

Anna Lis¹

OCENA KOMFORTU CIEPLNEGO OSÓB W BUDYNKACH MIESZKALNYCH NA PODSTAWIE WSKAŹNIKÓW PMV I PPD

Wprowadzenie

Odczucie komfortu bądź dyskomfortu jest subiektywne i uzależnione od oddziaływania na organizm człowieka wielu czynników kształtujących dane środowisko. Jednym z podstawowych czynników jest temperatura powietrza, która w powiązaniu ze średnią temperaturą promieniowania otoczenia daje temperaturę odczuwalną. Temperatura promieniowania otoczenia nie powinna różnić się zdecydowanie od temperatury powietrza, niekorzystna jest również asymetria rozkładu temperatury w pomieszczeniach. Wilgotność względna powietrza wpływa na odprowadzanie ciepła z organizmu na drodze odparowania potu. Wysoka wilgotność względna i temperatura powietrza łącznie powodują uczucie dyskomfortu. Prędkość przepływu powietrza wpływa na warunki komfortu cieplnego osób poprzez zmianę warunków wymiany ciepła przez konwekcję. Nadmierna prędkość przepływu powietrza o temperaturze niższej od temperatury powietrza w pomieszczeniu wywołuje uczucie dyskomfortu, zakłócając odczucia ciepłe [1, 2].

Termiczne elementy mikroklimatu wpływające na odczucia ciepłe ludzi są czynnikami charakteryzującymi dane środowisko. Niezwykle istotne są również osobowe czynniki mikroklimatu, takie jak izolacyjność cieplna noszonej odzieży i aktywność fizyczna. Rolą odzieży jest izolacja cieplna ciała w procesie wymiany ciepła z otoczeniem oraz transport pary wodnej. Własności termoizolacyjne odzieży zależą od materiału, z którego jest ona wykonana oraz od ilości znajdującego się w niej nieruchomego powietrza. Aktywność fizyczna człowieka potęguje metaboliczną produkcję ciepła. Zwiększenie aktywności powoduje obniżenie wartości temperatury powietrza uważanej przez niego wcześniej za komfortową [1, 2].

Problem zapewnienia odpowiednich warunków komfortu cieplnego jest niezwykle istotny ze względu na to, że mają one niebagatelny wpływ na samopoczucie i zdrowie osób przebywających w pomieszczeniach. Zgodnie z dyrektywą dotyczącą

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa, e-mail: alis@bud.pcz.czest.pl

charakterystyki energetycznej budynków, istnieje konieczność określenia warunków dla klasyfikacji obiektów pod względem wymagań klimatu wewnętrznego [3].

1. Wskaźniki PMV i PPD w ocenie komfortu

Wskaźniki PMV i PPD stosowane są do praktycznej oceny umiarkowanego środowiska cieplnego w znormalizowanej skali przez dużą liczbę osób. Zostały one opracowane przez Fanger'a w oparciu o równanie komfortu cieplnego [4].

Wskaźnik PMV (Predictive Mean Vote) określa przewidywaną średnią ocenę komfortu cieplnego osób przebywających w danym pomieszczeniu. Ocena uzależniona jest od temperatury operatywnej ujmującej łączne oddziaływanie temperatury powietrza oraz średniej temperatury promieniowania otoczenia [4, 5]. Skalę zmienności PMV przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Skala zmienności PMV [6]

PMV	Ocena komfortu cieplnego
+3	gorąco
+2	ciepło
+1	umiarkowanie ciepło
0	neutralnie
-1	umiarkowanie chłodno
-2	chłodno
-3	zimno

