Mikroklimat

dr Krzysztof Sołtyński - Centralny Instytut Ochrony Pracy
(artykuł z pakietu edukacyjnego „Nauka o pracy - bezpieczeństwo, higiena, ergonomia” CIOP)

1. Wymiana ciepła między człowiekiem a jego otoczeniem

Między człowiekiem a środowiskiem zachodzi nieustanna wymiana ciepła (foliogram 1). Odbywa się ona czterema drogami: przez przewodzenie, konwekcję, promieniowanie oraz odparowywanie potu. Tego rodzaju przepływy ciepła zależą od pewnej liczby charakterystyk fizycznych otoczenia. Są to: temperatura powietrza, średnia temperatura promieniowania, ciśnienie pary wodnej i prędkość ruchu powietrza. Ponieważ do prawidłowego działania wszystkich funkcji organizmu jest konieczne utrzymanie stałej ciepłoty ciała (homeotermii), dlatego muszą istnieć odpowiednie mechanizmy, które pozwalają organizmowi wytworzyć niezbędną ilość ciepła lub też odprowadzić jego nadmiar. Mechanizmy te, uruchamiane za pomocą niezależnego mechanizmu termoregulacji, nie zawsze mogą podołać obciążeniom termicznym, na jakie narażony jest organizm ze strony środowiska. Konsekwencją takiego stanu jest nieuchronny wzrost temperatury wnętrza ciała w środowisku gorącym lub jej spadek w środowisku zimnym.

Podstawowym mechanizmem wytwarzania ciepła w organizmie jest proces przemiany, zwany metabolizmem. Okazuje się, że w ten sposób wytworzone ciepło znacznie wzrasta podczas pracy fizycznej. Może osiągnąć wartości 15 ÷ 20-krotnie większe od przemiany podstawowej. Mała część tego ciepła zostaje usunięta z organizmu w wyniku oddychania i wydatku ciepła związanego z wykonywaną pracą. Pozostała ilość ciepła musi zostać przemieszczona z wnętrza ciała w kierunku skóry. Organizm stara się ułatwić to zadanie. Następuje wzrost ukrwienia i temperatury skóry oraz uaktywnianie się gruczołów potowych. Wzrost temperatury skóry zwiększa wymianę pomiędzy organizmem a środowiskiem w drodze konwekcji i promieniowania, a odparowywanie potu jest najwydajniejszym mechanizmem rozpraszania ciepła.

Organizm, podporządkowany prawu zachowania stałej ciepłoty, nie może oczywiście sprostać każdym obciążeniom pracy i środowiska. Wzrost tętna, który musi zrównoważyć zmniejszenie ciśnienia żylnego, związane ze zwiększonym przemieszczaniem krwi od wnętrza ku powierzchni ciała w wyniku rozszerzenia naczyń krwionośnych skóry, nie może przekroczyć 140 uderzeń/minutę. Ilość wydzielonego potu nie może wzrastać nieograniczenie - przyjmuje się, że maksymalna ilość potu w ciągu 8 godzin pracy nie przekracza 4 litrów. Wreszcie, temperatura wnętrza ciała może wzrosnąć zaledwie o 1 °C, tzn. może osiągnąć 38 °C.

Warunek zachowania homeotermii narzuca konieczność ograniczenia czasu przebywania człowieka w gorącym środowisku pracy. Wzrost tętna, maksymalny wydatek potowy oraz wzrost temperatury wnętrza ciała są czułymi wskaźnikami obciążenia cieplnego organizmu i wyznaczają granice tolerancji niekorzystnego wpływu środowiska i pracy na organizm człowieka.

Współzależność między człowiekiem a środowiskiem w zakresie wymiany ciepła ujęta jest ilościowo w równaniu bilansu cieplnego człowieka:

$$S = M - W - R - C - E - Res \qquad (1)$$

gdzie:

S - akumulacja ciepła
M - metabolizm energetyczny
W - praca zewnętrzna
Res - straty ciepła przy oddychaniu
C, R - wymiana ciepła na drodze konwekcji i promieniowania
E - straty ciepła na drodze odparowywania potu.

