

Termofizjologia, mikroklimat i komfort cieplny

Marcin Kuliński

Politechnika Wroclawska

1. Procesy przekazywania ciepła

Ciepło jest miarą energii przekazywanej w procesach termodynamicznych, w trakcie których nie następuje zmiana parametrów zewnętrznych układu traktowanego jako całość (np. jego objętość, energia kinetyczna czy potencjalna). Podczas wymiany ciepła zmienia się jedynie energia wewnętrzna układu, na którą składają się: energia ruchu postępowego i obrotowego cząsteczek (molekuł), energia elektronów poruszających się na orbitach energetycznych atomów oraz energia wzajemnego oddziaływania cząsteczek, elektronów i jąder atomowych. Jeśli ciału zostanie dostarczona energia cieplna, jego cząsteczki zaczynają poruszać się (drgać) szybciej; jeśli energia zostanie oddana, cząsteczki zmniejszą prędkość swych ruchów; w ten sposób ciało staje się cieplejsze lub chłodniejsze. Przepływ ciepła przebiega zawsze w kierunku od ciała lub jego części o wyższej temperaturze do ciała lub części o temperaturze niższej [1]. Proces przekazywania energii cieplnej może odbywać się zarówno z pośrednictwem materii jak i bezpośrednio, poprzez promieniowanie elektromagnetyczne. Transportowanie z pośrednictwem materii dzieli się dodatkowo na przewodzenie i konwekcję ciepła.

Przepływ ciepła poprzez przewodzenie występuje w obrębie jednego ciała lub w układzie ciał bezpośrednio stykających się. Proces dokonuje się dzięki przekazywaniu energii kinetycznej pomiędzy bezpośrednio sąsiadującymi ze sobą cząsteczkami, przez co przypomina nieco przekazywanie pałeczki w biegu sztafetowym. W układzie stykających się obiektów, odizolowanym od otoczenia, po pewnym czasie wszystkie obiekty będą charakteryzować się tą samą temperaturą, wszystkie cząsteczki będą posiadały identyczną energię kinetyczną. Ilość ciepła, jakie przepływa w jednostce czasu (czyli strumień ciepła) jest proporcjonalna do powierzchni przekroju, przez który odbywa się wymiana, proporcjonalna do różnicy temperatur obserwowanych obszarów oraz odwrotnie proporcjonalna do odległości między tymi obszarami [1]. Ograniczenie zjawiska przewodzenia ciepła jest możliwe poprzez zmniejszenie powierzchni styku obiektów oraz dzięki zastosowaniu izolatorów cieplnych, czyli materiałów o niskiej zdolności przewodzenia ciepła. Najefektywniejszym izolatorem cieplnym jest próżnia, gdyż całkowicie uniemożliwia cząsteczkom wymianę energii kinetycznej; ogólnie im większa gęstość materiału tym lepsze jego zdolności przewodzenia.

Wraz ze zmniejszaniem się gęstości ciała maleje rola przewodzenia w procesie transportu i wymiany ciepła, w cieczech i gazach zasadniczą rolę zaczyna odgrywać inny mechanizm - konwekcja. Jej działanie opiera się na prawie Archimedesesa, które stwierdza, że ciała lub obszary o większej gęstości pod wpływem siły ciężenia wypierają ciała lub obszary o gęstości mniejszej w stronę przeciwną niż działająca na nie siła. Wynika z tego, że zjawisko konwekcji może występować jedynie w układach, które znajdują się pod wpływem ukierunkowanej siły. Jeśli ciecz lub gaz w zbiorniku będzie

