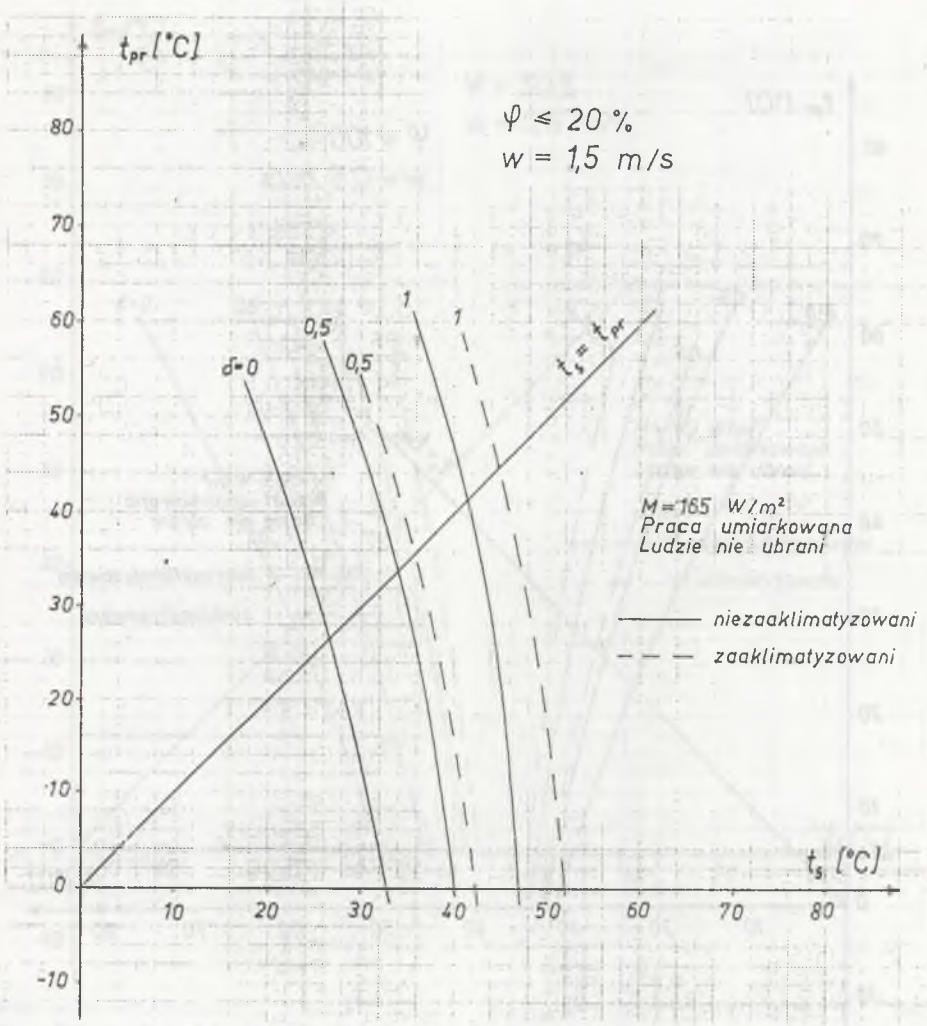


Rys. 24. Przebieg izolinii dyskomfortu cieplnego δ w zależności od temperatury powietrza t_s i średniej temperatury promieniowania otoczenia t_{pr}, dla człowieka nie ubranego, niezaaklimatyzowanego i zaaklimatyzowanego, wykonującego pracę o wydatku energetycznym $M = 165\ W/m^2$

- wilgotność względna powietrza $\varphi = 100\%$
- prędkość przepływu powietrza $w = 0{,}5\ m/s$

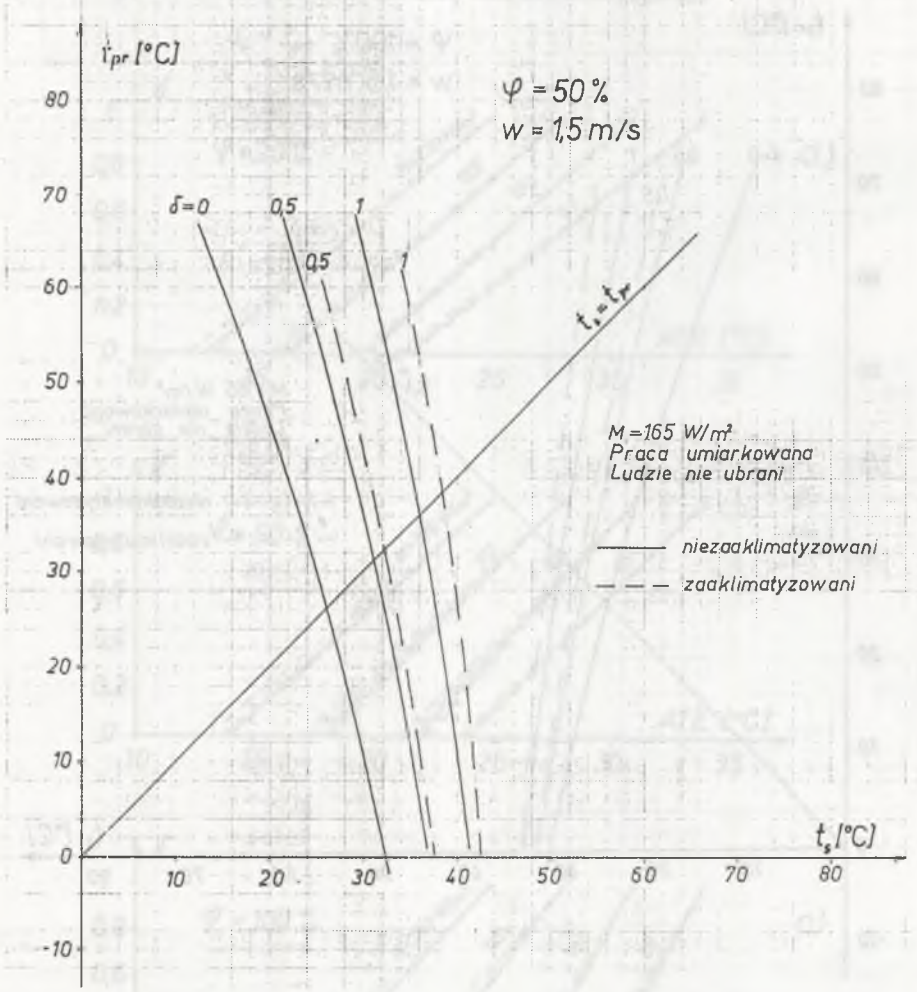
Fig. 24. Thermal discomfort isolines course as a function of air temperature t_s and mean ambient radiant temperature t_{pr} for unclothed, not acclimatized and acclimatized man, performing work of energy production $M = 165\ W/m^2$

