

UTCI – nowy wskaźnik oceny obciążeń cieplnych człowieka

UTCI – new index for assessment of heat stress in man

KRZYSZTOF BŁĄZEJCZYK

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN,
00-818 Warszawa, Twarda 51/55; k.blaz@twarda.pan.pl

PETER BROEDE

Leibniz Research Centre for Working Environment and Human Factors,
Ardeystr. 67, D-44139 Dortmund, Germany; broede@ifado.de

DUSAN FIALA

University of Stuttgart, Keplerstraße 11, D-70174 Stuttgart, Germany;
dfiala@ibbte.uni-stuttgart.de

GEORGE HAVENITH

Loughborough University, Loughborough, LE11 3TU, UK; g.havenith@lboro.ac.uk

INGVAR HOLMÉR

Lund Technical University, SE-22100 Lund, Sweden; ingvar.holmer@design.ltn.se

GERD JENDRITZKY

University of Freiburg, Werderring 10, D-79085 Freiburg, Germany;
gerd.jendritzky@meteo.uni-freiburg.de

BERNHARDT KAMPMANN

University of Wuppertal, Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal, Germany;
BIML.Kampmann@T-Online.de

Zarys treści. W ciągu ostatnich stu lat opracowano kilkadziesiąt różnych wskaźników oceniających oddziaływanie środowiska atmosferycznego na człowieka. Większość z nich nie ma bezpośredniego odniesienia do reakcji fizjologicznych zachodzących w organizmie pod wpływem zmieniających się warunków termicznych otoczenia. W latach 1990. powstały tzw. wielowęzłowe (*multi node*) modele bilansu cieplnego człowieka, które opisują wszystkie złożone mechanizmy gospodarki cieplnej organizmu. Na bazie jednego z tych modeli powstał nowy wskaźnik termiczny oceniający obciążenia cieplne człowieka (*UTCI – Universal Thermal Climate Index*). W artykule przedstawia się założenia metodyczne wskaźnika, zagadnienia związane z przygotowaniem danych wejściowych oraz podstawy interpretacji wskaźnika.

Słowa kluczowe: wskaźniki bioklimatyczne, bilans cieplny człowieka, obciążenia cieplne, *UTCI*.

Wprowadzenie

Od początku XX wieku trwają prace nad opracowaniem wskaźnika obrazującego wpływ na organizm różnych elementów meteorologicznych, przede wszystkim: temperatury i wilgotności powietrza, promieniowania słonecznego i prędkości wiatru. Poszukiwania te toczyły się dwoma torami:

- konstruowania przyrządu (analogu ciała człowieka), na którego wskazania wpływają różne elementy pogody,
- stworzenia wzoru matematycznego, w skład którego wchodzi wartości różnych elementów meteorologicznych, a wartość wynikowa jest wskaźnikiem odczuwalności ciepłej człowieka.

Przy konstruowaniu przyrządów mających służyć ocenie oddziaływania kilku czynników meteorologicznych na organizm człowieka zakładano, że powierzchnia przyrządu podlega takim samym procesom wymiany ciepła jak powierzchnia ciała człowieka. Ciało człowieka bywało odwzorowywane jako walec (katatermometr, miernik odczuć ciepłych), kula (frygorymetr i frygorygraf, termometr kulisty) i elipsoida obrotowa (miernik komfortu ciepłego). Analogi ciała człowieka przyjmowały także formę manekinów ciepłych, tzw. „coper man” (Błażejczyk, 2004; Bradtke i Liese, 1958; Flach, 1981; Jokl, 1965; Lee, 1980; Parsons, 2003).

