

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

Metody oceny środowiska umiarkowanego cieplnie zgodnie z zapisem normy PN-EN ISO 7730:2006

Słowa kluczowe: mikroklimat umiarkowany, wskaźniki *PMV* i *PPD*, komfort cieplny ogólny, dyskomfort miejscowy.

Keywords: moderate environment, *PMV*, *PPD*, general thermal comfort, local discomfort.

Zapewnienie pracownikom poczucia komfortu przez regulację odpowiednich parametrów środowiska pracy to m.in.: zmniejszenie liczby popełnianych przez nich błędów w pracy, ograniczenie liczby wypadków, chorób zawodowych, a także poprawa wydajności pracy oraz jakości produktów i usług.

Według danych GUS w 2008 r. około 60 tys. osób w Polsce jest zatrudnionych w warunkach mikroklimatu zimnego i gorącego, co oznacza, że przeważająca część społeczeństwa pracuje w mikroklimacie umiarkowanym, a więc w środowisku, które powinno spełniać wymagania komfortu termicznego, natomiast przez użytkowników najczęściej jest odbierane jako niesatysfakcjonujące.

W artykule zaprezentowano metody oceny komfortu cieplnego ogólnego i miejscowego.

ŚRODOWISKO UMIARKOWANE

Na odczucia cieplne pracownika zatrudnionego w mikroklimacie umiarkowanym wpływa zbiorcza kombinacja wrażeń wizualnych: słuchowych, namacalnych i cieplnych, jakie pojawiają się w danym środowisku i które wynikają ze zmian w zakresie następujących warunków: temperatury otaczającego powietrza, temperatury promieniowania otaczających powierzchni, wilgotności i prędkości powietrza, zapachów, ilości kurzu, walorów estetycznych oraz natężenia hałasu i oświetlenie. Z przytoczonych parametrów jedynie pierwsze cztery parametry wpływają na komfort cieplny człowieka, który zależy w dużym stopniu również od metabolizmu człowieka, jego aktywności oraz indywidualnej zdolności przystosowania się do zmian. Pomimo że człowiek ma zdolność

adaptacji do bardzo zmiennych i niekorzystnych warunków klimatycznych, to jednak efektywność pracowników wykonywujących określone zadania zależy w dużej mierze od warunków środowiska, w którym przebywają (Wyon 2006). Zapewnienie pracownikom poczucia komfortu cieplnego przez dobór i regulację odpowiednich parametrów środowiska pracy przyczynia się m.in. do:

- zwiększenia stopnia skupienia nad wykonywanym zadaniem
- zmniejszenia liczby popełnianych błędów
- zwiększenia wydajności oraz jakości produktów i usług
- ograniczenia liczby nieobecności w pracy wynikających z chorób
- ograniczenia liczby wypadków przy pracy i innych zagrożeń zdrowotnych (np. chorób układu oddechowego).

Optymalne warunki mikroklimatu zawarte w normie PN-78-B-03421 są ustalone dla określonej aktywności fizycznej człowieka:

- przy małym tempie metabolizmu (np. sycie, księgowanie czy pisanie na maszynie) temperatura powietrza w pomieszczeniach (zimą) wynosi $20 \div 22$ °C, a latem – $23 \div 26$ °C, wilgotność względna zimą (niezależnie od aktywności) wynosi $40 \div 60\%$, a latem – $40 \div 55\%$, natomiast prędkość ruchu powietrza zimą wynosi maksymalnie 0,2 m/s, a latem – 0,3 m/s
- przy średnim tempie metabolizmu (wbijanie gwoździ, tynkowanie) temperatura powietrza w pomieszczeniach zimą wynosi $18 \div 20$ °C, latem – $20 \div 23$ °C, wilgotność względna latem – $40 \div 60\%$, a prędkość ruchu powietrza zimą – maksymalnie 0,2 m/s, latem – 0,4 m/s.
- przy dużym tempie metabolizmu (praca z siekierą, przenoszenie ciężkich materiałów) temperatura powietrza w pomieszczeniach zimą wynosi $15 \div 18$ °C, latem – $18 \div 21$ °C, wilgotność względna latem – $40 \div 60\%$, a prędkość ruchu powietrza zimą – maksymalnie 0,3 m/s, latem – 0,6 m/s.

