

Ewa MEDYŃSKA, Zbigniew POPIOLEK

Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania, Politechnika Śląska

SYMULACJA ODCZUĆ CIEPLNYCH CZŁOWIEKA PRZY SINUSOIDALNYCH ZMIANACH PRĘDKOŚCI POWIETRZA NAWIEWANEGO NA SKÓRĘ

Streszczenie. W artykule przedstawiono model przepływu ciepła w wycinku skóry człowieka, uwzględniający zjawisko termorecepcji, za pomocą którego symulowano odczucie lokalnego dyskomfortu cieplnego, wywołane przez przeciąg. Przeprowadzono symulacje numeryczne przy użyciu tego modelu przy założeniu sinusoidalnie zmieniającej się, ze stałą amplitudą i różnymi częstotliwościami, prędkości powietrza nawiewanego na powierzchnię skóry. Otrzymane w wyniku symulacji charakterystyki wrażliwości częstotliwościowej termoreceptora zimna porównano z wynikami badań eksperymentalnych z udziałem ludzi.

SIMULATION OF HUMAN THERMAL SENSATION AT SINUSOIDAL VELOCITIES OF THE AIRFLOW

Summary. The paper presents a model of heat flow through an element of human skin, taking into account thermoreception and designed to simulate sensation of local thermal discomfort caused by draught. Numerical simulations were carried out with the use of the model, assuming sinusoidal velocities of the airflow of constant amplitudes and different frequencies. The frequency characteristics of the cold thermoreceptor, acquired in result of the simulation, were then compared with the results of experiments with people.

1. Wprowadzenie

Zjawisko lokalnego dyskomfortu cieplnego spowodowane może być wieloma czynnikami, takimi jak: przeciąg, asymetria temperatury promieniowania otoczenia, gradient temperatury i bezpośredni kontakt z zimną lub gorącą powierzchnią [1]. Przeciąg jest najczęściej podawaną przyczyną skarg z powodu lokalnego dyskomfortu cieplnego. Oceny stopnia dyskomfortu spowodowanego odczuciem przeciągu dokonuje się stosując, znany z literatury [2] i wprowadzony do znowelizowanej normy dotyczącej oceny środowiska umiarkowanego [3], model ryzyka przeciągu, umożliwiający określanie odsetka

niezadowolonych z powodu przeciągu. Wiadomo, że odczucie przeciągu jest tym większe, im wyższa jest prędkość przepływu powietrza i im niższa jest jego temperatura, oraz że zależy ono również od turbulencji ruchu powietrza. Jednakże oprócz stwierdzenia zwiększonej wrażliwości organizmu ludzkiego na turbulentny przepływ powietrza, zwiększającej się wraz ze wzrostem wartości skutecznej fluktuacji prędkości, z przeprowadzonych badań z udziałem ludzi wynika także, że wpływ na odczucie komfortu, jaki ma prędkość powietrza, jest zupełnie inny, gdy ta prędkość jest stała i gdy zmienia się wokół tej samej co do wartości prędkości średniej, a szczególna wrażliwość na fluktuacje prędkości występuje w zakresie częstotliwości około 0,5 Hz [4]. W tych samych warunkach, tj. przy tej samej średniej prędkości i temperaturze, przepływ fluktuacyjny daje większe odczucie dyskomfortu niż przepływ bez fluktuacji, a zatem ocena komfortu cieplnego za pomocą wskaźnika ryzyka przeciągu może nie być w pełni wiarygodna.

W związku z tym zastosowano inne podejście do oceny komfortu, próbując symulować odczucia cieplne człowieka. Wrażliwość organizmu człowieka na zmiany czynników zewnętrznych można opisać opierając się na psychofizjologii odczuć cieplnych, w której istotną część stanowi zjawisko termorecepcji [5]. Koncepcja wykorzystująca zjawisko termorecepcji pozwala na opisanie odczuć cieplnych człowieka w sposób odmienny od opisanych powyżej metod klasycznych, tj. za pomocą reakcji na zmiany temperatury zakończeń nerwów (termoreceptorów) umieszczonych w skórze. W opisanych w literaturze modelach, wykorzystujących zjawisko termorecepcji, [6,7] zakłada się, że okresowe zmiany temperatury powietrza na powierzchni skóry powodują zmiany temperatury w skórze odbierane przez termoreceptory. Model opracowany przez Ringa [6] zakłada, zgodnie z badaniami właściwości termoreceptorów [5], że odczucie cieplne człowieka proporcjonalne jest do reakcji termoreceptora R , tj. do częstotliwości wysyłanych przez ten receptor impulsów, wg zależności

