

dr inż. ANNA BOGDAN
Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
00-701 Warszawa
ul. Czerniakowska 16

Metody oceny oddziaływania mikroklimatu zimnego na organizm człowieka

Słowa kluczowe: mikroklimat zimny, odmrożenia, WCI, IREQ.

Key words: cold microclimate, frostbite, WCI, IREQ.

Ocena narażenia pracowników na oddziaływanie środowiska zimnego może być przeprowadzana za pomocą dwóch wskaźników – WCI (*wind chill index*) oraz IREQ (*required clothing insulation*), z których pierwszy opisuje wpływ miejscowego chłodzenia organizmu wywołanego działalnością powietrza o wysokiej prędkości, drugi zaś określa izolacyjność cieplną odzieży ochronnej wymaganej w celu zapobiegania oziębieniu całego ciała.

Omówiono metodę określania i interpretacji obu wskaźników.

MIKROKLIMAT ZIMNY

Wrażenia ciepłe odczuwane przez pracownika na danym stanowisku pracy są wypadkową warunków mikroklimatu, w jakim znajduje się pracownik, a ilością ciepła produkowaną przez jego organizm i izolacyjnością cieplną zastosowanej odzieży (ASHRAE 2004; Fanger 1974; Nims 1999; Parson 2003). W stanie równowagi termicznej, kiedy ilość ciepła odbierana przez środowisko jest równoważona przez ilość ciepła wytwarzanego w organizmie, człowiek odczuwa komfort cieplny. W przypadku gdy ilość ciepła odbierana przez otoczenie jest większa od ilości ciepła produkowanego przez organizm – człowiek znajduje się w stanie obciążenia cieplnego, natomiast środowisko pracy określa się wówczas jako mikroklimat zimny. Kryterium podziału środowiska cieplnego na warunki „komfortowe” i „zimne” jest wartość wskaźnika PMV (*predicted mean vote*). Wskaźnik PMV, opracowany przez Fangera (1974), opisuje zależność między: parametrami mikroklimatu (temperaturą, prędkością i wilgotnością

powietrza oraz temperaturą promieniowania), ilością produkowanego przez człowieka ciepła (metabolizmem) oraz barierą redukującą ilość oddawanego do otoczenia ciepła, jaką jest odzież (izolacyjnością cieplną odzieży oraz współczynnikiem stosunku powierzchni odzieży do powierzchni całego ciała człowieka).

Na podstawie określenia wartości wskaźnika PMV można stwierdzić, czy przebywający w danym pomieszczeniu pracownik będzie odczuwał panujące warunki jako „komfortowe” ($-0,5 < PMV < +0,5$), czy też środowisko będzie odczuwane jako „zimne” ($PMV < -2$). Środowisko termiczne, w którym wartość wskaźnika PMV wynosi poniżej -2 , jest definiowane zatem jako „mikroklimat zimny”, w którym może wystąpić lokalne wychłodzenie organizmu prowadzące do obniżenia temperatury skóry, a także nadmierne wychłodzenie całego organizmu prowadzące do obniżenia temperatury wewnętrznej. Dolna, dopuszczalna wartość temperatury skóry w takich warunkach wynosi $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, zaś temperatury wewnętrznej – $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dalsze obniżanie temperatury wewnętrznej może prowadzić do wielu zaburzeń funkcjonowania organizmu (tab.1.).

Tabela 1.

Odpowiedzi organizmu na obniżanie temperatury wewnętrznej (Nims 1999)

Temperatura wewnętrzna, $^{\circ}\text{C}$	Reakcje organizmu
36	wzrost tempa metabolizmu
35	silne dreszcze
33	stan silnej hipotermii
32	zaniki świadomości, ustąpienie dreszczy, obniżenie ciśnienia tętniczego krwi
30	sztywnienie mięśni, zanik pulsu, dalsze obniżenie ciśnienia tętniczego
28	nieregularny rytm pracy serca zagrażający życiu