- air relative humidity $\varphi = 100\%$
- air flow velocity $w = 0{,}5\ m/s$



Rys. 25. Przebieg izolinii dyskomfortu cieplnego δ w zależności od temperatury powietrza t_s i średniej temperatury promieniowania otoczenia t_{pr}, dla człowieka nie ubranego, niezaaklimatyzowanego i zaaklimatyzowanego, wykonującego pracę o wydatku energetycznym $M = 165\ W/m^2$
- wilgotność względna powietrza $\varphi \leq 20\%$
- prędkość przepływu powietrza $w = 1{,}5\ m/s$

Fig. 25. Thermal discomfort isolines course as a function of air temperature t_s and mean ambient radiant temperature t_{pr} for unclothed, not acclimatized and acclimatized man, performing work of energy production $M = 165\ W/m^2$
- air relative humidity $\varphi \leq 20\%$
- air flow velocity $w = 1{,}5\ m/s$

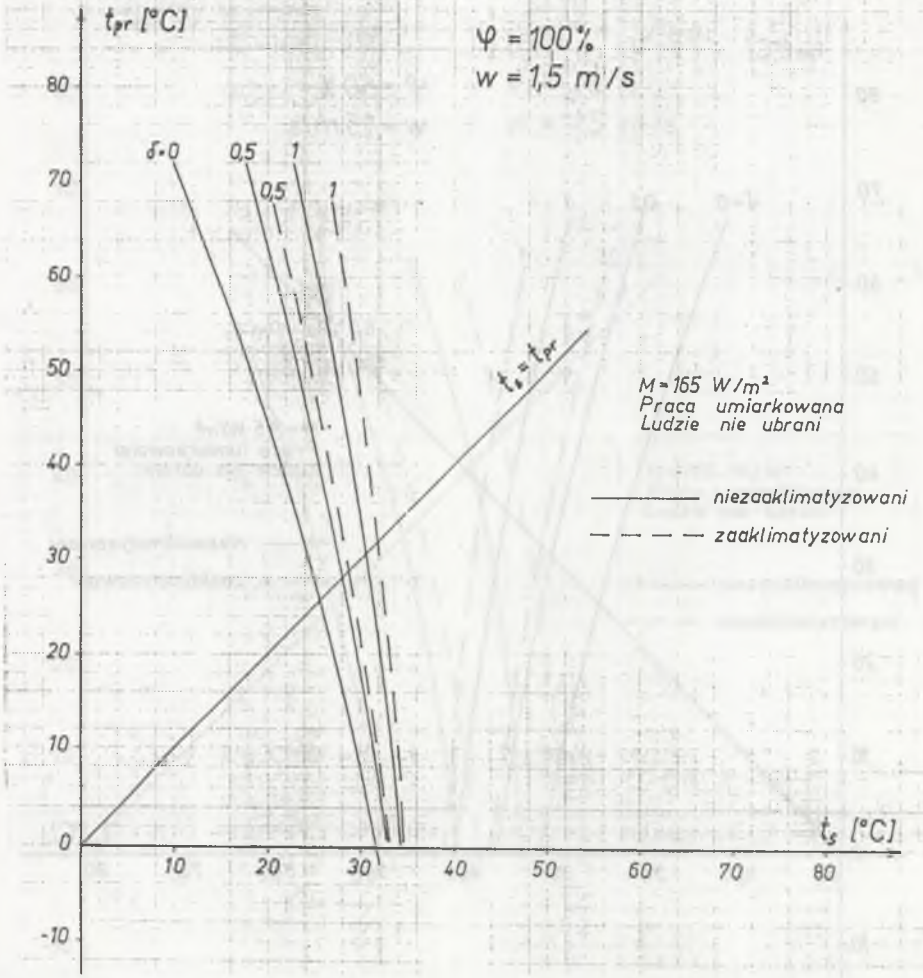


Rys. 26. Przebieg izolinii dyskomfortu cieplnego δ w zależności od temperatury powietrza t_s i średniej temperatury promieniowania otoczenia t_{pr}, dla człowieka nie ubranego, niezaaklimatyzowanego i zaaklimatyzowanego, wykonującego pracę o wydatku energetycznym $M = 165\ W/m^2$

- wilgotność względna powietrza $\varphi = 50\%$
- prędkość przepływu powietrza $w = 1{,}5\ m/s$

Fig. 26. Thermal discomfort isolines course as a function of air temperature t_s and mean ambient radiant temperature t_{pr} for unclothed, not acclimatized and acclimatized man, performing work of energy production $M = 165\ W/m^2$

