CHEMIA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CHEMISTRY
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-Ch/2012
ZESZYT 17
ROK 109
ISSUE 17
YEAR 109

ALEKSANDRA CUL, TADEUSZ KOMOROWICZ, KRZYSZTOF KUPIEC*

WYMIANA CIEPŁA MIĘDZY CZŁOWIEKIEM A OTOCZENIEM W MIKROKLIMACIE ZIMNYM

HEAT TRANSFER BETWEEN MAN AND SURROUNDINGS IN COLD MICROCLIMATE

Streszczenie

Konieczność utrzymania stałej temperatury ciała narzuca człowiekowi warunki przebywania oraz ograniczenia czasu przebywania w mikroklimacie zarówno zimnym, jak i gorącym. Czynnikami mającymi wpływ na wymianę ciepła między człowiekiem a otoczeniem są: tempo metabolizmu, właściwości termoizolacyjne odzieży oraz parametry fizyczne otoczenia (temperatura, wilgotność i prędkość powietrza oraz temperatura promieniowania cieplnego). Niniejsza praca jest poświęcona warunkom i ograniczeniom dotyczącym przebywania człowieka w mikroklimacie zimnym. Wyniki odpowiednich obliczeń zaprezentowano w formie graficznej.

Słowa kluczowe: wymiana ciepła, mikroklimat zimny, wskaźnik termoizolacyjności odzieży (IREQ)

Abstract

The need to keep up a constant body temperature forces on man both the conditions of staying as well as limitations of staying time in cold and hot microclimate. The factors influencing the heat transfer between the man and the surroundings are: the metabolic rate, clothing thermal insulation properties and physical parameters of surroundings (air temperature, humidity and velocity as well as heat radiation temperature). This paper deals with conditions and limitations of staying for man in cold microclimate. Results of applicable calculations have been presented graphically.

Keywords: heat transfer, cold microclimate, clothing insulation factor (IREQ)

* Inż. Aleksandra Cul (studentka), dr inż. Tadeusz Komorowicz, dr hab. inż. Krzysztof Kupiec, prof. PK, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

A – pole powierzchni skóry człowieka
C – strumień lub gęstość strumienia ciepła przez konwekcję
D_{lim} – dopuszczalny czas ekspozycji w środowisku zimnym
h – wysokość człowieka
IREQ – wskaźnik termoizolacyjności odzieży
K – strumień lub gęstość strumienia ciepła przez przewodzenie
M – tempo przemiany metabolicznej
m – masa ciała człowieka
P – strumień lub gęstość strumienia ciepła przez parowanie potu
Q – strumień lub gęstość strumienia ciepła akumulowanego w organizmie
Q_{lim} – dopuszczalna wartość strat ciepła z organizmu człowieka na jednostkę powierzchni skóry
R – strumień lub gęstość strumienia ciepła przez promieniowanie
s – grubość warstwy odzieży
t_{cl} – temperatura zewnętrznej strony odzieży
t_{sk} – temperatura skóry człowieka
V – strumień lub gęstość strumienia ciepła przez oddychanie
η – współczynnik sprawności, tj. zamiany energii cieplnej na pracę
λ – współczynnik przewodnictwa cieplnego odzieży

1. Wstęp

Organizm człowieka można przyrównać do silnika, który jest napędzany paliwem w postaci białek, węglowodanów i tłuszczów. W wyniku procesów metabolizmu następuje spalanie tego paliwa, głównie do ditlenku węgla i wody, w wyniku czego wydziela się ciepło, które częściowo może być zamienione na pracę. Nadmiar ciepła w organizmie musi być rozproszony, czyli oddany do otoczenia, gdyż człowiek jest istotą stałocieplną.

Intensywność wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem jest zasadniczo funkcją trzech parametrów:
– tempa metabolizmu zależnego od aktywności człowieka związanej z wykonywaną pracą,
– właściwości termoizolacyjnych odzieży,
– mikroklimatu pomieszczenia lub niewielkiej obszarowo przestrzeni, w której przebywa człowiek.

Odzież jest ważnym czynnikiem pośredniczącym w wymianie ciepła między człowiekiem a otoczeniem. W omawianym przypadku odzież można rozpatrywać jako izolację pomiędzy źródłem ciepła – organizmem człowieka a odbiornikiem ciepła, czyli otoczeniem. Dodatkowym parametrem charakteryzującym odzież pod względem izolacyjności cieplnej jest przepuszczalność powietrza i pary wodnej.

Mikroklimat pomieszczenia lub niewielkiej obszarowo przestrzeni to zespół wszystkich parametrów fizycznych charakteryzujących otoczenie pod względem zdolności odbioru ciepła z organizmu człowieka. Tymi parametrami są: temperatura, wilgotność i prędkość powietrza oraz temperatura promieniowania cieplnego.

