

## BADANIE STRAT CIEPLNYCH I TEMPERATURY W WYBRANYCH PUNKTACH POWIERZCHNI CIAŁA LUDZKIEGO PODDANEGO ODDZIAŁYWANIU STRUMIENIA POWIETRZA O RÓŻNEJ PRĘDKOŚCI

Katarzyna KLEMM\*, Piotr KONCA\*\*

\* Politechnika Łódzka, Instytut Architektury

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: [katarzyna.klemm@p.lodz.pl](mailto:katarzyna.klemm@p.lodz.pl)

\*\* Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: [piotr.konca@p.lodz.pl](mailto:piotr.konca@p.lodz.pl)

**Streszczenie:** W pracy przedstawione zostały wyniki badań wpływu strumienia powietrza o różnej prędkości na wielkość strat ciepła z powierzchni ciała ludzkiego do otoczenia. Szczególna uwaga została zwrócona na wpływ prędkości strugi powietrza na utratę ciepła z powierzchni osłoniętej i nieosłoniętej ciała.

**Słowa kluczowe:** eksperyment, człowiek, prędkość przepływu, temperatura, straty ciepła.

### 1. WPROWADZENIE

Człowiek należy do organizmów stałotemperaturowych, stąd zmiana warunków termicznych środowiska zewnętrznego znacząco wpływa na jego samopoczucie. Wymiana ciepła z powierzchni ciała człowieka do otoczenia na drodze konwekcji czy promieniowania uzależniona jest w dużym stopniu od zmieniających się warunków atmosferycznych. Temperatura skóry zmienia się stosownie do występujących wahań. Średnia temperatura skóry ludzkiej kształtuje się na poziomie 33,5°C. Maksymalna wartość temperatury rejestrowana jest w okolicy szyi, +35°C. Największe spadki temperatury występują w peryferyjnych częściach ciała, ponad 10°C, najmniejsze zaś na czole, 1°C. Odsłonięta głowa człowieka narażona jest więc na największe straty ciepła.

Przy bezwietrznej pogodzie i stałej temperaturze, w granicach +20°C, przewodnictwo skóry kształtuje się na poziomie 8W/m<sup>2</sup>K, zaś poziom metaboliczny, przy niskiej aktywności, około 70W/m<sup>2</sup>. Przewodnictwo cieplne skóry może osiągać maksymalną wartość 50W/m<sup>2</sup>K, w warunkach wysokiej temperatury, ponad +30°C [1].

Badania reakcji człowieka na zmieniające się warunki środowiska zewnętrznego stanowią podstawę wyznaczania kryteriów komfortu.

### 2. PROCEDURA BADAŃ

Badania prowadzone były przy wykorzystaniu tunelu o wymiarach W=1m, L=5m, H=1m. Do strefy badawczej, zlokalizowanej u wylotu tunelu doprowadzono strumień powietrza o różnych prędkościach średnich i różnej intensywności turbulencji.

Temperatura i wilgotność względna strumienia powietrza kształtowały się na stałym poziomie i wynosiły  $t = +20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 55\% \pm 2\%$ .

Pomiar temperatury i prędkości chwilowej prowadzony był przy wykorzystaniu czujników termooanemometrycznych, typ ATU.

Wilgotność względną powietrza określono przy pomocy czujnika typ HT 167. W czasie badań prowadzono jednocześnie rejestrację gęstości strumienia ciepła z części osłoniętej i nieosłoniętej ciała człowieka. Pomiar ten prowadzono przy wykorzystaniu czujnika Ahlborn typ 120.

Wszystkie wielkości fizyczne, które były punktem zainteresowania eksperymentu rejestrowane były w sposób dyskretny, w odstępach 1 sekundowych z ciągłym zapisem komputerowym. Dokładność pomiaru prędkości kształtowała się w granicach 0,2m/s a w przypadku temperatury i wilgotności odpowiednio na poziomie 0,1°C i 2%.

Prędkość średnia napływającego strumienia powietrza wynosiła 0,5m/s, 1,0m/s, 1,5m/s, 2,0m/s i 2,5m/s. Parametry przepływu podano w tablicy 1.

Tabela 1. Parametry strumienia napływającego powietrza (w odległości 150cm od osoby badanej)  
Table.1 Characteristic of the approaching flow (in the distance of 150cm from the human body)

Prędkość średnia strumienia powietrza [m/s]	Intensywność turbulencji [%]	Temperatura [°C]	Intensywność zmian temperatury [%]
0,5	0,00	20,8	0,00
1,0	0,00	20,8	0,242
1,5	0,00	20,7	0,224
2,0	2,46	20,7	0,273
2,5	1,96	20,9	0,152

Jednocześnie wykonywany był pomiar prędkości i temperatury w odległości 10cm, od powierzchni ciała człowieka. Gęstość strumienia ciepła oddawanego z powierzchni skóry rejestrowano w dwóch punktach pomiarowych tj. na czole i tułowiu. Badaniom poddane były osoby w wieku 25 lat, dla których metabolizm podstawowy kształtuje się na poziomie  $\sim 42\text{W/m}^2$  (kobiety) i  $\sim 52\text{W/m}^2$  (mężczyźni).

