

Efektywność energetyczna / Badanie komfortu cieplnego w budynkach – część 1

Wprowadzenie

Badanie komfortu cieplnego jest jednym z niezbędnych elementów kontroli środowiska w budynkach zarówno w sezonie grzewczym, jak i letnim. Jest ono szczególnie ważne w obiektach zorientowanych na dużą efektywność energetyczną. Komfort cieplny wpływa na jakość życia człowieka, jego zdrowie, wydajność pracy, jakość odpoczynku i snu. Zapewnienie człowiekowi odpowiednich warunków cieplnych w budynku, w którym spędza on większość czasu, jest jednym z podstawowych zadań inżynierskich. Odnosi się to nie tylko do zastosowania odpowiednich technik grzewczych i chłodniczych, ale również zaprojektowania właściwej bryły budynku, czy też doboru materiałów budowlanych. W świetle zmian klimatycznych, a co za tym idzie pojawiających się coraz częściej długotrwałych i dokuczliwych fal upałów, coraz większego znaczenia nabierają techniki chłodzenia pasywnego. Choć systemy aktywne nadal należą do najczęściej stosowanych sposobów radzenia sobie z przegrzewaniem budynków, to konieczność racjonalnego gospodarowania zasobami naturalnymi i energią skłania do podążania w kierunku chłodzenia opartego np. na wykorzystaniu pojemności cieplnej przegród budynku, czy też gruntu. O ile w przypadku urządzeń klimatyzacyjnych w stosunkowo prosty sposób można uzyskać wymagane parametry mikroklimatu poprzez sterowanie temperaturą w pomieszczeniu, o tyle w przypadku systemów pasywnych opartych na magazynowaniu ciepła w masie jest to znacznie bardziej złożone, związane przede wszystkim z przesunięciem czasowym w pobieraniu, zmagazynowaniu, a następnie uwolnieniu ciepła. Kontrola parametrów środowiska wewnętrznego jest w tym przypadku szczególnie istotna, ponieważ umożliwia na bieżąco – w miarę potrzeby – zastosowanie dodatkowo innych, pasywnych systemów zapobiegania przegrzewaniu pomieszczeń takich jak np. zwiększona wentylacja nocna, czy też żaluzje.

Równanie komfortu cieplnego

Istnieje wiele definicji komfortu cieplnego człowieka. Najogólniej można powiedzieć, że **komfort cieplny człowieka** jest to **stan zadowolenia ze środowiska cieplnego, które go otacza**. Szeroko zakrojonymi badaniami w tym zakresie zajmował się duński naukowiec – Povl Ole Fanger, który opracował równanie komfortu cieplnego w następującej postaci [1]:

$$f\left(\frac{Q}{A_{Du}}, \Lambda_{cl}, t_w, t_{mr}, p_w, v\right) = 0$$

gdzie:

$\frac{Q}{A_{Du}}$ – ilość ciepła wewnętrznego wytwarzanego przez organizm (wydatek energetyczny)
w odniesieniu do pola powierzchni ciała nie okrytego odzieżą (powierzchnia DuBois)

Λ_{cl} – opór przewodzenia ciepła odzieży

- t_w – temperatura powietrza
- t_{mr} – średnia temperatura promieniowania (dla człowieka ubranego w określoną odzież i znajdującego się w określonej pozycji w danym punkcie pomieszczenia jest to jednorodna temperatura otoczenia o czarnych powierzchniach, które powodowałyby straty ciepła przez promieniowanie równe stratom występującym w danym środowisku)
- p_w – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w otaczającym powietrzu
- v – względna prędkość przepływu powietrza

Podstawowym warunkiem odczuwania komfortu cieplnego przez człowieka jest zrównoważenie bilansu ciepła jego organizmu z otoczeniem, to znaczy że w tym stanie musi istnieć równowaga pomiędzy nadwyżką energii wytworzonej przez organizm podczas procesów metabolicznych a ilością ciepła oddaną przez człowieka do otoczenia.

Metabolizm określa wszystkie przemiany zachodzące w ciele człowieka, których rezultatem jest wytworzenie energii niezbędnej do funkcjonowania organizmu. Część produkowanej energii wykorzystywana jest przez organizm do podtrzymywania procesów życiowych oraz na wykonanie określonej pracy (W). Ciepło wytwarzane przez człowieka nazywamy metabolicznym (M).

Iloraz tych dwóch wielkości (W/M) to sprawność ruchowa człowieka (η). Jej maksymalna wartość rzadko przekracza 10% , dla większości czynności jest bliska zeru [1].