Obok wymienionych wyżej przyrządów pomiarowych do oceny warunków biometeorologicznych i bioklimatycznych stosuje się tzw. kompleksowe wskaźniki biometeorologiczne, które ujmują w postać wzorów empirycznych związku między wartościami kilku elementów meteorologicznych. Poszczególne wartości tych wskaźników przypisywane są określone, subiektywne odczucia ciepłe ludzi. Skale odczuć ciepłych są tworzone na podstawie wyników badań ankietowych przeprowadzanych na grupach ludzi ekspozowanych na działanie czynników meteorologicznych w komorach klimatycznych lub w terenie otwartym. Powstało w ten sposób wiele wskaźników opisywanych w licznych publikacjach (Błażejczyk, 2004; Flach, 1981; Jankowiak, red., 1976; Jokl, 1965; Kiełczewski i Bogucki, 1972; Klonowicz i Kozłowski, 1970; Kozłowska-Szczęsna i inni, 1997; Landsberg, 1972; Lee, 1980; Parsons, 2003).

O wyborze odpowiedniego wskaźnika biometeorologicznego decyduje cel opracowania (np. ocena odczuć ciepłych człowieka w ruchu, w spoczynku, w cieniu, w słońcu), dane meteorologiczne, którymi dysponujemy, a także rodzaj środowiska termicznego lub sezon, który podlega ocenie. Część wskaźników może być bowiem stosowana tylko w szczególnych warunkach otoczenia (np. tylko w miesiącach zimowych). Należy także pamiętać, że większość z nich nie ma bezpośredniego odniesienia do reakcji fizjologicznych zachodzących w organizmie pod wpływem zmieniających się warunków termicznych otoczenia.

Począwszy od lat 1960. rozwijają się badania bilansu cieplnego człowieka, a każdy z prostych modeli proponuje różne wskaźniki oceny warunków termicznych (Błażejczyk, 2004). W modelach tych rozważa się jedynie wymianę ciepła między powierzchnią ciała a otoczeniem, traktując organizm jako jedną całość, bez uwzględniania jego złożonej budowy wewnętrznej i anatomicznej. Spośród wielu modeli można jako przykłady wymienić:

- MEMI i wyprowadzony z niego wskaźnik *PET* (*Physiological Equivalent Temperature*) (Höppe, 1999);
- Klima-Michel-Model i wskaźnik *PT* (*Percived Temperature*) (Jendritzky, 1990);
- model Gaggego i wskaźnik *SET** (*Standardised Equivalent Temperature for outdoor applications*) (Gagge i inni, 1971; Pickup i de Dear, 2000);
- MENEX_2005 i wskaźniki: *PST* (*Physiological Subjective Temperature*), *PhS* (*Physiological Strain*) (Błażejczyk, 2004, 2007).

Modele te i wskaźniki wprowadziły nową jakość do badań bioklimatycznych. Odnoszą się one do rzeczywistych reakcji fizjologicznych organizmu na bodźce atmosferyczne, a niektóre z nich uwzględniają także indywidualne cechy osobnicze i procesy adaptacyjne do warunków otoczenia.

Kolejnym krokiem w kierunku pełnego uwzględnienia wszystkich procesów i mechanizmów gospodarki cieplnej organizmu są tzw. modele wielowęzłowe bilansu cieplnego (*multi node models*), w których uwzględnia się przepływy ciepła pomiędzy wnętrzem organizmu i jego poszczególnymi warstwami (kostną, mięśniową, tłuszczową, podskórną, skórną) oraz pomiędzy powierzchnią ciała i otoczeniem. Bierze się także pod uwagę specyficzne cechy przepływu i wymiany ciepła w różnych częściach ciała (tułów, głowa, kończyny dolne i górne). Za ich pomocą można ilościowo określić natężenie poszczególnych procesów termoregulacyjnych w odmiennych stanach środowiska oraz wskazać takie stany atmosfery, które zagrażają zdrowiu lub życiu człowieka (Fiala i inni, 1999, 2001, 2003, 2005; Tanabe i inni, 2002; Huizenga i inni, 2001; Jendritzky i inni, 2002).

Celem opracowania jest przedstawienie założeń i podstaw metodycznych nowego wskaźnika oceny warunków bioklimatycznych – *UTCI* (*Universal Thermal Climate Index*). Wskaźnik powstał we współpracy międzynarodowej realizowanej w ramach tzw. Akcji COST 730, prowadzonej w latach 2005–2009 (Jendritzky i inni, red., 2009).