### 3. WYNIKI BADAŃ

W pierwszej kolejności rozważany był przypadek wymiany ciepła pomiędzy ciałem człowieka a jego otoczeniem na drodze konwekcji swobodnej. Pozwoliło to zwrócić uwagę na termiczną zależność między ciałem człowieka a środowiskiem zewnętrznym. Badania wykazały, że w cienkiej warstwie przy powierzchni ciała człowieka można zarejestrować bardzo słaby przepływ powietrza. Wyraźne unoszenie się powietrza rejestrujemy od poziomu szyi. Nad głową następuje przyspieszenie przepływu, który osiąga maksymalną prędkość rzędu 0,25m/s. Zjawisko to prezentowane było w wielu pracach, por. [2] [3], gdzie prowadzono badania na manekinach i człowieku. Podobne efekty uzyskano w przypadku analiz numerycznych przepływu powietrza wokół sylwetki człowieka, por. [3] [4].

W pracy przedstawiono wybrane wyniki z przeprowadzonego eksperymentu. Obserwacji podlegała wymiana ciepła z powierzchni ciała człowieka do otoczenia oraz przemieszczające się powietrze we wspomnianych wcześniej strefach obserwacji.

Pomiary temperatury i prędkości strumienia powietrza wykazały, że w obserwowanych obszarach wartości są zróżnicowane. Jako przykład niech posłużą dwie strefy, tj. strefa zlokalizowana w połowie wysokości człowieka, oraz na czole. W każdej z powyższych stref rejestrowano

dotąd dodatkowo temperaturę oraz prędkość przepływu powietrza w odległości 10cm od powierzchni.

Średnie wartości prędkości i temperatury oraz intensywność ich zmian dla dwóch analizowanych stref, przy założonych średnich prędkościach napływającego strumienia powietrza kształtowały się na poziomie, por.tab.2.

Tabela 2. Parametry strumienia powietrza w odległości 10cm od osoby badanej

Table.2 Characteristic of the approaching flow (in the distance of 10cm from the human body)

Prędkość średnia strumienia napływającego powietrza [m/s]	Prędkość średnia strumienia powietrza w odległości 10cm od powierzchni ciała [m/s]	Intensywność turbulencji [%]	Temperatura średnia strumienia powietrza w odległości 10cm od powierzchni ciała [°C]	Intensywność zmian temperatury [%]
0,5	0,6	4,787	23,2	0,057
1,0	1,0	3,210	23,2	0,061
1,5	1,5	2,762	23,2	0,079
2,0	1,9	1,510	23,3	0,056
2,5	2,3	0,801	23,5	0,232

Z przeprowadzonych badań wynika, że temperatura na powierzchni skóry oraz gęstość strumienia ciepła oddawanego w strefie czoła kształtowała się na poziomie por. tab.3. Natomiast temperatura powierzchni ciała, temperatura powierzchni odzieży oraz gęstość strumienia ciepła w strefie osłoniętej (poziom tułowia) przyjmowały wartości przedstawione w tabeli 4.

Tabela 3. Temperatura powierzchni ciała i gęstość strumienia ciepła w strefie odsłoniętej - czoło

Table.3 Temperature of human body and heat flux density in exposed area - forehead

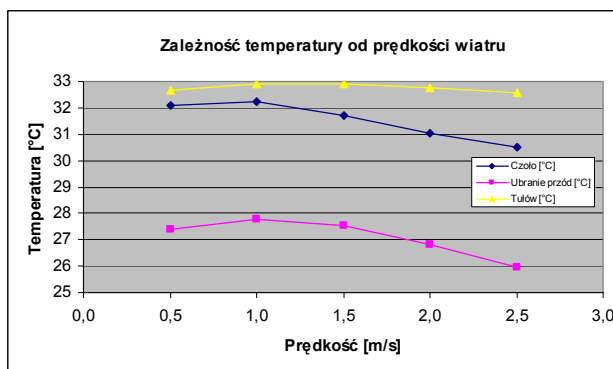
Prędkość średnia strumienia napływającego powietrza [m/s]	Temperatura powierzchni ciała osoby badanej [°C]	Gęstość strumienia ciepła [W/m <sup>2</sup> ]
0,5	32,1	162,5
1,0	32,2	199,6
1,5	31,7	243,2
2,0	31,1	263,2
2,5	30,5	268,7

