

dr inż. ANDRZEJ SOBOLEWSKI

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: as@ciop.pl

Dobór odzieży ochronnej do przebywania i pracy w środowisku zimnym (1)

Fot. Core Pics/Bigstockphoto



Artykuł przeznaczony jest dla osób zajmujących się oceną obciążenia cieplnego oddziałującego na człowieka pracującego w środowisku chłodnym i zimnym. Przedstawiono w nim zasady doboru odzieży o izolacyjności cieplnej odpowiedniej do przebywania w tych środowiskach, opierające się na założeniach teoretycznych wynikających ze współczesnego poziomu wiedzy.

Słowa kluczowe: odzież ochronna, zimne środowisko pracy, izolacyjność cieplna

Selecting protective clothing adjusted to staying and working in a cold environment

This article is aimed at people engaged in assessing thermal load acting on human working in cool and cold environments. It presents the principles of selecting clothing with insulation appropriate for staying in these environments. Those principles are based on theoretical assumptions resulting from the present level of knowledge.

Keywords: protective clothing, cold work environment, thermal insulation

Wstęp

Do powstania tego artykułu przyczyniły się pytania zadawane przez osoby wykonujące pomiary parametrów mikroklimatu zimnego i oceniające na ich podstawie obciążenie cieplne pracowników. Pytania pojawiały się podczas konsultacji, seminariów i szkoleń organizowanych w CIOP-PIB i najczęściej dotyczyły:

- interpretacji wielkości $IREQ_{minimal}$ i $IREQ_{neutral}$
- możliwości wykorzystania do pracy w środowisku zimnym odzieży o wartości izolacyjności cieplnej mniejszej od wartości wymaganej (tj. $IREQ$)
- kryterium definiującego środowisko zimne w świetle rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Społecznej [1]

– celowości i metody i określania niepewności oszacowania wartości $IREQ$.

Poniższy tekst jest próbą odpowiedzi na te pytania. Ze względu na zakres tematyki artykuł podzielono na dwie części, publikowane w kolejnych numerach „Bezpieczeństwa Pracy”. W części 1. omówiono warunki prowadzące do powstania obciążenia cieplnego organizmu człowieka w środowisku zimnym, w części 2. – metody określania izolacyjności cieplnej odzieży dostosowanej do danych warunków środowiskowych; ustosunkowano się również do najczęściej zadawanych pytań dotyczących analizy i oceny obciążenia cieplnego oddziałującego na człowieka pracującego w środowisku zimnym.

Środowisko zimne pracy człowieka w ujęciu współczesnych norm

Zasady doboru odzieży ochronnej przeznaczonej do przebywania i pracy w środowisku zimnym uregulowane są postanowieniami 5 norm [2-6]. Pierwsze trzy ujmują w sensie dosłownym zasady doboru odzieży do warunków środowiska chłodnego i zimnego. Według PN-EN 342 „środowisko zimne charakteryzuje się łącznym występowaniem wilgotności, wiatru i temperatury poniżej -5 °C ” [2]. PN-EN 14058 definiuje środowisko chłodne jako: „kombinację wilgotności i wiatru przy wartościach temperatury -5 °C i wyżej” [3]. W PN-EN ISO 11079 rozpatrywane są warunki klimatu odzwanego jako środowisko chłodne i zimne, określone temperaturą powietrza $t_a \leq 10\text{ °C}$ i jego przepływem o prędkości zmieniającej się w zakresie $0,4\text{ m/s} \leq v_a \leq 18\text{ m/s}$ [4].

Z założeń przyjętych w wymienionych normach wynika pozorna niespójność spowodowana przydzieleniem różnych zakresów

zmienności temperatury otaczającego środowiska do opisu, czym jest środowisko chłodne i zimne. Pojęcia środowisko *chłodne* lub *zimne* wchodzi w zakres 7-stopniowej skali subiektywnych odczuć cieplnych człowieka, wykorzystywanej w normach znajdujących zastosowanie w ocenie środowisk termicznych [7]. Środowisku zimnemu przypisuje się na tej skali liczbę -3, a środowisku chłodnemu -2. Określenie środowiska jako *zimne* lub *chłodne* oddaje jednoznacznie wrażenia cieplne, które są udziałem większości przebywających w nim ludzi. Ujmuje jednak ogólnie i tylko jakościowo jego właściwości cieplne. Uściślenie pojęcia *środowisko zimne* lub *chłodne* wnosi informacja, że warunki powodujące takie odczucia powstają, kiedy wytwarzane w organizmie metaboliczne ciepło przestaje pokrywać jego straty do otoczenia. Widziane z tej perspektywy różne zakresy temperatury otoczenia przyjmowane przez wspomniane normy do opisu środowiska chłodnego i zimnego stają się teraz bardziej zrozumiałe.