OCENA ODDZIAŁYWANIA ZIMNA NA ORGANIZM

Miejscowe oddziaływanie zimna na organizm człowieka, czyli stres miejscowy występujący przy temperaturze powietrza poniżej $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, jest określane m.in. za pomocą wskaźnika WCI (*wind chill index* – wskaźnik siły chłodzącej wiatru). Wskaźnik ten został opracowany przez *Siple'a* i *Pastela* (1945) na podstawie wyników badań wykonanych na Antarktydzie na cylindrycznej kolbie zanurzonej częściowo w wodzie. Wskaźnikiem WCI można opisać wielkość strat ciepła z cylindra, na drodze promieniowania i konwekcji, dla powierzchni o temperaturze $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ w funkcji temperatury oraz prędkości powietrza. Wskaźnik WCI jest wyrażany w kilokaloriach na metr kwadratowy razy godzina ($\text{kcal/m}^2\text{h}$).

Wskaźnik stosuje się do wyznaczania siły chłodzącej wiatru na organizm człowieka i jest stosowany do szybkiej oceny oddziaływania środowiska zimnego na organizm człowieka w okresie reprezentatywnym dla jego pracy. Wskaźnik ten jest stosowany najczęściej w przypadku pracy na zewnątrz budynków. Pomimo pewnych ograniczeń (wskaźnik nie uwzględnia strat ciepła przez oddychanie ani ekspozycji na zimno nagiej skóry oraz oporności termicznej odzieży) jest to obecnie powszechnie wykorzystywany sposób oceny wpływu środowiska zimnego na organizm.

Tak samo jak ocena miejscowego oddziaływania wiatru na organizm pracownika istotne jest określenie wychłodzenia całego organizmu. W tym celu stosuje się wskaźnik IREQ (*required clothing insulation* – wymagana izolacyjność odzieży). Wskaźnik ten został opracowany przez *Holmera* (1984), który oparł go na równaniu równowagi termicznej układu człowiek-otoczenie (równaniu bilansu cieplnego) opracowanym przez *Fangera* (1974). Wskaźnikiem IREQ określa się wymaganą izolacyjność termiczną odzieży (wyrażaną w jednostkach clo; 1 clo = 0,155 m²K/W) w celu zapewnienia stanu komfortu cieplnego i równowagi termicznej w środowisku zimnym. Wskaźnik IREQ należy określać zarówno w przypadku pracy na zewnątrz budynków, jak i pracy w pomieszczeniach zamkniętych.

OCENA LOKALNEGO WYCHŁODZENIA ORGANIZMU

Określenie wartości wskaźnika WCI przebiega w trzech etapach:

1. W pierwszej kolejności są dokonywane pomiary temperatury oraz prędkości powietrza bezpośrednio na stanowisku pracy. Zaleca się wykonywanie pomiarów w okresie odpowiadającym ekstremalnym ujemnym obciążeniom termicznym, nie rzadziej niż raz w ciągu 4 h. Aparatura pomiarowa powinna spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN ISO 7726:2002 Ergonomia środowiska termicznego. Przyrządy do pomiaru wielkości fizycznych (oryg.).

2. Wyniki pomiarów (wyrażone w kilokaloriach na metr kwadratowy razy godzina, kcal/m²h) należy następnie uśrednić dla sumarycznego czasu przeprowadzanych pomiarów na podstawie wzoru:

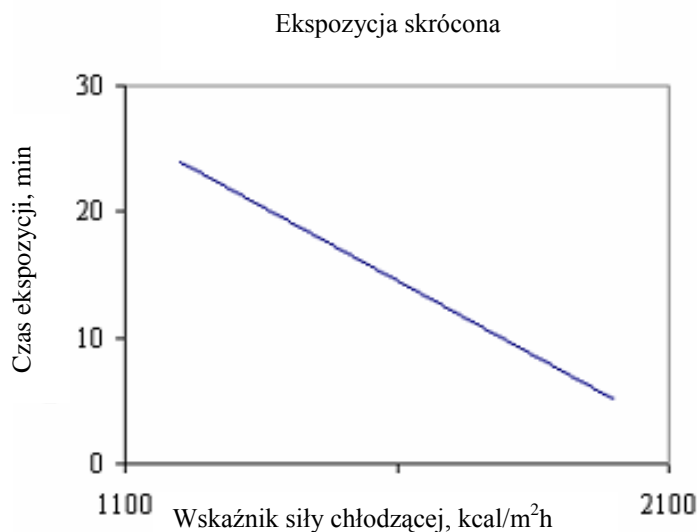
$$WCI = 10,45 + 10\sqrt{V_{ar}} - V_{ar} \cdot 33 - t_a ,$$