W dotychczasowych rozważaniach o stabilności termicznej człowieka pominięto wpływ odzieży. Ubranie stanowi jednak barierę pomiędzy powierzchnią skóry a otoczeniem, która oddziałuje zarówno na wymianę ciepła przez konwekcję i promieniowanie, jak i na wymianę ciepła przez odparowywanie. Trzeba wyraźnie

wskazać, że wpływ ubrania na wymianę ciepła jest bardzo złożony. Należy wprowadzić wiele uproszczeń uśredniających oraz pewne przybliżenia. Praktycznie do bilansu cieplnego człowieka wnosi się czynniki korekcyjne:

$$f_{cl} = \frac{1}{1 + (h_c + h_r) \cdot I_{cl}} \qquad (2)$$

dla wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie
oraz

$$f_{pcl} = \frac{1}{1 + 0{,}923 \cdot h_c \cdot I_{cl}} \qquad (3)$$

jako czynnik redukujący wymianę ciepła przez odparowywanie,
gdzie:

I_{cl} - izolacja cieplna ubrania
h_c i h_r - współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie.

Obliczenie bilansu cieplnego (1) z uwzględnieniem korekcji (2) umożliwia wyliczenie obciążenia termicznego. Obliczenie to, przeprowadzone przy założeniu braku potu, a więc przy założeniu minimalnej wilgotności skóry, daje:

$$S = M - W - R - C - Res \qquad (4)$$

Gdy bilans cieplny jest dodatni, mamy do czynienia ze środowiskiem gorącym, wymagającym uruchomienia mechanizmów walki z gorącem. Gdy bilans cieplny jest ujemny, mamy do czynienia ze środowiskiem chłodnym, wymagającym uruchomienia mechanizmów walki z zimnem. Natomiast bilans cieplny jest równy zeru w środowisku neutralnym.

W środowisku neutralnym ilość ciepła, które jest wytwarzane przez przemianę w spoczynku lub podczas wykonywania określonej czynności, zostaje rozproszona w taki sposób, że temperatura wnętrza ciała, bez udziału niezależnego mechanizmu termoregulacji, utrzymuje się na stałym poziomie. Z tego względu w środowisku tym wszyscy ludzie, bez względu na płeć, wiek i aklimatyzację, czują się jednakowo dobrze.

Zupełnie odmiennie jest w środowisku gorącym. Ilość ciepła wytwarzanego ulega wprawdzie rozproszeniu w stopniu umożliwiającym utrzymanie temperatury wnętrza ciała na stałym poziomie, lecz muszą zostać włączone mechanizmy autonomicznej termoregulacji. W krańcowym przypadku ilość zgromadzonego ciepła nie może zostać rozproszona i temperatura wnętrza ciała zaczyna się stopniowo podnosić.

Sprawność mechanizmów utrzymujących stałą ciepłotę ciała zależy od ogólnej kondycji człowieka, przede wszystkim zaś od jego wydolności krążeniowej, ilości gruczołów potowych, aklimatyzacji, a więc czynników zależnych od wieku, płci, wagi ciała oraz wytrenowania [11].

Współzależność między funkcją przenoszenia tlenu a funkcją przenoszenia ciepła powoduje u człowieka, w gorącym środowisku pracy, zmiany aktywności psychosensomotorycznej. Obserwuje się spadek wydolności pracy i wskaźnika dokładności wykonywania zadań (błąd, przeoczenie), [4]. Wynika stąd konieczność klasyfikacji stanowisk pracy zarówno ze względu na stopień uciążliwości fizycznej i termicznej, jak również wymagań dotyczących precyzji wykonywanej pracy. Szczególnie wymagające - z tego punktu widzenia - stanowiska pracy są dostępne tylko dla organizmów zaaklimatyzowanych, wytrenowanych i mających duże zdolności adaptacyjne.