Przewidywana średnia ocena komfortu cieplnego jest odniesiona do nierówności pomiędzy ciepłem oddawanym przez człowieka i odbieranym przez otaczającego środowisko a optymalną ilością ciepła przekazywaną do otoczenia, która zapewniałaby mu warunki komfortu przy danej aktywności fizycznej. Zakłada się, że wartość $PMV = 0$ opisuje idealny stan komfortu cieplnego, natomiast dopuszczalny stan komfortu cieplnego określa wartość w granicach $-0,5 < PMV < +0,5$. Strefa umiarkowanego ciepłnie (akceptowanego) środowiska zawiera się w przedziale $-1,0 < PMV < +1,0$. Wartości PMV powyżej +2 i poniżej -2 odnoszą się do środowiska wyraźnie nieakceptowanego przez większość przebywających w nim osób. Wskaźnik PMV jest najbardziej wiarygodny dla warunków ustalonych, lecz może być również stosowany przy powolnych zmianach wartości poszczególnych parametrów mikroklimatu wewnątrz w określonych przedziałach [4].

Wskaźnik PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) określa przewidywany procent osób niezadowolonych z istniejących warunków komfortu. Gdy środowisko jest ocenione jako neutralne, wskaźnik PPD ma wartość 5%, co oznacza, że zawsze pewna grupa spośród osób przebywających w tym środowisku jest niezadowolona z panujących w nim warunków. Niejednorodna ocena tego samego środowiska

przy analogicznej aktywności fizycznej i izolacyjności cieplnej wynika z indywidualnych różnic w odczuwaniu mikroklimatu przez poszczególne osoby [4].

2. Wyznaczanie wskaźników PMV i PPD

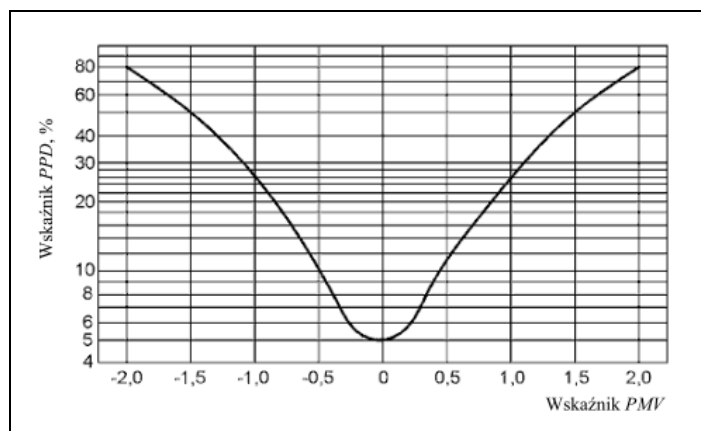
Wskaźniki PMV i PPD mają zastosowanie w przypadku, gdy temperatura powietrza w analizowanym pomieszczeniu zawiera się w przedziale $10\div 30^{\circ}\text{C}$, średnia temperatura promieniowania otoczenia w przedziale $10\div 40^{\circ}\text{C}$, ciśnienie cząstkowe pary wodnej w przedziale $0\div 2,7$ kPa, a prędkość przepływu powietrza w przedziale $0\div 1$ m/s. Wydatek energetyczny przebywających w nim osób zawiera się w przedziale $0,8\div 4,0$ met, a izolacyjność cieplna ich odzieży w zakresie $0\div 2$ clo.

Do wyznaczania wskaźnika PMV Fanger sporządził skomplikowaną formułę, jednak do praktycznego wykorzystania zaproponował tabele opracowane dla szeregu wartości zmiennych termicznych i osobowych parametrów mikroklimatu [4, 6]. Wskaźnik ten można również uzyskać na podstawie bezpośrednich pomiarów, stosując miernik komfortu. Tempo metabolizmu można oszacować na podstawie normy PN-EN ISO 8996 [7] w zależności od rodzaju wykonywanej pracy, a izolacyjność cieplną odzieży na podstawie normy PN-EN ISO 9920 [8]. Uzyskaną wartość PMV porównuje się z 7-stopniową skalą wrażeń cieplnych (tab. 1).