w którym:

- V_{ar} – prędkość powietrza, w m/s
- t_a – temperatura powietrza, w °C.

3. Obliczone na tej podstawie wartości WCI należy następnie porównywać z wartościami odniesienia, które zostały określone dla osób zdrowych i w których nie uwzględniono zmian, jakie mogą być np. wywołane działaniem wiatru na nabłonek wyszczepiający drogi oddechowe czy też zmian reakcji psychomotorycznych, które mogą doprowadzić do wypadku. W zależności od wartości współczynnika WCI określa się warunki pracy w trzech przedziałach odniesienia:

- $WCI < 1200$ kcal/m²h – dozwolona jest ekspozycja ciągła pracownika
- $1200 \leq WCI < 2000$ kcal/m²h – dozwolona jest ekspozycja skrócona, której czas jest wyznaczany z zależności liniowej przedstawionej na rysunku 1.
- $WCI \geq 2000$ kcal/m²h – ekspozycja na zimno jest bezwzględnie zabroniona.



Rys. 1. Dozwolony czas ekspozycji dla wskaźnika WCI zawartego w granicach 1200 ÷ 2000

Jeżeli na danym stanowisku pracy wystąpi przekroczenie wartości odniesienia WCI, należy albo bezpośrednio zmniejszyć ujemne obciążenie termiczne za pomocą odpowiednich metod, albo zastosować skrócony czas pracy, np. zgodnie z zaleceniami zawartymi w tabeli 2., w której przedstawiono zalecany czas pracy (w min) w cyklu praca-wypoczynek, w odniesieniu do 4-godzinnej zmiany roboczej, umiarkowanej lub ciężkiej. Zastosowanie zalecanej długości cyklu praca-wypoczynek (zależnego od wartości prędkości powietrza oraz temperatury powietrza nasłonecznionego) zmniejsza ryzyko niekorzystnego oddziaływania środowiska zimnego na organizm pracownika.

Tabela 2.

Zalecany cykl praca – wypoczynek zastosowany do pracy umiarkowanej i ciężkiej dla 4-godzinnej zmiany