2. Komfort cieplny

W czasie opracowywania koncepcji instalacji wentylacji lub regulowania instalacji już istniejącej należy dążyć do osiągnięcia optymalnego samopoczucia pracowników - komfortu cieplnego. Odczucia cieplne człowieka odnoszą się głównie do równowagi cieplnej całego ciała. Na równowagę wpływa aktywność fizyczna człowieka, odzież, jaką ma na sobie, jak również parametry otoczenia: temperatura powietrza, średnia temperatura promieniowania, prędkość przepływu powietrza i wilgotność powietrza (foliogram 2).

Po przeprowadzeniu oceny lub pomiarów powyższych czynników można na podstawie aktualnego stanu wiedzy [2, 13] przewidzieć wrażenia cieplne człowieka, wyrażone w 7-stopniowej skali wrażeń cieplnych, jako: gorące (+3), ciepłe (+2), lekko ciepłe (+1), neutralne (0), lekko chłodne (-1), chłodne (-2), zimne (-3), obliczając wskaźnik PMV (przewidywana ocena średnia) i związany z nim wskaźnik PPD (przewidywany procent osób niezadowolonych).

Na podstawie wskaźników PMV i PPD proponuje się określenie granic komfortu cieplnego jako zadawalających dla 90% ludzi, co odpowiada wartości wskaźnika PMV zawartej w granicach $-0{,}5 < PMV < +0{,}5$.

Wskaźnik PMV wykorzystywany jest również do klasyfikacji środowisk termicznych gorących i zimnych (foliogram 3).

Analizie warunków, jakie należy spełnić, aby zapewnić komfort cieplny, jak również sposobom jego ścisłej definicji poświęcono w piśmiennictwie wiele uwagi [1, 2]. Warunki komfortu cieplnego stwarzają jednakowe i najkorzystniejsze warunki pracy, dostępne dla ogółu pracowników bez ograniczeń związanych z wiekiem i płcią. Niepotrzebna jest aklimatyzacja pracownika, możliwa jest praca całozmianowa, mogą być także wykonywane prace wymagające wyjątkowej precyzji i uwagi. W ostatnich latach komfort cieplny jest swoistego rodzaju „produktem", który się wytwarza, sprzedaje i na który istnieje wzrastający popyt.

Według P.O. Fangera [3] w ustalonych warunkach otoczenia podstawowymi warunkami komfortu cieplnego człowieka są:

- zrównoważony bilans cieplny
- pot wydzielany w granicach przewidzianych dla komfortu
- średnia ważona temperatura skóry w granicach przewidzianych dla komfortu

$$H = E_d - E - E_r - C_r = K = R + C \qquad (5)$$

gdzie:

H - wewnętrzna produkcja ciepła człowieka
R - przekaz ciepła przez promieniowanie z powierzchni odzieży
C - przekaz ciepła na drodze konwekcji z powierzchni odzieży
K - przekaz ciepła od powierzchni skóry do wewnętrznej powierzchni odzieży
E - straty ciepła przez odparowanie potu z powierzchni skóry
E_d - straty ciepła na skutek dyfuzji pary wodnej przez skórę
E_r - straty ciepła na parowanie z dróg oddechowych
C_r - straty ciepła przez konwekcję z dróg oddechowych.

Ciepło generowane jest we wnętrzu ciała i tracone z powierzchni skóry, następnie transportowane przez odzież i wymieniane z otoczeniem. Logiczne rozważania, rozsądne założenia i przegląd piśmiennictwa doprowadziły do równań dających się rozwiązać względem sześciu podstawowych parametrów (t_a, t_r, p_a,v, Clo, M).

