

## OCENA WSKAŹNIKÓW KOMFORTU CIEPLNEGO LUDZI W POMIESZCZENIACH

Anna LIS\*

\* Politechnika Częstochowska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli  
ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa, e-mail: [annalis29@wp.pl](mailto:annalis29@wp.pl)

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki analizy wybranych wskaźników komfortu cieplnego ludzi w pomieszczeniach. Rozpatrywanymi wskaźnikami są: temperatura ekwiwalentna, temperatura operatywna, temperatura komfortu, przewidywana średnia ocena komfortu cieplnego oraz przewidywany procent osób odczuwających brak komfortu. Pomiary analizowanych wskaźników dokonano przy użyciu miernika komfortu cieplnego firmy Brüel & Kjaer. Dokonano także pomiarów elementów mikroklimatu: temperatury, wilgotności względnej oraz prędkości przepływu powietrza. Prześladowano wpływ zmian warunków mikroklimatu pomieszczeń na odczucia cieplne ludzi. Dokonano oceny analizowanych wskaźników komfortu cieplnego.

**Słowa kluczowe:** fizyka budowli, komfort cieplny ludzi, mikroklimat pomieszczeń.

### 1. WPROWADZENIE

Komfort cieplny człowieka to stan zadowolenia z warunków cieplnych środowiska, które go otacza. Organizm człowieka powinien znajdować się w stanie równowagi termicznej, czyli równowagi pomiędzy ilością ciepła wytwarzanego w trakcie procesów metabolicznych, a ilością ciepła oddawanego do otoczenia na drodze konwekcji, promieniowania i przewodzenia. Człowiek przebywając w danym środowisku powinien znajdować się w stanie obojętnego odczuwania warunków cieplnych otoczenia. Jednak z powodu różnic osobniczych nie jest możliwe wytworzenie takich warunków mikroklimatu, które byłyby w pełni akceptowane przez wszystkich przebywających w nich ludzi. Każdy człowiek ma, bowiem subiektywne wrażenie odczuć cieplnych. Duża, rzeczywista liczba czynników wpływających na samopoczucie w znacznej mierze utrudnia ściśle ustalenie warunków komfortu. Dotychczas zaproponowano kilkanaście wskaźników pozwalających w pewien sposób określić środowisko cieplne człowieka. Najbardziej rozpowszechnionym miernikiem komfortu cieplnego, odczuwanego przez daną osobę,

jest jej własna ocena. Zależy ona od zewnętrznych warunków fizycznych, wewnętrznych procesów fizjologicznych oraz od uwarunkowań psychologicznych. Obecnie przy ocenie odczuć cieplnych stosuje się powszechnie dwie siedmiostopniowe skale komfortu cieplnego wg ASHRAE i wg Bedforda [2, 3]. Ilustruje je tabela 1.

Tabela 1. Skale komfortu cieplnego.  
Table 1. The thermal comfort scales.

	skala ASHRAE	skala Bedforda	PMV	
1	zimno (cold)	za zimno (much too cool)	zimno (cold)	-3
2	chłodno (cool)	za chłodno (too cool)	chłodno (cool)	-2
3	lekko chłodno (slightly cool)	przyjemnie chłodno (comfortable cool)	dość chłodno (slightly cool)	-1
4	ani ciepło ani zimno (neutral)	przyjemnie (comfortable)	obojętnie (neutral)	0
5	lekko ciepło (slightly warm)	przyjemnie cie- pło (comfortable warm)	dość cie- pło (slightly warm)	+1
6	ciepło (warm)	za ciepło (too warm)	ciepło (warm)	+2
7	gorąco (hot)	za gorąco (much too warm)	gorąco (hot)	+3

Z równaniem komfortu Fangera powiązany jest wskaźnik PMV, czyli przewidywana średnia ocena komfortu cieplnego oraz PPD, czyli przewidywana liczba osób niezadowolonych z istniejących warunków. Wskaźnik PMV (tabela 1) [1] jest funkcją aktywności fizycznej człowieka, izolacyjności cieplnej odzieży, temperatury, wilgotności i prędkości ruchu powietrza oraz średniej temperatury promieniowania otoczenia.