podgrzewana od dołu, to obszary najbliższe źródłu ciepła nagrzeją się, cząsteczki zaczną szybciej się poruszać (bardziej wychylać od położenia równowagi), co da w rezultacie lokalne zmniejszenie gęstości. Siła wyporu spowoduje ruch nagrzanego obszaru ku górze, w trakcie którego cząsteczki będą stopniowo oddawały energię poprzez kontakt ze swymi nieogrzanyymi sąsiadami. Oddając energię spowodują ochłodzenie i zwiększenie gęstości ośrodka, przez co uprzednio wypierane obszary zaczną opadać z powrotem ku dołowi pojemnika. W ten sposób sytuacja powtórzy się, tworząc proces ciągły i cykliczny zwany cyrkulacją ośrodka. Taki rodzaj konwekcji jest nazywany konwekcją swobodną w odróżnieniu od konwekcji wymuszonej, która opiera się na procesie wymuszonego obiegu ośrodka, np. w instalacji klimatyzacyjnej [2]. Należy zauważyć, że w przypadku podgrzewania od góry cyrkulacja nie wystąpi a przekazywanie ciepła będzie odbywało się na drodze przewodzenia. Ponadto, sam mechanizm konwekcji nie jest w stanie zapewnić przenoszenia energii cieplnej, cyrkulacja jest jedynie swego rodzaju środkiem transportu dla cząsteczek, które w dalszym ciągu wymieniają ciepło poprzez bezpośrednie oddziaływanie, tak jak w przypadku przewodzenia.

Pomimo tego, że próżnia jest idealnym izolatorem cieplnym, może poprzez nią odbywać się transport energii cieplnej; wymiana ciepła bez pośrednictwa cząsteczek materii jest możliwa dzięki promieniowaniu elektromagnetycznemu, które nie potrzebuje ośrodka aby się rozchodzić. Poruszające się ładunki elektryczne w atomach rozgrzanego ciała powodują powstawanie fal elektromagnetycznych, które rozchodzą się we wszystkich kierunkach z prędkością równą prędkości światła [1]. Kiedy promieniowanie elektromagnetyczne pada na powierzchnię ciała, część niesionej przez nie energii może zostać pochłonięta przez ciało; atomy absorbują kwanty energii zwiększając tym samym poziom swego pobudzenia, w rezultacie czego następuje ogrzewanie ciała. Stosunek energii promieniowania pochłoniętego przez ciało do całkowitej energii promieniowania padającego na jego powierzchnię nazywany jest zdolnością absorbcyjną lub współczynnikiem pochłaniania ciała. Idealna powierzchnia pochłaniająca, zwana ciałem doskonale czarnym, ma zdolność pochłaniania równą 1. Należy zauważyć, że każde ciało o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego emituje promieniowanie elektromagnetyczne, więc proces ma zawsze charakter dwustronny: energia jest pochłaniana i równocześnie wypromieniowywana, bilans tej wymiany jest zależny od zdolności emisyjnej i absorbcyjnej ciała. Transport energii cieplnej poprzez promieniowanie zachodzi również w ośrodkach przezroczystych nie będących próżnią; jego efektywność jest tym mniejsza, im mniejsza przezroczystość ośrodka, gdyż część energii jest wychwytywana przez atomy ośrodka.

2. Procesy cieplne w organizmach żywych

Utrzymanie organizmu przy życiu wymaga ciągłego wydatkowania energii, również pod postacią ciepła; praca każdego narządu i układu jest związana z jej wymianą. Źródłem tej energii są procesy metaboliczne, które u zwierząt i grzybów polegają na rozkładzie skomplikowanych związków chemicznych, podczas którego jest ona uwalniana. Aby mogły one jednak prawidłowo przebiegać, organizm musi posiadać pewne zasoby energetyczne "do natychmiastowego wykorzystania", czyli