Praca i przebywanie w nieodpowiednim środowisku termicznym oraz źle dobrana pod względem izolacji termicznej odzież stwarzają dla organizmu człowieka poważne obciążenie z powodu trudności w zbilansowaniu ciepła wytworzonego przez organizm i wymienionego z otoczeniem.

Bilans cieplny organizmu człowieka przedstawia równanie [1]:

$$Q = M \cdot (1 - \eta) \pm P \pm V \pm K \pm C \pm R \tag{1}$$

Poszczególne człony tego równania można wyrażać jako strumienie ciepła w J/s, tj. W, lub jako gęstości strumieni w W/m^2 powierzchni skóry człowieka. Zazwyczaj wyraża się je w W/m^2.

Powierzchnię skóry człowieka można z kolei obliczyć z równania [2]:

$$A = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot h^{0,725} \quad m\,[\mathrm{kg}],\ h\,[\mathrm{m}] \tag{2}$$

W obliczeniach standardowych przyjmuje się tę wartość równą 1,8 m^2 dla mężczyzn i 1,6 m^2 dla kobiet [3].

Jak wynika z równania (1), ciepło produkowane w organizmie w wyniku przemian metabolicznych może być częściowo zamienione na pracę mechaniczną ($M \cdot \eta$) ze sprawnością η w granicach 17–25%, średnio 20% [1], a reszta, tzw. metabolizm kaloryczny ($M - M \cdot \eta$), musi być w sposób ciągły oddawana do otoczenia (znaki minus po prawej stronie równania), jeśli temperatura ciała ma być utrzymana na stałym poziomie. Najbardziej efektywnym mechanizmem oddawania ciepła przez organizm człowieka jest parowanie wydzielonego potu. Organizm może też przyjmować ciepło z otoczenia, jeśli siła napędowa działa w przeciwnym kierunku (znaki plus po prawej stronie równania).

Najbardziej odpowiedni mikroklimat dla człowieka to taki, w którym nie odczuwa on ani zimna ani gorąca, czyli ma poczucie komfortu cieplnego. Komfort cieplny człowiek odczuwa przy temperaturze wewnętrznej ciała równej 37±0,3°C, średniej temperaturze powierzchni skóry 33°C i wtedy, gdy ilość ciepła traconego przez parowanie potu nie przekracza 20% maksymalnej zdolności utraty ciepła tą drogą (maksymalnie 4 dm^3/8 h) [1].

W mikroklimacie gorącym i zimnym organizm ma trudności w utrzymaniu temperatury ciała na stałym poziomie, gdyż wtedy akumulacja ciepła może być odpowiednio dodatnia ($Q > 0$) lub ujemna ($Q < 0$). Aby w mikroklimacie gorącym strumień ciepła powstały w wyniku przemian metabolicznych został rozproszony w jak największym stopniu, ośrodek termoregulacji znajdujący się w mózgu człowieka powoduje rozszerzenie naczyń skórnych, wzrost skórnego przepływu krwi, zwiększenie przewodnictwa tkanek powierzchniowych i wydzielanie potu. W mikroklimacie zimnym z kolei włącza się drugi ośrodek termoregulacji zapobiegający obniżeniu temperatury ciała, który powoduje skurcz naczyń krwionośnych skóry, zmniejszenie skórnego przepływu krwi, zmniejszenie przewodnictwa tkanek powierzchniowych oraz wzrost napięcia mięśni i drżenie komórek mięśniowych powodujące wydzielanie ciepła.

Konieczność utrzymania stałej temperatury ciała narzuca więc człowiekowi zarówno warunki przebywania, jak i ograniczenia czasu przebywania zarówno w mikroklimacie zimnym, jak i gorącym. Niniejsza praca jest poświęcona warunkom i ograniczeniom dotyczącym przebywania człowieka w mikroklimacie zimnym.

Jak widać z przeprowadzonych wyżej rozważań, wymiana ciepła pomiędzy zarówno człowiekiem, jak i każdym organizmem żywym a otoczeniem podlega tym samym regułom, które występują w problemach technicznych, w tym w inżynierii procesowej. W pracy połączono zagadnienia związane z ergonomią z problematyką wymiany ciepła.