$$R = R_0 + K_s t_R + K_d \frac{dt_R}{dt} \quad (1)$$

gdzie t_R - temperatura termoreceptora,

τ - czas,

K_s i K_d - stałe proporcjonalności, odpowiednio dla reakcji statycznej (przy stałej temperaturze termoreceptor wysyła impulsy ze stałą częstotliwością) i dynamicznej termoreceptora (przy zmianie temperatury częstotliwość wysyłanych impulsów zwiększa się).

Symulacje odczuć ciepłych przy użyciu tego modelu Ring prowadził przy sinusoidalnych zmianach temperatury na powierzchni skóry i uzyskał charakterystyki wrażliwości termoreceptorów na zmiany temperatury na powierzchni skóry o różnych częstotliwościach. Opracowany poprzednio model numeryczny [8] również symulował reakcję termoreceptorów na sinusoidalne zmiany temperatury na powierzchni skóry. Wyniki symulacji uzyskane z obu tych modeli były zgodne między sobą, ale odbiegały od wyników otrzymanych z badań z udziałem ludzi (maksymalna reakcja termoreceptora zimna, reagującego na ochłodzenie, występowała dla częstotliwości wyższych niż 0,5 Hz).

Analizując przebieg charakterystyk wrażliwości częstotliwościowych należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że w symulacjach numerycznych rozważano sinusoidalne zmiany temperatury na powierzchni skóry, podczas gdy badania z udziałem ludzi [4] dotyczyły periodycznych zmian prędkości nawiewanego powietrza.

W referacie przedstawiono modyfikację opracowanego poprzednio modelu, w której symulację odczuć ciepłych zakładającą sinusoidalne zmiany temperatury na powierzchni skóry zastąpiono symulacją odczuć ciepłych będących reakcją na sinusoidalne zmiany prędkości powietrza nawiewanego na skórę, a więc bliższą warunkom eksperymentu z udziałem ludzi.

2. Model zakładający liniowy rozkład konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła

Przy opracowywaniu modelu, który w lepszy sposób odzwierciedlałby badania z udziałem ludzi, początkowo założono liniową zależność konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła α_C od prędkości. Założenie to przyjęto opierając się na wynikach badań eksperymentalnych [9], w których badana była korelacja pomiędzy konwekcyjną stratą ciepła z głowy manekina a przewidywanym odsetkiem niezadowolonych z powodu odczucia przeciągu obliczonym z równania ryzyka przeciągu. W wyniku tych badań, dla częstotliwości fluktuacji prędkości ok. 0,5 Hz, uzyskano, w zakresie średnich prędkości powietrza zmieniających się od 0 do 0,4 m/s, liniową zależność wartości zarówno lokalnego, jak i globalnego (średniego dla całej głowy) konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła - dla badanego zakresu średnich prędkości wartości współczynnika lokalnego wynosiły od 4 do 12 W/m^2K .

Przeprowadzono numeryczną symulację odczuć cieplnych człowieka modyfikując stosowany poprzednio program komputerowy, tak by symulowana była reakcja termoreceptorów na sinusoidalne zmiany prędkości powietrza nawiewanego prostopadle do powierzchni skóry. Symulowany w obliczeniach numerycznych wycinek skóry człowieka zgodnie z danymi literaturowymi podzielony był na 3 warstwy (naskórek, skóra właściwa i tkanka tłuszczowa) o różnych grubościach i różnych własnościach cieplnych [12]. Grubość wycinka skóry dobrana została w taki sposób, by dla stanu ustalonego spełnione było wyprowadzone przez Madsena [10] i wykorzystywane w manekinie cieplnym oraz w przyrządach do pomiaru komfortu cieplnego równanie termoregulacji ciała człowieka wyrażające temperaturę na powierzchni skóry, t_s , jako:

$$t_s = 36,4 - 0,054 \dot{q}_j \quad (2)$$

gdzie \dot{q}_j – gęstość strumienia jawnych strat ciepła do otoczenia, składająca się z wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie. Przy założeniu, że temperatura powietrza w otoczeniu człowieka t_a jest równa średniej temperaturze promieniowania \bar{t}_r , $t_a = \bar{t}_r$, strumień ten można zapisać wzorem:

$$\dot{q}_j = \dot{q}_c + \dot{q}_r = \dot{q}_{c+r} = (\alpha_c + \alpha_r)(t_s - t_a)$$

gdzie t_a – temperatura powietrza w otoczeniu człowieka, którą przyjęto równą 20°C .

Przy przyjmowanej temperaturze wewnątrz ciała człowieka równej $36,4^\circ\text{C}$, temperatura na powierzchni skóry powinna spełniać równanie:

$$t_s = 36,4 - R_\lambda \dot{q}_j \quad (3)$$

gdzie R_λ – opór cieplny przewodzenia dla całego wycinka skóry:

$$R_\lambda = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \quad (4)$$

gdzie d_1, d_2, d_3 – grubości trzech zakładanych warstw,

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – odpowiednio ich współczynniki przewodzenia ciepła.

Stąd z porównania równań 2 i 3 wynika, że wartość oporu cieplnego przewodzenia powinna wynosić $R_{\lambda}=0,054$. Z tej zależności dobrano grubość ostatniej warstwy, tj. tkanki tłuszczowej, przyjmując grubości d_1 i d_2 wg danych fizjologicznych.

Przyjęte do obliczeń dane dotyczące właściwości cieplnych poszczególnych warstw zestawiono w tabeli 1.

Zgodnie z równaniem termoregulacji, na głębokości 8,575 mm zakładano stałą temperaturę $36,4^{\circ}\text{C}$.

Wartość promienistego współczynnika wnikania ciepła α_r , wyznaczono wg wzoru

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon_{1-2}\sigma_c}{\bar{T}_s - \bar{T}_r} \left[T_s^4 - \bar{T}_r^4 \right] \quad (5)$$

gdzie ε_{1-2} - emisyjność wzajemna,

σ_c - stała Stefana-Boltzmann'a (stała promieniowania ciała doskonale czarnego),

$$\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

T_s, \bar{T}_r - odpowiednio, temperatura bezwzględna skóry i średnia temperatura bezwzględna promieniowania, K.

Obliczano wartości tego współczynnika dla temperatur skóry $t_s=28 \div 32^{\circ}\text{C}$ i temperatury powietrza $t_a=20^{\circ}\text{C}$. W obliczeniach założono, że $\varepsilon_{1-2}=0,92$, a średnia temperatura promieniowania \bar{t}_r jest równa temperaturze powietrza w otoczeniu człowieka t_a , $\bar{t}_r = t_a$.

W modelu przyjęto wartość średnią z uzyskanych wyników: $\alpha_r=5,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Wartość ta jest zgodna z podawaną w literaturze wartością promienistego współczynnika wnikania ciepła dla głowy człowieka, w środowisku, gdzie $t_a=\bar{t}_r$ [11].

Tabela 1

Dane przyjęte w symulacjach numerycznych

Grubość warstwy[mm]	Współczynnik przewodzenia ciepła[W/mK]	Gęstość [kg/m ³]	Ciepło właściwe[J/kgK]
0,125	0,25	1000	4190
0,7	0,4	1000	419
7,75	0,15	800	2000

Symulowany wycinek skóry podzielony został na 26 obszarów elementarnych z węzłami w środku każdego obszaru. W pierwszej warstwie umieszczono 2 węzły, w drugiej - 14, w trzeciej - 10. Odległości między węzłami wynosiły odpowiednio w warstwie pierwszej, drugiej i trzeciej: 0,0625, 0,05 i 0,775 mm. Węzeł symulujący termoreceptor zimna umieszczony był na głębokości 0,2 mm, węzeł symulujący termoreceptor ciepła - na głębokości 0,5 mm, zgodnie z danymi literaturowymi dotyczącymi położenia termoreceptorów w skórze.