Na podstawie określonej wartości PMV można wyznaczyć wskaźnik PPD za pomocą równania zawartego w normie PN EN-ISO 7730 [6]:

$$\text{PPD} = 100 - 95 \exp(-0,03353 \text{ PMV}^4 - 0,2179 \text{ PMV}^2)$$

Analityczny związek pomiędzy odsetkiem osób niezadowolonych PPD a PMV przedstawiono na rysunku 1. Na jego podstawie można stwierdzić, że gdy 90% osób przebywających w pomieszczeniu ocenia jego środowisko jako komfortowe, dla pozostałych 10% jest ono zimne (5%) lub gorące (5%).



Rys. 1. Przewidywany procent niezadowolonych PPD w funkcji przewidywanej oceny średniej komfortu cieplnego PMV [4]

3. Wyniki pomiarów PMV i PPD w budynkach edukacyjnych

Analizę i ocenę komfortu cieplnego osób przebywających w pomieszczeniach na podstawie wskaźników PMV i PPD przeprowadzono w budynkach mieszkalnych. Badania wykonano w sezonie grzewczym. W trakcie prowadzenia badań w pomieszczeniach zachowano naturalne warunki bez ingerowania w realizację zajęć objętych typowym harmonogramem dnia. Po dokonaniu weryfikacji wyniki badań poddano analizie statystycznej.

W pierwszym rzędzie wykonano pomiary podstawowych termicznych parametrów mikroklimatu mających zasadniczy wpływ na kształtowanie się wartości PMV i PPD. Analizie poddano temperaturę (t_a) i wilgotność względną (φ_a) powietrza oraz prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniach (v_a), a także temperaturę promieniowania otoczenia (t_r). Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 2

Termiczne parametry mikroklimatu

Wybrane miary statystyki opisowej	t_a	φ_a	v_a	t_r
	°C	%	m/s	°C
Średnia arytmetyczna	20,4	48,2		21,6
Średnia harmoniczna			0,09	
Odchylenie standardowe	1,5	10,1	0,04	1,8

Następnie prześledzono osobowe czynniki mikroklimatu. Analizie poddano izolacyjność cieplną noszonej odzieży (I_{cl}) oraz wartość wytwarzanej energii metabolicznej związanej z określoną aktywnością fizyczną poszczególnych osób (M). Przy ustalaniu izolacyjności cieplnej odzieży oraz tempa metabolizmu posłużono się wartościami i wzorami zawartymi w literaturze [7, 8]. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

TABELA 3

Osobowe parametry mikroklimatu

Wybrane miary statystyki opisowej	Osoby dorosłe		Dzieci	
	I_{cl}	M	I_{cl}	M
	clo	met	clo	met
Średnia arytmetyczna	0,84	1,2	0,73	2,3
Odchylenie standardowe	0,08	0,2	0,09	0,5

Ocenę stanu komfortu cieplnego osób przebywających w pomieszczeniach przeprowadzono na podstawie pomiarów przewidywanej średniej oceny komfortu cieplnego (PMV) i przewidywanego procentu osób niezadowolonych z istniejących warunków komfortu (PPD). Pomiary wykonano miernikiem komfortu ciepl-

nego firmy Brüel & Kjær. Miernik umożliwia określenie PMV i PPD na podstawie temperatury powietrza, prędkości jego przepływu, średniej temperatury promieniowania otoczenia, ciśnienia cząstkowego pary wodnej oraz izolacyjności cieplnej odzieży osób przebywających w danym środowisku termicznym i poziomie ich metabolizmu. W tabeli 4 zawarto wyniki pomiarów wskaźników PMV i PPD.