2. Określanie tempa metabolizmu

Metabolizm jest stałym i podstawowym źródłem ciepła dla organizmu. Istnieje tzw. metabolizm podstawowy, mierzony w środowisku termoneutralnym w stanie spoczynku, po śnie. Wynosi on standardowo 44 W/m^2 dla mężczyzn i 41 W/m^2 dla kobiet [3]. Podczas aktywności człowieka tempo metabolizmu wzrasta, gdyż praca mechaniczna może być wykonana tylko kosztem wytworzonej przez organizm energii cieplnej z uwzględnieniem współczynnika sprawności η. Sposób określania tempa metabolizmu, kluczowej wielkości w bilansie cieplnym organizmu człowieka, podaje norma [3]. Wyróżnia ona 4 poziomy określania, różniące się stopniem trudności i dokładnością. Im niższy poziom, tym prostsze metody, ale i mniejsza dokładność. Na poziomie pierwszym, tzw. sprawdzającym, norma [3] podaje dwie często stosowane metody: według rodzaju zawodu lub według rodzaju czynności.

Tabela 1 podaje przykładowe wartości tempa metabolizmu według rodzaju zawodu.

Tabela 1

Przykładowe wartości tempa metabolizmu

Zawód	Tempo metabolizmu [W/m^2]
Sprzedawca	100–120
Nauczyciel	85–100
Laborant	85–100
Kierowca autobusu	75–125
Mechanik precyzyjny	70–110
Kowal	90–200
Murarz	110–160
Pracownik odlewni	140–240
Hutnik	170–220

Jeśli chodzi o rodzaj wykonywanych czynności, to norma [3] dzieli tempo metabolizmu na małe (100 W/m^2), umiarkowane (165 W/m^2), duże (230 W/m^2) i bardzo duże (290 W/m^2), przypisując do każdego tempa określone czynności. Poziom drugi, tzw. obserwacyjny, jest podobny do poziomu pierwszego, lecz dokładniejszy, gdyż w zależności od podawanej w nim metody bazuje na rodzaju oraz chronometrażu wykonywanych czynności. Poziom trzeci, tzw. analityczny, jest stosunkowo dokładny (±10%), ponieważ jego podstawą jest pomiar częstości skurczów serca w określonych warunkach. Poziom czwarty, tzw. ekspercki, jest teoretycznie najdokładniejszy (±5%), gdyż bazuje na po-

miarze zużycia tlenu przez człowieka przy znanym przeliczniku ilości wytworzonego ciepła (1 dm^3 zużytego tlenu odpowiada 20 448 J wytworzonego ciepła [3]). Jest jednak bardzo trudny w realizacji.

Posługując się normą [3], można więc określić tempo metabolizmu człowieka praktycznie z dokładnością rzędu 10%.

3. Charakterystyka mikroklimatu zimnego

W mikroklimacie zimnym pracuje znaczna liczba pracowników. Są to pracownicy chłodni, zamrażalni, laboratoriów niskich temperatur oraz ci, którzy w zimie wykonują prace na zewnątrz pomieszczeń (pracownicy budownictwa, leśnictwa itp.). W mikroklimacie zimnym tempo strat cieplnych organizmu człowieka może przewyższyć tempo metabolizmu kalorycznego. Średnie ciepło właściwe ciała człowieka wynosi 3,49 kJ/(kg·K) [2]. Wynika stąd, że spadek temperatury ciała człowieka o standardowej masie 70 kg o 1 K wiąże się ze stratą 244 kJ ciepła. Spadek temperatury ciała człowieka o 0,5 K powoduje wyczuwalny, ale akceptowalny dyskomfort [2]. Spadek temperatury organizmu poniżej 35°C może uszkodzić mechanizm termoregulacyjny, a poniżej 28°C spowodować śmierć. W mikroklimacie zimnym temperatura organizmu nie powinna być niższa od 36°C.

Zgodnie z rozporządzeniem [4] podstawowym kryterium klasyfikacji środowiska termicznego do obszaru mikroklimatu zimnego jest wartość wskaźnika PMV (przewidywana ocena średnia). Wskaźnik ten określa przewidywane odczucia cieplne osób w danym otoczeniu. Wartość tego wskaźnika wynosząca –2 lub mniej jest charakterystyczna dla mikroklimatu zimnego. W celu zapobieżenia hipotermii, tj. ochłodzeniu całego ciała, stosuje się odzież ciepłochronną, która zabezpiecza organizm przed nadmiernymi stratami ciepła. Wartość dopuszczalnych strat cieplnych organizmu człowieka przyjmuje się w wysokości 144 kJ/m^2 [5]. Odpowiada to obniżeniu temperatury ciała o 1°C w przeliczeniu na średnią powierzchnię skóry równą 1,7 m^2.