W warunkach klimatu umiarkowanego Europy, do którego jesteśmy przystosowani najlepiej, straty ciepła do otoczenia przez znaczną część roku są dosyć łatwo uzupełniane przez organizm. Dzięki temu zachowanie stanu równowagi cieplnej odbywa się niewielkim kosztem fizjologicznym. Niezależnie od charakteru oddziałującego środowiska i tego, czy jest ono odczuwane jako zimne, czy gorące, procesy życiowe wymagają utrzymania wewnętrznej temperatury ciała w optymalnym dla organizmu zakresie zmian, tj. $\pm 1^\circ\text{C}$ wokół wartości średniej wynoszącej około 37°C . Proces regulacji temperatury wnętrza ciała do optymalnego poziomu stanowi obciążenie dla organizmu tym większe, im bardziej temperatura otoczenia różni się od temperatury ciała.

Po przekroczeniu granic wydolności organizmu w skrajnych warunkach klimatu, utrzymanie stałości parametrów wewnętrznych staje się niemożliwe. W konsekwencji w środowisku zimnym, wraz z upływem czasu, dochodzi do postępującego spadku średniej temperatury ciała, co zaburza sprawność przebiegających procesów fizjologicznych. Przekroczenie granicy dopuszczalnego wychłodzenia ciała prowadzi do nieodwracalnych zmian w organizmie, a w ostateczności, po osiągnięciu poziomu temperatury letalnej, do zahamowania jego czynności życiowych.

Równanie bilansu cieplnego

Do racjonalnej oceny obciążenia cieplnego organizmu człowieka służy równanie bilansu cieplnego. Lewa strona równania określa moc źródła ciepła, jakim jest organizm człowieka. Prawa strona równania wyróżnia zjawiska natury odmiennej, za pośrednictwem których w środowisku zimnym odbywa się rozprasa-

nie ciepła z organizmu do otoczenia. Równanie bilansu cieplnego [8] ma postać

$$M = W + E_{sk} + H_{res} + C + R + \Delta S \quad (1)$$

gdzie:

M – gęstość strumienia metabolicznej produkcji ciepła, W/m^2

W – gęstość strumienia mocy wykorzystana na pracę mechaniczną, W/m^2

E_{sk} – gęstość strumienia mocy traconej w wyniku parowania potu, W/m^2

H_{res} – gęstość strumienia mocy traconej w wyniku oddychania, W/m^2

$C + R$ – gęstość strumienia mocy traconej na skutek konwekcji i promieniowania, W/m^2

ΔS – akumulacja lub strata ciepła, W/m^2 .

Jak wynika z postaci równania (1), przyjmowane do obliczeń wartości M mają decydujące znaczenie w ocenie obciążenia cieplnego organizmu człowieka. Wartości metabolizmu określa się z bezpośrednich pomiarów lub korzystając z danych zgromadzonych w specjalnie opracowanych tablicach [2, 3, 4, 9]. Człowiek nie jest w stanie osiągnąć dużego poziomu metabolizmu bez wykonywania pracy fizycznej. W takim przypadku w obliczeniach bilansu należy uwzględnić część energii metabolicznej zużywaną na wykonywaną pracę W . Wartość W zależy od sprawności organizmu i nie przekracza 25% wartości M [8].

Straty ciepła wynikające z oddychania i parowania potu z powierzchni skóry, tj. H_{res} i E_{sk} zależą od wydolności organizmu i jego przystosowania do występujących warunków środowiskowych oraz obciążenia pracą. Pozostałe straty ciepła spowodowane konwekcją C , czyli jego unoszeniem na skutek opływu powietrza wokół ciała człowieka i wypromiowaniem ciepła R do zimnego otoczenia z powierzchni jego skóry, są regulowane odzieżą odpowiednio dobraną do zaistniałych warunków.

Dług cieplny organizmu a rozmiary ciała

Jeżeli w równaniu bilansu cieplnego $\Delta S < 0$, to straty ciepła niezrównoważone jego metaboliczną produkcją powodują, że organizm wychładza się zaciągając tzw. dług cieplny. W PN-EN ISO 11079 przyjęto poziom utraty energii cieplnej, dopuszczalny i bezpieczny dla

zdrowia, równy $Q_{lim} = -144 \text{ kJ}/\text{m}^2$. Jest to szczególnie istotne założenie dla rozumowania przyjętego w tej normie i w PN-EN 342 oraz PN-EN 14058, które często się na nią powołują. Wymiar Q_{lim} podany w jednostkach kJ/m^2 oznacza, że rzeczywiste straty ciepła z organizmu są proporcjonalne do powierzchni ciała P , m^2 . Do oszacowania powierzchni ciała człowieka wykorzystuje się najczęściej wzór Du Bois [8] dany w postaci

$$P = 0,00718h^{0,725}m^{0,425} \quad (2)$$

gdzie:

h – wysokość ciała, cm

m – masa ciała, kg.