W trakcie obliczeń symulowano sinusoidalne zmiany prędkości powietrza nawiewanego wokół założonych wartości średnich $\bar{V}=0,1, 0,2$ i $0,3\text{m/s}$, zakładając w kolejnych seriach 18 różnych częstotliwości zmian: $f=0,001, 0,002, 0,005, 0,01, 0,02, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 0,625, 0,8, 1, 1,25, 2, 2,5, 4, 5, 10\text{ Hz}$.

Symulacje przeprowadzono w dwóch wariantach:

- dla wszystkich trzech prędkości średnich, $\bar{V}=0,1, 0,2$ i $0,3\text{ m/s}$, przyjmując amplitudę fluktuacji prędkości $V_m=50\% \bar{V}$,
- dla prędkości $\bar{V}=0,2\text{ m/s}$, przyjmując kolejno amplitudę fluktuacji prędkości $V_m=10, 50, 100\% \bar{V}$.

Symulacje prowadzono dla 100 okresów, gdyż dopiero po takim czasie uzyskiwano ustalone amplitudy temperatur w węzłach odpowiadających termoreceptorom, przyjmując każdorazowo krok czasowy $\Delta\tau=1/1000$ okresu.

W wyniku symulacji numerycznych otrzymano rozkłady temperatur w węzłach, na podstawie których, dla węzłów odpowiadających termoreceptorom, obliczono maksymalną wartość bezwzględną pochodnej $dt_R/d\tau$ i sporządzono charakterystyki częstotliwościowe dla obu termoreceptorów. Charakterystyki te przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Kształt charakterystyk otrzymanych dla termoreceptora zimna jest zgodny z kształtem krzywych uzyskanych z badań z udziałem ludzi (rys.3), jednakże wartości częstotliwości fluktuacji, dla których występuje maksimum, są nadal różne od 0,5 Hz, chociaż różnica jest znacznie mniejsza niż otrzymana z modelu opracowanego poprzednio, zakładającego fluktuacje temperatury na powierzchni skóry.

Ze względu na tę rozbieżność przeanalizowano zmiany temperatury termoreceptora zimna dla ustalonych bezfluktuacyjnych przepływów powietrza z różnymi prędkościami i temperaturami. Ponieważ w ustalonych warunkach temperatura termoreceptora jest stała, termoreceptor wysyła impulsy o stałej częstotliwości. Te impulsy odbierane są w mózgu

człowieka i w zależności od ich częstotliwości tworzone jest wrażenie odczuć ciepłych. Powinna więc zachodzić dobra korelacja pomiędzy temperaturą termoreceptora i odczuciem ciepłym wyrażonym przez wskaźnik ryzyka przeciągu.

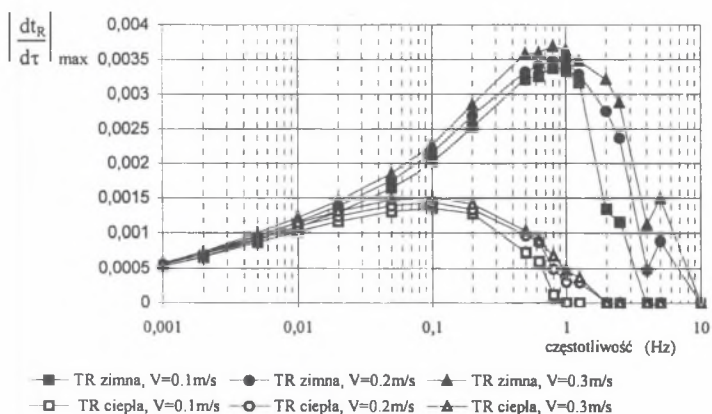
Wyniki analiz przedstawia rysunek 4, ilustrujący zależność wskaźnika ryzyka przeciągu od temperatury termoreceptora zimna w stanie ustalonym, wyznaczoną dla prędkości V zmieniającej się od 0,1 do 0,4 m/s z krokiem 0,025 m/s i temperatury otoczenia t_a zmieniającej się dla każdej z tych prędkości od 20 do 26°C z krokiem 0,5°C. Z powodu widocznego braku korelacji pomiędzy wskaźnikiem ryzyka przeciągu i temperaturą termoreceptora podjęto próbę kolejnego zmodyfikowania modelu.