Podstawowe założenia wskaźnika

Duża liczba wskaźników i metod oceny wpływu środowiska termicznego na człowieka nie pozwala na obiektywne porównanie wyników badań prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych. Dlatego na kongresie Międzynarodowego Stowarzyszenia Biometeorologii w Sydney w listopadzie 1999 r. powstała grupa badawcza mająca na celu stworzenie nowego, uniwersalnego wskaźnika

oceny warunków bioklimatycznych. Wskaźnik ten, nazwany roboczo *Universal Thermal Climate Index (UTCI)*, powinien dać pełne informacje o procesach termofizjologicznych w pełnym zakresie możliwych warunków środowiskowych (z uwzględnieniem sezonowości klimatu) i we wszystkich skalach przestrzennych, z możliwością zastosowania w najważniejszych aplikacjach z zakresu bioklimatologii człowieka.

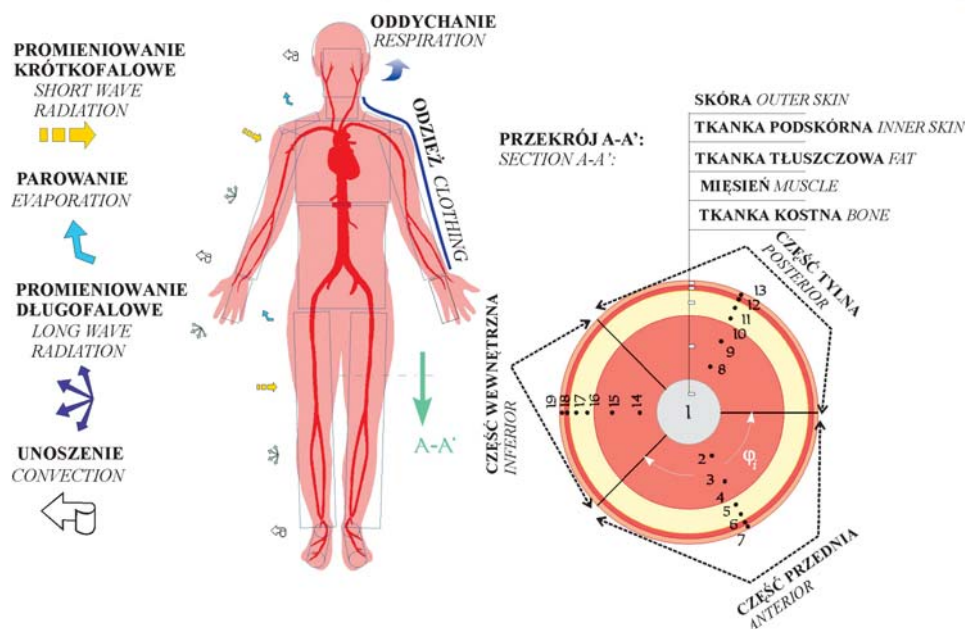
Inicjatorem i przewodniczącym tej grupy badawczej jest prof. Gerd Jendritzky z Niemieckiej Służby Pogody we Freiburgu. Grupa skupiła czołowych naukowców zajmujących się tymi zagadnieniami (m.in. P. Höppe, R.G. Steadman, R. de Dear, Ch. de Freitas, K. Błażejczyk, I. Holmér). W wyniku konsultacji i dyskusji wszyscy członkowie grupy zgodzili się, że podstawą nowego wskaźnika powinna być najnowsza generacja wielowęzłowych modeli bilansu cieplnego człowieka. Dodatkowo przyjęto, że wskaźnik powinien mieć wymiar termiczny (°C).