Opierając się na tej zależności obliczono powierzchnie ciała kobiet i mężczyzn dla 5, 50 i 95 centyla populacji polskiej (tabela). Dane o wysokości h i masie ciała m pochodzą z Atlasu [10]. Po uwzględnieniu powierzchni ciała P , bezpieczne dla organizmu straty ciepła ΔC wyniosą $\Delta C = -144 \cdot P$, kJ. Konsekwencją utraty ciepła o wartości ΔC jest spadek średniej temperatury ciała o Δt_c stopni. Jest on odwrotnie proporcjonalny do masy m zgodnie z zależnością wywodzącą się z podstawowego wzoru opisującego związek między akumulacją lub stratami ciepła w ciele o cieple właściwym c i masie m , pod wpływem zmiany temperatury ciała o Δt stopni

$$\Delta t_c = \Delta C / (m \cdot c) \quad (3)$$

gdzie:

c – ciepło właściwe tkanki ciała człowieka, $c = 3,49 \text{ kJ}/(\text{kgK})$, [8].

Rezultaty obliczeń zamieszczono w ostatnim wierszu tabeli. Wynika z nich, że wartości Δt_c są różne i zmieniają się, w zakresie: $-1,20 \leq \Delta t_c \leq -0,93^\circ\text{C}$, w zależności od rozmiarów człowieka określonych wartością centyla.

Zróżnicowanie to jest nieprzypadkowe. Dla brył geometrycznie podobnych, tj. izometrycznych, stosunek ich powierzchni P do objętości V zmienia się według zależności

$$\frac{P}{V} = k V^{-0,333} \quad (4)$$

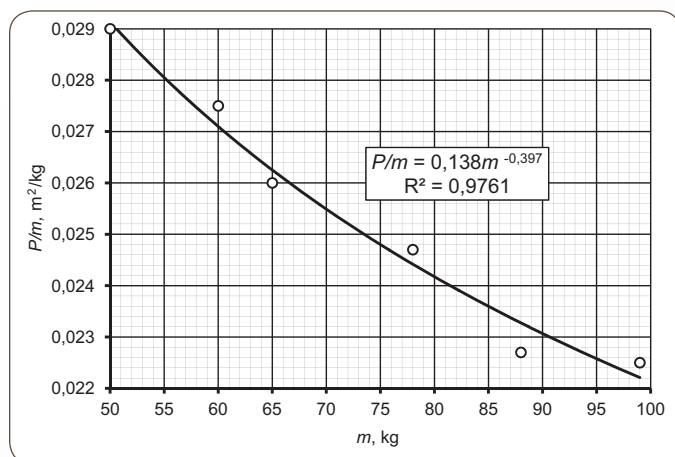
gdzie:

k – współczynnik zależny od kształtu bryły. Dla sześcianu $k = 6$, dla sfery $k = 10,37$.

Tabela. Wartości powierzchni ciała P , straty ciepła ΔC obliczone dla warunku $Q_{lim} = -144 \text{ kJ}/\text{m}^2$ i odpowiadające im spadki temperatury ciała Δt_c , dla 5, 50 i 95 centyla populacji polskiej

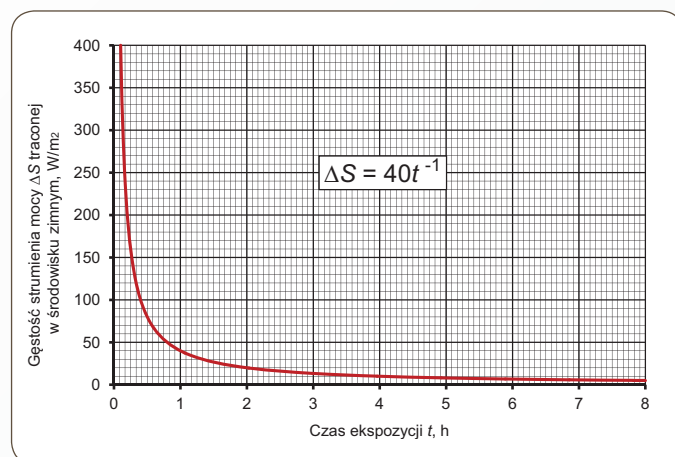
Table. Values of body surface P , warmth losses ΔC calculated for $Q_{lim} = -144 \text{ kJ}/\text{m}^2$, and decreases in body temperature Δt_c corresponding to warmth losses, for 5, 50, and 95 percentile of the Polish population

Centyl	Kobiety			Mężczyźni		
	5	50	95	5	50	95
Masa ciała m , kg	50,0	65,0	88,0	60,0	78,0	99,0
Wysokość ciała h , cm	152,4	161,5	170,7	164,3	174,8	185,4
Powierzchnia ciała P , m^2	1,45	1,69	2,00	1,65	1,93	2,23
Strata ciepła $\Delta C = -144 \cdot P$, kJ	-208,8	-243,4	-288,0	-237,6	-277,9	-321,1
Spadek temperatury ciała, Δt_c , $^\circ\text{C}$	-1,20	-1,07	-0,94	-1,13	-1,02	-0,93



Rys. 1. Zależność między masą ciała m a stosunkiem powierzchni ciała do jego masy P/m dla populacji polskiej. Opr. na podst. danych pochodzących z Atlasu [10]