- air relative humidity $\varphi = 50\%$
- air flow velocity $w = 1{,}5\ m/s$

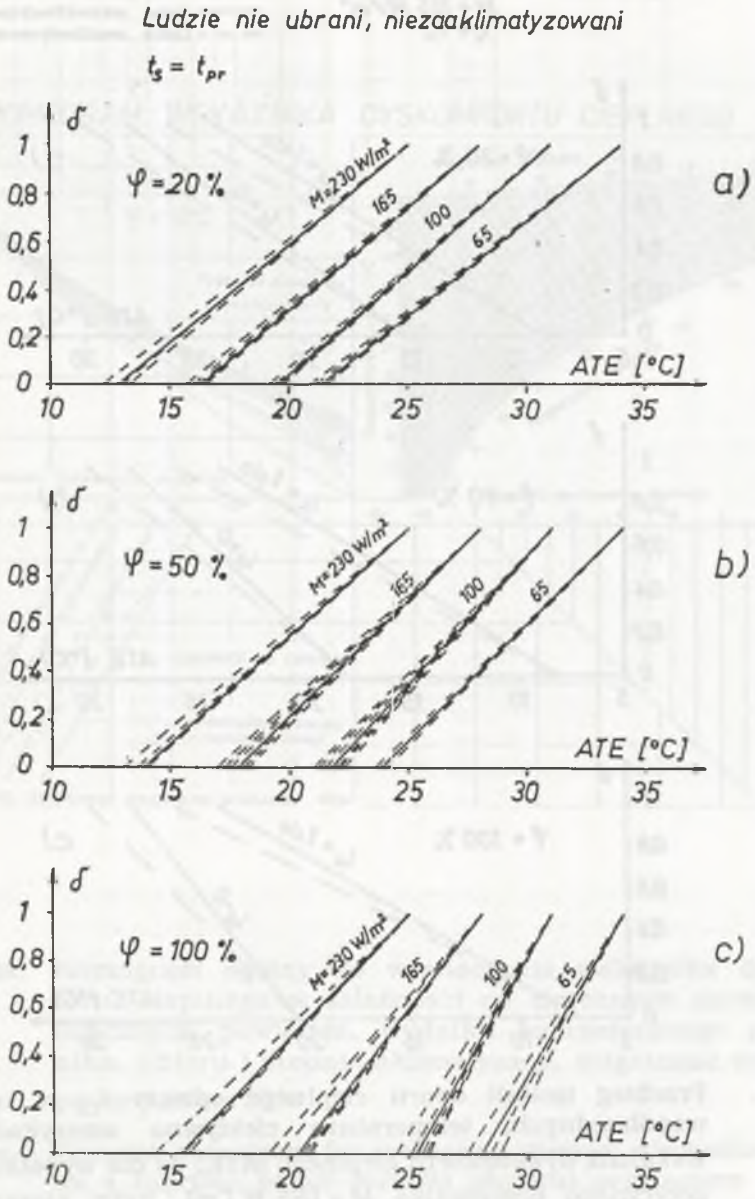


Rys. 27. Przebieg izolinii dyskomfortu cieplnego δ w zależności od temperatury powietrza t_s i średniej temperatury promieniowania otoczenia t_{pr}, dla człowieka nie ubranego, niezaaklimatyzowanego i zaaklimatyzowanego, wykonującego pracę o wydatku energetycznym $M = 165\ W/m^2$

- wilgotność względna powietrza $\varphi = 100\%$
- prędkość przepływu powietrza $w = 1{,}5\ m/s$

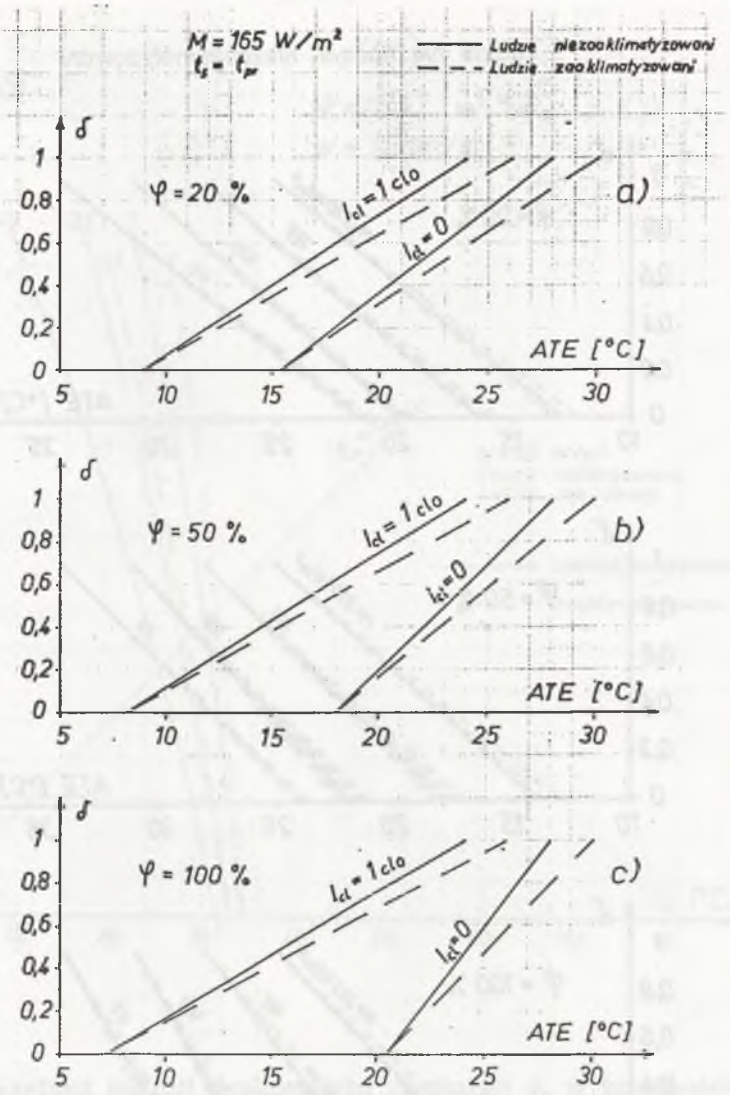
Fig. 27. Thermal discomfort isolines course as a function of air temperature t_s and mean ambient radiant temperature t_{pr} for unclothed, not acclimatized and acclimatized man, performing work of energy production $M = 165\ W/m^2$