Kolejnym, ważnym krokiem w kierunku stworzenia wskaźnika spełniającego powyższe kryteria było powstanie interdyscyplinarnego zespołu badawczego w ramach europejskiego programu COST (Współpraca w Dziedzinie Nauki i Rozwoju Technologicznego – *Cooperation in Science and Technical Development*). Na początku 2005 r. program współpracy został zaakceptowany jako Akcja COST 730. Uczestniczyli w niej naukowcy z 18 krajów europejskich oraz Izraela, Kanady, Australii i Nowej Zelandii; z Polski prof. Krzysztof Błażejczyk z IGiPZ PAN, mgr Barbara Wojtach z IMGW oraz mgr Anna Kunert z UKW. Należy dodać, że istotą programu COST jest wspieranie finansowe spotkań naukowych (dyskusje, seminaria), a nie samych badań. Badania są prowadzone w ramach funduszy narodowych uczestników Akcji. W Polsce na prowadzenie badań, będących częścią Akcji COST 730, IGiPZ PAN uzyskał specjalny grant naukowy, przyznany przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, „Weryfikacja wielosegmentowego modelu bilansu cieplnego człowieka oraz uniwersalnego wskaźnika temperatury odczuwalnej”. Kierownikiem projektu był K. Błażejczyk. Po kilkuletniej, intensywnej pracy w najlepszych ośrodkach naukowych Europy oraz po licznych spotkaniach, dyskusjach i walidacjach udało się stworzyć nowy wskaźnik *UTCI*, który pozwala na określenie obciążeń cieplnych organizmu w różnych warunkach termicznych otoczenia.

Fizjologiczne podstawy wskaźnika *UTCI*

Jak już wspomniano, wskaźnik *UTCI* opiera się na analizie bilansu cieplnego człowieka, dokonywanej przy zastosowaniu wielowęzłowego modelu wymiany ciepła. Spośród kilku opisanych w literaturze modeli wybrano model Fiali (Fiala i inni, 2001). O wyborze tego modelu zdecydowały: duża zgodność obliczanych parametrów wymiany ciepła z danymi eksperymentalnymi, dostępność do kodów źródłowych modelu oraz możliwość udziału autora modelu w zespole badawczym.

Model Fiali składa się z dwóch podsystemów regulacji wymiany ciepła: pasywnego i aktywnego. Podsystem pasywny uwzględnia fizyczne elementy transportu ciepła wewnątrz organizmu oraz na powierzchni ciała. Jego składowymi są krążenie krwi i równania wymiany ciepła (opisujące produkcję ciepła, jego transport w organizmie i wymianę z otoczeniem). Obejmuje on także numeryczne algorytmy uwzględnionych procesów (ryc. 1). Podsystem pasywny rozpatruje przepływy ciepła w obrębie 19 różnych części ciała (głowa, twarz, szyja, barki, ramiona, przedramiona, dłonie, uda, łydki, stopy oraz górna i dolna część tułowia). Każda z tych części jest dodatkowo podzielona na 5 warstw (kość, mięsień, tkanka tłuszczowa i podskórna oraz skóra) i dwa-trzy segmenty (przedni, tylny i wewnętrzny). Każda z tych części ciała, jego warstwa i segment są reprezentowane przez jeden węzeł. Łącznie algorytmy opisują przepływy ciepła pomiędzy ponad trzystoma węzłami.