Innym wskaźnikiem używanym często w krajach skandynawskich [2, 3] jest temperatura operatywna określana jako jednolita temperatura czarnej kabiny, w której człowiek przez promieniowanie i konwekcję wymienia taką samą ilość ciepła jak w niejednorodnym środowisku termicznym. Wskaźnik ten ujmuje łączne oddziaływanie na człowieka temperatury powietrza oraz średniej temperatury promieniowania otoczenia.

Temperatura ekwiwalentna jest jednolitą temperaturą czarnej kabiny przy zerowej prędkości przepływu powietrza, w której człowiek wykazuje takie same straty ciepła jak w niejednorodnym środowisku termicznym. Do wyznaczenia tego wskaźnika należy określić temperaturę powietrza, średnią temperaturę promieniowania otoczenia oraz prędkość przepływu powietrza [1].

Temperatura efektywna opracowana przez Yaglou to wskaźnik określający temperaturę powietrza o wilgotności 50 %, w którym człowiek, wymienia taką samą całkowitą ilość ciepła, jaką wymienia w rzeczywistych warunkach. Temperatura efektywna określana na podstawie temperatury operatywnej uwzględnia temperaturę, wilgotność i prędkość przepływu powietrza oraz wprowadzoną później średnią temperaturę promieniowania otoczenia. Wskaźnik ten został zastąpiony standardową temperaturą efektywną definiowaną jako odpowiednik temperatury powietrza w izotermicznym środowisku o wilgotności względnej równej 50 %, w którym człowiek ubrany w odzież odpowiadającą jego aktywności, ma takie samo obciążenie termiczne oraz termoregulacyjne jak w środowisko rzeczywistym.

Innym wskaźnikiem sprecyzowanym przez Fangera jest temperatura komfortu uwzględniająca temperaturę ciała człowieka, strumień ciepła oddawany przez ciało, współczynnik przenikania ciepła przez skórę oraz współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni skóry, a także izolacyjność cieplną odzieży.

Temperatura wynikowa wprowadzona przez Missenard'a to temperatura termometru kulistego o wymiarach czaszy, odpowiednich do odwzorowania zachowania organizmu człowieka w zakresie wymiany ciepła przez promieniowanie i konwekcję [2, 3].

Wskaźnikiem zaproponowanym przez McIntyre'a jest temperatura subiektywna. Wskaźnik ten to temperatura jednorodnego otoczenia o temperaturze równej temperaturze promieniowania otoczenia, prędkości ruchu powietrza równej 0,1 m/s i wilgotności względnej równej 50 %,

które powodowałyby takie samo odczucie ciepła, jak dane środowisko niejednorodne [2, 3].

Każdy z zaprezentowanych tutaj wskaźników komfortu cieplnego w głównej mierze odzwierciedla obszar zainteresowań swoich twórców odnośnie jego badań nad wpływem mikrośrodowiska na odczucia cieplne ludzi. Pomijanie części zmiennych fizycznych charakteryzujących środowisko i człowieka w niektórych przedstawionych wskaźnikach nasuwa wątpliwości, co do reprezentatywności wyników i ich powszechnego stosowania. Lepszym rozwiązaniem wydaje się być uwzględnienie możliwie jak największej ilości elementów charakteryzujących środowisko i człowieka jednocześnie jak ma to np. miejsce w równaniu komfortu Fangera.

## 2. WYNIKI BADAŃ

Analizę i ocenę komfortu cieplnego osób przebywających w pomieszczeniach przeprowadzono w kilku budynkach mieszkalnych poddanych termomodernizacji. Badania wykonano w sezonie grzewczym, równoległe z przeprowadzonym monitoringiem efektów działań termomodernizacyjnych.