Podane wartości można jedynie traktować orientacyjnie, planując parametry środowiska przebywania pracownika, natomiast w celu określenia rzeczywistych odczuć cieplnych pracownika należy przeprowadzić dokładne badania komfortu cieplnego człowieka.

Komfort cieplny może być ogólny i miejscowy. Komfort cieplny ogólny dotyczy odczucia charakteryzowanego dla całego ciała. Pomimo odczuć dla całego ciała określanych jako komfortowe, możliwe jest jednoczesne odczuwanie dyskomfortu miejscowego, powodowanego np. przez przeciąg występujący w pomieszczeniu. W tym celu do oceny środowiska umiarkowanego stosuje się dwie grupy wskaźników – opisujące komfort ogólny oraz dyskomfort miejscowy.

W kolejnych częściach artykułu zostaną scharakteryzowane metody pomiaru i oceny poszczególnych wskaźników, zgodnie z normą PN-EN ISO 7730:2006 „Środowiska termicznie umiarkowane. Wyznaczanie wskaźników *PMV* i *PPD* oraz określanie warunków komfortu termicznego (oryg.)”.

WSKAŹNIKI OCENY KOMFORTU CIEPLNEGO OGÓLNEGO

W celu oceny środowiska umiarkowanego stosuje się dwa wskaźniki określające komfort cieplny ogólny, tj. dotyczący całego ciała: *PMV* i *PPD* (Fanger 1974).

Wskaźnik *PMV* (*predicted mean vote*) określa przewidywaną średnią ocenę dużej liczby osób przebywających w danym pomieszczeniu, zgodnie z przedstawioną w tabeli 1. skalą zmienności cieplnej.

Tabela 1.**Skala zmienności cieplnej**

Temperatura środowiska	Ocena komfortu cieplnego ogólnego
+3	gorąco
+2	ciepło
+1	umiarkowanie ciepło
0	neutralnie
-1	umiarkowanie chłodno
-2	chłodno
-3	zimno

Wskaźnik *PMV* jest odniesiony do nierówności między ciepłem oddawanym przez człowieka i odbieranym przez środowisko otaczające a optymalnym strumieniem przekazywanego do otoczenia strumienia ciepła, które zapewniałoby warunki komfortu przy danej aktywności. Zakłada się, iż wartość wskaźnika $PMV = 0$ opisuje idealny komfort cieplny organizmu, natomiast w granicach $-0,5 < PMV < +0,5$ określa się dopuszczalny komfort cieplny. Strefa umiarkowanego ciepła środowiska rozciąga się w zakresie $-2,0 < PMV < +2,0$ – powyżej tej wartości występuje środowisko gorące, a poniżej środowisko zimne.

Określony w normie PN-ISO 7730:2006 wskaźnik *PMV* stosuje się do obliczenia: metabolizmu, pracy wykonywanej przez człowieka, izolacyjności cieplnej i powierzchni odzieży w stosunku do ciała człowieka, temperatury powietrza, średniej temperatury promieniowania, prędkości powietrza, ciśnienia cząstkowego pary wodnej i temperatury powierzchni odzieży.

Wielkość wskaźnika *PMV* oblicza się na podstawie równania:

$$\begin{aligned}
 & [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \\
 & \left\{ \begin{aligned}
 & (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\
 & - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)
 \end{aligned} \right\} \quad [1]
 \end{aligned}$$

w którym:

- M – tempo metabolizmu, w watach na metr kwadratowy,
- W – efektywna praca mechaniczna, w watach na metr kwadratowy,
- I_a – izolacyjność cieplna odzieży, w metrach kwadratowych razy kelwin na wat,
- f_d – współczynnik powierzchni odzieży,
- t_a – temperatura powietrza, w stopniach Celsjusza,
- \bar{t}_r – średnia temperatura promieniowania, w stopniach Celsjusza,
- v_{ar} – prędkość powietrza, w metrach na sekundę,
- p_a – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, w paskalach,
- h_c – współczynnik konwekcji ciepła, w watach na metr kwadratowy razy kelwin,
- t_{cl} – temperatura powierzchni odzieży, w stopniach Celsjusza.

