

Lech ŚLIWOWSKI¹

KRYTERIA BIOFIZYCZNE KOMFORTU CIEPLNEGO LUDZI W POMIESZCZENIACH

Pomieszczenia współczesnych budynków powinny zaspokajać uzasadnione potrzeby fizyczne i psychiczne ludzi w sposób jak najpełniejszy stosownie do możliwości materialnych społeczeństwa. Mieszkańcy, pracownicy i uczniowie powinni osiągać w swych domach oraz miejscach pracy lub nauki między innymi stan zadowolenia ze środowiska cieplnego, które ich otacza, zwany komfortem cieplnym [1].

Człowiek, podobnie jak zwierzęta stałocieplne, utrzymuje stałą wewnętrzną temperaturę ciała niezależnie od znacznych nawet wahań temperatury otoczenia. Mechanizmy termoregulacyjne człowieka dostosowują się ilość ciepła wytwarzanego w organizmie i usuwanego z organizmu do potrzeb bilansu cieplnego pomiędzy człowiekiem, chłod-nie-lub ciepłym środowiskiem. Ośrodek termoregulacji znajduje się w mózgu [2, 9].

Ciepło jest wytwarzane w ciele człowieka nieprzerwanie. Główną pozycją przychodów w bilansie cieplnym organizmu jest energia powstała z przemiany chemicznej pokarmów, dalsze to ciepło przyjęte przez promieniowanie i ciepło gorących potraw. Część tej energii jest niezbędna dla różnych procesów życiowych, część może być zużyta do wykonania określonej pracy – większość zaś jest jako ciepło usuwana z ciała. Część energii powstała z utlenienia pokarmów niezbędna do podtrzymania procesów życiowych, nosi nazwę metabolizmu podstawowego. Całkowita ilość ciepła wytwarzanego metabolicznie zależy od wykonywanych przez człowieka czynności. Wielkość metabolicznej produkcji energii określać można przez pomiar konsumpcji tlenu.

W regionach ciała, gdzie znajdują się podstawowe organy utrzymywania jest stale temperatura wewnętrzna najodpowiedniejsza dla ich funkcjonowania. Jej poziom jest dostosowany indywidualnie do gospodarki cieplnej organizmu i zależy od wieku, płci, uwarunkowań psychicznych, sposobu ubierania się, odżywiania, rodzaju pracy i innych czynników. Różnice temperatur wewnętrznych poszczególnych ludzi są niewielkie. Wynoszą plus, minus 1° od średniego poziomu 37°C.

O ile temperatura wewnętrzna ciała jest utrzymywana na stałym poziomie pomimo zmian temperatury otoczenia, tyle temperatura skóry człowieka zmienia się stosownie do tych wahań. Temperatura skóry jest także różna w różnych miejscach. Średnia temperatura skóry ludzi znajdujących się w stanie komfortu cieplnego wynosi

¹ Prof. dr hab. inż., profesor nadzwyczajny w Politechnice Wrocławskiej, kierownik Zakładu Fizyki Budowli i Środowiska

$\sim 33,5^{\circ}\text{C}$ przy odchyleniu standardowym $0,5\text{ K}$ pomiędzy nimi. Najwyższa jest temperatura skóry na szyi $\sim 35^{\circ}\text{C}$, najniższa na powierzchni stóp $\sim 32^{\circ}\text{C}$.

Skóra odgrywa główną rolę w wymianie ciepła pomiędzy organizmem człowieka i otoczeniem. Ciepło, które ma być usunięte z ciała, transportowane jest z jego wnętrza do skóry przez krew oraz częściowo przez tkanki. System termoregulacji reguluje intensywność przepływu ciepła z wnętrza ciała do jego powierzchni głównie przez zmianę strumienia krwi do skóry. Wielkie znaczenie ma też przewodnictwo cieplne skóry, które może się zmieniać od $8\text{ W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$ przy największym skurczu naczyń, poprzez $15\text{ W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$ u człowieka siedzącego w warunkach komfortu cieplnego, do $50\text{ W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$ lub więcej podczas intensywnego pocenia się gorącym otoczeniu.