dostępne bez dodatkowego wydatkowania energii na ich pozyskanie. Funkcję tę spełnia energia cieplna, której odpowiedni poziom pozwala na uruchomienie procesów przemiany materii oraz normalne funkcjonowanie organizmu. W przypadku zbyt niskiej ciepłoty ciała nie jest możliwe pozyskiwanie energii chemicznej, w rezultacie czego organizm ginie. Z tych względów temperatura ciała jest czynnikiem decydującym o przetrwaniu i musi być utrzymywana w ściśle określonym przedziale [1]. Wstępne zakresy dopuszczalnych temperatur są determinowane przez fizyczne właściwości budulca organizmu, który w głównej mierze złożony jest z wody; w normalnych warunkach (to jest panujących na powierzchni Ziemi) woda może istnieć w stanie ciekłym w temperaturze od zera do 100 stopni Celsjusza. Także białko, będące drugą podstawą ziemskiego życia, jest bardzo czułe na temperaturę: już przy 42 stopniach Celsjusza następuje jego nieodwracalne ścięcie, czyli zniszczenie pierwotnej struktury molekularnej. Jeszcze bardziej rygorystyczne normy dotyczące temperatury operacyjnej (czyli optymalnej temperatury funkcjonującego organizmu) wymuszane są przez specyfikę procesów fizykochemicznych zachodzących w organizmie żywym, takich jak rozpuszczanie się gazów i związków chemicznych we krwi czy chemiczne spalanie węglowodanów i tłuszczów. Tego typu procesy przebiegają tym efektywniej, im wyższa panuje temperatura; dlatego też temperatura operacyjna ciała powinna być możliwie najwyższa, nie przekraczając jednocześnie temperatury denaturacji białka (wraz z zachowaniem pewnego obszaru bezpieczeństwa).

Pierwsze stworzenia, jakie pojawiły się na Ziemi, były organizmami zmiennocieplnymi, to znaczy temperatura ich ciała zależała od temperatury otoczenia, gdyż nie posiadały one mechanizmów jej regulacji. Nie dziwi więc fakt, że pierwotnie środowiskiem ich życia była woda, która ze względu na swe właściwości fizyczne (duża pojemność cieplna oraz stosunkowo dobre przewodzenie ciepła) jest w stanie zapewnić warunki o minimalnych wahaniami temperatury. Wyjście zwierząt wodnych na ląd spowodowane zostało między innymi poszukiwaniem środowiska cieplejszego, które umożliwiłoby zwiększenie aktywności; życie na lądzie pozwala korzystać z ciepła przekazywanego bezpośrednio przez promieniowanie słoneczne, które woda z racji swej małej przezroczystości pochłania już w powierzchniowych warstwach. Dzięki temu zwierzęta mogły prowadzić bardziej aktywne życie w ciągu dnia; ceną za to była konieczność przeczekań okresów nocnych, gdyż niska temperatura nie pozwalała utrzymać metabolizmu na odpowiednio wysokim poziomie. Natura borykała się z tymi problemami, dopóki nie pojawiły się pierwsze organizmy stałocieplne, czyli niezależne (w pewnym zakresie) od temperatury otoczenia oraz potrafiące wpływać na temperaturę swego organizmu. Dzięki temu są one w stanie przeżyć i funkcjonować w temperaturach z zakresu od -50 (biegun południowy) do +50 stopni Celsjusza (pustynie).

Z punktu widzenia problematyki komfortu cieplnego najważniejszymi mechanizmami przystosowawczymi i regulacyjnymi są te, które mają za zadanie utrzymywać odpowiednią temperaturę ciała w krótkich okresach czasu, czyli reagujące na nagłe jej zmiany w otoczeniu. Nie należy jednak zapominać o istnieniu mechanizmów regulacji sezonowej (np. sen zimowy, migracje sezonowe, linienie) oraz o ewolucyjnych sposobach reakcji na stopniowo zmieniające się warunki klimatyczne (np. utrata owłosienia u ludzi czy zmieniająca się grubość futra u zwierząt) [1]. Mechanizmy te u zwierząt stałocieplnych skupiają się na utrzymaniu stałej, najkorzystniejszej dla

organów i układów ciała temperatury poprzez wpływanie na wielkość ciepła oddawanego do otoczenia. Ze względu na fakt, iż tkanki biologiczne są stosunkowo dobrymi izolatorami termicznymi, ciepło musi najpierw zostać przetransportowane w te rejony ciała, które mają bezpośredni kontakt z otoczeniem, by mogło zostać stamtąd wydalone przy pomocy opisywanych wcześniej mechanizmów przewodzenia, konwekcji i promieniowania. Takimi rejonami jest powierzchnia skóry oraz płuca, natomiast czynnikiem transportującym ciepło z wnętrza jest krew. Przy wydalaniu ciepła wykorzystywana jest także woda, której duża pojemność cieplna pozwala na odprowadzenie znacznych ilości energii; paruje ona bezpośrednio z tkanek (płuca i w niewielkim stopniu skóra) lub jest dostarczana na powierzchnię skóry w postaci potu przez gruczoły potowe. Nadzorem wymiany ciepła z otoczeniem zajmuje się podwzgórze, organ mieszczący się w mózgu i pełniący rolę termostatu; jego zadaniem jest uruchamianie odpowiednich reakcji tak, by utrzymać temperaturę ciała na stałym poziomie, pomimo jej wahań w otoczeniu.