Tabela 4. Temperatura powierzchni ciała, temperatura na powierzchni odzieży oraz gęstość strumienia ciepła w strefie osłoniętej - tułów

Table.4 Temperature of human body, temperature on clothes and heat flux density in covered area - torso

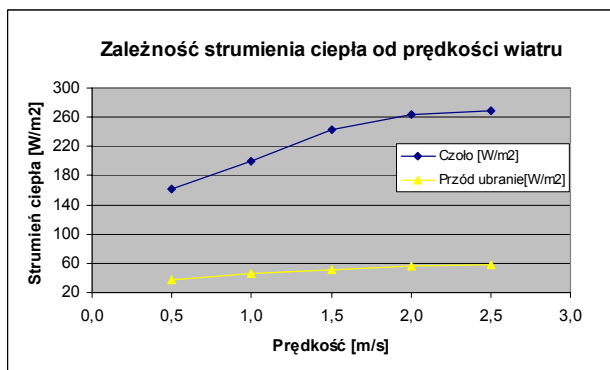
Prędkość średnia strumienia napływającego powietrza [m/s]	Temperatura powierzchni ciała osoby badanej [°C]	Temperatura na powierzchni odzieży [°C]	Gęstość strumienia ciepła [W/m <sup>2</sup> ]
0,5	32,7	27,4	37,2
1,0	32,9	27,8	46,1
1,5	32,9	27,5	50,4
2,0	32,7	26,8	56,6
2,5	32,6	26,0	57,8

Dla pełniejszego zobrazowania wpływu różnych prędkości napływającego powietrza na zmiany temperatury i gęstości strumienia ciepła przedstawiono je na wykresach (rys.1 i rys.2).



Rys.1. Wpływ prędkości napływającego powietrza na temperaturę w wybranych punktach pomiarowych

Fig. 1. The effect of approaching flow velocity on temperature in selected control points



Rys.2. Wpływ prędkości napływającego powietrza na wartość strumienia ciepła w wybranych punktach pomiarowych

Fig. 2. The effect of approaching flow velocity on heat flux in selected control points

#### 4. ANALIZA OTRZYMANYCH DANYCH

Wykorzystując dane uzyskane z badań możliwe jest oszacowanie utraty ciepła przez powierzchnię ciała ludzkiego przy zmiennych warunkach zewnętrznych.

Analizie poddane zostały dwa charakterystyczne punkty na powierzchni ciała człowieka, tj. w części odsłoniętej i nieodsłoniętej. Ocenie poddano dwa warianty, pierwszy gdy mamy do czynienia z ruchem swobodnym tj. przy minimalnej prędkości powietrza. Drugi przypadek dotyczy sytuacji, w której wokół ciała człowieka występował ruch powietrza o różnej prędkości i intensywności turbulencji.

W przypadku konwekcji swobodnej zauważalny ruch powietrza odbywa się od poziomu szyi w górę. W strefie tej zarejestrowano przepływ w granicach 0,25m/s zaś gęstość strumienia ciepła na czole wynosiła 130W/m<sup>2</sup>.

Wyraźny wzrost strat ciepła można zaobserwować przy prędkości napływającego strumienia powietrza poczynając już od prędkości 0,5m/s i intensywności turbulencji 5%. Gęstość strumienia ciepła oddawanego przez powierzchnię czoła kształtowała się na poziomie 162W/m<sup>2</sup> a temperatura powierzchni skóry 32,1°C. Przyjmując wartość średnią temperatury powietrza opływającego równą 23,2°C możemy przypuszczać, że wartość współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję może kształtować się na poziomie  $h_c = 15\text{W/m}^2\text{K}$ . Powyższą wartość oszacowano, zakładając, że straty w wyniku promieniowania będą na poziomie 15%

Bardziej złożony przebieg miała wymiana ciepła przez powierzchnię ciała ludzkiego do otoczenia przy wymuszonym ruchu powietrza. Przepływ powietrza w otoczeniu człowieka, przy prędkości przepływu w granicach 1,0m/s powoduje, że w bezpośrednim otoczeniu powierzchni ciała utrzymywała się intensywność turbulencji w granicach 3%. Gęstość strumienia ciepła w tym przypadku w części odsłoniętej (czoło) wynosiła 200W/m<sup>2</sup>. Przyjmując z pomiarów temperaturę na powierzchni czoła 32,2°C oraz temperaturę strumienia powietrza 23,2°C można założyć, że współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję kształtuje się na poziomie  $h_c = 19\text{W/m}^2\text{K}$ .