Fig. 1. A relationship between body weight m and a relationship between body surface and its weight P/m for the Polish population. Prepared on the basis of data from Atlas [10]



Rys. 2. Związek między dopuszczalną stratą ciepła z organizmu człowieka do środowiska zimnego, wyrażoną gęstością strumienia traconej mocy ΔS , a czasem ekspozycji t . Najmniejsza działka osi X – 5 min

Fig. 2. A relationship between exposure time t and permissible warmth loss from a human body to a cold environment. The loss is expressed as a density of a stream of decreasing power ΔS . The smallest unit on X axis: 5 min

Wynika stąd, że powierzchnia bryły jest większa w przeliczeniu na jednostkę jej objętości przy mniejszych rozmiarach bryły niż przy dużych. Ponieważ masa ciała m zależy wprost proporcjonalnie od jego objętości V (przyjmując w obliczeniach średnią gęstość ciała), to także powierzchnia ciała jest większa w przeliczeniu na kilogram jego masy przy mniejszych rozmiarach człowieka niż przy dużych. Stąd właśnie wynika odpowiednio większy spadek temperatury ciała u osób o małych rozmiarach, tj. odpowiadających 5 centylowi, w porównaniu z osobami dużymi, tj. odpowiadających 95 centylowi. Kierując się analogią do zależności (4) przedstawiono na wykresie wyniki obliczeń P/m w funkcji masy m (rys. 1.).

Uzyskany z obliczeń empiryczny wykładnik potęgi równy $-0,397$ różni się od wartości teoretycznej $-0,333$ o około 19%. Nie ma w tym żadnej sprzeczności, bo mimo że ogólny plan budowy ciała ludzkiego jest podobny, to między poszczególnymi osobnikami, zważywszy na różnice płci i indywidualne różnice budowy ciała, nie ma ścisłego podobieństwa geometrycznego. Natomiast z przedstawionego wyżej rozumowania wynika istotny wniosek: osoby o dużych rozmiarach ciała powinny lepiej tolerować obciążenie środowiskiem zimnym w porównaniu z osobami o małych rozmiarach.

Ogólne zasady doboru odzieży o izolacyjności odpowiedniej do warunków środowiska zimnego

Czas, po upływie którego straty ciepła z organizmu osiągną przyjęty w normie limit $Q_{lim} = -144 \text{ kJ/m}^2$, zależy od intensywności chłodzenia występującego w środowisku. Jest to wartość gęstości mocy strumienia ciepła rozpraszanego do otoczenia, oznaczona

w równaniu (1) symbolem ΔS . I tak poziom $Q_{lim} = -144 \text{ kJ/m}^2$ osiągnięty zostanie po upływie 8 godzin przy stratach o wartości gęstości strumienia mocy $\Delta S = -5 \text{ W/m}^2$, po upływie 1 godziny przy $\Delta S = -40 \text{ W/m}^2$ i po 6 minutach przy $\Delta S = -400 \text{ W/m}^2$ (rys. 2.)

Istota doboru odzieży o oporności cieplnej dostosowanej do zaistniałych warunków środowiskowych i metabolizmu M polega zatem na tym, by po uwzględnieniu w bilansie strat ciepła powstających wskutek: oddychania H_{res} , parowania potu E_{sk} i wykonywanej pracy W , tak sponownie pozostatek straty ciepła przepływającego z pozostałe straty ciepła do otoczenia, by mogły one być w tym samym czasie zrównoważone ciepłem wytwarzanym w organizmie. Warunek ten spełnia odzież o wymaganej izolacyjności cieplnej (ang. *required clothing insulation*). W piśmiennictwie wielkość ta występuje jako $IREQ$.

Reakcje fizjologiczne organizmu na środowisko zimne

W środowisku zimnym proporcje rozpraszania ciepła metabolicznego przypadające na każde ze zjawisk wyróżnionych w równaniu bilansu cieplnego są inne, niż w środowisku gorącym lub umiarkowanym. Jest to zrozumiałe ze względu na różne strategie termoregulacji wykształcone i uruchamiane przez organizm w zależności od charakteru oddziałującego obciążenia cieplnego. PN-EN ISO 11079 wprowadza podział dychotomiczny odnoszący się do reakcji fizjologicznej organizmu człowieka na obciążenie występujące w środowisku zimnym:

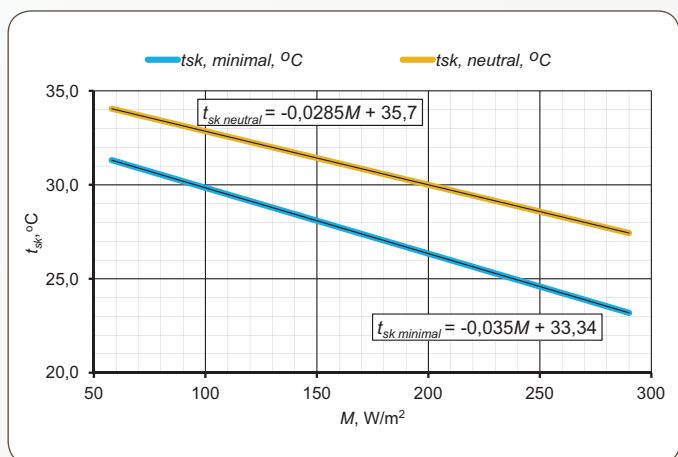
- małe obciążenie fizjologiczne odczuwane jako *neutralne* odczucie cieplne, osiągnięte przy zastosowaniu odzieży o izolacyjności $IREQ_{neutral}$ zapewniającej stan równowagi cieplnej przy

minimalnym obciążeniu układu termoregulacji w występujących warunkach

- duże obciążenie fizjologiczne odczuwane jako „zimno”, dopuszczalne dla zdrowia, ale osiągnięte przy zastosowaniu odzieży o *minimalnej* oporności cieplnej $IREQ_{minimal}$ zapewniającej jednak stan równowagi w zaistniałych warunkach.

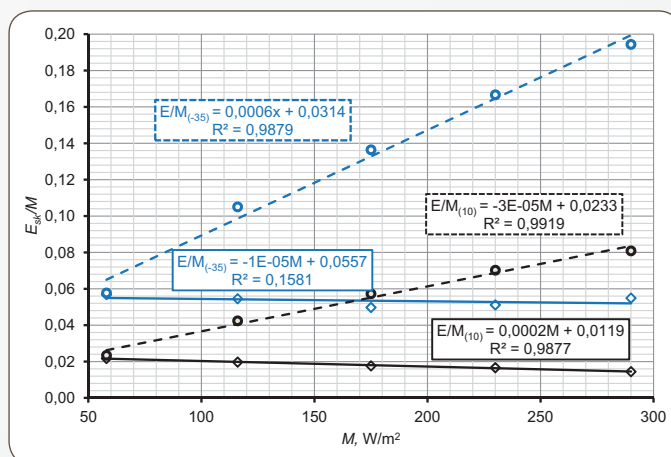
Stan ten jest odmienny od poprzedniego, wynika z innej strategii termoregulacyjnej podejmowanej w tym przypadku przez organizm, a polegającej na zwężeniu średnicy naczyń krwionośnych skóry i kończyn, przez co zredukowany zostaje dopływ do nich krwi. W ten sposób wspomniane części ciała wychładzają się po upływie 20-40 minut od momentu rozpoczęcia ekspozycji w środowisku zimnym. Obniżona po tym czasie temperatura powierzchni skóry przyczynia się do zmniejszenia intensywności oddawania ciepła do otoczenia przez konwekcję i promieniowanie i na tym poziomie zostaje osiągnięty stan równowagi cieplnej. Odbywa się to jednak dużym kosztem fizjologicznym organizmu po jego wstępnym wychłodzeniu o wartość około 140 kJ/m^2 [4].

Autorzy PN-EN ISO 11079, opierając się na wynikach badań przeprowadzonych z udziałem ludzi, przyjęli różne założenia co do średniej temperatury powierzchni skóry w warunkach małego i dużego obciążenia i odmiennie warunki odnoszące się do straty ciepła na skutek parowania potu. W przypadku odczuwania „zimna”, tj. dużego obciążenia, parowanie z powierzchni skóry jest minimalne i odbywa się jedynie przez dyfuzję. Temperatura średnia skóry przyjmuje wartości z przedziału $23,2 \leq t_{sk} \leq 31,3 \text{ }^\circ\text{C}$ w zależności od metabolizmu. W warunkach neutralnych, co wiąże się z małym obciążeniem cieplnym, intensywność wydzielania potu jest większa i zależy wprost proporcjonalnie od wartości metabolizmu M .



Rys. 3. Związki między średnią temperaturą powierzchni skóry t_{sk} a metabolizmem M , w warunkach małego i dużego obciążenia środowiskiem zimnym

Fig. 3. Relationships between an average temperature of skin surface t_{sk} and metabolism M under conditions of small and big loads of a cold environment



Rys. 4. Względne straty ciepła na skutek parowania potu E_{sk}/M . Kolorem niebieskim oznaczono wyniki obliczeń dla $t_a = -35$ °C, kolorem czarnym dla $t_r = 10$ °C. Linie przerywane dotyczą przypadku „neutral”, linie ciągłe przypadku „minimal” (środowisko zimne) Fig. 4. Relative warmth losses as a result of sweat vaporising E_{sk}/M . Results of calculations for $t_a = -35$ °C are marked in blue, for $t_a = -10$ °C in black. Dotted lines = “neutral” case, solid lines = “minimal” case (cold environment)

Przy maksymalnym, uwzględnianym w normie metabolizmie $M = 290 \text{ W/m}^2$ zwilżenie skóry potem nie przekracza 29% jej powierzchni. Natomiast temperatura średnia powierzchni skóry przyjmuje wartości wyższe w porównaniu z założonymi dla warunków, w których odczuwane jest „zimno”. Zmieniają się one w przedziale $27,4 \leq t_{sk} \leq 34,0$ °C w zależności od wartości metabolizmu (rys. 3).