3. Model zakładający rozkład typu pierwiastkowego dla konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła

Biorąc pod uwagę zależność lokalnego współczynnika wnikania ciepła nie tylko od prędkości nawiewanego powietrza, ale również od tworzącej się na skutek konwekcji naturalnej warstwy przyściennej wokół ciała człowieka, w modelu uwzględniono zarówno konwekcję naturalną, jak i konwekcję wymuszoną.

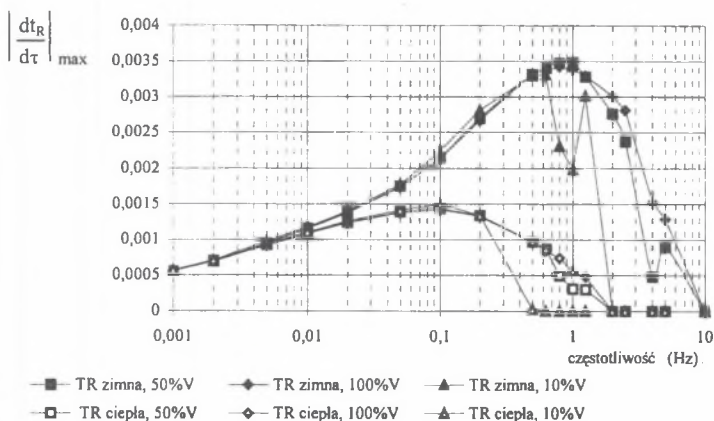
Warstwa przyścienna powoduje praktycznie brak odczuwania przez człowieka prędkości powietrza mniejszych od 0,15 m/s. Dla małych prędkości wartość całkowitego konwekcyjnego współczynnika wnikania jest zatem stała, równa współczynnikowi wnikania dla konwekcji naturalnej, którego wartość, zgodnie z danymi literaturowymi [13], przyjęto jako $\alpha_{nc}=3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

W przypadku konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła dla konwekcji wymuszonej, dane liczbowe podawane w literaturze są bardzo różne. Rozbieżności występują już dla wartości średnich współczynnika, liczonego dla całego ciała. W wielu źródłach, np. [13], podawana jest jednak jego zależność pierwiastkowa od prędkości średniej z różnymi współczynnikami proporcjonalności, zmieniającymi się od ok. 8 do 13. Jeszcze mniej zbliżonych danych znaleźć można na temat wartości współczynnika lokalnego, ale wiadomo, zarówno z badań eksperymentalnych [9,13], jak i z obliczeń numerycznych [14], że jego wartość może być dwukrotnie większa od wartości współczynnika średniego.



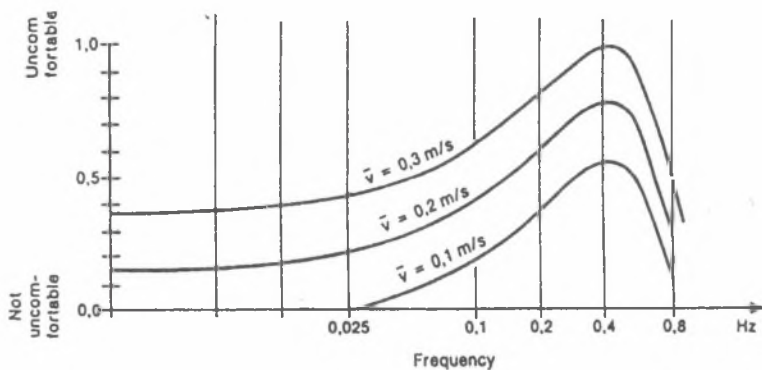
Rys. 1. Charakterystyki częstotliwościowe termoreceptora zimna i ciepła dla prędkości $\bar{V}=0,1, 0,2$ i $0,3\text{ m/s}$ ($V_a=50\% \bar{V}$)