Tempo metabolizmu (M) potrzebne do obliczeń określa się, stosując zapisy zawarte w normie PN-EN ISO 8996:2005 lub w załączniku B normy PN-ISO 7730:2006 w zależności od rodzaju

wykonywanej pracy. Przy zmiennych wartościach tempa metabolizmu należy określić wartość średnią ważoną dla poprzedniej godziny. Izolacyjność cieplną odzieży i krzesła szacuje się na podstawie zapisu w normie PN-EN ISO 9920:2009 lub w załączniku C (PN-ISO 7730:2006), biorąc pod uwagę porę roku.

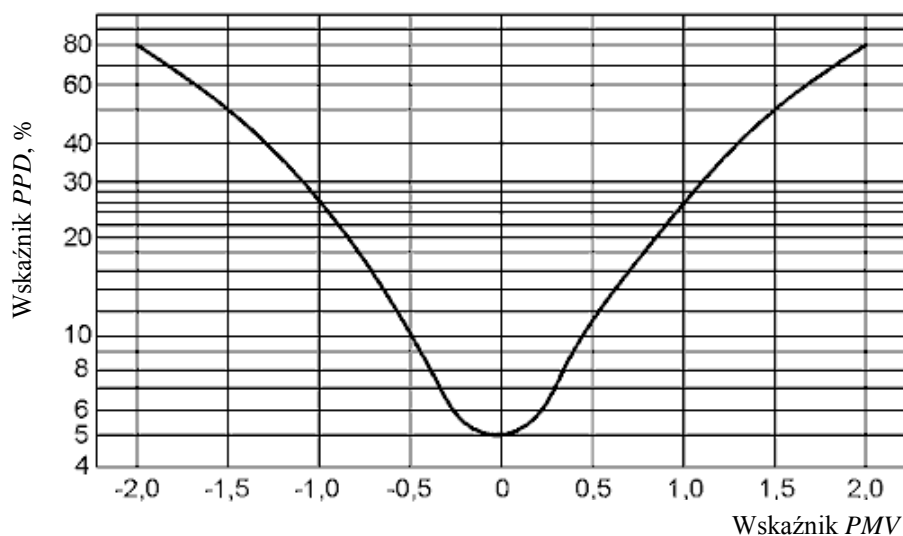
Wyznaczanie wartości wskaźnika *PMV* można przeprowadzić za pomocą:

- programu komputerowego w języku BASIC zawartego w normie PN-ISO 7730:2006 (patrz załącznik D), a w celu weryfikacji innych programów obliczeniowych należy zastosować przykładowe wartości wyjściowe
- tabel zawartych w załączniku E w normie PN-ISO 7730:2006, w którym podano wartości wskaźnika *PMV* określone dla różnych kombinacji: aktywności, odzieży, temperatury operatywnej i wilgotności względnej. Wartości *PMV* przedstawione w załączniku E mają zastosowanie przy wilgotności względnej równej 50%. Wpływ wilgotności na odczucia termiczne jest niewielki w temperaturze umiarkowanej, bliskiej strefie komfortu i może być zazwyczaj pominięty przy określaniu wartości wskaźnika *PMV* (patrz załącznik F)
- bezpośrednich pomiarów, stosując zintegrowany czujnik (temperatury ekwiwalentnej i operacyjnej).

Dane na temat wielkości wskaźnika *PMV* są niewystarczające do określenia ważniejszego czynnika, jakim jest liczba osób nieusatysfakcjonowanych warunkami panującymi w pomieszczeniu. Informacje na ten temat wyraża wskaźnik *PPD* (*predicted percentage of dissatisfied*), tj. przewidywany odsetek niezadowolonych z grupy ludzi znajdujących się w danym otoczeniu. Wskaźnikiem *PPD* określa się procentowy udział osób oceniających zdecydowanie negatywnie badane środowisko termiczne, przy czym środowisko uznaje się za komfortowe, gdy wskaźnik *PPD* ma wartość mniejszą niż 10%, co odpowiada wskaźnikowi *PMV* w granicach $\pm 0,5$.