Nagi mężczyzna nie wykonujący żadnej pracy jest w stanie komfortu cieplnego przy temperaturze otaczającego go powietrza 28°C . W tej temperaturze ciało jest w równowadze termicznej z otoczeniem, nie występuje termoregulacyjne pocenie się a temperatura skóry ma średnią wartość $\sim 34^{\circ}\text{C}$. Gdy temperatura otoczenia maleje organizm reaguje zmniejszeniem przewodnictwa cieplnego skóry i dopływu do niej krwi. W wyniku tego obniża się temperatura powierzchni skóry co przeciwdziała wzrostowi utraty ciepła na skutek obniżenia temperatury otoczenia. Inną reakcją organizmu na ochłodzenie się otoczenia jest wzrost metabolicznej produkcji ciepła, który zwykle nie jest w stanie zrekompensować strat.

Gdy temperatura otoczenia wzrasta powyżej komfortowej pierwszą reakcją organizmu jest rozszerzenie naczyń. Więcej krwi przemieszcza się do powierzchni skóry, której temperatura rośnie i ciepło może być usuwane nawet do cieplejszego otoczenia. Następnie organizm uruchamia pocenie się.

Podczas wykonywania pracy temperatura wewnętrzna ciała utrzymywana jest na wyższym poziomie niż w czasie bezczynności i mniej zależy od zmian temperatury otoczenia niż od zmian intensywności pracy. Zaś temperatura skóry zależy głównie od temperatury otoczenia, a jedynie nieznacznie od intensywności pracy.

W warunkach gorących, gdy człowiek się poci, przyjęcie bardzo gorącego napoju powoduje ostry wzrost wydzielania potu wywołujący obniżenie temperatury skóry i uczucie ochłodzenia. Jest to działanie efektywniejsze niż w przypadku napoju zimnego.

Ostatecznym probierzem tego w jakim stanie komfortu cieplnego człowiek się znajduje, są jego własne odczucia[3]. Czynniki wpływające na odczucia ciepła podzielić można na elementy charakteryzujące człowieka oraz elementy mikroklimatu charakteryzujące środowisko termiczne. Komfort cieplny nie jest pojęciem całkowicie jednoznacznym związanym z określoną temperaturą. Człowiek może być w stanie komfortu cieplnego w dużym obszarze zmiennych temperatur, a gdy temperatura przekroczy ten obszar odczucie braku komfortu nie jest nagłe. Reakcje człowieka na temperatur, która odpowiada odczuciu komfortu zależą bardzo od jego oczekiwania, osobowości i charakteru pracy. Odczucia komfortu cieplnego ocenia się w siedmiopunktowej skali. Przy czym za sferę komfortu uważa się trzy środkowe oceny odczucia ciepła.

Właściwa regulacja temperatury pomieszczeń jest szczególnie ważna, gdy dotyczy dużej grupy ludzi. Jednak w temperaturze komfortowej dla danej grupy 5%

ludzi jest niezadowolonych. Gdy temperatura wykracza poza optimum liczba niezadowolonych szybko wzrasta. Jeśli dopuścić 10% niezadowolonych temperatura powietrza musi być utrzymana w wąskich granicach $\pm 1,5$ K wokół optymalnej. Temperatura w pomieszczeniach, w których przebywają ludzie, powinna być dostosowana do miejscowego klimatu oraz poziomu cywilizacyjnego i raczej nie zmieniać się z dnia na dzień. Oczywiście najwyższy poziom komfortu cieplnego osiągają ludzie przebywający w pomieszczeniach klimatyzowanych, których cechą jest bardzo ustabilizowana temperatura.

Istnieje niewiele rzeczowych dowodów sugerujących, że starsi ludzie wymagają innych temperatur niż ludzie młodzi. Poziom podstawowego metabolizmu obniża się z wiekiem lecz jest to kompensowane przez obniżenie utraty ciepła poprzez parowanie[4]. Dzieci mają wyższy metabolizm niż dorośli i to wydaje się powodować obniżenie ich temperatur komfortowych. A priori nie ma powodu, dla którego kobieta i mężczyzna mogli mieć takie same temperatury komfortowe. Poziom metabolizmu jest niższy u kobiet niż u mężczyzn, występują też inne wyraźne różnice w termoregulacji. Jednak badania laboratoryjne nie wykazały znaczącej różnicy pomiędzy temperaturami komfortowymi kobiet i mężczyzn. Przy czym kobiety są bardziej wrażliwe na zmiany wokół temperatury komfortowej.

Człowiek ma zdolność określonej akceptacji do warunków gorących i chłodnych. Adaptacja ta ma jednak charakter czasowy i nie zmienia temperatury komfortowej osobnika.