TABELA 3

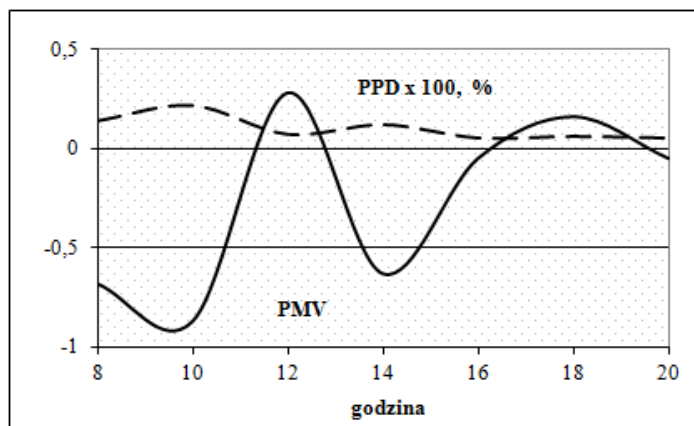
Wskaźniki PMV i PPD

Wybrane miary statystyki opisowej	Osoby dorosłe		Dzieci	
	PMV	PPD	PMV	PPD
	–	%	–	%
Średnia arytmetyczna	-0,64	17,1	+0,57	23,1
Odchylenie standardowe	0,37	7,3	0,68	9,5

Średnia ocena komfortu cieplnego osób dorosłych przebywających w rozpatrywanych pomieszczeniach w oparciu o wskaźniki PMV i PPD wypadła nieco poniżej oceny uznawanej za neutralną (równą 0) i wyniosła $-0,64$, natomiast w przypadku dzieci powyżej tej oceny i wyniosła $+0,57$.

4. Analiza i ocena stanu komfortu cieplnego

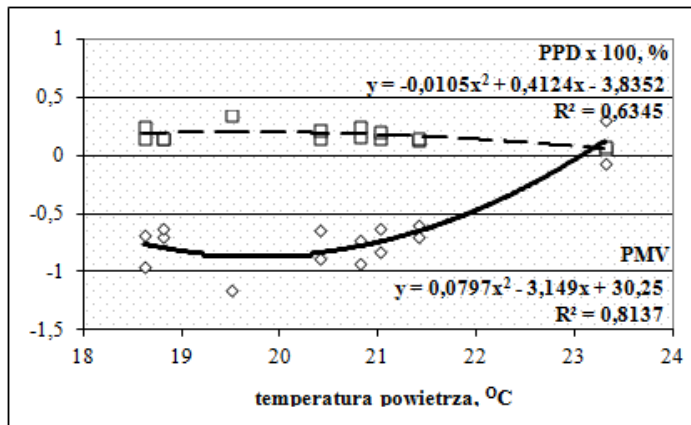
Analizę komfortu cieplnego przeprowadzono w oparciu o wyniki uzyskane dla osób dorosłych z uwagi na małą ilość dzieci przebywających w pomieszczeniach w trakcie badań. Prześledzono zmiany wartości PMV i PPD w ciągu dnia (rys. 2).



Rys. 2. Przebieg zmian wartości PMV i PPD w ciągu dnia

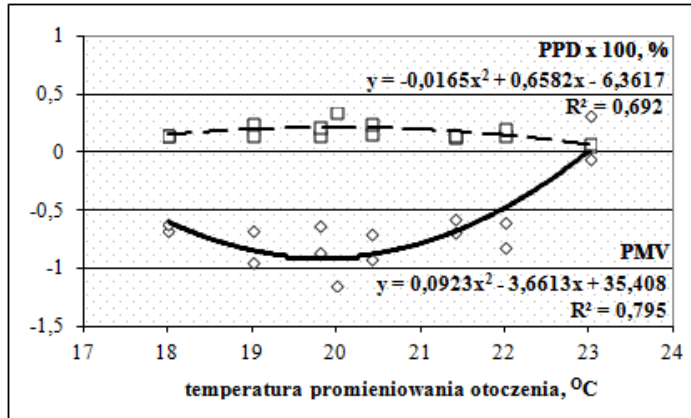
Generalnie ocena środowiska mieściła się w strefie komfortu. Wzrost wartości PMV w określonych przedziałach czasowych wynikał głównie ze zmian wartości

parametrów mikroklimatu, które w pierwszym rzędzie wpływają na kształtowanie się wartości PMV i PPD w danym środowisku termicznym. Na rysunku 3 przedstawiono zmiany wartości PMV i PPD w wyniku zmian temperatury powietrza.