Kiedy temperatura otoczenia jest niska, organizm jest zmuszony do produkowania ciepła w celu wyrównania strat związanych z wychładzaniem się ciała. W celu ograniczenia tych strat następuje zwężenie naczyń krwionośnych w obrębie zewnętrznych warstw ciała, w rezultacie czego zmniejsza się dopływ krwi do skóry (świadczy o tym jej bledność) oraz emisja ciepła tą drogą. U zwierząt pokrytych sierścią lub futrem występuje również jej jeżenie, mające na celu zwiększenie stopnia izolacyjności cieplnej pokrycia - zwiększa się jego grubość, a przestrzenie między włosami wypełniają się powietrzem, które jest dobrym izolatorem [odruch ten jest obserwowany również u człowieka pod postacią tak zwanej "gęsiej skórki", lecz ze względu na znikomą ilość włosów na ciele nie ma on znaczenia praktycznego]. Jeśli takie działanie nie przynosi pożądanego rezultatu (straty ciepła są nadal zbyt duże), uruchamiane są radykalne mechanizmy produkowania energii cieplnej: drżenie i napięcie mięśni. Ich skuteczność jest bardzo duża, produkowane w ten sposób ciepło jest prawie równe ciepłu powstającemu w czasie jazdy rowerem [1], lecz należy pamiętać, że odbywa się to kosztem dużego zużycia energii chemicznej (pozyskiwanej z węglowodanów, tłuszczów, a w krytycznych sytuacjach nawet z białek), której ilość jest ograniczona.

Wzrost temperatury wewnątrz ciała niesie ze sobą zagrożenie zniszczeniem struktury molekularnej białek, z których zbudowany jest organizm; taka sytuacja wymaga zintensyfikowania procesów wydalania ciepła z organizmu. W tym celu poprzez rozszerzenie naczyń krwionośnych zwiększany jest dopływ krwi do skóry. Jeśli jednak temperatura otoczenia jest porównywalna lub wyższa od temperatury ciała, taka metoda nie skutkuje ze względu na brak przepływu ciepła między skórą a powietrzem; co więcej, ciepło może zacząć wtedy napływać z zewnątrz do organizmu. W takim przypadku uruchamiane są mechanizmy oparte na parowaniu, gdyż umożliwiają one wydalanie ciepła pomimo wyższej temperatury otoczenia (nie następuje wtedy transfer ciepła; woda podgrzewa się i odparowuje, dzięki czemu jest w stanie opuścić organizm wraz ze zgromadzoną energią). Człowiek jest w stanie w ciągu godziny odparować do 1.5 kilograma potu, co jest równoważne odprowadzeniu do otoczenia energii ponad 10-ciokrotnie większej niż energia wytwarzana przez organizm ludzki w czasie spoczynku [1]. Zwierzęta nie posiadające gruczołów potowych (np. psy) odparowują wodę poprzez płuca, wspomagając wentylację intensywnym dyszeniem. Mechanizm parowania jest

wykorzystywany także do wydalania tak zwanego ciepła odpadowego, powstającego podczas intensywnej pracy fizycznej. Należy mieć na uwadze, iż jego efektywność zmniejsza się wraz ze wzrostem wilgotności powietrza; im wyższe ciśnienie pary wodnej, tym trudniej jest zmienić stan skupienia wody z płynnego na gazowy. Intensywne odparowywanie wody z organizmu może ponadto doprowadzić do jego odwodnienia w sytuacji, gdy zapasy wody nie są odpowiednio często uzupełniane.