Dalszy wyraźny wzrost gęstości strumienia ciepła z powierzchni czoła notujemy przy prędkości 1,5m/s. W wyższych warunkach gęstość strumienia osiąga poziom 243 W/m<sup>2</sup>. Uwzględniając pozostałe dane por. tab.2 i tab.3 można określić, że współczynnik  $h_c$  kształtuje się na poziomie  $\sim 24\text{W/m}^2\text{K}$ .

Najwyższe wartości strat ciepła z powierzchni czoła zanotowano przy prędkościach strumienia powietrza równych 2,0m/s i 2,5m/s. Gęstość strumienia ciepła wynosiła w tych przypadkach 263W/m<sup>2</sup> i 269W/m<sup>2</sup>. Przyjmując temperaturę na powierzchni czoła  $\sim 31^\circ\text{C}$  i temperaturę strumienia powietrza 23°C można przypuszczać, że wartość współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję

będzie osiągała wartość  $h_c = 28\text{W/m}^2\text{K}$ . Należy równocześnie zauważyć, że poziom intensywności turbulencji jest niższy, w granicach od 1% do 2%. Można to tłumaczyć opływem powietrza wokół człowieka w płaszczyźnie poziomej. Przy niższych prędkościach napływającego strumienia powietrza tj. 0,5m/s do 1,5m/s obserwujemy ruch w górę i w dół a punkt graniczny znajduje się na wysokości około 2/3 wysokości człowieka. Powyższy efekt został również zauważony przy analizach symulacyjnych ruchu powietrza wokół sylwetki człowieka por. [3] [4].

Nieco inna sytuacja wynika z analizy strat ciepłych w części osłoniętej tj. tułowia. Zmiany prędkości strumienia powietrza od 0,5m/s do 2,5m/s nie wywołują zmian temperatury powierzchni ciała. W powyższym przypadku temperatura utrzymywała się na poziomie 32°C zaś temperatura na powierzchni odzieży wahała się od 28°C do 26°C. Gęstość strumienia ciepła ulegała zmianie od 37W/m<sup>2</sup> do 58W/m<sup>2</sup>. Przyjmując powyższe dane można ocenić, że współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję byłby w granicach  $\sim 7\text{W/m}^2\text{K}$ . Natomiast izolacyjność ubrania osoby poddanej badaniom kształtowała się na poziomie  $R_{\text{ubr}} \cong 0,12\text{m}^2\text{K/W}$ .

## 5. WNIOSKI

Prędkości powietrza na poziomie 0,25m/s do 0,30m/s nie mają większego wpływu na przebieg wymiany ciepła powierzchni ciała ludzkiego z otoczeniem.

Prędkości średnie na poziomie 0,5m/s do 1,5m/s wywołują przepływ turbulentny powietrza wokół ciała ludzkiego w granicach 3 do 5%, co powoduje wyraźny wzrost strat ciepłych, głównie w części odsłoniętej, gdzie przyrost może wynosić 50% w stosunku do strat przy prędkości 0,5m/s. Natomiast w części osłoniętej powyższy przyrost strat ciepłych jest mniejszy i wynosi około 36%.

W przypadku prędkości wyższych, tj. 2 do 2,5m/s straty ciepła w części odsłoniętej są wysokie około 265W/m<sup>2</sup> i są w miarę ustabilizowane. Podobna sytuacja ma miejsce w części osłoniętej, gdzie wielkość strat kształtuje się na poziomie 57W/m<sup>2</sup> i również obserwuje się pewną stabilizację. Można przypuszczać, że stopniowo zaczynają przeważać oddziaływania dynamiczne nad termicznymi.

Wskazane są dalsze badania w celu ustalenia wartości progowej oddziaływań termicznych, niezbędnej przy ustalaniu kryteriów komfortu wietrznego.

## EXAMINATION OF HEAT LOSSES AND TEMPERATURE IN SELECTED MEASUREMENT POINTS ON HUMAN BODY UNDER VARIOUS WIND CONDITION

**Summary:** The paper presents the experimental results of heat release from a human body caused by wind flow. The special attention has been paid to effect of wind speed on heat losses from exposed and covered surfaces of the body.

### Literatura

- [1] Śliwowski L.: *Mikroklimat wewnątrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniu*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000
- [2] Murakami S., Shinsuke K., Jie Z.: *Combined simulation of airflow and moisture transport for heat release from human body*. Building and Environment 35, 2000 s.489-500
- [3] Murakami S., Jie Z., Tatsuya H.: *CFD analysis of wind environment around a human body*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 83, 1999 s.393 – 408
- [4] Klemm K., Jabłoński M.: *Turbulentny przepływ strumienia powietrza wokół powierzchni ciała ludzkiego (analiza numeryczna)*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, 2007