Określenie wartości wskaźnika *PMV* umożliwia obliczenie wskaźnika *PPD* oraz korelacji między wartościami *PMV* a *PPD* (rys.1) za pomocą równania [2] zawartego w normie PN-ISO 7730:2006:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad [2]$$



Rys. 1. Zależność między wskaźnikami *PMV* i *PPD*

MIEJSCOWY DYSKOMFORT CIEPLNY

Wskaźniki *PMV* i *PPD* wyrażają ogólne odczucia cieplne organizmu, ale dyskomfort cieplny może być również wywołany przez nadmierne wychłodzenie oraz ogrzanie poszczególnych części ciała. Zjawisko to jest określane jako dyskomfort lokalny. W szczególności osoby pracujące z niską aktywnością fizyczną (np. praca biurowa, w pozycji siedzącej) są wrażliwe na dyskomfort lokalny, jednocześnie osoby te oceniają odczucia cieplne jako neutralne dla całego ciała. Przy wyższym poziomie aktywności osoby są mniej wrażliwe cieplnie i w konsekwencji mniejsze jest ryzyko wystąpienia lokalnego dyskomfortu.

Przyczynami miejscowego dyskomfortu są:

- lokalne chłodzenie konwekcyjne powodujące na nieosłoniętych częściach ciała uczucie przeciągu
- pionowy gradient temperatury w pomieszczeniu
- zimne lub gorące stopy przy zastosowaniu niewłaściwego modelu ogrzewania (np. zbyt duże różnice temperatury przy ogrzewaniu podłogowym)
- chłodzenie lub ogrzewanie części ciała przez promieniowanie (asymetria temperatury promieniowania w pomieszczeniu).

Dyskomfort wynikający z przeciągu może być wyrażony jako odsetek osób przewidujących niezadowolenie z przeciągu. Wskaźnik przeciągu *DR* możemy obliczyć za pomocą równania [3]:

$$DR = (34 - t_{a,l}) \cdot (\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} (0,34 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot Tu + 3,14) \quad [3]$$

w którym:

- $t_{a,l}$ – lokalna temperatura powietrza, w stopniach Celsjusza,
- $\bar{v}_{a,l}$ – lokalna średnia prędkość powietrza, w metrach na sekundę,
- Tu – lokalna intensywność turbulencji, w procentach.

Duża różnica temperatury powietrza między głową i kostkami może powodować dyskomfort, który jest określany za pomocą wskaźnika *PD* (*percent of dissatisfied*). Wielkość wskaźnika *PD* w tym przypadku oblicza się, korzystając z równania [4] lub wykresu zamieszczonego w normie PN-ISO 7730:2006.

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856 \cdot \Delta t_{a,v})} \quad [4]$$

w którym:

- $\Delta t_{a,v}$ – różnica temperatury w pomieszczeniu, w stopniach Celsjusza.

Zbyt ciepła lub zbyt chłodna podłoga może powodować nieprzyjemny skurcz lub rozkurczenie naczyń krwionośnych w kończynach dolnych. W tym przypadku odsetek osób niezadowolonych (*PD*) można określić za pomocą równania [5]:

$$PD = 100 - 94 \cdot \exp(-1,387 + 0,118 \cdot t_f - 0,0025 \cdot t_f^2) \quad [5]$$

w którym:

- t_f – temperatura podłogi, w stopniach Celsjusza.

Asymetria promieniowania występująca w pomieszczeniu może powodować nadmierne straty/zyski ciepła odprowadzanego/doprowadzanego do organizmu z poszczególnych jego stron. Organizm ludzki jest najbardziej wrażliwy na asymetrię promieniowania powodowaną przez ciepłe sufity lub chłodne przegrody (okna). Określenie wskaźnika *PD*, czyli odsetka osób niezadowolonych z powodu asymetrii promieniowania określa się na podstawie następujących równań:

- w przypadku cieplejszego sufitu na podstawie równania [6]

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(2,84 - 0,174 \cdot \Delta t_{pr})} - 5,5 \quad [6]$$

w którym:

Δt_{pr} – różnica temperatury promieniowania powierzchni, w stopniach Celsjusza

- w przypadku chłodniejszej ściany na podstawie równania [7]

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 \cdot \Delta t_{pr})} \quad [7]$$

- w przypadku chłodniejszego sufitu na podstawie równania [8]

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(9,93 - 0,50 \cdot \Delta t_{pr})} \quad [8]$$

- w przypadku cieplejszej ściany na podstawie równania [9]

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(3,72 - 0,052 \cdot \Delta t_{pr})} - 3,5 \quad [9]$$