- air relative humidity $\varphi = 100\%$
- air flow velocity $w = 1{,}5\ m/s$



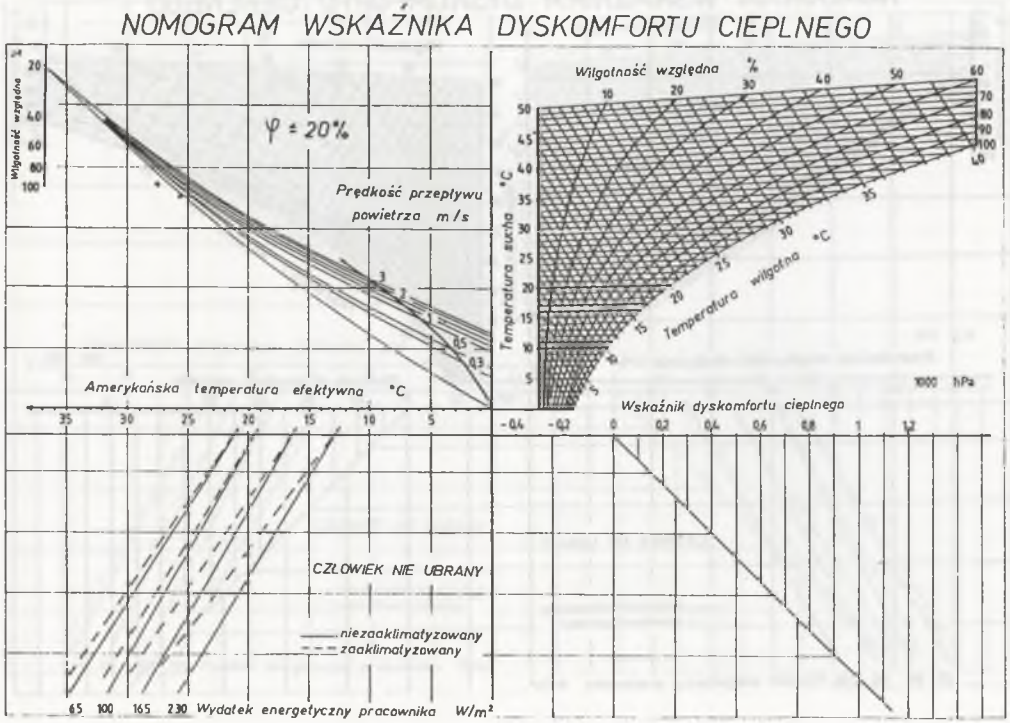
Rys. 28. Przebieg izolinii wydatku energetycznego pracowników w układzie współrzędnych, efektywna temperatura amerykańska, wskaźnik dyskomfortu cieplnego (ATE; δ) dla ludzi nie ubranych, niezaaklimatyzowanych, $t_s = t_{pr}$

Fig. 28. Workers energy production isolines course in coordinate system: American Effective Temperature and thermal discomfort index (ATE; δ) for unclothed, not acclimatized men, $t_s = t_{pr}$



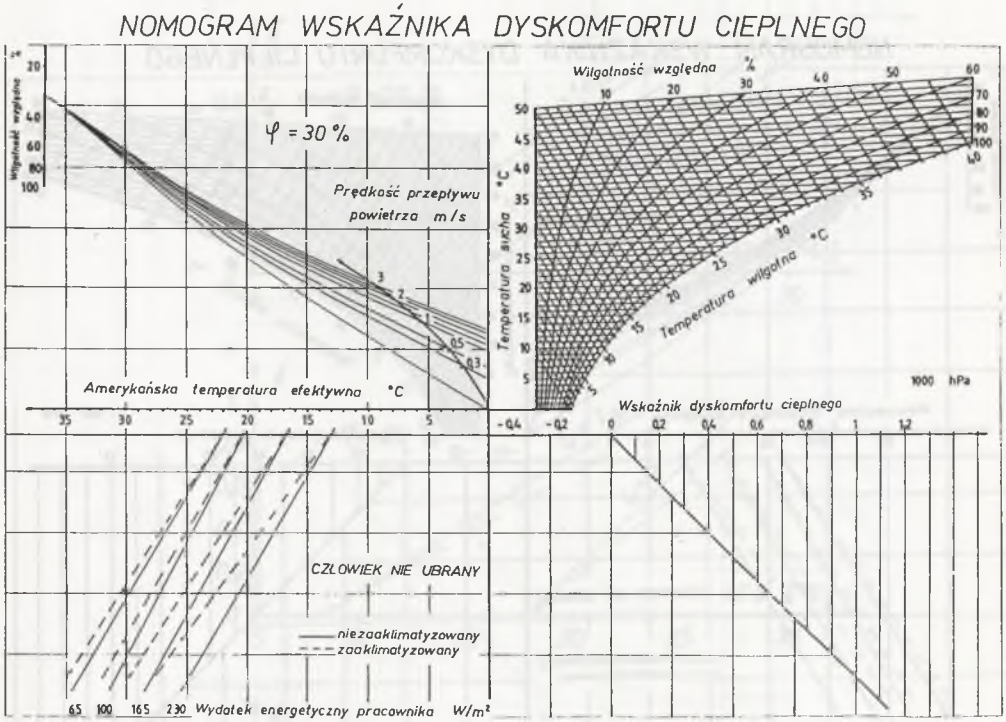
Rys. 29. Przebieg izolinii oporu cieplnego odzieży I_{cl} w układzie współrzędnych, temperatura efektywna amerykańska i wskaźnik dyskomfortu cieplnego (ATE; δ) dla wydatku energetycznego pracownika $M = 165\ W/m^2$, ludzi niezaaklimatyzowanych i zaaklimatyzowanych, temperatury powietrza równej średniej temperaturze promieniowania ($t_s = t_{pr}$)

Fig. 29. Clothing insulation isolines course I_{cl} in coordinate system: American Effective Temperature and thermal discomfort index (ATE; δ) for worker energy production $M = 165\ W/m^2$, not acclimatized and acclimatized men, air temperature is equal to mean radiant temperature ($t_s = t_{pr}$)