Fig. 1. Frequency characteristics of cold and warm thermoreceptor for velocities $\bar{V}=0,1, 0,2$ and $0,3\text{m/s}$ ($V_a=50\% \bar{V}$)

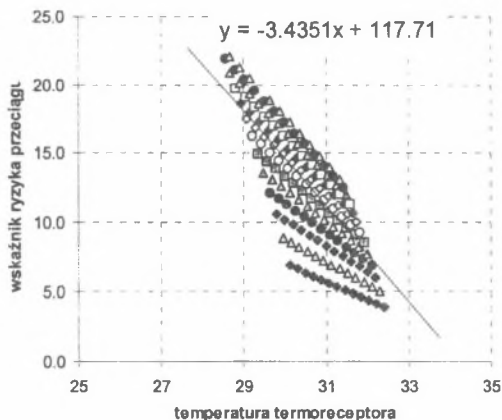


Rys. 2. Charakterystyki częstotliwościowe termoreceptora zimna i ciepła dla prędkości $\bar{V}=0,2\text{ m/s}$ ($V_a=10, 50, 100\% \bar{V}$)

Fig. 2. Frequency characteristics of cold and warm thermoreceptor for velocity $\bar{V}=0,2\text{ m/s}$ ($V_a=10, 50, 100\% \bar{V}$)



Rys. 3. Wyniki badań odczucia przeciągu prowadzonych przez Fangera i Pedersena [4]
 Fig. 3. Results of the tests of draught sensation after Fanger and Pedersen [4]



Rys. 4. Zależność wskaźnika ryzyka przeciągu od temperatury termoreceptora zimna w stanie ustalonym wyznaczona dla prędkości powietrza v zmieniających się od 0,1 do 0,4 m/s z krokiem 0,125 m/s i temperatury otoczenia t_a zmieniającej się dla każdej z tych prędkości od 20 do 26°C z krokiem 0,5°C (prosta $y = -3,4351x + 117,71$ - wyznaczona linia trendu)

Fig. 4. Draught risk dependence on cold thermoreceptor temperature determined for air velocities v increasing from 0,1 to 0,4 m/s by 0,125 m/s and for the ambient temperature t_a varying for each velocity from 20 to 26°C by 0,5°C (with linear correlation determined: $y = -3,4351x + 117,71$)

Biorąc pod uwagę powyższe informacje zaproponowano model, w którym założono, że współczynnik wnikania ciepła dla konwekcji wymuszonej jest proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego z prędkości średniej powietrza nawiewanego, z korektą zmniejszającą jego wartość dla małych prędkości, wg wzoru:

$$\alpha_{fc} = A\sqrt{V} \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{V-a}{\sqrt{2b}}\right)\right) \quad (6)$$

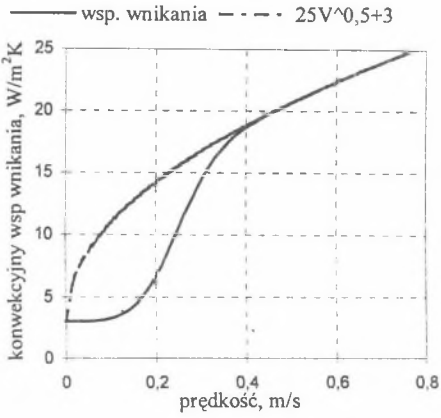
gdzie $\operatorname{erf}\left(\frac{V-a}{\sqrt{2b}}\right)$ funkcja błędu, $a=0,233$, $b=0,072$, (współczynniki wyznaczone na drodze optymalizacji komputerowej, dla których uzyskano maksymalne wartości współczynnika korelacji pomiędzy odsetkiem niezadowolonych DR a temperaturą termoreceptora zimna t_{Rz}), $A=25$.

Zaproponowany rozkład całkowitego konwekcyjnego współczynnika wnikania, porównany z wykresem odpowiedniej funkcji pierwiastkowej, przedstawia rys. 5.