O stopniu przydatności odzieży do prac w konkretnych warunkach środowiska zimnego informuje wymieniony w rozporządzeniu [4] wskaźnik IREQ (skrót ten pochodzi od terminu Insulation Required lub Required Clothing Insulation), tj. wskaźnik termoizolacyjności odzieży. Podawany jest w jednostkach oporu cieplnego odzieży – clo, przy przeliczniku: 1 clo = 0,155 m^2·K/W. Wskaźnik ten zależy zasadniczo od tempa metabolizmu człowieka i parametrów fizycznych otoczenia.

W dalszej części pracy wyznaczono:

- konieczny wskaźnik termoizolacyjności odzieży,
- dopuszczalny czas ekspozycji człowieka w mikroklimacie zimnym dla różnych wartości wskaźnika termoizolacyjności odzieży,

w funkcji

- tempa metabolizmu człowieka,
- temperatury operacyjnej (średniej ważonej, według wagi: współczynnika wnikania ciepła dla konwekcji i zastępczego współczynnika wnikania ciepła dla promieniowania, odpowiednio z temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania),
- prędkości przepływu powietrza.

4. Wyznaczenie wskaźnika termoizolacyjności odzieży

W warunkach mikroklimatu zimnego odzież ma za zadanie zapewnić równowagę cieplną między człowiekiem a otoczeniem poprzez odpowiednie ograniczanie utraty ciepła przez konwekcję i promieniowanie w zależności od tempa metabolizmu człowieka i parametrów otoczenia. Ciepło tracone tymi drogami musi najpierw być przewodzone przez odzież, co można wyrazić równaniem Fouriera dla warstwy płaskiej:

$$R + C = \frac{\lambda}{s}\left(t_{sk} - t_{cl}\right) \tag{3}$$

Wiedząc, że człon $\frac{s}{\lambda}$ to opór cieplny odzieży, równanie (3) można przekształcić do postaci:

$$\mathrm{IREQ} = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{R + C} \tag{4}$$

Sposób obliczania wskaźnika IREQ określa norma [5]. Wprowadza ona dwa jego rodzaje:
- $\mathrm{IREQ}_{\mathrm{neutral}}$ – przy którym ciało utrzymuje równowagę termiczną przy długich ekspozycjach i tym samym człowiek odczuwa komfort cieplny,
- $\mathrm{IREQ}_{\mathrm{min}}$ – przy którym równowaga termiczna jest utrzymywana przy dodatkowym skurczu naczyń krwionośnych skóry i kończyn i tym samym człowiek już odczuwa zimno.

Temperaturę skóry człowieka w pierwszym i w drugim przypadku można obliczyć odpowiednio z wzorów [5]:

$$t_{sk} = 35,7 - 0,0285 \cdot M \tag{5}$$

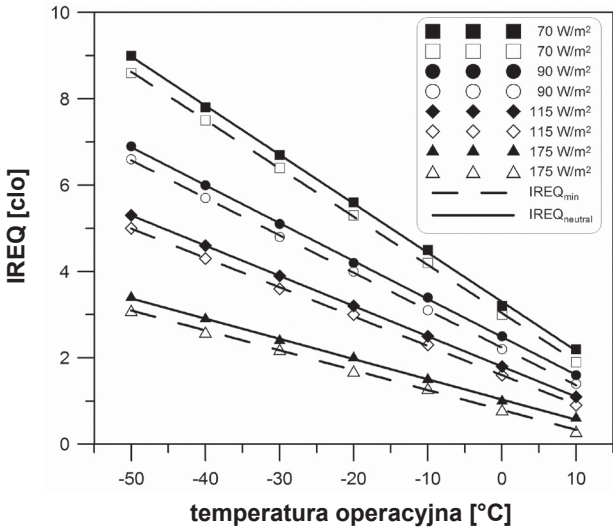
$$t_{sk} = 33,34 - 0,0354 \cdot M \tag{6}$$

W niniejszej pracy obliczano zarówno wskaźnik $\mathrm{IREQ}_{\mathrm{neutral}}$ zapewniający komfort cieplny, jak i $\mathrm{IREQ}_{\mathrm{min}}$. Obliczeń dokonano za pomocą najnowszej wersji programu Java for ISO 11079 [6], do którego odsyła norma [5]. Obliczenia przeprowadzono dla następujących wartości parametrów:
- tempo metabolizmu od 70 do 260 W/m^2;
- prędkość przepływu powietrza od 0,4 do 15 m/s;
- temperatura operacyjna od –50 do +10°C;
- wilgotność względna powietrza równa 85%;
- przenikalność powietrzna odzieży wynosząca 8 dm^3/(m^2·s);
- prędkość poruszania się człowieka równa 0 m/s;
- cykl pracy trwający 1 godzinę, przy stosunku czas pracy/czas odpoczynku równym 45/15 min.