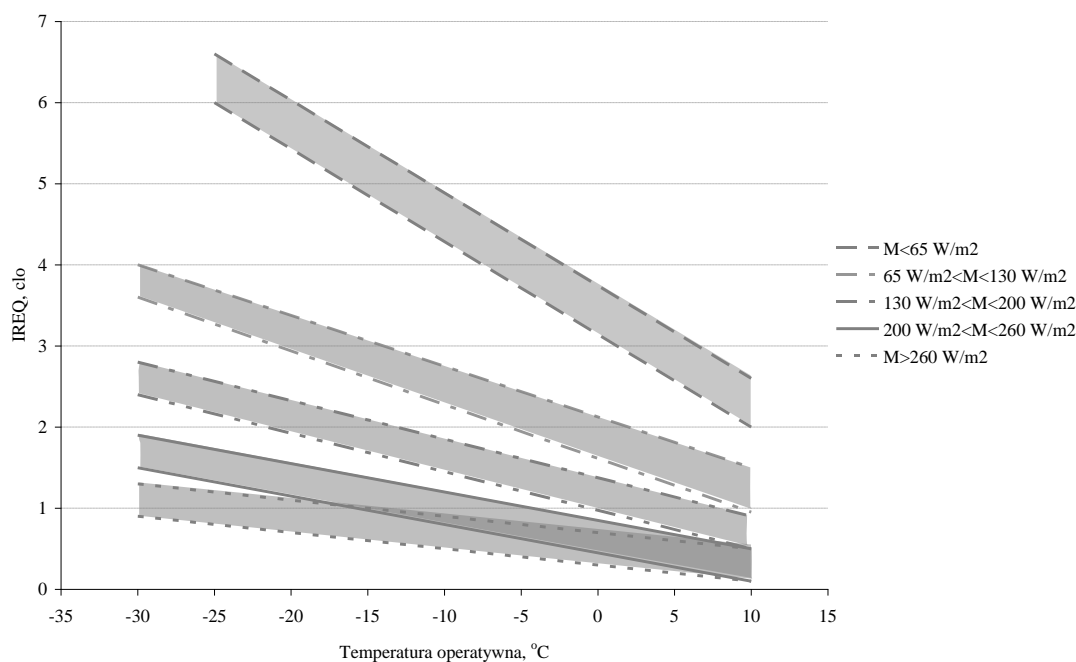
Temperatura powietrza nasłonecznionego, °C	Ruch powietrza, m/s									
	0		2,6		4,5		6,7		8,9	
	czas pracy max	liczba przerw	czas pracy max	liczba przerw	czas pracy max	liczba przerw	czas pracy max	liczba przerw	czas pracy max	liczba przerw
-26 do -28	normalna zmiana	1	normalna zmiana	1	75 min	2	55 min	3	40 min	4
-29 do -31	normalna zmiana	1	75 min	2	55 min	3	40 min	4	30 min	5
-32 do -34	75 min	2	55 min	3	40 min	4	30 min	5	x	x
-35 do -37	55 min	3	40 min	4	30 min	5	x	x	x	x
-38 do -39	40 min	4	30 min	5	x	x	x	x	x	x
-40 do -42	30 min	5	x	x	x	x	x	x	x	x

OCENA OGÓLNEGO WYCHŁODZENIA ORGANIZMU

Wyznaczenie wartości wskaźnika IREQ można podzielić na trzy etapy:

1. W początkowej fazie przeprowadza się pomiary: temperatury powietrza, prędkości ruchu powietrza i temperatury poczernionej kuli bezpośrednio na stanowisku pracy, a następnie, podobnie jak w przypadku wskaźnika WCI, obliczane są wartości średnie, w których są uwzględnione zmiany tych parametrów w czasie i w przestrzeni otaczającej pracownika. W trakcie pomiarów jest jednocześnie określany wydatek energetyczny z jakim pracują osoby przebywające w analizowanym środowisku zimnym. Wydatek energetyczny może być określany na podstawie pomiaru zużycia tlenu przez danego pracownika lub też, w sposób mniej dokładny, ale zdecydowanie prostszy i szybszy za pomocą oszacowania na podstawie tablic zawartych w normie PN-EN ISO 8996:2005. Ergonomia środowiska termicznego. Określanie tempa metabolizmu (oryg.).

2. Na podstawie zmierzonych parametrów powietrza jest obliczana temperatura operatywna, która wraz z wartością wydatku energetycznego umożliwia określenie wartości odniesienia IREQ (zgodnie z rys. 2.). Na rysunku 2. wartości odniesienia są przedstawione w postaci wykresów, na których podano wartości liczbowe IREQ przy stałej wilgotności względnej powietrza równej 50% dla różnych poziomów metabolizmu i różnych wartości temperatury operatywnej. Wartości odniesienia IREQ odpowiadają poziomom oddziaływania, na które mogą być narażone prawie wszystkie osoby bez żadnych szkodliwych skutków zdrowotnych i które reprezentują średni wpływ środowiska zimnego na człowieka w czasie długiego okresu pracy, bez uwzględniania obciążeń szczytowych (tj. krótkotrwałych, szczególnie niskich temperatur i krótkich okresów mniej intensywnej pracy). Wartości odniesienia wskaźnika IREQ zostały opracowane przy następujących założeniach: brak akumulacji ciepła u pracowników, średnia temperatura skóry 30 °C, stosunek pożądanego odparowania potu do wartości maksymalnej równy 0,06 (a więc praktycznie brak pocenia).