3. Środowisko gorące

Powyżej strefy komfortu cieplnego (PMV > +2), w zakresie pola wysokiej temperatury powietrza i promieniowania, rozciąga się obszar warunków klimatycznych, dla których równanie bilansu cieplnego, obliczone wyłącznie na podstawie wymiany konwekcyjnej i przez promieniowanie, ma wartość dodatnią.

Warunki te będą dalej określane jako środowisko gorące, warunki stresu cieplnego lub, biorąc pod uwagę obciążenie ustroju w tych warunkach, dyskomfort gorący ogólny.

Istnieją również inne przyczyny powstania stresu termicznego gorącego. Brak równowagi bilansu cieplnego może być wywołany, na przykład, zwiększeniem metabolicznej produkcji ciepła, zwiększeniem wilgotności powietrza i zmianą szybkości przepływu powietrza, gdy jego temperatura jest wyższa od średniej temperatury skóry.

Niezależnie od przyczyny powodującej powstanie stresu termicznego gorącego, odpowiedzią termoregulacyjną ze strony ustroju człowieka jest rozszerzenie naczyń krwionośnych skóry i wzrost skórnego przepływu krwi. Gdy temperatura otoczenia przekracza 28 ÷ 32 °C zostaje uruchomiony drugi mechanizm termoregulacyjny - wydzielanie potu.

Fizjologiczna przewodność cieplna jest definiowana za pomocą zależności:

$$h_i = h + F_{fl} \cdot Q_{sk} \qquad (6)$$

w której:

h_i - fizjologiczna przewodność cieplna, $W \cdot m^2 \cdot K^{-1}$
h - przewodność cieplna tkanki, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
F_{fl} - pojemność cieplna krwi, $J \cdot l^{-1} \cdot K^{-1}$
Q_{sk} - stopień ukrwienia skóry, $l \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$

Widać wyraźnie, że wzrost fizjologicznej przewodności cieplnej praktycznie może być zapewniony przez zwiększenie ukrwienia skóry, wynikające z redystrybucji przepływu przez nią krwi, kosztem obszarów wewnętrznych ciała [9].

Celem obu tych mechanizmów jest utrzymanie homeostazy termicznej w ustroju, a ich działanie powoduje wiele wtórnych zmian czynnościowych ze strony serca oraz różnych narządów i układów. Są to przede wszystkim zmiany w rozmieszczeniu krwi w ustroju, odwodnienie i utrata soli mineralnych. Ponadto, wzrost temperatury ciała wpływa na czynność ośrodkowego układu nerwowego.

Organizm podporządkowany prawu zachowania stałej ciepłoty nie może oczywiście sprostać każdym obciążeniom pracy i środowiska. Działanie środowiska cieplnego należy więc ściśle wiązać z czasem.

Obecnie, na podstawie aktualnego stanu wiedzy [7, 8, 10, 14, 16] możemy ocenić nie tylko wielkość obciążenia termicznego i jego najwyższą wartość dopuszczalną (NDN), lecz również wyznaczyć czas ekspozycji dopuszczalnej, określić ryzyko oraz podać warunki i wymagany czas odnowy biologicznej organizmu.

W praktyce przemysłowej do tego celu szeroko wykorzystywany jest wskaźnik WBGT (wet bulb globe temperature) opisany w normie ISO 7243 i odpowiadającej jej polskiej normie PN-N-08011: 1985 [14]. Uwzględnione są przy tym wszystkie czynniki, które wpływają na obciążenie termiczne: parametry mikroklimatu, obciążenie wysiłkiem fizycznym (wielkość produkcji ciepła metabolicznego), termoizolacyjność odzieży, ruch powietrza oraz zaaklimatyzowanie bądź niezaaklimatyzowanie do środowiska gorącego.