Zakresy zmienności przyjmowanych w obliczeniach parametrów są zgodne z normą [5].

W wyniku obliczeń wyznaczono zależność wskaźników $IREQ_{neutral}$ i $IREQ_{min}$ od temperatury operacyjnej dla różnych poziomów tempa metabolizmu i stałej prędkości przepływu powietrza.

Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono graficznie na rys. 1. Podaje on porównanie zależności wskaźników $IREQ_{neutral}$ i $IREQ_{min}$ od temperatury operacyjnej dla czterech poziomów tempa metabolizmu przy stałej wartości prędkości przepływu powietrza.



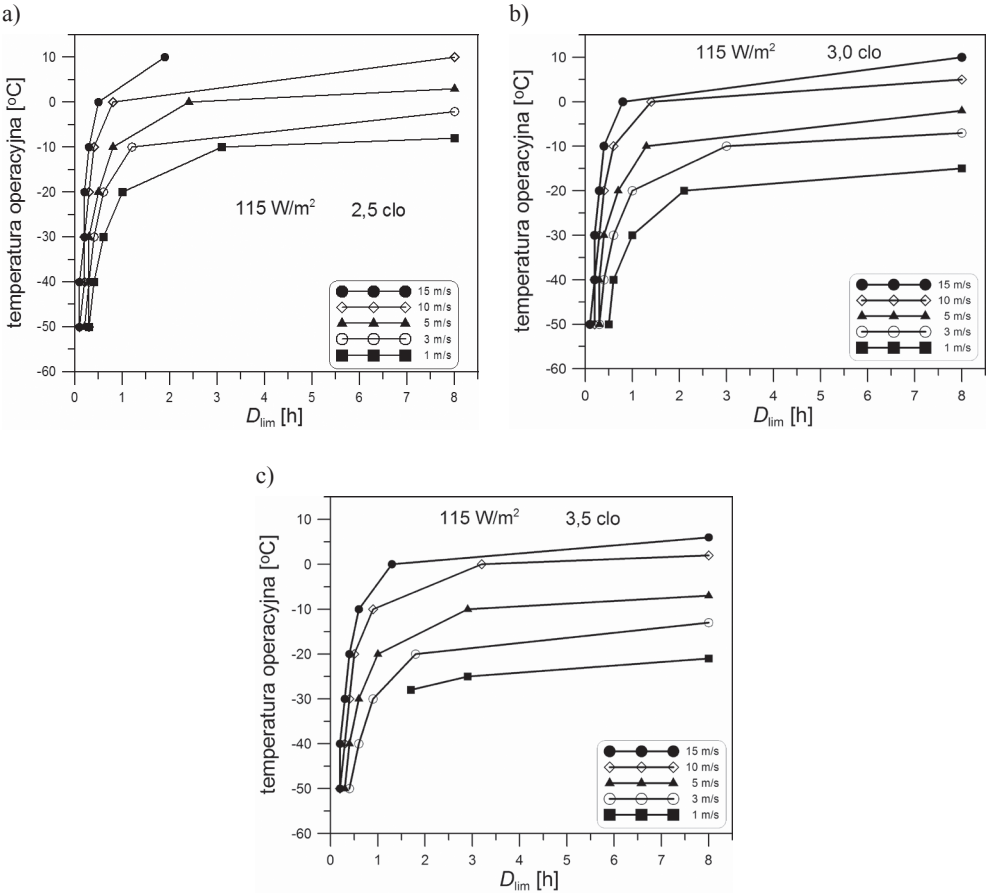
Rys. 1. Porównanie wskaźników $IREQ_{neutral}$ i $IREQ_{min}$ w funkcji temperatury operacyjnej dla czterech poziomów tempa metabolizmu przy stałej wartości prędkości przepływu powietrza równej 0,4 m/s

Fig. 1. Comparison of $IREQ_{neutral}$ and $IREQ_{min}$ factors at four levels of metabolic rate and at a constant air velocity value of 0,4 m/s

5. Wyznaczenie dopuszczalnego czasu ekspozycji

Podczas pracy w środowisku zimnym pracownik powinien nosić odzież o odpowiednim wskaźniku termoizolacyjności $IREQ_{neutral}$ obliczonym dla swego tempa metabolizmu i parametrów cieplnych otoczenia. Może wtedy zasadniczo pracować przez całą zmianę roboczą. W przypadku posiadania odzieży o wskaźniku mniejszym od wymaganego jego czas ekspozycji musi ulec skróceniu, aby nie dopuścić do zbytniego wychłodzenia organizmu. Dopuszczalny czas ekspozycji oblicza się z zależności [5]:

$$D_{\lim} = \frac{Q_{\lim}}{Q} \tag{7}$$



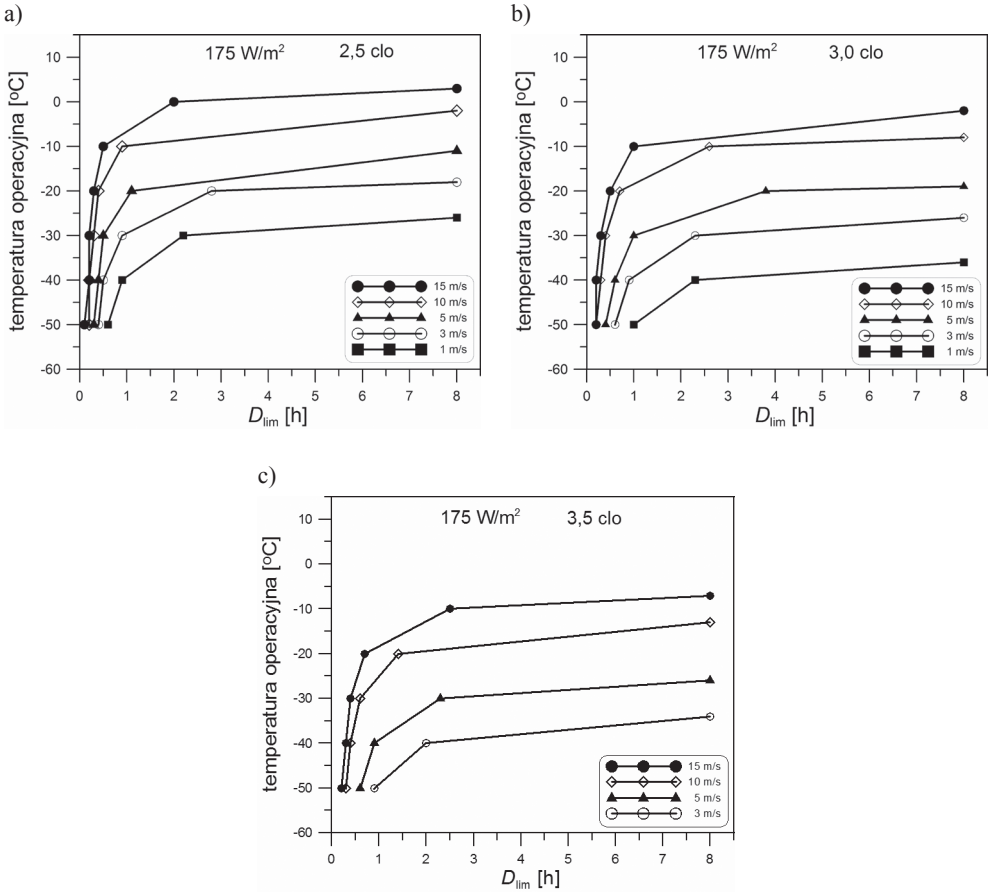
Rys. 2. Zależność czasu ekspozycji w mikroklimacie zimnym od temperatury operacyjnej dla zmiennych wartości prędkości przepływu powietrza (1–15 m/s), stałej wartości tempa metabolizmu równej 115 W/m² i przy trzech wartościach wskaźnika IREQ: a) 2,5 clo, b) 3,0 clo, c) 3,5 clo

Fig. 2. Duration limited exposure in cold microclimate in function of operative temperature for various air velocity values (1–15 m/s) at a constant metabolic rate of 115W/m² for three IREQ values: a) 2,5 clo, b) 3,0 clo, c) 3,5 clo

Obliczenia dopuszczalnego czasu ekspozycji zostały przeprowadzone również za pomocą programu Java for ISO 11079 [6] dla zakresu parametrów przyjętych w poprzednim rozdziale. Dodatkowo przyjęto zakres zmian wskaźnika termoizolacyjności odzieży od 0,5 do 3,5 clo co 0,5 clo.

W wyniku obliczeń wyznaczono zależność dopuszczalnego czasu ekspozycji w mikroklimacie zimnym w funkcji temperatury operacyjnej dla różnych wartości:

– prędkości przepływu powietrza,
– tempa metabolizmu,
– wskaźnika IREQ ($IREQ_{neutral}$).