### 2.1. Mikroklimat wewnątrz

Czynniki wpływające na odczucia cieplne ludzi można podzielić na elementy charakteryzujące środowisko termiczne oraz elementy charakteryzujące człowieka [2, 3]. W pierwszym rzędzie wykonano pomiary podstawowych elementów termicznych mikroklimatu: temperatury ( $t_a$ ), wilgotności względnej ( $\varphi_a$ ) i prędkości przepływu powietrza ( $v_a$ ) oraz temperatury promieniowania otoczenia ( $t_{ra}$ ). W tabeli 2 zamieszczono wyniki pomiarów elementów mikroklimatu wewnątrz.

Tabela 2. Parametry mikroklimatu.  
Table 2. The microclimate factors.

Parametry mikroklimatu	$t_a$	$t_{ra}$	$\varphi_a$	$v_a$
	°C		-	m/s
Średnia arytmetyczna	20,3	21,7	48	-
Średnia harmoniczna	-	-	-	0,09
Odchylenie standardowe	1,4	1,9	10	0,05

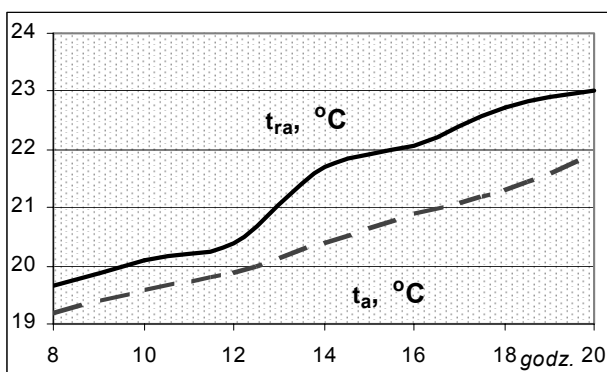
Termiczne elementy mikroklimatu wpływające na odczucia cieplne ludzi w pomieszczeniach są czynnikami charakteryzującymi dane środowisko. Wrażenia cieplne zależą także od czynników osobowych właściwych dla poszczególnych osób. Czynniki te są izolacyjność cieplna noszonej odzieży ( $I_{cl}$ ) oraz aktywność fizyczna osób ( $M$ ) związana z produkcją energii metabolicznej. W tabeli 3 zawarto wyznaczone wartości izolacyjności cieplnej odzieży osób dorosłych i dzieci przebywających w pomieszczeniach oraz poziom ich aktywności fizycznej.

Tabela 3. Czynniki osobowe.  
Table 3. The human factors.

Czynniki osobowe	Dorośli		Dzieci	
	$I_{cl}$	$M$	$I_{cl}$	$M$
	clo	met	clo	met
Średnia arytmetyczna	0,83	1,1	0,69	2,3
Odchylenie standardowe	0,07	0,3	0,11	0,5

Izolacyjność cieplna odzieży noszonej przez dzieci w stosunku do osób dorosłych utrzymywała się wyraźnie na niższym poziomie, natomiast aktywność fizyczna dzieci była znacznie intensywniejsza.

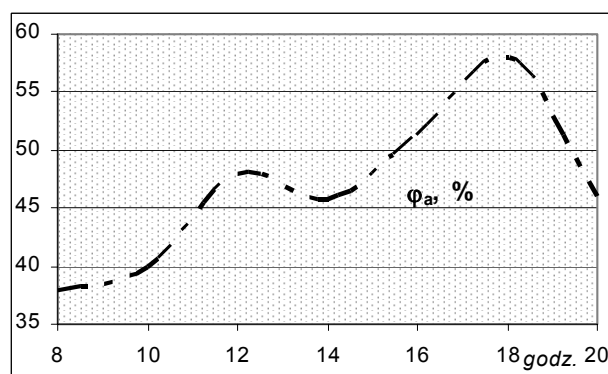
Prześledzono również zmiany wartości elementów mikroklimatu w czasie. Na rys. 1 przedstawiono przebieg wartości temperatury powietrza  $t_a$  oraz temperatury promieniowania otoczenia  $t_{ra}$  w ciągu dnia.



Rys. 1. Przebieg zmian wartości temperatury powietrza  $t_a$  oraz temperatury promieniowania otoczenia  $t_{ra}$  w ciągu dnia.  
Fig. 1. The fluctuations of  $t_a$  and  $t_{ra}$  by day.