POMIARY WSKAŹNIKÓW KOMFORTU I DYSKOMFORTU CIEPLNEGO

Ocenę środowiska w pomieszczeniach ze względu na komfort termiczny przeprowadza się zgodnie z wymaganiami określonymi w normie PN-EN 7730:2006. W dalszej części artykułu przedstawiono kolejne etapy prawidłowo przeprowadzonych badań, których wyniki zostaną wykorzystane do oceny komfortu termicznego w pomieszczeniach:

Etap I:

- ogólna ocena warunków pracy w pomieszczeniu na podstawie wywiadu z przedstawicielem służby BHP i pracownikami oraz analizy warunków środowiska cieplnego w pomieszczeniu pracy
- pomiar parametrów mikroklimatu środowiska na analizowanym stanowisku (stanowiskach) pracy, tj.: temperatury, prędkości i ciśnienia cząstkowego powietrza.

W przypadku wystąpienia na stanowisku pracy dyskomfortu lokalnego pomiary powinny być prowadzone bez przerwy podczas całego czasu przebywania pracownika w pomieszczeniu.

Etap II:

- określenie (z tabeli B.1. normy PN-ISO 7730:2006) tempa metabolizmu pracownika na analizowanym stanowisku pracy lub ewentualnie jego pomiar
- określenie (z tabeli C.1. normy PN-ISO 7730:2006) izolacyjności cieplnej odzieży stosowanej przez pracownika lub ewentualnie jego pomiar
- obliczenie (na podstawie zmierzonych parametrów powietrza oraz danych uzyskanych w pkt. 1 i 2) wskaźników komfortu: wskaźnika *PMV* za pomocą zamieszczonego w normie PN-ISO 7730:2006 równania lub programu wskaźnika *PPD* na podstawie wykresu lub z równania (w przypadku dyskomfortu lokalnego są również obliczane wskaźniki *DR* oraz *PD*).

Etap III:

- porównanie obliczonej wielkości wskaźnika *PMV* z wartościami skali odczuć termicznych w celu orientacyjnej oceny subiektywnych odczuć warunków komfortu termicznego
- porównanie obliczonych wskaźników *PMV* i *PPD* (ew. również wskaźników *DR* i *PD*) z wartościami odniesienia zawartymi w normie PN-ISO 7730:2006
- przedstawienie wyniku przeprowadzonej oceny środowiska termicznego wraz z ewentualnymi wskazówkami co do koniecznych modyfikacji, w celu zapewnienia komfortu termicznego.

PODSUMOWANIE

Świadomość potrzeby zapewnienia komfortu cieplnego na stanowiskach pracy jest wciąż w Polsce niewystarczająca (*Bogdan* 2009), pomimo że zapewnienie komfortu termicznego, z uwagi na jego duży wpływ na jakość i efektywność pracy, jest obecnie priorytetowym wymogiem stawianym projektantom systemów wentylacji i klimatyzacji.

Wiedza o mechanizmach wymiany ciepła między człowiekiem a środowiskiem oraz znajomość podstawowych metod pomiarów w środowiskach termicznych, będących przedmiotem niniejszego artykułu, są niezbędne dla nadzorujących miejsca pracy służb BHP i Inspekcji Pracy.

PIŚMIENNICTWO

Bogdan A. (2009) Komfort cieplny w budynkach użyteczności publicznej – stan prawny a rzeczywistość. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja* nr 2, 39–40.

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

PN-B-03421:1978 *Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi*.

PN-EN ISO 7730:2006 *Środowiska termicznie umiarkowane. Wyznaczanie wskaźników *PMV* i *PPD* oraz określanie warunków komfortu termicznego (oryg.)*.

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

PN-EN ISO 9920:2009 Ergonomia środowiska termicznego. Szacowanie izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieży (oryg.).

Wyon D.P., Wargoeki P. (2006) Indoor air quality effects on office work. Part of: Creating the productive workplace. London, Taylor Francis 193–205.

ANNA BOGDAN

Methods of evaluation of moderate thermal environment according to EN ISO 7730

A b s t r a c t

Provide employees comfort sensation by adjusting the particular parameters of work environment translates into reduce errors, reduce the number of work accidents and occupational diseases, as well as to improve productivity and quality of products and services. According to data gathered in 2008 about 60 thousand people in Poland are employed in conditions of cold and hot environment, which means that the majority of population is exposed to moderate environment, and hence in the environment, which should meet the requirements of thermal comfort, while the users often perceived as unsatisfying.

The paper presents methods for assessing general and local thermal comfort of employees.