4. Środowisko zimne

Poniżej strefy komfortu cieplnego (PMV < -2), w zakresie pola niskiej temperatury zarówno powietrza, jak i promieniowania, rozciąga się obszar warunków klimatycznych, dla których równanie bilansu cieplnego, obliczone wyłącznie na podstawie wymiany konwekcyjnej i przez promieniowanie, ma wartość ujemną. Warunki te będziemy określać dalej jako środowisko zimne, warunki stresu cieplnego lub, biorąc pod wagę obciążenie ustroju w tych warunkach, dyskomfort zimny ogólny.

Powstanie stresu termicznego zimnego może mieć również inne przyczyny. Nierównowagę bilansu cieplnego wywołuje na przykład obniżenie metabolizmu i zmiana szybkości przepływu powietrza, gdy jego temperatura jest niższa od średniej temperatury skóry.

Niezależnie od przyczyny powodującej powstanie stresu termicznego zimnego, odpowiedzią termoregulacyjną ze strony ustroju człowieka jest skurcz naczyń krwionośnych skóry, wywołujący zmniejszenie skórnego przepływu krwi i przewodnictwa cieplnego tkanek powierzchniowych oraz zwiększenie wytwarzania ciepła.

Oba te mechanizmy mają na celu utrzymanie homeostazy termicznej ustroju, a ich działanie powoduje wiele wtórnych zmian czynnościowych ze strony różnych narządów i układów. Należą do nich przede wszystkim zmiany w objętości i rozmieszczeniu płynów ustrojowych, w czynnościach nerek i inne.

Organizm, podporządkowany prawu zachowania stałej ciepłoty, nie może oczywiście sprostać każdym obciążeniom ze strony środowiska. Podobnie jak w przypadku środowiska gorącego, skutki działania środowiska zimnego należy ściśle wiązać z czasem jego oddziaływania, a temperatura skóry, spadek temperatury wnętrza ciała i ubytek ciepła są czułymi wskaźnikami ujemnego obciążenia termicznego organizmu i wyznaczają granice tolerancji niekorzystnego wpływu środowiska na organizm człowieka.

Zimny stres miejscowy jest oceniany za pomocą wskaźnika siły chłodzącej powietrza WCI (wind chill index). Oznaczenie wskaźnika WCI jest konieczne do oceny miejscowego chłodzenia ciała, np. powierzchni twarzy, rąk. Wraz ze wzrostem wartości tego wskaźnika rośnie niebezpieczeństwo (ryzyko) odmrożenia.

Środowisko zimne powoduje również chłodzenie całego ciała, czyli hipotermię, i dlatego w tym mikroklimacie należy stosować odzież ciepłochronną. Wymaganą ciepłochronność odzieży IREQ (required clothing insulation) określa się w jednostkach clo, w zależności od szybkości metabolicznej produkcji ciepła i parametrów środowiska zewnętrznego. Zastosowanie wymaganej ciepłochronności odzieży ma zapobiegać hipotermii i obniżeniu wewnętrznej temperatury ciała nie więcej niż o 1,0 °C, czyli do 36,0 °C [7, 8, 10 ,15].

5. Środowiska termiczne niejednorodne i o parametrach zmiennych w czasie

W dotychczasowych rozważaniach założono a priori stałość parametrów fizycznych charakteryzujących środowisko cieplne pracy zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. W praktyce nie występują tak idealne warunki. Człowiek może się czuć ogólnie termicznie neutralny, lecz lokalnie może odczuwać dyskomfort w części ciała (może być za zimno lub za gorąco). Przyczyną tego lokalnego dyskomfortu będzie np. nadmierne promieniowanie z jednego kierunku, lokalne konwekcyjne chłodzenie (przeciągi), kontakt z gorącą lub zimną powierzchnią, wreszcie pionowy gradient temperatury.

Również poziom przemiany na ogół jest zmienny w czasie, tak, jak zmienia się wydatek energetyczny, czyli wielkość obciążenia pracą fizyczną zgodnie z wymaganiami wykonywanej pracy [6].