Rys. 3. Zależność czasu ekspozycji w mikroklimacie zimnym od temperatury operacyjnej dla zmiennych wartości prędkości przepływu powietrza (1–15 m/s), stałej wartości tempa metabolizmu równej 175 W/m^2 i przy trzech wartościach wskaźnika IREQ: a) 2,5 clo, b) 3,0 clo, c) 3,5 clo

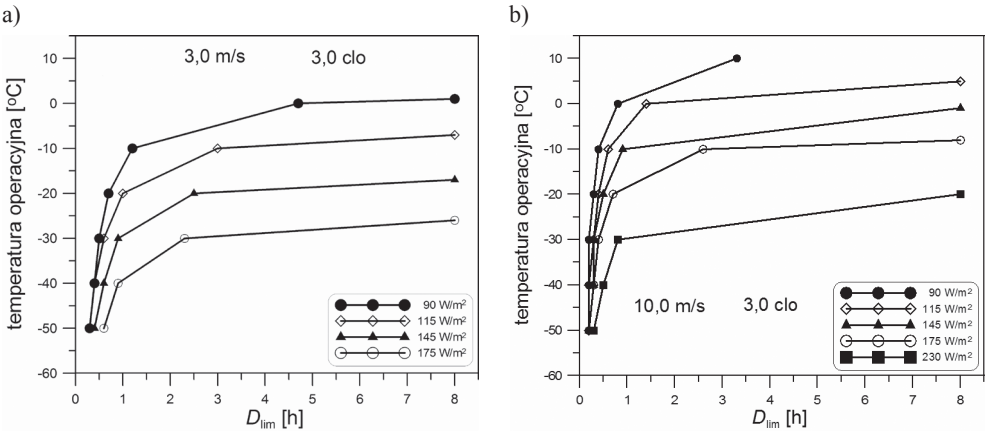
Fig. 3. Duration limited exposure in cold microclimate in function of operative temperature for various air velocity values (1–15 m/s) at a constant metabolic rate of 175W/m^2 for three IREQ values: a) 2,5 clo, b) 3,0 clo, c) 3,5 clo

Wyniki obliczeń przedstawiono graficznie. Zamieszczone tu przykładowe wykresy ilustrują zależność dopuszczalnego czasu ekspozycji w mikroklimacie zimnym od temperatury operacyjnej dla:

– zmiennych prędkości przepływu powietrza przy różnych wartościach wskaźnika IREQ i dla stałych wartości tempa metabolizmu (rys. 2 i 3 – rysunki te nie mają swego odpowiednika w normie [5]),
– zmiennych wartości tempa metabolizmu przy różnych wartościach prędkości przepływu powietrza i stałej wartości wskaźnika IREQ (rys. 4),
– zmiennych wartości wskaźnika IREQ przy różnych wartościach prędkości przepływu powietrza i stałej wartości tempa metabolizmu (rys. 5).

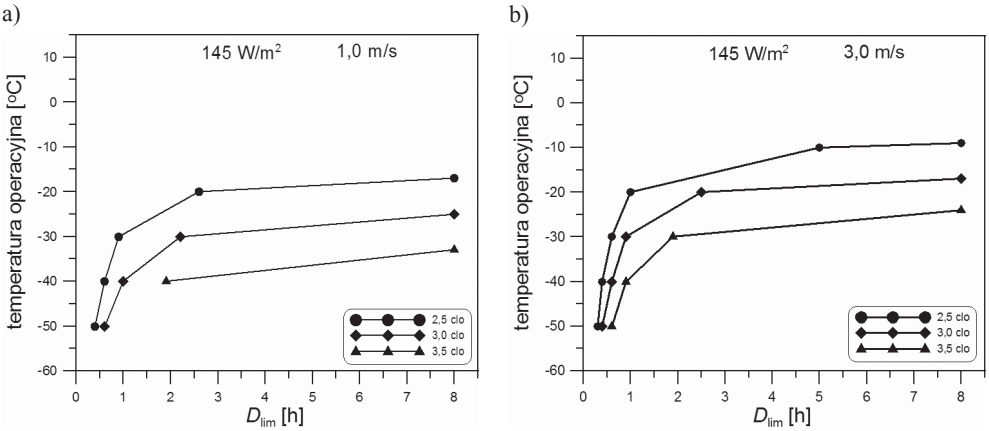
W celu przeprowadzenia porównań przy konstrukcji wykresów zachowano układ osi taki sam jak dla wykresów zamieszczonych w normie [5].

Na rysunku 3 zamieszczono dla porównania podobny zestaw wykresów dla wartości tempa metabolizmu równej 175 W/m^2.