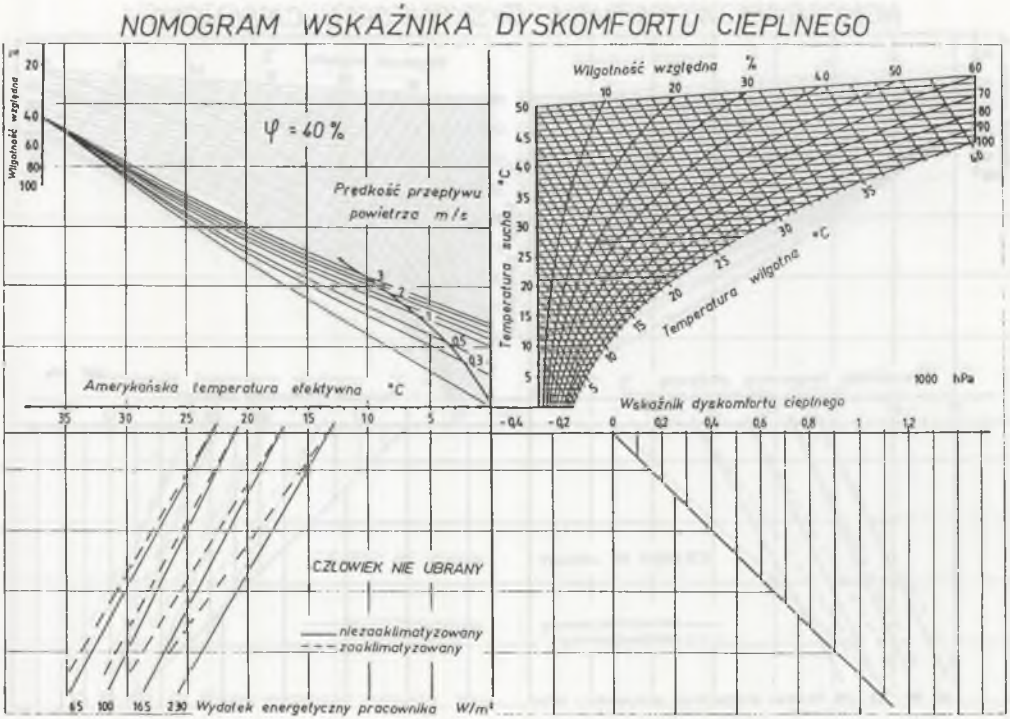
Rys. 30a. Nomogram ogólny do wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego w zależności od zmiennych parametrów fizycznych powietrza, wydatku energetycznego pracownika, ubioru i stopnia aklimatyzacji, wilgotność względna powietrza $\varphi \leq 20\%$

Fig. 30a. General nomogram for evaluating thermal discomfort index as a function of air variable physical parameters, worker energy production, clothing, and a degree of acclimatization, air relative humidity $\varphi \leq 20\%$



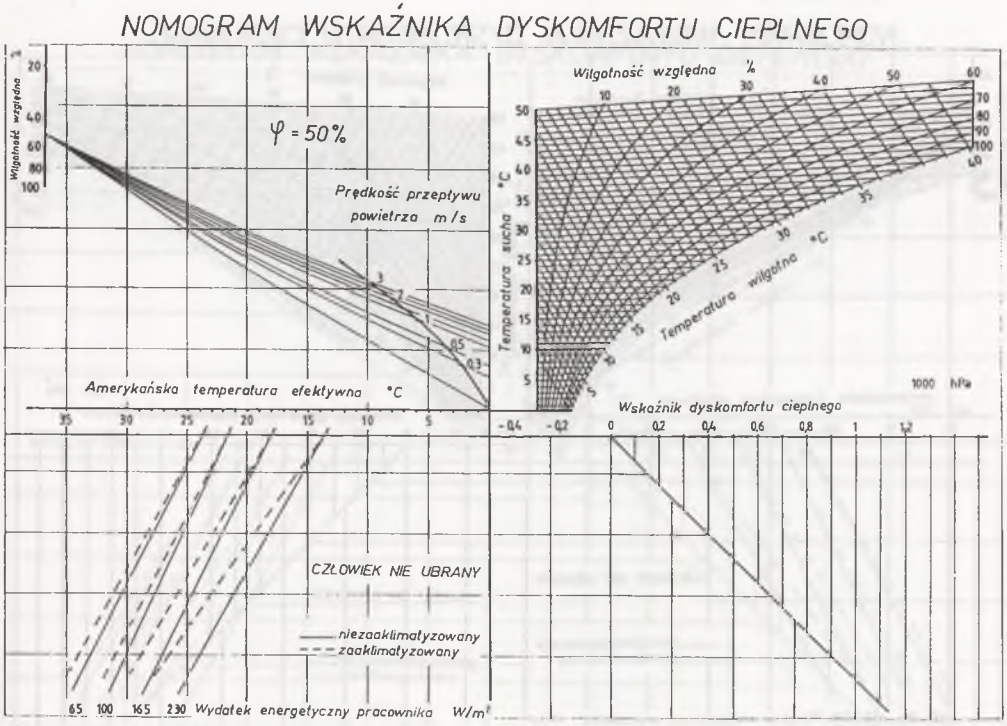
Rys. 30b. Nomogram ogólny do wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego w zależności od zmiennych parametrów fizycznych powietrza, wydatku energetycznego pracownika, ubioru i stopnia aklimatyzacji, wilgotność względna powietrza $\varphi = 30\%$

Fig. 30b. General nomogram for evaluating thermal discomfort index as a function of air variable physical parameters, worker energy production, clothing, and a degree of acclimatization, air relative humidity $\varphi = 30\%$