Konsekwencją przyjętych założeń dotyczących temperatury t_{sk} i stopnia zawilgocenia skóry są straty ciepła E_{sk} i $C+R$ różne dla małego i dużego obciążenia.

E_{sk} , czyli straty ciepła w środowisku zimnym wg PN-EN ISO 11079 powstające w wyniku parowania potu

Straty ciepła E_{sk} wynikające z parowania potu z powierzchni skóry [4, 8] określone są z wzoru

$$E_{sk} = w(\rho_{sk,s} - \rho_a) / R_{E,T} \quad (5)$$

gdzie:

w – bezwymiarowy współczynnik zawilgocenia skóry, może zmieniać się od wartości $w=0,06$ kiedy para wodna unoszona jest z powierzchni skóry na skutek dyfuzji i $w=1$, kiedy skóra jest całkowicie wilgotna od potu

ρ_a – ciśnienie pary wodnej w otaczającym powietrzu, kPa

$\rho_{sk,s}$ – ciśnienie pary wodnej nasyconej na powierzchni skóry o temperaturze t_{sk} , kPa

$R_{E,T}$ – opór stawiany przez odzież parowaniu potu z powierzchni skóry, zależny od izolacyjności cieplnej odzieży, $\text{m}^2 \text{kPa/W}$.

Udział strat ciepła na parowanie potu w środowisku zimnym jest mały w porównaniu ze stratami występującymi w środowisku gorącym. Do obliczeń szacunkowych, względnych

strat ciepła E_{sk}/M wynikających z parowania potu przyjęto założenia:

- obliczenia wykonano dla dwóch skrajnych wartości temperatury powietrza t_a (-35 °C i 10 °C), założono także, że temperatury powietrza i promieniowania są równe $t_a = t_r$,
- stałą wilgotność względną powietrza $rh = 50\%$
- przedział zmienności metabolizmu $58 \leq M \leq 290 \text{ W/m}^2$
- przepuszczalność odzieży dla powietrza $\rho = 8 \text{ l/(m}^2\text{s)}$
- prędkość przemieszczania się człowieka $v_w = 0,8 \text{ m/s}$
- prędkość wiatru $v_a = 2 \text{ m/s}$
- dla $t_a = t_r = 10$ °C: $8,3 \cdot 10^{-3} \leq R_{E,T}^{(minimal)} \leq 7,19 \cdot 10^{-2}$; $1,57 \cdot 10^{-2} \leq R_{E,T}^{(neutral)} \leq 8,17 \cdot 10^{-2}$
- dla $t_a = t_r = -35$ °C: $4 \cdot 10^{-2} \leq R_{E,T}^{(minimal)} \leq 2,16 \cdot 10^{-1}$; $4,5 \cdot 10^{-2} \leq R_{E,T}^{(neutral)} \leq 2,26 \cdot 10^{-1}$
- obliczenia wykonano dla obu wariantów, tj. *minimal* i *neutral*.

Względne straty ciepła powstałe z parowania potu: $E_{sk\,minimal}/M$ i $E_{sk\,neutral}/M$ w zależności od M dla $t_a = -35$ °C i $t_a = 10$ °C przedstawiono na rys. 4.

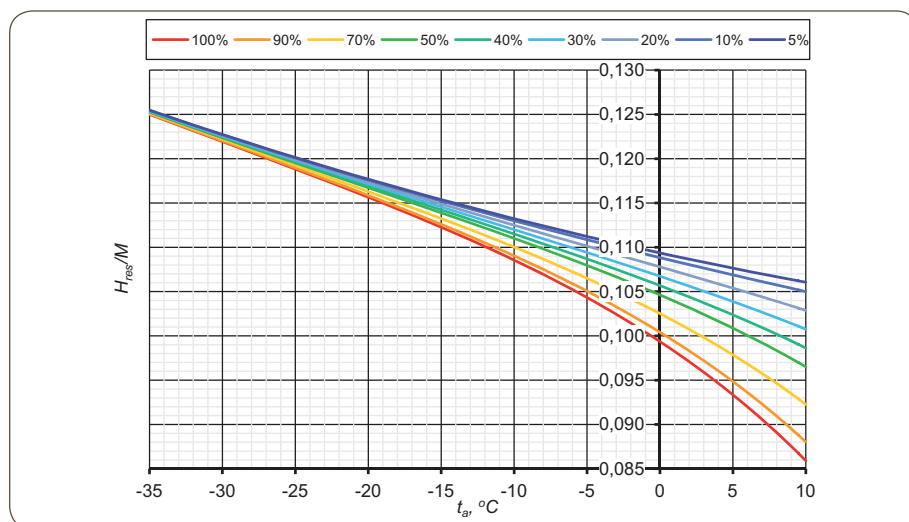
W wariancie dużego obciążenia odpowiadającego warunkowi *minimal*, względne straty ciepła praktycznie są stałe w całym zakresie zmienności metabolizmu $58 \leq M \leq 290 \text{ W/m}^2$, przy czym dla $t_a = 10$ °C wynoszą około 2% wartości M , a dla $t_a = -35$ °C około 5,5%. W przypadku małego obciążenia środowiskiem zimnym, dla warunku *neutral* zależą liniowo od wartości metabolizmu. Dla skrajnej wartości $M = 290 \text{ W/m}^2$ i $t_a = -35$ °C dochodzą do około 20% wartości M , a dla $t_a = 10$ °C do około 8% wartości M .