3. Mikroklimat i komfort cieplny

Mikroklimat w znaczeniu encyklopedycznym jest to klimat charakterystyczny dla małej części środowiska, której odrębność jest wynikiem specyfiki układu czynników ją tworzących, np. wysokością i wahaniami temperatury, wilgotności, szybkością ruchu powietrza itp. Określonym mikroklimatem może charakteryzować się zarówno obszar geograficzny (np. miejscowość, kotlina czy wąwóz), jak i twór sztuczny, zbudowany przez człowieka (wnętrze samochodu, mieszkanie, hala produkcyjna). Kształtowanie się mikroklimatu zależy głównie od warunków meteorologicznych jego otoczenia oraz od naturalnych barier, które przyczyniają się do jego utrzymania (np. ściana lasu czy otaczające góry). W przypadku wytworów rąk ludzkich dodatkowy wpływ mają techniczne i konstrukcyjne parametry obiektów (rozwiązania konstrukcyjne okien, materiały użyte do budowy ścian) oraz charakterystyka procesów, które przebiegają wewnątrz nich (np. sposób użytkowania czy metoda ogrzewania) [2]. Warto zauważyć, że człowiek buduje pomieszczenia właśnie w tym celu, by uniezależnić się od klimatu swego otoczenia poprzez stworzenie przestrzeni o bardziej odpowiadającym mu mikroklimacie.

Najważniejszymi parametrami charakteryzującymi mikroklimat są: temperatura powietrza, promieniowanie termiczne otoczenia, wilgotność powietrza, prędkość jego ruchu oraz ciśnienie atmosferyczne [4], przy czym należy pamiętać, że ich wpływ nie ogranicza się tylko do procesów termofizjologicznych w organizmach żywych (np. samopoczucie dużej części populacji zależy od ciśnienia atmosferycznego, które praktycznie nie wpływa na procesy wymiany ciepła). Temperatura powietrza określa stan energetyczny cząstek powietrza oraz pary wodnej w nim zawartej. Promieniowanie termiczne otoczenia wyraża wielkość energii, jaką oddają przedmioty znajdujące się w otoczeniu poprzez promieniowanie; jego poziom zależy od temperatury powietrza i temperatury promieniujących obiektów. Wilgotność powietrza charakteryzuje zawartość pary wodnej w powietrzu; może być wyrażana jako liczba gramów pary wodnej zawartej w jednym metrze sześciennym powietrza (wilgotność bezwzględna), ciśnienie wywierane przez cząsteczki pary wodnej (cząstkowe ciśnienie pary wodnej) lub stosunek tego ciśnienia do ciśnienia, jakie wywierałaby para nasycona w tej samej temperaturze (wilgotność względna). Prędkość ruchu powietrza opisuje względne zmiany wzajemnego położenia organizmu i otaczających go cząsteczek powietrza i pary wodnej; na otwartej przestrzeni determinowana jest przez prędkość mas powietrza i prędkość przemieszczania się

organizmu, w pomieszczeniach zamkniętych dodatkowy wpływ wywiera na nią cyrkulacja powietrza powodowana przez konwekcję oraz cyrkulacja wymuszona, generowana przez układy wentylacyjne.

W pomieszczeniach, w których przebywa (pracuje lub odpoczywa) człowiek, należy utrzymywać odpowiedni poziom parametrów określających mikroklimat [2]; daje to gwarancję dobrego samopoczucia przebywających w pomieszczeniu ludzi, a w przypadku wykonywanej pracy wiąże się dodatkowo z polepszeniem jej jakości. Jeśli w danych warunkach mikroklimatu pomieszczenia człowiek czuje się dobrze, a gospodarka cieplna jego organizmu przebiega najbardziej ekonomicznie, to mamy do czynienia ze stanem komfortu cieplnego [3]. Należy pamiętać, że nie jest on obiektywną formą oceny warunków klimatycznych, gdyż w dużej mierze zależy również od ogólnego stanu organizmu, który "wystawia" ocenę. Ze względu na ten fakt należałoby zdefiniować komfort cieplny jako "taki stan umysłu, który wyraża zadowolenie z panujących warunków termicznych" [5]. Na odczuwanie ciepła przez człowieka, oprócz czynników mikroklimatycznych, ma wpływ jego aktywność fizyczna oraz charakterystyka termiczna odzieży, którą ma na sobie. Aktywność fizyczna jest związana z poziomem metabolizmu, który z kolei wpływa na produkcję ciepła przez organizm; im większa aktywność fizyczna, tym intensywniej przebiegają procesy metaboliczne i wydziela się więcej ciepła. Odzież zastępuje u człowieka utraconą w procesie ewolucji sierść; dzięki temu, że można ją dowolnie dobierać, w zależności od warunków klimatycznych, człowiek jest w stanie funkcjonować zarówno w skrajnie niskich temperaturach (np. badacze bieguna południowego), jak i w temperaturach bardzo wysokich, przy których odzież staje się całkowicie zbędna. Funkcja, jaką pełni ubranie, z punktu widzenia termofizjologii sprowadza się do regulacji procesów wymiany ciepła z otoczeniem poprzez redukcję strumienia promieniowania, który przez nie przepływa. Ogólnie, im wyższy stopień izolacyjności odzieży, tym mniej ciepła ucieka i mniejsze jest zapotrzebowanie organizmu na produkcję dodatkowej, wyrównującej powstające straty, energii.