Niższa wartość temperatury powietrza w pomieszczeniach w godzinach porannych wiązała się w głównej mierze z jej celowym zmniejszaniem na okres nocny i w godzinach dopołudniowych.

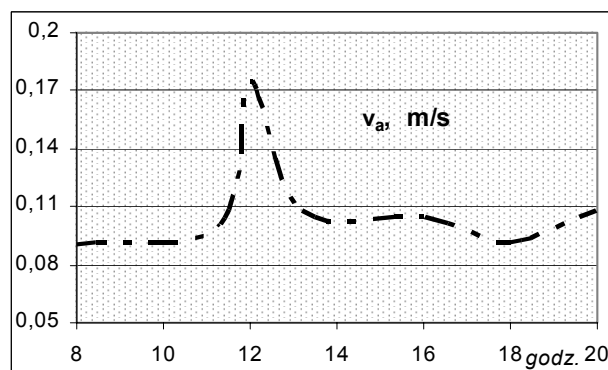
Pomieszczenia w budynkach mieszkalnych w zależności od przeznaczenia różnią się zwykle w sezonie grzewczym dobowym przebiegiem wilgotności powietrza. Większe wahania wilgotności obserwuje się w kuchniach i sypialniach. Rys. 2 ilustruje przebieg zmian wilgotności względnej powietrza  $\phi_a$  w ciągu dnia w pokoju dziennym.



Rys. 2. Przebieg zmian wartości wilgotności względnej powietrza  $\phi_a$  w ciągu dnia w pokoju dziennym.  
Fig. 2. The fluctuations of  $\phi_a$  by day.

W ciągu dnia wilgotność względna powietrza wykazywała wahania w granicach 10-15%. Temperatura i wilgotność względna powietrza ulegają zwykle w ciągu dnia licznym krótkotrwałym wahaniom związanym z czynnościami eksploatacyjnymi.

W typowych polskich mieszkaniach z wentylacją grawitacyjną mamy do czynienia z niewielką i w miarę stałą prędkością ruchu powietrza w ciągu dnia. Na rys. 3 zaprezentowano zmiany prędkości przepływu powietrza  $v_a$  w pomieszczeniach w ciągu dnia.



Rys. 3. Przebieg zmian prędkości przepływu powietrza  $v_a$  w pomieszczeniach w ciągu dnia.  
Fig. 3. The fluctuations of  $v_a$  by day.

## 2.2. Komfort cieplny ludzi

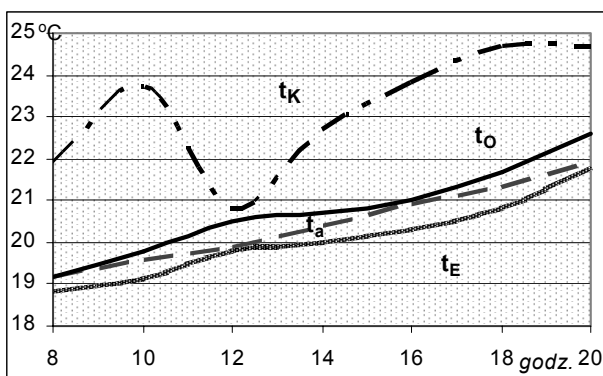
Ocenę komfortu cieplnego osób przebywających w pomieszczeniach przeprowadzono na podstawie pomiarów następujących wskaźników komfortu: temperatury ekwiwalentnej ( $t_E$ ), operatywnej ( $t_O$ ) i komfortu ( $t_K$ ) oraz przewidywanej średniej oceny komfortu cieplnego (PMV) i przewidywanego procentu osób odczuwających brak komfortu (PPD). Pomiary wykonano miernikiem komfortu cieplnego [1] firmy Brüel & Kjaer. W tabeli 4 zawarto wyniki pomiarów wskaźników komfortu cieplnego osób dorosłych.

Tabela 4. Wskaźniki komfortu cieplnego.  
Table 4. The thermal comfort factors.