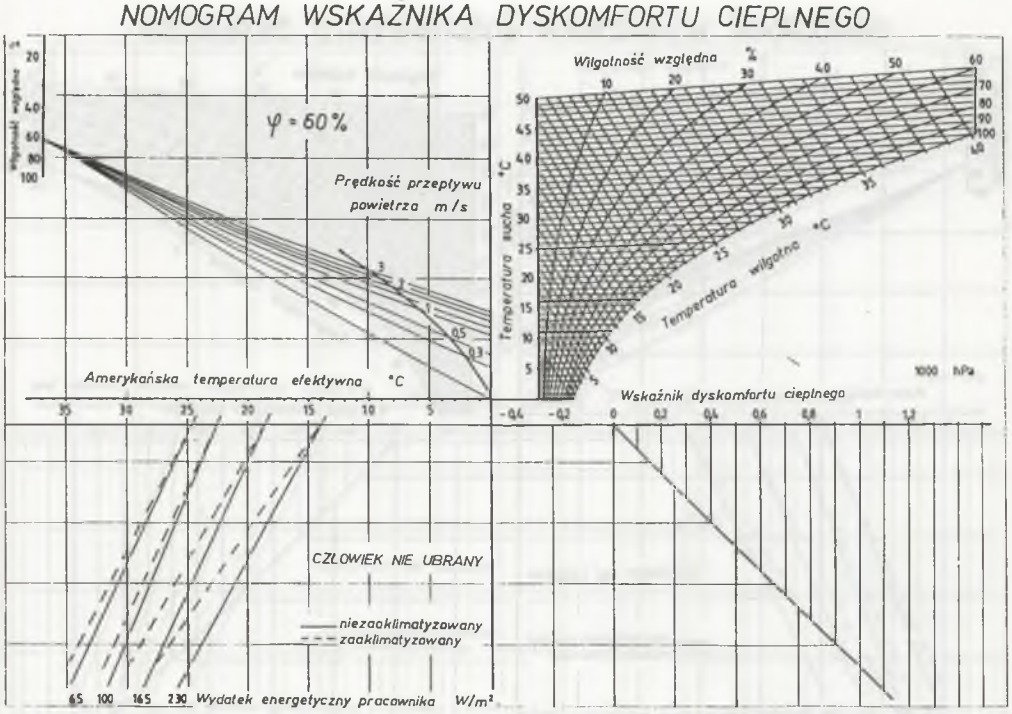
Rys. 30c. Nomogram ogólny do wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego w zależności od zmiennych parametrów fizycznych powietrza, wydatku energetycznego pracownika, ubioru i stopnia aklimatyzacji, wilgotność względna powietrza $\varphi = 40\%$

Fig. 30c. General nomogram for evaluating thermal discomfort index as a function of air variable physical parameters, worker energy production, clothing, and a degree of acclimatization, air relative humidity $\varphi = 40\%$



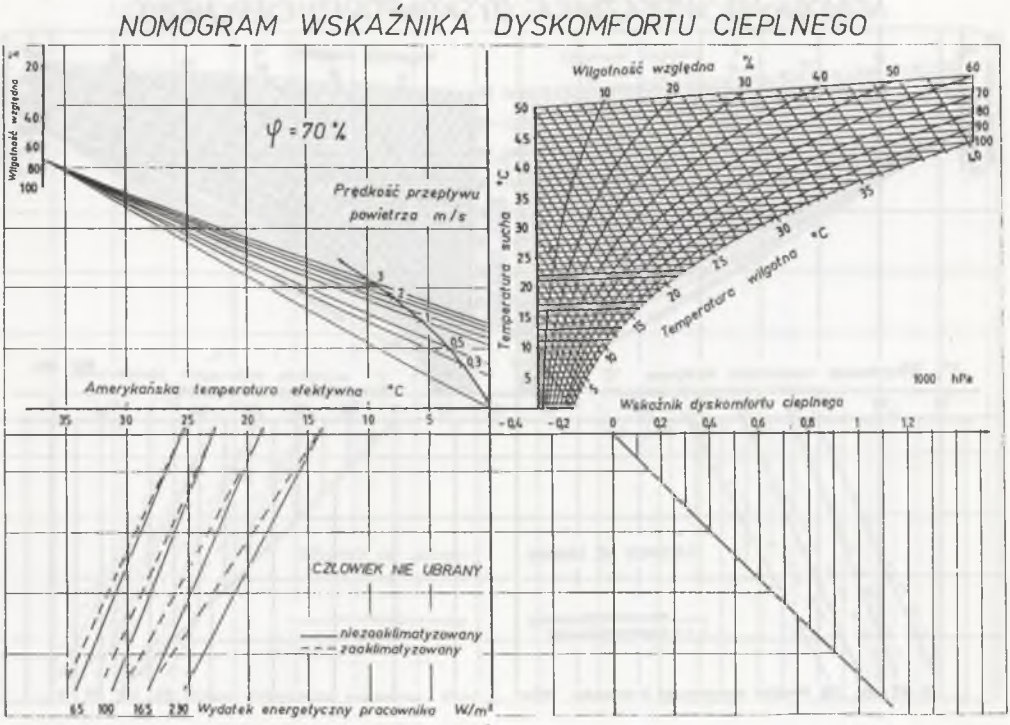
Rys. 30d. Nomogram ogólny do wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego w zależności od zmiennych parametrów fizycznych powietrza, wydatku energetycznego pracownika, ubioru i stopnia aklimatyzacji, wilgotność względna powietrza $\varphi = 50\%$

Fig. 30d. General nomogram for evaluating thermal discomfort index as a function of air variable physical parameters, worker energy production, clothing, and a degree of acclimatization, air relative humidity $\varphi = 50\%$