Pierwsza zasada termodynamiki mówi, że końcowa energia wewnętrzna układu równa jest sumie jego energii początkowej oraz dostarczonego (lub odebranego) mu ciepła (z oczywistych względów pomijamy wykonywaną nad układem pracę). Inaczej mówiąc, zmiana energii wewnętrznej układu równa jest ciepłu dostarczonemu lub odebranemu układowi. Fizycznym stanem związanym z odczuwaniem komfortu cieplnego jest sytuacja, gdy zmiana energii wewnętrznej organizmu ludzkiego wynosi zero, równocześnie przy takim jej poziomie, który gwarantuje utrzymanie temperatury operacyjnej ciała. W takim przypadku łączna ilość ciepła wpływającego i wypływającego z ciała powinna również być równa zero. Aby stworzyć formułę opisującą komfort cieplny, należałoby zidentyfikować wszystkie strumienie ciepła, jakie przepływają przez organizm. Pierwszym z nich jest ciepło produkowane na drodze metabolizmu, zarówno to potrzebne do prawidłowego funkcjonowania ciała, jak i ciepło odpadowe. Następnym strumieniem jest energia przepływająca do organizmu z otoczenia, czy to poprzez promieniowanie (np. gdy wystawiamy się na działanie Słońca), czy przewodzenie (np. podczas gorącej kąpieli). Strumienie, które odprowadzają ciepło z ciała, to: ciepło oddawane poprzez skórę (z uwzględnieniem jej pokrycia odzieżą) w wyniku promieniowania, konwekcji, parowania wody i potu oraz przewodzenia (kąpiel w chłodnej wodzie), ciepło wydalone poprzez płuca (zarówno jako para wodna, jak i ogrzane, wydychane powietrze) oraz energia

wykorzystana do wykonania pracy fizycznej. Ze względu na to, iż niektóre z tych strumieni są znikomo małe lub występują bardzo rzadko [4], przyjęto za wystarczające stosowanie równania komfortu cieplnego w następującej formie [3]:

$$f(M, I_{cl}, t_a, t_r, p_w, v)=0$$

gdzie:

- M - szybkość metabolicznej produkcji ciepła
- I_{cl} - izolacyjność odzieży
- t_a - temperatura powietrza
- t_r - temperatura promieniowania otoczenia
- p_w - ciśnienie pary wodnej zawartej w powietrzu
- v - prędkość powietrza względem powierzchni ciała

Pomiar pierwszych dwóch wielkości w warunkach nielaboratoryjnych jest w zasadzie niemożliwy, stosuje się więc szacowanie oparte na zestawieniach, tabelach i zależnościach stworzonych podczas badań empirycznych.

4. Norma ISO 7730

Norma ISO 7730 [5] dotyczy umiarkowanych warunków mikroklimatycznych, odpowiadających pomieszczeniom zamkniętym z systemami ogrzewania oraz opcjonalnej wymuszonej wentylacji. Specyfikuje ona warunki komfortu cieplnego oraz udostępnia narzędzia służące do jego oceny.