Rys. 4. Zależność dopuszczalnego czasu ekspozycji w mikroklimacie zimnym od temperatury operacyjnej dla zmiennych wartości tempa metabolizmu (90–230 W/m^2), stałej wartości wskaźnika IREQ równej 175 W/m^2 i przy dwóch różnych wartościach prędkości przepływu powietrza: a) 3,0 m/s, b) 10,0 m/s

Fig. 4. Duration limited exposure in cold microclimate in function of operative temperature for various metabolic rates values (90–230 W/m^2) at a constant IREQ value of 175W/m^2 for two air velocity values: a) 3,0 m/s, b) 10,0 m/s



Rys. 5. Zależność czasu ekspozycji w mikroklimacie zimnym od temperatury operacyjnej dla zmiennych wartości wskaźnika IREQ (2,5–3,5 clo), stałej wartości tempa metabolizmu 145 W/m^2 i przy dwóch różnych wartościach prędkości przepływu powietrza: a) 1 m/s, b) 3,0 m/s

Fig. 5. Duration limited exposure in cold microclimate in function of operative temperature for various IREQ values (2,5–3,5 clo) at a constant metabolic rate of 145W/m^2 for two air velocity values: a) 1 m/s, b) 3,0 m/s

Obliczone w niniejszej pracy wartości dopuszczalnego czasu ekspozycji różnią się od podawanych w normie [6]. Różnice te przekładają się na wartość wskaźnika termoizolacyjności odzieży średnio 0,5 clo.

6. Analiza wyników i wnioski

Program [6] pozwala na dobór odzieży o odpowiednim wskaźniku IREQ do pracy w mikroklimacie zimnym. Gdy zastosowana odzież ma niedostateczny wskaźnik termoizolacyjności, konieczne jest wyznaczenie dopuszczalnego czasu ekspozycji. Przedstawione wyniki obliczeń pozwalają na sformułowanie następujących wniosków.

1. Wartości wskaźnika IREQ, zarówno $IREQ_{neutral}$, jak i $IREQ_{min}$, maleją proporcjonalnie do wzrostu temperatury operacyjnej oraz tempa metabolizmu (rys. 1). Jednocześnie widać, że bezwzględne wartości współczynników kierunkowych zamieszczonych na rys. 1 prostych maleją wraz ze wzrostem tempa metabolizmu. Wynika stąd, że im wyższe tempo metabolizmu, tym słabszy jest wpływ temperatury operacyjnej na wymienione wskaźniki;
2. Wartości wskaźnika $IREQ_{min}$ obliczone za pomocą najnowszej wersji programu [6] są wyższe o ok. 7% od wartości podanych w normie [5], podczas gdy wskaźniki $IREQ_{neutral}$ są bardzo zbliżone (różnica mniejsza niż 1%);
3. Maksymalny czas ekspozycji w mikroklimacie zimnym zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości przepływu powietrza przy stałych wartościach tempa metabolizmu i wskaźnika IREQ (rys. 2, 3). Im wyższa wartość tempa metabolizmu, tym ten czas dłuższy dla stałych wartości wskaźnika IREQ i stałych wartości prędkości przepływu powietrza (rys. 2–4);
4. Maksymalny czas ekspozycji wydłuża się również wraz ze wzrostem wartości wskaźnika IREQ przy innych ustalonych parametrach.

Program [6], przy odpowiednim doborze parametrów, może być wykorzystywany do zagadnień obliczeniowych z zakresu wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem w warunkach polarnych. Tego typu tematyka leży w sferze zainteresowań klimatologów [7]. Można go również adaptować do zastosowań typowo technicznych, np. dla izolowanych reaktorów, w których zachodzi egzotermiczna przemiana chemiczna.

Literatura

[1] Fanger P.O., *Komfort cieplny*, Arkady, Warszawa 1974.
[2] Cengel Y.A., *Heat and Mass Transfer*, Mc Graw-Hill, New York 2007.
[3] PN-EN ISO 8995:2005 Ergonomia środowiska termicznego. Określanie tempa metabolizmu.
[4] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U. z 2002 r. Nr 217, poz. 1833 ze zmianami Dz.U. z 2009 r. Nr 1056, poz. 873 i z 2011 r. Nr 274, poz. 1621.

[5] PN EN ISO 11079:2008 Ergonomia środowiska termicznego. Wyznaczanie i interpretacja stresu termicznego wynikającego z ekspozycji na środowisko zimne z uwzględnieniem wymaganej izolacyjności cieplnej odzieży (IREQ) oraz wpływu wychłodzenia miejscowego.

[6] Program Java for ISO 11079 (http://wwwold.eat.lth.se/Forskning/Termisk/Termisk_HP/Klimatfiler/IREQ2002alfa.htm).

[7] Sikora S., Dubicka M., Migała K., *Bilans cieplny organizmu człowieka w warunkach polarnych na przykładzie SW Spitsbergenu*, XV Ogólnopolskie Seminarium Meteorologii i Klimatologii Polarnej, Gdańsk, 6–7.05.2005 (http://www.geokmk.strony.ug.edu.pl/sempolar/streszczenia/sikora1.pdf).