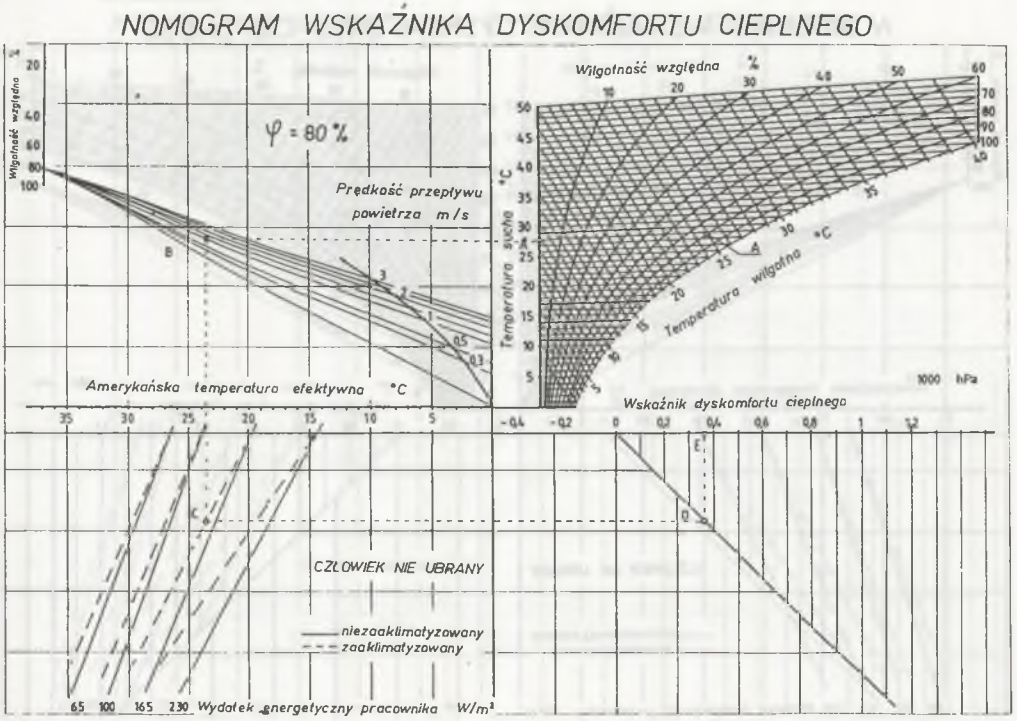
Rys. 30e. Nomogram ogólny do wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego w zależności od zmiennych parametrów fizycznych powietrza, wydatku energetycznego pracownika, ubioru i stopnia aklimatyzacji, wilgotność względna powietrza $\varphi = 60\%$

Fig. 30e. General nomogram for evaluating thermal discomfort index as a function of air variable physical parameters, worker energy production, clothing, and a degree of acclimatization, air relative humidity $\varphi = 60\%$



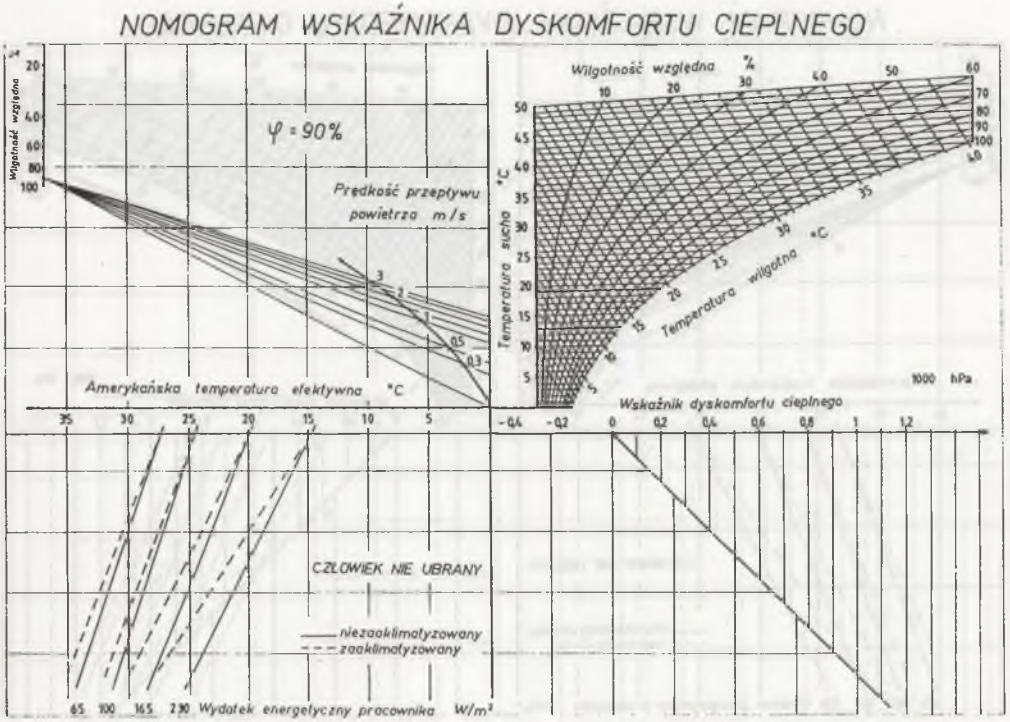
Rys. 30f. Nomogram ogólny do wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego w zależności od zmiennych parametrów fizycznych powietrza, wydatku energetycznego pracownika, ubioru i stopnia aklimatyzacji, wilgotność względna powietrza $\varphi = 70\%$

Fig. 30f. General nomogram for evaluating thermal discomfort index as a function of air variable physical parameters, worker energy production, clothing, and a degree of acclimatization, air relative humidity $\varphi = 70\%$



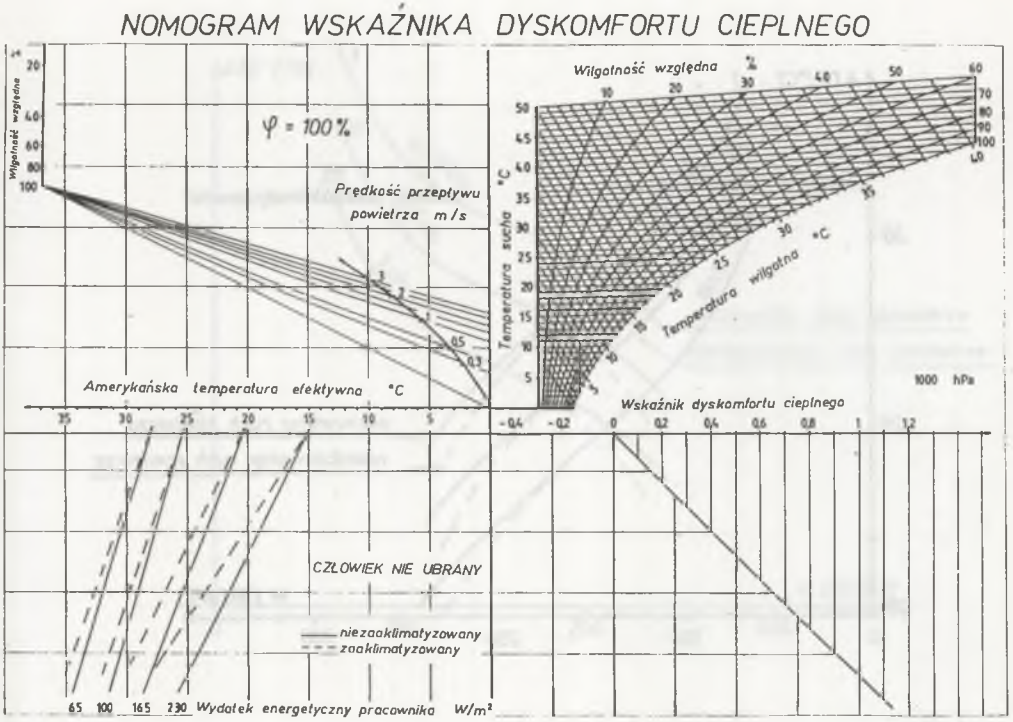
Rys. 30g. Nomogram ogólny do wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego w zależności od zmiennych parametrów fizycznych powietrza, wydatku energetycznego pracownika, ubioru i stopnia aklimatyzacji, wilgotność względna powietrza $\varphi = 80\%$