Wpływ poszczególnych elementów fizycznych środowiska na komfort cieplny człowieka zbadany w laboratorium nie w pełni potwierdza się podczas badań w warunkach rzeczywistych np. w mieszkaniach, szkołach czy na stanowiskach pracy [5]. Odczucia cieplne respondentów ujawniane są przez nich najczęściej w formie ocen komfortu cieplnego, testujący zaś usiłuje określić przyczyny takich lub innych ocen. Znaczna liczba występujących jednocześnie oddziaływań powoduje konieczność posługiwania się metodami statystycznymi. Czasem jednak otrzymuje się negatywne oceny komfortu tam, gdzie zmierzone parametry termicznych elementów mikroklimatu są prawidłowe. Odczucia takie jak duszność, brak tlenu, ból głowy, zmęczenie, senność związane są najczęściej z mikroklimatem. Wyjaśnienie przyczyn tych odczuć nie jest proste. Istnieją różne propozycje łączenia ich z tzw. zespołem pozatermicznych elementów mikroklimatu takich jak zanieczyszczenia powietrza, jonizacja powietrza, poziom hałasu, natężenie pól elektrostatycznych i elektromagnetycznych, radioaktywne promieniowanie przegród, rodzaj mikroflory i mikrofauny w pomieszczeniach czy wreszcie oświetlenie i barwa.

Od dawna widać dążenie do opisanego środowiska cieplnego człowieka w pomieszczeniach za pomocą zmiennych fizycznych, które można łatwo regulować. Zaproponowano wiele tzw. wskaźników komfortu. Każdy z nich odzwierciedla zainteresowania swego twórcy co znacznie ogranicza jego uniwersalność. Ponadto każde położenie zmiennych fizycznych w jeden wskaźnik wydaje się być teoretycznie nieprawidłowe. Bardziej zadowalającym rozwiązaniem jest uwzględnienie możliwie wszystkich zmiennych jednocześnie jak np. w równaniu Fanger'a czy w standardowej temperaturze efektywnej. Jednakże te związki są dość skomplikowane, jak na możliwości ich uniwersalnego stosowania. Nadal więc poszukuje się prostego wskaźnika komfortu.

Komfort cieplny człowieka w pomieszczeniu zależy najbardziej od temperatury tego pomieszczenia. Istnieją jednak czynniki które powodują mniej lub bardziej miejscowe odczucia braku komfortu również w środowiskach ogólnie komfortowych pod względem cieplnym.

Narzekania na ogrzewanie radiacyjne wywodzą się na ogół z nieuzasadnionego przekonania, że istnieje możliwość rekompensowania znacznych obniżen temperatury powietrza od temperatury komfortowej stosunkowo niewielkimi zwiększeniami średniej temperatury promieniowania. Ten sposób myślenia wywodzący się z przyjemnych odczuć ciepłych słonecznego, wiosennego dnia, gdy słońce przygrzewa a powietrze jest chłodne i rześkie, nie odnosi się jednak do środowisk pomieszczeń i nie znajduje potwierdzenia w wynikach badań. Należy więc uważać że we wnętrzach temperatura powietrza i średnia temperatura promieniowania powinny być zbliżone do siebie.

Ogrzewanie sufitowe pomimo znacznie wyrównanych temperatur powietrza w pomieszczeniu generuje dość dużą asymetrię promieniowania cieplnego co może powodować odczucia braku komfortu.

Źródłem asymetrii promieniowania cieplnego mogą być również urządzenia oświetleniowe.

Z badań wynika, że także temperatura podłogi może mieć wpływ na odczucie braku komfortu.

Najczęściej osiąga się ochłodzenie pomieszczeń przez cyrkulację oziębionego i pozbawionego wilgoci powietrza. Możliwe jest także realizowanie chłodzenia przez promieniowanie. Może to powodować odczucia braku komfortu podobnie jak np. zbyt zimne powierzchnie okien.

Ludzie dostosowują rodzaj odzieży do zmian temperatury. Nie ma jednak dowodu, że robią to przy krótkotrwałych zmianach temperatury by zlikwidować ich stresujący wpływ.

Możliwe jest rekompensowanie nadmiernego wzrostu temperatury powietrza przez wzrost prędkości jego ruchu. Istotnym problemem jest miejscowy zbyt duży ruch powietrza – przeciąg w ogólnie komfortowym cieplnie środowisku. Niekiedy zbyt niska temperatura podłogi jest mylnie odczuwana jako przeciąg.