Należy zauważyć, że mimo zachowania warunków neutralnych w odczuciu doznawanych wrażeń cieplnych, przy stracie ciepła na poziomie 20% wartości M , osiągniętej kosztem pa-

rowania potu na granicy skóry i wewnętrznej warstwy odzieży, przy temperaturze otaczającego powietrza $t_a = -35$ °C i dopuszczanym maksymalnym metabolizmie $M = 290 \text{ W/m}^2$, istnieje ryzyko wsiąknięcia potu do odzieży, co istotnie obniży jej oporność cieplną. Z tego względu wybór odzieży o izolacyjności odpowiadającej $IREQ_{neutral}$ w warunkach ujemnych, szczególnie niskich temperatur otoczenia i dużego wysiłku może być niekorzystny. Lepszym rozwiązaniem, ze względu na małą zmienność oporności cieplnej odzieży w czasie eksploatacji w warunkach minimalnego pocenia, jest przyjęcie wymaganej izolacyjności o wartości pośredniej zawartej w przedziale $IREQ_{minimal} \div IREQ_{neutral}$. Ze zrozumiałych przyczyn należy unikać odzieży o izolacyjności cieplnej większej od $IREQ_{neutral}$.

H_{res} , czyli straty ciepła w środowisku zimnym wg PN-EN ISO 11079 powstające w wyniku oddychania (respiracji)

Straty ciepła ponoszone przez organizm w wyniku oddychania w środowisku zimnym spowodowane są różnicą występującą między temperaturą powietrza t_a wdychanego z zewnątrz i temperaturą powietrza wydychanego z płuc t_{sk} . Są to straty na skutek procesu unoszenia ciepła z dróg oddechowych, czyli konwekcji C_{res} . Intensywność wymiany ciepła zależy tu od objętości powietrza wentylującego układ oddechowy, tj. częstotliwości i głębokości oddechów, która zależy od wysiłku wynikającego z obciążenia organizmu. Odpowiedzią na występujące obciążenie jest zapotrzebowanie na wytwarzaną przez organizm energię na poziomie odpowiednim do wykonywanej pracy, łącznie z zaspokojeniem jego potrzeb dotyczących podstawowych funkcji życiowych.



Rys. 5. Względne straty ciepła H_{res}/M spowodowane oddychaniem w środowisku zimnym powietrzem o temperaturze t_a , °C i wilgotności względnej rh , %

Fig. 5. Relative warmth losses H_{res}/M caused by breathing in cold air in a cold environment at temperature t_a , °C, and relative humidity rh , %

Miarą tej całkowitej energii jest zmienny metabolizm M . Oprócz straty ciepła spowodowanej różnicą temperatur podczas oddychania, dokonuje się utrata ciepła wynikająca z różnicy prężności pary wodnej p_a znajdującej się w powietrzu otaczającym o temperaturze t_a i ciśnieniem pary wodnej w powietrzu wydychanym p_{ex} o temperaturze t_{ex} . Są to straty E_{res} powstające na skutek parowania z dróg oddechowych. Łączne straty ciepła na oddychanie H_{res} [4, 8] wynoszą

$$H_{res} = C_{res} + E_{res} \quad (6)$$

Z praktycznego punktu widzenia celowe jest oszacowanie, jaka część energii metabolicznej M tracona jest do otoczenia podczas oddychania. Odniesienie strat ciepła H_{res} do wartości metabolizmu M pozwala przedstawić stosunek w postaci funkcji dwóch parametrów, tj. t_a i rh (wilgotności względnej), uwalniając ją od związków z wartością metabolizmu M . Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 5. Obliczenia wykonano dla przedziałów temperatury powietrza $-35 \text{ °C} \leq t_a \leq 10 \text{ °C}$ i wilgotności względnej $5\% \leq rh \leq 100\%$ zakładając, że pokrywają one prawdopodobny zakres ich zmienności w zimnym środowisku pracy oraz na obszarze Polski w okresie zimowym.

Z rys. 5. wynika, że względne straty ciepła H_{res}/M rosną ze spadkiem temperatury t_a i wilgotności względnej rh . W miarę obniżania się temperatury t_a maleje wpływ wilgotności względnej rh na względne straty ciepła w wyniku oddychania. Z wykresu można odczytać, że w temperaturze $t_a = 10 \text{ °C}$ i przy pełnym nasyceniu parą wodną powietrza wdychanego ($rh = 100\%$) względne straty ciepła przez oddychanie stanowią 8,6% wartości M , zaś przy $rh = 5\%$ stanowią około 10,6% wartości M . W skrajnym rozpatrzonym tu przypadku, tj. w temperaturze $t_a = -35 \text{ °C}$, dochodzą

do 12,5% wartości M i praktycznie nie zależą od rh .