Rys. 3. Wpływ temperatury powietrza na kształtowanie się wartości PMV i PPD

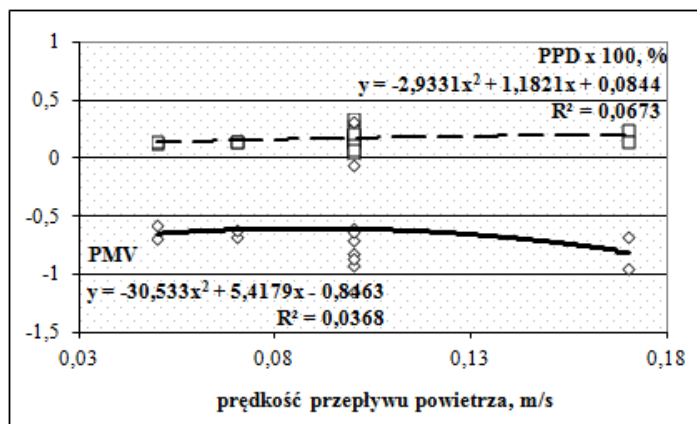
Na rysunku 4 przedstawiono natomiast zmiany wartości PMV i PPD w wyniku zmian temperatury promieniowania otoczenia.



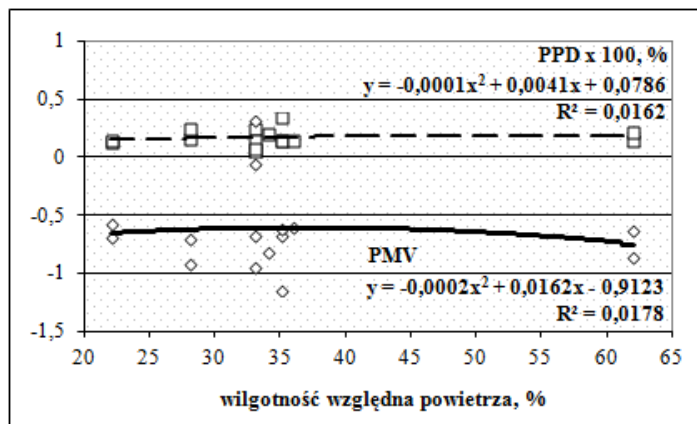
Rys. 4. Wpływ temperatury promieniowania otoczenia na kształtowanie się wartości PMV i PPD

Zmiany zarówno temperatury powietrza, jak i średniej temperatury promieniowania otoczenia w znacznym stopniu wpływały na kształtowanie się warunków komfortu cieplnego osób przebywających w badanych pomieszczeniach. Współczynniki determinacji w obu przypadkach utrzymywały się średnio na poziomie 0,8.

Zmiany prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniach, jak również jego wilgotność względna nie miały istotnego wpływu na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu (rys. 5 i 6).



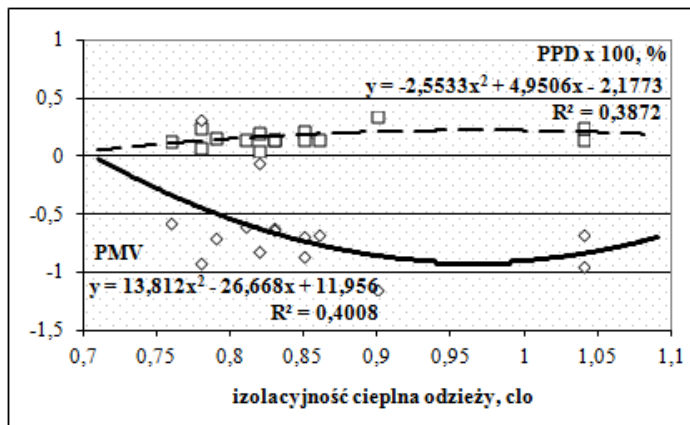
Rys. 5. Wpływ prędkości przepływu powietrza na kształtowanie się wartości PMV i PPD