Jednostkami opisującymi ilość wydzielanego i oddawanego do otoczenia ciepła są: [W/m² powierzchni ciała] lub [met], powiązane ze sobą następującą zależnością:

$$1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$$

Przykładowe wartości tempa metabolizmu wg EN-ISO 7730 [2]:

- odpoczynek w pozycji półleżącej – 0,8 met
- odpoczynek w pozycji siedzącej – 1,0 met
- umiarkowana aktywność w pozycji siedzącej (praca w biurze) – 1,2 met
- średnia aktywność w pozycji stojącej (prace domowe) – 2,0 met
- spacer z 5 km/h – 3,4 met

Jak widać z równania Fangera, na odczucie komfortu cieplnego przez człowieka oprócz parametrów środowiskowych (temperatura, wilgotność powietrza, ciśnienie, prędkość przepływu powietrza) i aktywności fizycznej wpływ ma także jego ubiór.

Opór przewodzenia ciepła odzieży (czy też izolacyjność odzieży) Λ_{cl} potrzebny do utrzymania równowagi termicznej pomiędzy ciałem człowieka w pozycji siedzącej a otoczeniem jest równy 1 clo.

$$1 \text{ clo} = 0,155 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Przykładowe wartości podano poniżej wg EN-ISO 9920 [3]:

- skarpety – 0,03 clo
- podkoszulek – 0,09 clo
- spodnie lekkie – 0,26 clo
- marynarka – 0,3 clo
- gruby sweter – 0,37 clo

Do obliczeń komfortu cieplnego należy przyjąć sumaryczną wartość clo całego ubrania.

Wskaźniki PMV i PPD oceny komfortu cieplnego

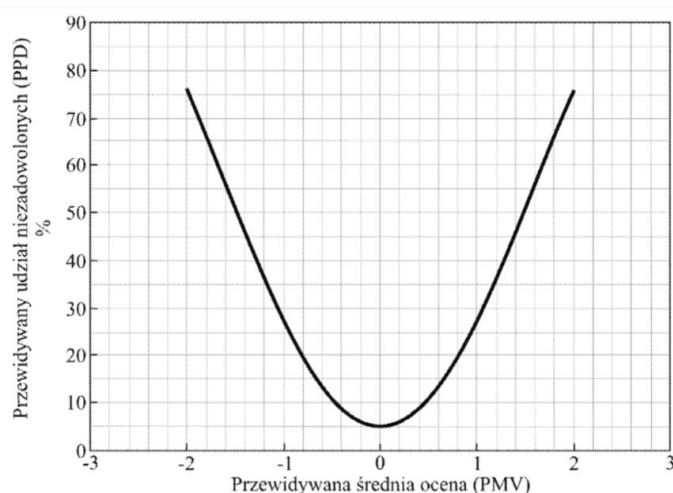
Wskaźnik **PMV** wyprowadzono przyjmując jako punkt wyjścia równanie komfortu cieplnego. [Charakteryzuje on średnią ocenę odczuwania komfortu przez dużą grupę ludzi w znormalizowanej skali ocen](#) (tabela poniżej):

ZIMNO	CHŁODNO	LEKKO CHŁODNO	OBOJĘTNIE	LEKKO CIEPŁO	CIEPŁO	GORĄCO
-3	-2	-1	0	1	2	3

Wskaźnik PMV uwzględnia wszystkie parametry występujące w równaniu komfortu cieplnego i można go obliczyć ze wzoru dla dowolnej kombinacji wydatku energetycznego człowieka, izolacyjności cieplnej odzieży, temperatury powietrza, średniej temperatury promieniowania i wilgotności powietrza w oparciu o normę EN-ISO 7730. Wzór ten jest jednak skomplikowany, dlatego w celu uproszczenia obliczeń istnieją tablice, wykresy oraz programy komputerowe wspomagające obliczenia.

Ponieważ wskaźnik PMV został opracowany w oparciu o wyniki badań, które tylko nieznacznie różniły się od stanu obojętnego (PMV = 0), dlatego najbardziej miarodajne jest stosowanie go w zakresie od **-2 do +2**. Ponieważ w praktyce trudno jest precyzyjnie zinterpretować wartość wskaźnika PMV, o wiele bardziej przydatny w ocenie środowiska wewnętrznego wydaje się być wskaźnik **PPD**. [Określa on procentowy udział ludzi, którzy odczuwają dyskomfort przy danych warunkach w pomieszczeniu.](#)

Zależność pomiędzy PMV i PPD przedstawiono na wykresie (Rys.1).



Rys. 1. PPD w funkcji PMV [1]

Zaleca się, aby wartość PMV znajdowała się w przedziale $(-0,5 < PMV < +0,5)$, wówczas procentowy udział ludzi niezadowolonych z danych warunków w pomieszczeniu nie przekracza 10%.

[1] P.O. Fanger. Komfort cieplny, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1974r.

[2] EN-ISO 7730: Ergonomia środowiska termicznego - Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego.

[3] EN-ISO 9920: Ergonomia środowiska termicznego - Szacowanie izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieży.

Opracowanie:

Dr inż. Anna Staszczuk