Wskaźniki komfortu	$t_O$	$t_E$	$t_K$	PMV	PPD
	°C			-	%
Średnia arytmetyczna	20,6	19,9	23,2	-0,64	16,9
Odchylenie standardowe	1,3	1,3	1,1	0,36	7,1

Średnia ocena komfortu cieplnego PMV wypadła nieco poniżej oceny obojętnej równej 0 i wyniosła -0,64. Generalnie jednak ocena środowiska mieściła się w strefie komfortu, czyli pomiędzy wartością -1 i 1.

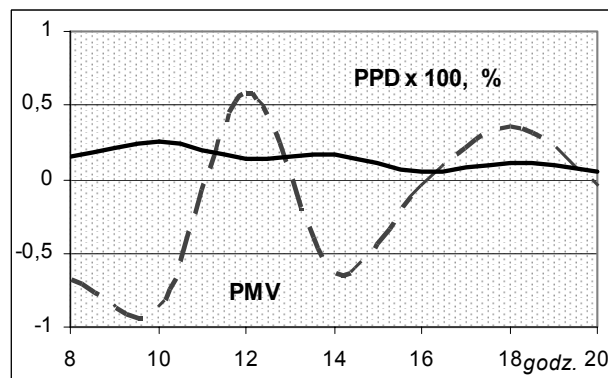
Przebadano również zmiany wartości pomierzonych wskaźników komfortu cieplnego w ciągu dnia. Rys. 4 ilustruje przebieg zmian wartości temperatury powietrza  $t_a$  oraz przebieg zmian wartości wskaźników komfortu  $t_K$ ,  $t_O$  i  $t_E$  w ciągu dnia.



Rys. 4. Przebieg zmian wartości temperatury powietrza  $t_a$  oraz wskaźników komfortu cieplnego  $t_K$ ,  $t_O$  i  $t_E$ .  
Fig. 4. The fluctuations of  $t_a$  and thermal factors  $t_K$ ,  $t_O$ ,  $t_E$  by day.

Obniżenie wartości temperatury komfortu w godzinach południowych wynikało ze wzrostu aktywności fizycznej osób przebywających w pomieszczeniach.

Na rys. 5 przedstawiono zmiany wartości wskaźników komfortu cieplnego PMV i PPD w ciągu dnia.



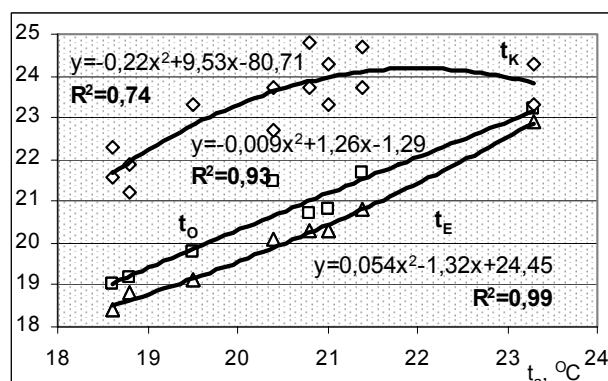
Rys. 5. Przebieg zmian wartości wskaźników komfortu cieplnego PMV i PPD w ciągu dnia.

Fig. 5. The fluctuations of thermal factors PMV and PPD by day

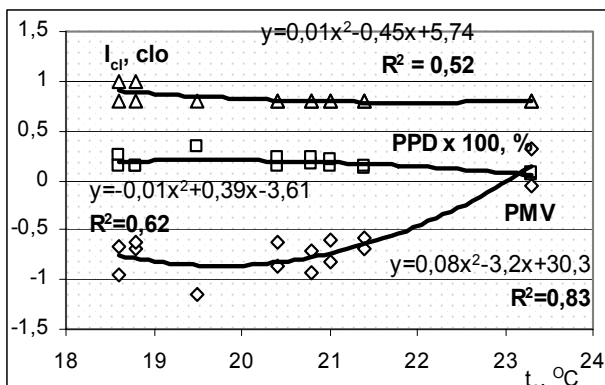
Przedstawione wartości PPD należy pomnożyć przez 100.