Dynamika zmian środowiska i pracy prowadzi do zmiennych obciążeń organizmu człowieka. W zakresie prawidłowej oceny zagrożenia (ryzyka) musi to pozostawić ślad w postaci konieczności analizowania uśrednionych wartości obciążenia. Zwiększa to znacznie liczbę niezbędnych pomiarów, które dodatkowo, przy dużej niejednorodności środowiska, powinny być prowadzone na wysokości głowy, piersi i nóg pracownika.

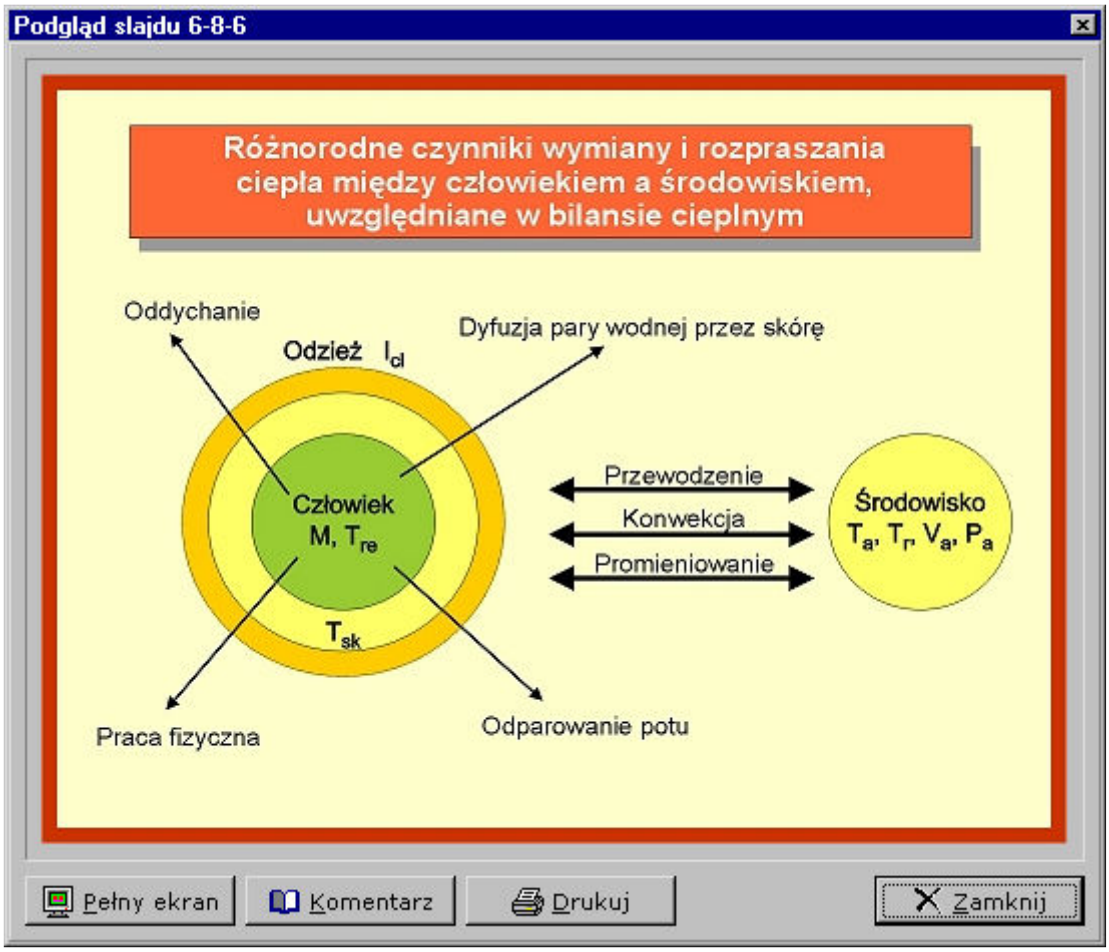
Powiązanie człowieka ze środowiskiem cieplnym pracy ma charakter złożony ze względu na występowanie licznych wzajemnie na siebie oddziałujących czynników. Dokładne poznanie charakteru, dynamiki i wielkości tych oddziaływań stanowi jednak niezbędną podstawę do rzetelnie prowadzonej pracy w zakresie ochrony człowieka przed skutkami obciążeń występujących przy pracy tak w zimnym, jak i gorącym klimacie. Optymalizacja przemysłowego środowiska cieplnego pracy, w celu zmniejszenia do minimum jego niekorzystnego wpływu na organizm człowieka, oznacza jednoczesną poprawę zdrowia, bezpieczeństwa i wydajności pracy. Jest więc działaniem niezbędnym z punktu widzenia humanitarnego i utylitarnego.