Rys. 2. Wartości odniesienia wskaźnika IREQ

3. Określone w 2. etapie wartości odniesienia wskaźnika IREQ są porównywane z wartościami izolacyjności cieplnej odzieży stosowanej na określonym, analizowanym stanowisku pracy. W przypadku gdy izolacyjność odzieży na danym stanowisku pracy będzie mniejsza w stosunku do wartości odniesienia, wymagane jest zastosowanie zestawu o większej wartości izolacyjności cieplnej lub też środków zmniejszających oddziaływanie zimna na pracownika (np. przez izolację termiczną przestrzeni źródła zimna).

PODSUMOWANIE

Problem pracy w mikroklimacie zimnym od wielu lat dotyczy zbliżonej liczby osób. W 2000 r. w warunkach mikroklimatu zimnego było zatrudnionych 22,7 tys. osób, w 2002 r. – 21 tys., w 2004 r. – 15,4 tys., a w 2007 r. – 19,7 tys. osób w stosunku do 5245,4 tys. osób objętych monitoringiem dotyczącym warunków pracy (Warunki... 2005; Ocena... 2008). Na podstawie wyników licznych badań wykazano, że sprawność fizyczna i zdolności intelektualne człowieka osiągają maksimum w warunkach komfortu cieplnego, podczas gdy mikroklimat zimny wywiera skutek negatywny w odniesieniu zarówno do stanu zdrowia, jak i jakości pracy (Grether 1973; Fanger 1974; Nadler, Busch 2002).

Z uwagi jednak na wymagania związane z realizowanymi technologiami nadal na wielu stanowiskach pracownicy są narażeni na oddziaływanie środowisk gorących i zimnych. Zadaniem projektantów tych stanowisk jest takie ich zaprojektowanie, aby były one zgodne z zasadami ergonomii, a zadaniem pracodawców i służb BHP jest właściwy nadzór nad stworzonymi warunkami pracy.

PIŚMIENNICTWO

ASHRAE 55 (2004) Thermal environmental conditions for human occupancy.

Fanger P.O. (1974) Komfort cieplny. Warszawa, Wyd. Arkady.

Grether W.F. (1973) Human performance at elevated environmental temperature. *Aerospace Med.*, 44, 747–755.

Warunki pracy w 2004 r. (2005) Warszawa, GUS.

Holmer I. (1984) Required clothing insulation (IREQ) as an analytical index of cold stress. *ASHRAE Transactions* 90, 116–128.

Ocena stanu bezpieczeństwa i higieny pracy w 2007 roku. (2008) Warszawa, MIPS.

Nadler E., Busch C. (2002) Effects of hot and cold temperature exposure on performance: a meta-analytic review. *Ergonomics* 45, 682–698.

Nims D.K. (1999) Basics of industrial hygiene. John Wiley Sons Inc.

Parson K. (2003) Human thermal environments. The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance. Taylor&Francis.

Siple P.A., Pastel C.F. (1945) Measurements of dry atmosphere cooling in sub-freezing temperatures. *Proc. of American Philosophical Soc.* 89, 177–199.

PN-EN ISO 7726:2002 Ergonomia środowiska termicznego. Przyrządy do pomiaru wielkości fizycznych (oryg.).

PN-EN ISO 8996:2005 Ergonomia środowiska termicznego. Określanie tempa metabolizmu (oryg.).

ANNA BOGDAN

Methods for evaluating the influence of a cold environment on the human body

A b s t r a c t

Estimation of workers' exposure to a cold environment is based on two indices: WCI (wind chill index), which determines the effect of local cooling on human, and IREQ, which determines the clothing insulation required to prevent general cooling. This paper presents a methodology for determining and interpreting both indicators.