Ocena stopnia komfortu cieplnego opiera się na wyznaczeniu wskaźnika PMV (Predicted Mean Vote), który przewiduje średnią wartość głosów dużej grupy ludzi co do odczuwanego przez nich ciepła. Skala ocen wygląda następująco:

- +3 - gorąco
- +2 - ciepło
- +1 - nieznacznie ciepło
- 0 - neutralnie
- -1 - nieznacznie chłodno
- -2 - chłodno
- -3 - zimno

Formuła obliczeniowa bazuje na zjawisku równowagi termicznej ludzkiego ciała; zachodzi ona wówczas, gdy wielkość ciepła produkowanego wewnątrz ciała jest równa wielkości ciepła

oddawanego do otoczenia. Obliczenie wskaźnika PMV wymaga oszacowania poziomu metabolizmu i izolacyjności termicznej odzieży oraz zmierzenia parametrów mikroklimatu: temperatury powietrza, średniej temperatury promieniowania, względnej prędkości ruchu powietrza i cząstkowego ciśnienia pary wodnej. Postać formuły jest następująca:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - p_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \}$$

przy czym:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \}$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{dla } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \geq 12.1\sqrt{v_{ar}} \\ 12.1\sqrt{v_{ar}} & \text{dla } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl} & \text{dla } I_{cl} < 0.078 \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & \text{dla } I_{cl} \geq 0.078 \end{cases}$$

gdzie:

- M - poziom metabolizmu
- W - praca zewnętrzna
- I_{cl} - izolacyjność termiczna odzieży
- f_{cl} - stosunek powierzchni ciała pokrytej odzieżą do powierzchni nieokrytej
- t_a - temperatura powietrza
- t_r - średnia temperatura promieniowania
- v_{ar} - względna prędkość powietrza
- p_a - cząstkowe ciśnienie pary wodnej
- h_c - współczynnik konwekcyjnego transferu ciepła
- t_{cl} - temperatura powierzchni odzieży

Obliczenia dotyczące temperatury odzieży należy przeprowadzać wielokrotnie, aż do ustabilizowania się uzyskiwanego wyniku (z tego względu zalecane jest zastosowanie komputerowych technik obliczeniowych). Wskazane jest, aby wartości parametrów wejściowych zawierały się w następujących granicach:

- M - 58 do 232 [W/m²] (1 do 4 [met])

- I_{cl} - 0 do 0.31 [$m^2 \cdot ^\circ C/W$] (0 do 2 [clo])
- t_a - 10 do 30 [$^\circ C$]
- t_r - 10 do 40 [$^\circ C$]
- v_{ar} - 0 do 1 [m/s]
- p_a - 0 to 2700 [Pa]

Uzupełnieniem oceny stopnia komfortu cieplnego wyrażanej przez PMV jest wskaźnik PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), który daje odpowiedź na pytanie: jak wiele osób z dużej grupy odczuwa dyskomfort cieplny w zadanych warunkach? Oblicza się go według następującego wzoru:

$$PPD=100-95 \times e^{-(0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2)}$$

Ze względu na indywidualne przyzwyczajenia oraz różnice osobnicze niemożliwe jest stworzenie takiego mikroklimatu, który satysfakcjonowałby każdego, istnieje jedynie możliwość minimalizowania liczby ludzi niezadowolonych. Proponowane granice komfortu cieplnego to wartość PMV zawierająca się w przedziale (-0.5;+0.5), co odpowiada 90% zadowolonych (odczuwających komfort cieplny).

Literatura:

1. Kane J. W., Sternheim M. M., "Fizyka dla przyrodników 2."
PWN, Warszawa 1988
2. Bogosłowski Wacław N., "Procesy cieplne i wilgotnościowe w budynkach."
Arkady, Warszawa 1985
3. Koradecka Danuta (red.), "Bezpieczeństwo pracy i ergonomia."
Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa 1997
4. Grobelny Jerzy, "Modelowanie wpływu czynników mikroklimatycznych na człowieka dla potrzeb ergonomii."
Instytut Organizacji i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980
5. International Standard Organisation, "ISO 7730: Moderate thermal environments -
Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal
comfort."
1984