Fig. 30g. General nomogram for evaluating thermal discomfort index as a function of air variable physical parameters, worker energy production, clothing, and a degree of acclimatization, air relative humidity $\varphi = 80\%$



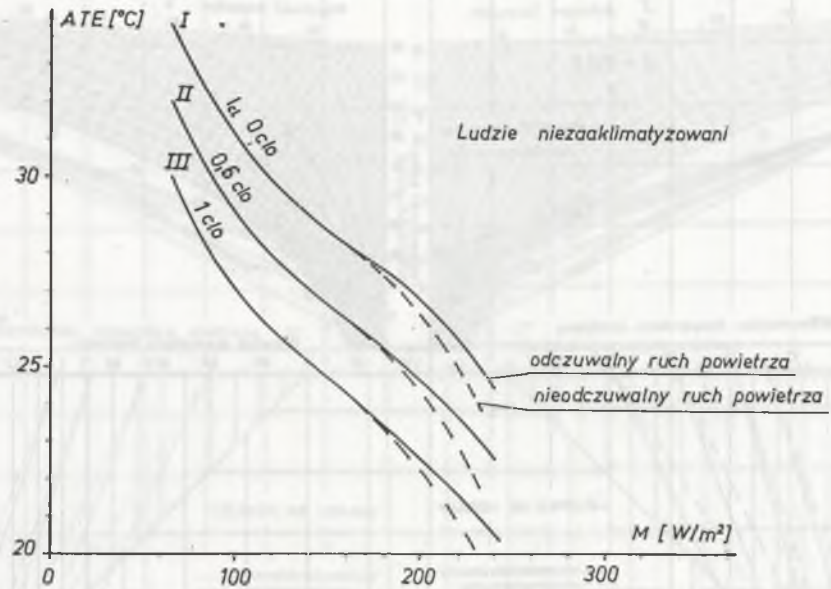
Rys. 30h. Nomogram ogólny do wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego w zależności od zmiennych parametrów fizycznych powietrza, wydatku energetycznego pracownika, ubioru i stopnia aklimatyzacji, wilgotność względna powietrza $\varphi = 90\%$

Fig. 30h. General nomogram for evaluating thermal discomfort index as a function of air variable physical parameters, worker energy production, clothing, and a degree of acclimatization, air relative humidity $\varphi = 90\%$



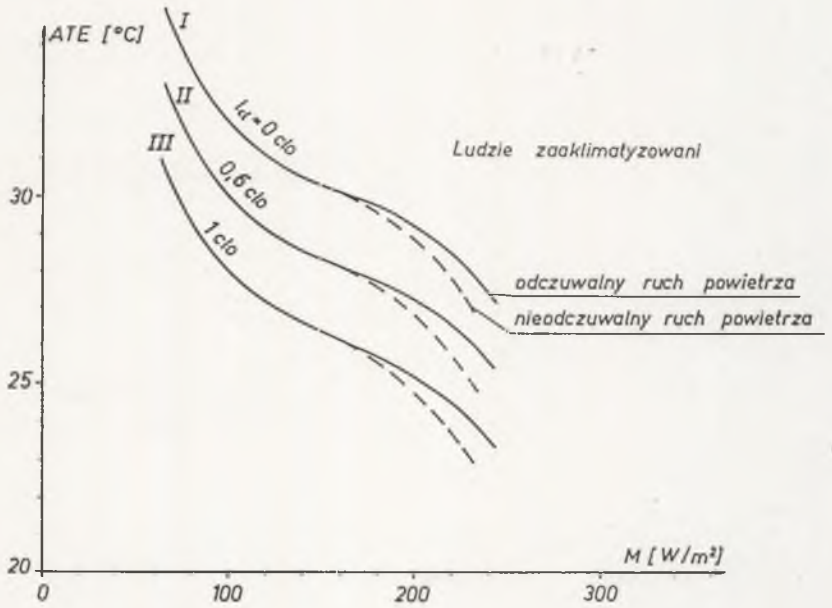
Rys. 30i. Nomogram ogólny do wyznaczenia wskaźnika dyskomfortu cieplnego w zależności od zmiennych parametrów fizycznych powietrza, wydatku energetycznego pracownika, ubioru i stopnia aklimatyzacji, wilgotność względna powietrza $\varphi = 100\%$

Fig. 30i. General nomogram for evaluating thermal discomfort index as a function of air variable physical parameters, worker energy production, clothing, and a degree of acclimatization, air relative humidity $\varphi = 100\%$



Rys. 31. Zależność granicznych wartości temperatur efektywnych amerykańskich od wydatku energetycznego pracownika dla ludzi niezaaklimatyzowanych

Fig. 31. Limiting values of American Effective Temperatures as a function of worker energy production for not acclimatized men



Rys. 32. Zależność granicznych wartości temperatur efektywnych amerykańskich od wydatku energetycznego pracownika dla ludzi zaaklimatyzowanych

Fig. 32. Limiting values of American Effective Temperatures as a function of worker energy production for acclimatized men

.000,-

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P.3351/93/213