## 3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wskaźniki komfortu wyznaczono wyłącznie dla osób dorosłych ze względu na małą liczbę dzieci przebywającą w pomieszczeniach w czasie badań. Przebadano wpływ warunków środowiska na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu cieplnego. Rys. 6-13 przedstawiają wpływ temperatury, wilgotności względnej i prędkości ruchu powietrza oraz temperatury promieniowania otoczenia na wartości analizowanych wskaźników komfortu  $t_K$ ,  $t_O$  i  $t_E$  oraz PMV i PPD, a także na zmianę wartości izolacyjności cieplnej odzieży.

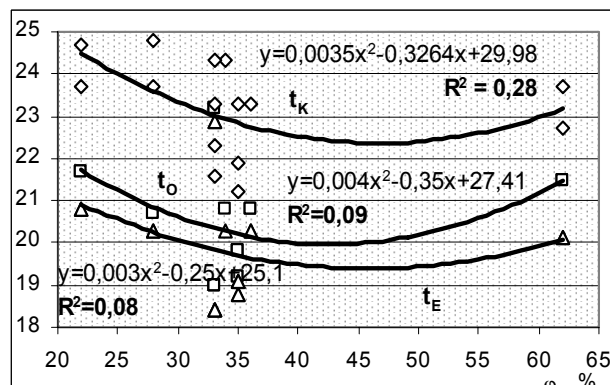


Rys. 6. Wpływ temperatury powietrza  $t_a$  na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu cieplnego  $t_K$ ,  $t_O$  oraz  $t_E$ .  
Fig. 6. The influence  $t_a$  on  $t_K$ ,  $t_O$  and  $t_E$  factors.



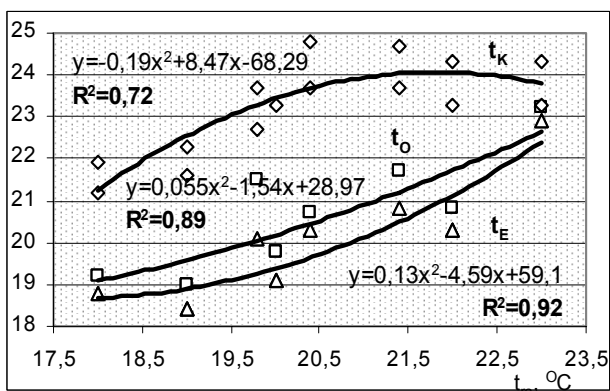
Rys. 7. Wpływ temperatury powietrza  $t_a$  na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu cieplnego PPD i PMV oraz wartości izolacyjności cieplnej odzieży  $I_{cl}$ .

Fig. 7. The influence  $t_a$  on  $I_{cl}$ , PPD i PMV factors



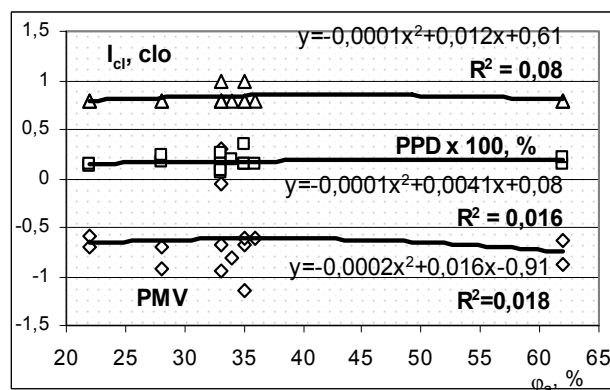
Rys. 10. Wpływ wilgotności względnej powietrza  $\phi_a$  na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu cieplnego  $t_k$ ,  $t_o$  oraz  $t_E$ .

Fig. 10. The influence  $\phi_a$  on  $t_k$ ,  $t_o$  and  $t_E$  factors.