Rys. 6. Wpływ wilgotności względnej powietrza na kształtowanie się wartości PMV i PPD

Prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniach utrzymywała się na poziomie akceptowanym przez użytkowników pomieszczeń. W typowych polskich mieszkaniach z wentylacją grawitacyjną mamy do czynienia zwykle z niewielką i w miarę stałą prędkością ruchu powietrza w ciągu dnia. Wilgotność względna powietrza ma stosunkowo mały wpływ na warunki komfortu cieplnego w środowiskach termicznych umiarkowanych. Na podstawie prowadzonych badań stwierdzono, że człowiek znajdujący się w czystym powietrzu o temperaturze w przedziale 15÷27°C nie jest w stanie odczuć zmian wilgotności powietrza nawet w dość znacznym zakresie [4, 5].

Prześlędzono również wpływ izolacyjności cieplnej odzieży (rys. 7) oraz tempa metabolizmu na zmiany wartości PMV i PPD.



Rys. 7. Wpływ izolacyjności cieplnej odzieży na kształtowanie się wartości PMV i PPD

Wyjście poza strefę komfortu można w pewnym zakresie regulować wzrostem lub spadkiem izolacyjności cieplnej odzieży w szczególności przy określonej aktywności fizycznej. Pomimo wyższego poziomu metabolizmu u dzieci średnia izolacyjność cieplna odzieży zwłaszcza tych młodszych była często zbliżona do izolacyjności odzieży u dorosłych, co wynika z tego, iż dobór odzieży pozostawał tu w gestii osób dorosłych. Wzrost aktywności fizycznej użytkowników pomieszczeń powodował obniżenie wartości temperatury uznawanej za komfortową. Przy zwiększonym poziomie aktywności fizycznej poszczególne osoby były mniej wrażliwe na zmiany wartości temperatury powietrza.

W trakcie prowadzenia badań zanotowano występowanie u osób przebywających w pomieszczeniach pewnych dolegliwości z grupy symptomów, tzw. syndromu budynku chorobotwórczego, które identyfikowali oni z długotrwałym przebywaniem w danym środowisku. Sygnalizowano nasilenie podrażnienia oczu, dróg oddechowych oraz ból głowy, jak również ogólną złą jakość powietrza.

Podsumowanie i wnioski

Znajomość mechanizmów wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem oraz podstawowych metod pomiarów środowisk termicznych i zasad ich kształtowania powinna być niezbędnym narzędziem w ręku projektanta obiektów budowlanych i infrastruktury technicznej w celu odpowiedniego kształtowania środowiska wewnątrz w budynkach pod kątem osiągnięcia stanu komfortu cieplnego przez osoby w nich przebywające. 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. Przy użyciu wskaźników PMV i PPD można dokonać oceny wrażeń cieplnych osób przebywających w środowisku umiarkowanym. W warunkach komfortu obciążenie cieplne organizmu człowieka jest równe zeru. Wartości PMV różne od zera wskazują ogólny stopień odczuwanego dyskomfortu.

Na podstawie dokonanej analizy i oceny warunków mikroklimatu i stanu komfortu cieplnego osób przebywających w pomieszczeniach w oparciu o wskaźniki PMV i PPD stwierdzono, że:

- 1) na kształtowanie się wartości wskaźników komfortu cieplnego w największym stopniu wpływała temperatura powietrza oraz średnia temperatura promieniowania otoczenia, natomiast ani wilgotność względna powietrza, ani prędkość jego przepływu nie miały istotnego znaczenia przy ocenie warunków cieplnych rozpatrywanego środowiska;
- 2) wartość izolacyjności cieplnej odzieży była zróżnicowana i zależna od temperatury powietrza w pomieszczeniach, poziomu metabolizmu oraz indywidualnych preferencji osób przebywających w pomieszczeniach, a także od stereotypowych przyzwyczajęń związanych z noszeniem określonego typu odzieży w określonych porach roku;
- 3) izolacyjność cieplna odzieży noszonej przez dzieci w stosunku do izolacyjności cieplnej odzieży noszonej przez osoby dorosłe utrzymywała się na nieco niższym lub zbliżonym poziomie, natomiast ich aktywność fizyczna była znacznie intensywniejsza;
- 4) średnia ocena komfortu cieplnego PMV w rozpatrywanym środowisku termicznym mieściła się w strefie akceptowanego komfortu;
- 5) w związku z występowaniem u osób przebywających w pomieszczeniach określonych dolegliwości z grupy symptomów tzw. syndromu budynku chorobotwórczego parametry środowiska powinny być kształtowane tak, aby zapewnić właściwe warunki komfortu, co powinno być zadaniem priorytetowym nawet w stosunku do działań związanych z efektywnością energetyczną, ze względu na decydujący ich wpływ na samopoczucie i zdrowie osób;
- 6) zamiast stosowania jako wskaźnika komfortu przewidywanej średniej oceny komfortu cieplnego bardziej miarodajne w ocenie danego środowiska termicznego wydaje się określenie procentowego udziału osób niezadowolonych z istniejących warunków komfortu.

Literatura

- [1] Budownictwo ogólne. Fizyka budowli, red. P. Klemm, Tom drugi, Arkady, Warszawa 2012.
- [2] Śliwowski L., Mikroklimat wnętrza i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
- [4] Fanger P.O., Komfort cieplny, Arkady, Warszawa 1974.

- [5] Fanger P.O., Popiołek Z., Wargocki P., Środowisko wewnętrzne. Wpływ na zdrowie, komfort i wydajność pracy, Politechnika Śląska, Gliwice 2003.
- [6] PN-EN ISO 7730:2006 Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego.
- [7] PN-EN ISO 8996:2005 Ergonomia środowiska termicznego. Określanie tempa metabolizmu.
- [8] PN-EN ISO 9920:2009 Ergonomia środowiska termicznego. Szacowanie izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieży (oryg.).

Streszczenie

W artykule omówiono wskaźniki oceny komfortu cieplnego PMV i PPD oraz sposoby ich wyznaczania. Oszacowano wartości podstawowych czynników wpływających na odczucia cieplne ludzi w pomieszczeniach oraz wskaźników PMV i PPD. Pomiar wskaźników komfortu cieplnego wykonano przy użyciu miernika komfortu cieplnego. Prześledzono zmiany wartości PMV i PPD wraz ze zmianami czynników środowiskowych i osobowych. Przeprowadzono analizę stanu komfortu cieplnego osób znajdujących się w rozpatrywanej grupie budynków edukacyjnych. Pomiar wskaźników uzupełniono i porównano z oceną stanu komfortu dokonaną przez użytkowników pomieszczeń w oparciu o badania ankietowe.

Słowa kluczowe: komfort cieplny człowieka, wskaźniki PMV i PPD, budynki edukacyjne

Evaluation of thermal comfort in education buildings based on PMV and PPD indicators

Abstract

The article discusses the PMV and PPD indicators of thermal comfort and methods of their determination. The value of the basic factors influencing on the people feelings in the rooms and PMV and PPD indicators was estimated. The measurements of thermal comfort indicators were made using a thermal comfort measurer. The changes in the PMV and PPD value, together with changes in environmental and personal factors were investigated. Analysis of people thermal comfort in the studied group of educational buildings was carried out. The measurements of indicators supplemented and compared with the individual assessment of thermal comfort made by users of the rooms based on the questionnaire surveys.

Keywords: human thermal comfort, PMV and PPD indicators, educational buildings