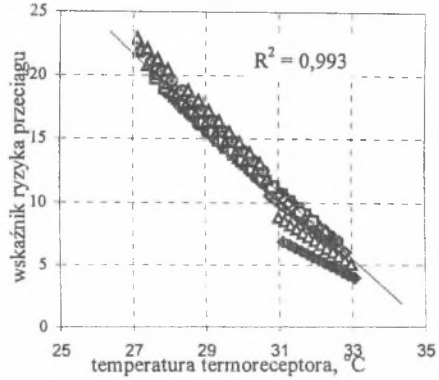
Na rys. 6 przedstawiono korelację wskaźnika ryzyka przeciągu i temperatury termoreceptora zimna w stanie ustalonym, dla prędkości v zmieniającej się od 0,1 do 0,4 m/s z krokiem 0,025 m/s i temperatury otoczenia t_a zmieniającej się dla każdej z tych prędkości od 20 do 26°C z krokiem 0,5°C, uzyskaną dla tak przyjętego konwekcyjnego współczynnika wnikania. Jest to zależność liniowa, o wysokim współczynniku korelacji $R^2=0,993$.

Przeprowadzono obliczenia numeryczne, w których uwzględniono model z rozkładem współczynnika wnikania ciepła typu pierwiastkowego, z korektą dla małych prędkości. Symulowany wycinek skóry człowieka miał takie same własności i grubość, jak w modelu z rozkładem liniowym. Zastosowano również taki sam podział na obszary elementarne. Średnią temperaturę wewnątrz ciała człowieka przyjęto jak poprzednio równą 36,4°C, natomiast aby jak najwierniej odzwierciedlić warunki eksperymentu Fangera z udziałem ludzi, temperaturę otoczenia przyjęto jako średnią z tego eksperymentu, tj. 23,3°C.

W trakcie obliczeń symulowano sinusoidalne zmiany prędkości powietrza nawiewanego wokół 3 średnich prędkości powietrza $\bar{V}=0,1, 0,2$ i $0,3$ m/s, zakładając w kolejnych seriach 18 takich samych jak poprzednio, częstotliwości fluktuacji prędkości oraz w celu zagęszczenia punktów na wznoszącej się i opadającej części krzywej, dwie dodatkowe częstotliwości $f=0,3125$ i $1,6$ Hz. Dla wszystkich trzech prędkości założono stałą wartość amplitudy fluktuacji prędkości $V_m=0,1$ m/s. Konieczne było również wydłużenie czasu symulacji, liczbę okresów zwiększono więc do 200.

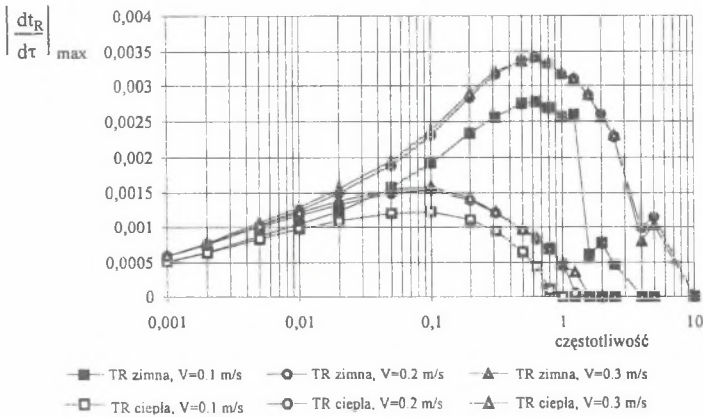


Rys. 5. Założony rozkład konwekcyjnego współczynnika wnikania
 Fig. 5. Assumed distribution of the convective heat transfer coefficient



Rys.6. Zależność wskaźnika ryzyka przeciągu od temperatury termoreceptora zimna
 Fig. 6. Correlation between draught risk and the cold thermoreceptor temperature

Na podstawie wyników obliczeń sporządzono charakterystyki częstotliwościowe dla modelu pierwiastkowego z korektą dla małych prędkości. Charakterystyki te przedstawiono na rys.7.