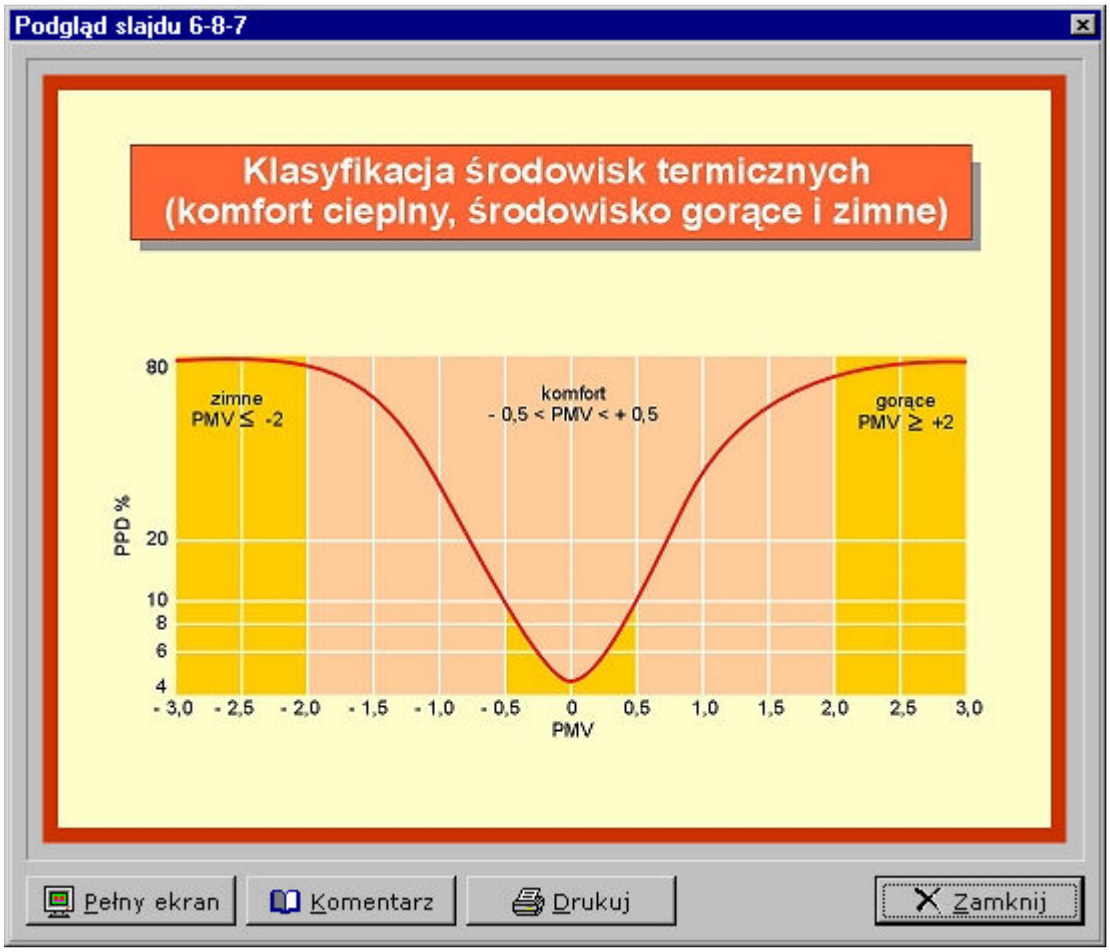
6. Literatura

1. Cena K., Clark J. A.: Bioenginering. Thermal physiology and comfort. Wrocław, Technical University Press 1980.
2. Fanger P. O.: Komfort cieplny. Warszawa, Arkady 1974.
3. Fanger P.O.: Thermal Comfort. Copenhagen, Danish Technical Press 1970.
4. Grivel F.: La recherche d une relationreguliere entre chaleur et performance psychomotorice. Le Travail Humain 1976, 36.
5. Kaciuba-Uściłko H., Kruk B.: Termoregulacja i wpływ warunków środowiska termicznego na organizm człowieka. W: Wprowadzenie do fizjologii klinicznej. Red. S. Kozłowski, K. Nazar. Warszawa, PZWL 1995.
6. Koradecka D., Łotach H.: Ocena wielkości obciążenia pracą fizyczną na stanowiskach roboczych. Materiały do Studiów i Badań 1981, 58.
7. Marszałek A., Sołtyński K., Spioch F.: Mikroklimat gorący i zimny. W: Bezpieczeństwo pracy i ergonomia. Red. nauk. D. Koradecka. T. 1. Warszawa, CIOP 1999.
8. Parsons K. C.: Human thermal environments. London, Taylor & Francis 1993.
9. Rowell L.B.: Sercowo-krążeniowy mechanizm regulacyjny u człowieka podczas wysiłku i narażeń cieplnych. Review of Physiology 1974, 22.
10. Sołtyński K.: Mikroklimat. W: Czynniki szkodliwe w środowisku pracy. Warszawa, CIOP 1999.
11. Vogt J. J.: L' ambiance thermique de travail. Archives des Maladies Professionnelles de Medicine du Travail et Securite Sociale 1979, 40.
12. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 17 czerwca 1998 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dz.U. nr 79, poz. 513.
13. PN-N-08013: 1985. Ergonomia. Środowiska termicznie umiarkowane. Określanie wskaźników PMV, PPD i wymagań dotyczących komfortu termicznego.
14. PN-N-08011: 1985. Ergonomia. Środowiska gorące. Wyznaczanie obciążeń termicznych działających na człowieka w środowisku pracy, oparte na wskaźniku WBGT.
15. PN-N-08009: 1987. Ergonomia. Środowiska zimne. Metoda oceny ujemnego obciążenia termicznego oparta na wskaźnikach WCI i IREQ.
16. PN-N-08008: 1988. Ergonomia. Środowiska gorące. Analityczne określenie i interpretacja stresu cieplnego oparta na podstawie obliczenia wymaganej ilości potu.

7. Foliogramy

Foliogram 1.


Podgląd slajdu 6-8-6
Różnorodne czynniki wymiany i rozpraszania ciepła między człowiekiem a środowiskiem, uwzględniane w bilansie cieplnym
Oddychanie
Odzież I_{cl}
Dyfuzja pary wodnej przez skórę
Człowiek
M, T_{re}
T_{sk}
Przewodzenie
Konwekcja
Promieniowanie
Środowisko
T_a, T_r, V_a, P_a
Praca fizyczna
Odparowanie potu
Pełny ekran
Komentarz
Drukuj
Zamknij
Foliogram 2.


Podgląd slajdu 6-8-7
Klasyfikacja środowisk termicznych
(komfort cieplny, środowisko gorące i zimne)
80
20
10
8
6
4
PPD %
zimne
PMV ≤ -2
komfort
- 0,5 < PMV < + 0,5
gorące
PMV ≥ +2
- 3,0
- 2,5
- 2,0
- 1,5
- 1,0
- 0,5
0
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
PMV
Pełny ekran
Komentarz
Drukuj
Zamknij
Foliogram 3.