Straty ciepła przez odzież w wyniku konwekcji i radiacji C+R

Po uwzględnieniu w bilansie cieplnym straty ciepła na pracę W , oddychanie H_{res} i parowanie potu E_{sk} pozostaje strumień ciepła $C+R$ tracony z organizmu do otoczenia na skutek konwekcji i radiacji. Jeżeli straty ciepła z organizmu do otoczenia są zrównoważone metaboliczną produkcją ciepła, to $\Delta S = 0$, a równanie (1) można zapisać jako

$$C + R = M - W - H_{res} - E_{sk} \quad (7)$$

Do zachowania warunku równowagi cieplnej człowieka przebywającego w otoczeniu zimnym należy wobec tego zastosować odzież o izolacyjności cieplnej zdolnej utrzymać stałą różnicę między założoną średnią temperaturą powierzchni skóry t_{sk} i temperaturą t_a zewnętrznej powierzchni odzieży, przy zrównoważonym dopływie ciepła z organizmu równym $C+R$. Temperatura t_a osiągnięta jest na powierzchni odzieży graniczącej z otaczającym powietrzem o temperaturze t_a . Warunek ten spełnia odzież o wymaganej izolacyjności $IREQ$

$$IREQ = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{C + R} \quad (8)$$

Wartości temperatury skóry zależą od przyjętego wariantu obciążenia. Dla małego obciążenia fizjologicznego będzie to $t_{sk}^{neutral}$, a dla dużego $t_{sk}^{minimal}$, w obu przypadkach zależne od metabolizmu M (rys. 3.).

Podsumowanie

Wykazano, że straty ciepła z organizmu do otaczającego środowiska zimnego zależą od rozmiarów człowieka. Odzież dobrze dobrana do zaistniałych warunków powinna umożli-

wić takie straty ciepła z organizmu, by w sumie z pozostałymi stratami ciepła zrównoważył całą metaboliczną produkcję ciepła M wytwarzaną w organizmie. Część energii wytwarzanej przez organizm jest wykorzystywana na pracę mechaniczną. Wynikające stąd straty ciepła wynoszą od 0% (obciążenie statyczne) do 25% (obciążenie dynamiczne) wartości M . Względne straty ciepła w środowisku zimnym powstające wskutek parowania potu oszacowano na około 2%-5,5% wartości M dla warunku obciążenia *minimal* i 8%-20% dla warunku *neutral*, zaś względne straty ciepła w wyniku oddychania na od około 8,6% do 12,5% wartości M w zależności od temperatury i wilgotności powietrza otaczającego. Pozostałe straty ciepła z organizmu człowieka do środowiska zimnego zależą od oporności cieplnej użytej odzieży.

W 2. części artykułu Czytelnik znajdzie omówienie metody określania wartości izolacyjności cieplnej odzieży dostosowanej do danych warunków środowiskowych i wyjaśnienie występujących w literaturze kilku pojęć izolacyjności cieplnej odzieży rozróżnianych w zależności od warunków, dla jakich została ona określona, oraz komentarz do programu komputerowego przeznaczonego do obliczania wskaźnika $IREQ$. Ustosunkowano się także do interpretacji pojęcia „mikroklimat zimny” w rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej [1] oraz celowości określania niepewności wskaźnika $IREQ$.

PIŚMIENICTWO

- [1] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 16 grudnia 2011 r. Dz.U. nr 274 poz. 1621. Mikroklimat zimny
- [2] PN-EN 342 Odzież ochronna. Zestawy odzieży i wyroby odzieżowe chroniące przed zimnem
- [3] PN-EN 14058 Odzież ochronna. Wyroby odzieżowe chroniące przed chłodem
- [4] PN-EN ISO 11079 Ergonomia środowiska termicznego. Wyznaczenie i interpretacja stresu termicznego wynikającego z ekspozycji na środowisko zimne z uwzględnieniem wymaganej izolacyjności cieplnej odzieży $IREQ$ oraz wpływu wychłodzenia miejscowego
- [5] PN-EN ISO 9920 Ergonomia środowiska termicznego. Szacowanie izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieży
- [6] PN-EN ISO 15831 Odzież. Skutki fizjologiczne. Pomiar izolacyjności cieplnej za pomocą manekina termicznego
- [7] PN-EN ISO 7730 Ergonomia środowiska termicznego – Analityczne wyznaczenie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego
- [8] K. Parson *Human Thermal Environments*. Taylor & Francis, Second Edition 2003
- [9] PN-EN ISO 8996 (U) Ergonomia środowiska termicznego – Określenie tempa metabolizmu
- [10] *Atlas miar człowieka. Dane do projektowania i oceny ergonomicznej*. Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa 2001

Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.