Rys.7. Charakterystyki częstotliwościowe dla termoreceptora zimna i ciepła dla prędkości $\bar{V}=0,1, 0,2$ i $0,3$ m/s ($V_m=0,1$ m/s)
 Fig. 7. Frequency characteristics of cold and warm thermoreceptor for velocities $\bar{V}=0,1, 0,2$ and $0,3$ m/s ($V_m=0,1$ m/s)

4. Podsumowanie i wnioski

Opracowano model, który w stanie ustalonym, przy ustalonej temperaturze i prędkości przepływu powietrza, daje temperaturę termoreceptora zimna dobrze skorelowaną ze wskaźnikiem ryzyka przeciągu. Obliczona według tego modelu wartość temperatury powierzchni skóry zgodna jest ze średnią wartością \bar{t}_s w danych warunkach.

Przeprowadzono symulacje reakcji termoreceptora na sinusoidalne zmiany prędkości powietrza, jakie nigdy dotychczas nie były wykonywane.

Maksima charakterystyk częstotliwości, uzyskanych z symulacji numerycznych dla termoreceptora zimna, wystąpiły dla wartości częstotliwości fluktuacji prędkości równej 0,625 Hz, a więc bardzo bliskiej wartości 0,5 Hz, uzyskanej w badaniach z udziałem ludzi.

LITERATURA

1. Fanger P.O.: Komfort cieplny, Arkady, Warszawa 1974.
2. Fanger P. O., Melikov A., Hanzawa H., Ring J.: Air Turbulence and Sensation of Draught, Energy and Buildings, No12, 1988.
3. ISO:7730-1984, Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.
4. Fanger P.O., Pedersen C.J.K.: Discomfort due to air velocities in spaces. Proc. Meeting of Commission B1,B2 and E1 of National Institute of Refrigeration, Vol. 4, 1997.
5. Hensel H.: Thermoreception and Temperature Regulation, Academic Press, London 1981.
6. Ring J., de Dear R., Melikov A.: Human thermal sensation: frequency response to sinusoidal stimuli at the surface of the skin, Energy and Buildings, 20, 1993.
7. Madsen T.L.: Why do even low air velocities cause thermal discomfort ?, Proc. 3rd Int. Conf. Indoor Air Quality and Climate, Vol.5, Swedish Council for Building Research, 1984.
8. Medyńska E., Popiołek Z., Skorek J.: Dyfuzja ciepła w skórze człowieka a odczucie ciepła i zimna, Materiały konferencyjne IX Międzynarodowej Konferencji: Air Conditioning and District Heating, Wrocław-Szklarska Poręba 1998.
9. Popiołek Z., Madsen T.L.: Correlation between the sensation of draught and the convective heat transfer coefficient around the human head, Proc. 7th Int. Conf. Indoor Air Quality and Climate, Vol.1, Nagoya, 1996.

10. Madsen T.L.: An apparatus for measuring the degree of thermal comfort and a system comprising such an apparatus, Application for US Patent.
11. Stolwijk J.A.J.: Mathematical Model of Thermoregulation, Rozdz. 48, Hardy J.D., Gagge, A.P, Stolwijk. J.A., Physiological and Behavioral Temperature Regulation, Charles C Thomas Publisher, Springfield, Illinois, 1970.
12. D.A. McIntyre, Indoor Climate, Applied Science Publishers Ltd, London 1980
13. McIntyre D.A.: Draughts on the face, The Electricity Council Research, ERC/M1119.
14. Murakami S.: Flow and Temperature Fields around Human Body with Various Room Air Distribution, CFD Study on Computational Thermal Manikin, Part 1, 1997

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Teresa Jędrzejewska-Ścibak

Abstract

The paper presents a model of heat flow through an element of human skin, taking into account thermoreception and designed to simulate sensation of local thermal discomfort caused by draught. The model simulates reaction of cold and warm thermoreceptor to periodical airflow. When defining the relation between the heat transfer coefficient and airflow velocity, two types of the relation were considered: linear and proportional to the square root of velocity with a correction for low velocities. Numerical simulations were carried out with the use of the model, assuming sinusoidal velocities of the airflow of constant amplitudes and different frequencies, which corresponded to the conditions assumed with the experiments with a group of people. There was a good agreement between the frequency characteristics of the cold thermoreceptor, acquired in result of the simulation and the results of experiments with people.