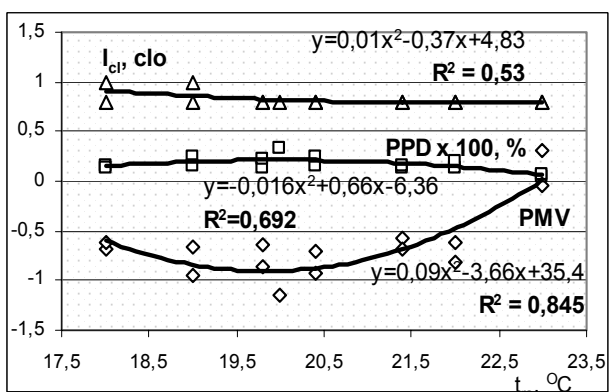
Rys. 8. Wpływ temperatury promieniowania otoczenia  $t_{ra}$  na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu cieplnego  $t_k$ ,  $t_o$  oraz  $t_E$ .

Fig. 8. The influence  $t_{ra}$  on  $t_k$ ,  $t_o$  and  $t_E$  factors.



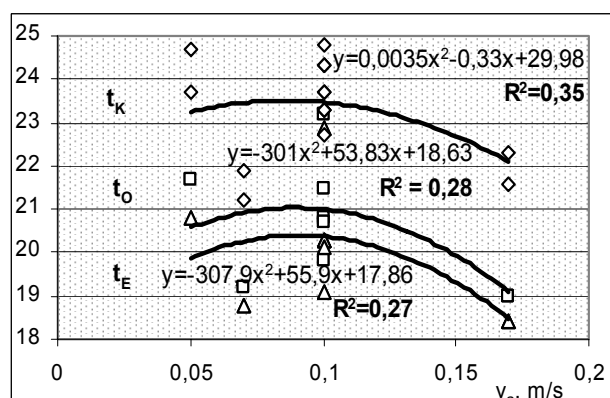
Rys. 11. Wpływ wilgotności względnej powietrza  $\phi_a$  na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu cieplnego PPD i PMV oraz wartości izolacyjności cieplnej odzieży  $I_{cl}$ .

Fig. 11. The influence  $\phi_a$  on  $I_{cl}$ , PPD i PMV factors



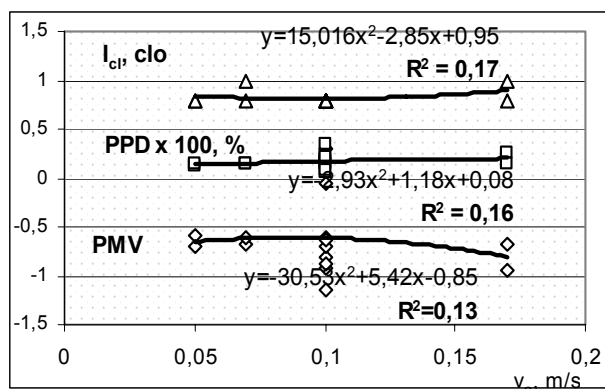
Rys. 9. Wpływ temperatury promieniowania otoczenia  $t_{ra}$  na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu cieplnego PPD i PMV oraz wartości izolacyjności cieplnej odzieży  $I_{cl}$ .

Fig. 9. The influence  $t_{ra}$  on  $I_{cl}$ , PPD i PMV factors



Rys. 12. Wpływ prędkości przepływu powietrza  $v_a$  na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu cieplnego  $t_k$ ,  $t_o$  oraz  $t_E$ .

Fig. 12. The influence  $v_a$  on  $t_k$ ,  $t_o$  and  $t_E$  factors.



Rys. 13. Wpływ prędkości przepływu powietrza  $v_a$  na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu cieplnego PPD i PMV oraz wartości izolacyjności cieplnej odzieży  $I_{cl}$ .

Fig. 13. The influence  $v_a$  on  $I_{cl}$ , PPD i PMV factors

Na kształtowanie się warunków komfortu cieplnego w największym stopniu wpływała temperatura powietrza oraz średnia temperatura promieniowania otoczenia. Poszczególne osoby przebywające w pomieszczeniach były mniej wrażliwe na zmiany temperatury przy zwiększonym poziomie aktywności fizycznej. Wilgotność względna powietrza, a w szczególności prędkość jego przepływu nie miały istotnego wpływu na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu.