Wpływ wilgotności powietrza na odczucia ciepłe jest większy w temperaturach powietrza wyższych od komfortowej gdy człowiek poci się. W temperaturach komfortowych jest trudny do wykrycia w badaniach laboratoryjnych. Mała wilgotność powietrza w pomieszczeniach jest często oceniana przez ludzi jako przyczyna wysuszenia skóry, śluzówki, bólu gardła i głowy. Są jednak dowody, że małe wilgotności występują łącznie z zanieczyszczeniami powietrza, które właśnie generują dolegliwości. Argumenty przeciw zbyt dużej wilgotności powietrza w budynkach są zwykle związane z problemami innymi niż odczucia ciepłe. Stały poziom wilgotności względnej powietrza powyżej 70% sprzyja rozwojowi pleśni. Są także dowody epidemiologiczne mówiące o wzroście infekcji przy wilgotności względnej powietrza poniżej 40%. Poniżej tego poziomu elektryzuje się także nadmiernie większość wykładzin podłogowych.

Większość ludzi stara się wykonywać pracę umysłową czy fizyczną w środowisku o komfortowej temperaturze spodziewając się słusznego zmniejszenia

wydajności w środowisku zbyt ciepłym lub zimnym. Istnieje ogólny pogląd, że sprawność umysłowa gwałtownie spada po przekroczeniu temperatury 33°C, malejąc stopniowo podczas wzrostu temperatury od komfortowej do tego poziomu. Z badań dotyczących uczniów i studentów wynika, że powyżej 27°C ich zdolność percepcji jest bardzo osłabiona. Z badań nad robotnikami uzyskano pogląd, że ich wydajność gwałtownie spada po przekroczeniu 33°C, zaś przy wzroście od 24°C do 32°C maleje o 1 % na każdy Kelwin. Wpływ zimna na sprawność jest dwojaki. Gdy zmarzną palce rąk maleje ich sprawność. Zimny stres oddziałuje też na system nerwowy ograniczając sprawność umysłową.

Pomieszczenie mieszkalne, pracy i nauki można uznać za rzeczywiste środowisko człowieka. Współczesny statystyczny człowiek spędza tam niemal całą dobę. Poddawany jest jednoczesnemu oddziaływaniu wielorakich czynników wewnętrznych i zewnętrznych, fizycznych i pozafizycznych, biorących udział w kształtowaniu jego stanu fizycznego i psychicznego oraz dobrego i złego samopoczucia.

Pomieszczenia, w których stale występują warunki powodujące brak komfortu cieplnego mogą sprzyjać rozwojowi chorób przebywających w nich ludzi. Wpływają też ujemnie na wydajność pracy i skuteczność wycieczki.

Pomieszczenia w nowowznoszonych budynkach powinny kształtować mikrośrodowiska zapewniające komfort cieplny ludzi.

Pomieszczenia w budynkach istniejących, w których nie ma mikroklimatu zapewniającego komfort cieplny ludzi powinny zostać odpowiednio ulepszone.

Literatura

- [1] ASHRAE standard Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 1992 ISSN 1041-2336
- [2] Lech Śliwowski, Mikroklimat w mieszkaniu, Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa 1986.
- [3] Lech Śliwowski, Komfort cieplny ludzi w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1982.
- [4] K. Cena, J.R.Spotila, L.Śliwowski, Thermal comfort and clothing in the elderly. International Symposium on Clothing Comfort Studies in Mt. Fuji, 1988.8.29-31, Fuji Institute of Education and Training, Japan.
- [5] E.Śliwińska, L.Śliwowski, Thermal comfort of workers at cool workplaces. In: Thermal Physiology 1989, editor J.B.Mercer, Excerpta Medica, International Congress Series 871.
- [6] P.Skov, O.Valbiorn, B.Pedersen, Influence of indoor climate on the sick building syndrome in an office environment. Scan.J.Work Environmental Health, 1990, 16.
- [7] P.Skov, O.Valbiorn, B.Pedersen, Influence of personal characteristics, job-related factors and psychosocial factors on the sick building syndrome, Scan. J.Work Environmental Health, 1989,15.
- [8] L.Śliwowski, Results of investigation of the microclimate in some new apartment buildings in Wrocław, Building Science, vol.7, 1972, Pregamon Press, Oxford, Londyn, New York, Paris
- [9] L.Śliwowski, Mikroklimat wnętrza i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach, Oficyna Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000

BIOFISICAL FACTORS OF HUMAN THERMAL COMFORT

Summary

The relationship between human warmth sensation and physical environment in compartment has been presented.

Paper also contains some practice remarks.