#### 4. PODSUMOWANIE

Właściwe ukształtowanie wartości poszczególnych elementów mikroklimatu wewnątrz jest podstawowym warunkiem osiągnięcia przez osoby przebywające w danym środowisku stanu komfortu cieplnego oraz ogólnego dobrego samopoczucia i zdrowia. Temperatura odbierana przez człowieka tzw. temperatura odczuwalna, jest wypadkową działania na niego temperatury powietrza oraz temperatury promieniowania otoczenia. Aby człowiek mógł znajdować się w stanie komfortu cieplnego średnia temperatura promieniowania otoczenia powinna różnić się od temperatury powietrza nie więcej niż 3-4 °C. Spadek temperatury odbieranej jako komfortowa można w pewnym zakresie zrekomensować wzrostem izolacyjności cieplnej odzieży lub zwiększeniem aktywności fizycznej. Wilgotność względna powietrza wywiera wpływ na odprowadzanie ciepła z organizmu na drodze odparowania potu. Wilgotność powietrza ma stosunkowo mały wpływ na warunki komfortu cieplnego w środowiskach termicznych umiarkowanych. Człowiek znajdujący się w czystym powietrzu o temperaturze od 15 °C do 27 °C nie jest w stanie odczuć zmian wilgotności nawet w dość znacznym zakresie takim jak przedział o wartościach od 25 % do 75 % [2, 3]. Dopiero wysoka wilgotność względna i temperatura powietrza łącznie powodują

uczucie dyskomfortu. Wzrost wilgotności względnej można rekompensować zwykle nieznacznym spadkiem temperatury. Ruch powietrza wpływa na stan komfortu cieplnego osób poprzez zmianę warunków wymiany ciepła przez konwekcję. Odczucie prędkości przepływającego powietrza jest subiektywne i zależy od temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz od różnicy pomiędzy temperaturą przepływającego strumienia i temperaturą otoczenia. Przy znacznie niższej temperaturze napływającego powietrza lub znacznej jego prędkości przepływ może być odczuwany jako nieprzyjemny przeciąg. Ruch powietrza o prędkości nieprzekraczającej 0,20 m/s jest zazwyczaj odbierany pozytywnie. Dla małych prędkości przepływu powietrza wymagana temperatura komfortu cieplnego nie zależy od prędkości. Zwiększenie prędkości przepływu powietrza można równoważyć wzrostem jego temperatury. Rola odzieży w procesie wymiany ciepła polega na izolacji cieplnej ciała oraz na transporcie pary wodnej. Własności termoizolacyjne odzieży zależą od materiału, z którego jest ona wykonana i od ilości znajdującego się w niej nieruchomego powietrza. Wpływ izolacyjności cieplnej odzieży na wartość temperatury koniecznej do uzyskania stanu komfortu cieplnego zwiększa się wraz ze wzrostem aktywności fizycznej. Aktywność fizyczna potęguje metaboliczną produkcję ciepła. Zwiększenie aktywności człowieka powoduje obniżenie temperatury powietrza uważanej przez niego wcześniej za komfortową.

Jednoczesne ujmowanie różnorodnych zmiennych fizycznych w jednym wskaźniku prowadzi do konieczności wykonywania skomplikowanych obliczeń, a także obniża siłę związku pomiędzy poszczególnymi elementami wpływającymi na odczucia cieplne.

#### THE ASSES OF HUMAN THERMAL COMFORT FACTORS IN THE ROOMS

**Summary:** These paper presents the results of the research on human thermal comfort factors inside the rooms. The influence the microenvironment condition on people thermal comfort in the rooms was observed. The researching of thermal comfort factors was assessed to.

#### Literatura

- [1] Lis A., Śliwowski L. *Wybrane problemy komfortu cieplnego osób w zamkniętych pomieszczeniach*. Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja 7-8 (2002) 45-49
- [2] Śliwowski L. *Mikroklimat wewnątrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [3] Śliwowski L. *Mikroklimat wewnątrz*. W: Budownictwo ogólne. Fizyka budowli. Red.: P. Klemm. Tom drugi. Arkady, Warszawa 2005, 2006