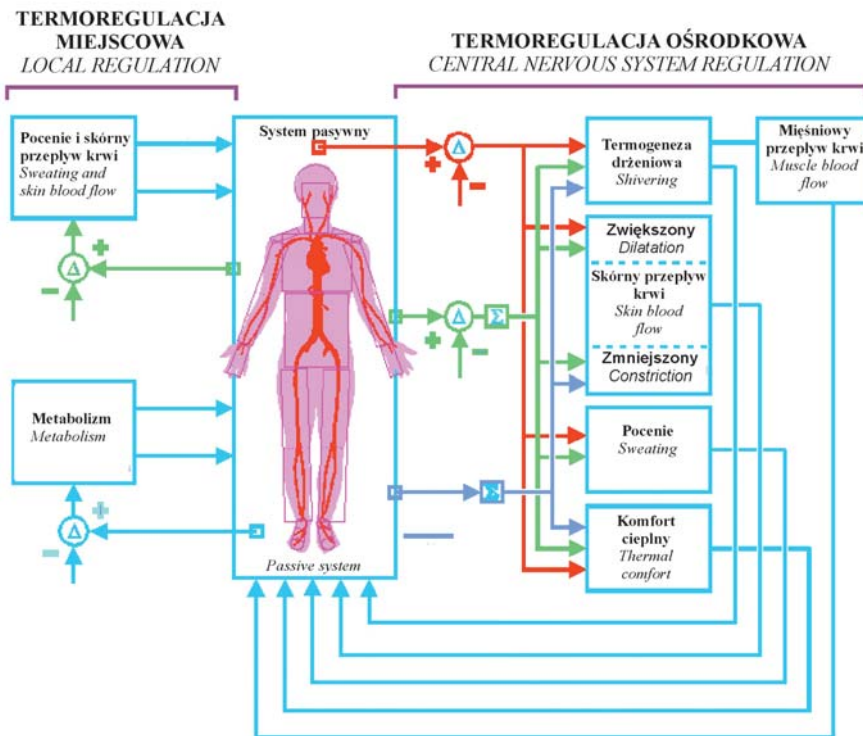
Ryc. 1. Podsystem pasywny modelu Fiali; 1–19 –numery węzłów wymiany ciepła w obrębie uda
Passive sub-system of Fiala model; 1–19 – numbers of nodes at thigh cross section

Drugi podsystem, tzw. aktywny, uwzględnia fizjologiczne mechanizmy termoregulacji i obejmuje:

- skórę z rozmieszczonymi w niej gruczołami potowymi oraz receptorami ciepła i zimna,
- system nerwowy przesyłający sygnały z termoreceptorów do mózgu,
- podwzgórze, czyli centralny ośrodek termoregulacji w mózgu,

- reakcje termoregulacyjne stymulowane przez podwzgórze, a mające na celu zachowanie komfortu cieplnego:
 - wydzielanie potu (maksymalnie około $1,5 \text{ l}\cdot\text{godz}^{-1}$, co w przypadku jego wyparowania pozwala na odprowadzenie 1000 W ciepła),
 - produkcję ciepła w wyniku tzw. termogenezy drżeniowej (*shivering thermogenesis* – maksymalnie 400 W), określanej niekiedy drżeniem mięśniowym;
 - zmianę tempa skórniego przepływu krwi: wzrost przepływu (*vasodilatation* – maksymalnie $3\text{--}4 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$), zahamowanie przepływu (*vasoconstriction*).

Model uwzględnia aktywne, fizjologiczne procesy termoregulacji, które zmieniają wielkość strumieni ciepła (ryc. 2). Dodatkową cechą modelu Fiala jest dynamiczne analizowanie składników bilansu cieplnego w dowolnym czasie (model testowano na danych obejmujących czas od 10 minut do 12 godzin).



Ryc. 2. Podsystem aktywny modelu bilansu cieplnego człowieka Fiala
Active sub-system of Fiala model

Danymi wejściowymi do modelu są informacje meteorologiczne (temperatura powietrza, ciśnienie pary wodnej, prędkość wiatru oraz tzw. średnia temperatura promieniowania) oraz fizjologiczne (metaboliczna produkcja ciepła,

albedo powierzchni ciała i odzieży, współczynnik emisyjności ciała i odzieży, izolacyjność termiczna i ewaporacyjna odzieży). Model dostarcza informacji o wielkości poszczególnych fizjologicznych parametrów organizmu (uwilgotnienie skóry, wydzielanie potu, skórny przepływ krwi, termogeneza drżeniowa, temperatura wewnętrzna, temperatura skóry w różnych częściach ciała) oraz strumieni ciepła (konwekcyjnego, radiacyjnego, ewaporacyjnego, respiracyjnego i kondukcyjnego).

Cały model i jego poszczególne komponenty podlegały kilkakrotnej weryfikacji, poprzez porównanie obliczonych danych wyjściowych z odpowiednimi danymi eksperymentalnymi. Pozwoliło to na wprowadzenie niezbędnych korekt, zwłaszcza w odniesieniu do modelowania strumieni przepływu krwi i termogenezy drżeniowej oraz termoizolacyjnych właściwości odzieży.

Koncepcja wskaźnika

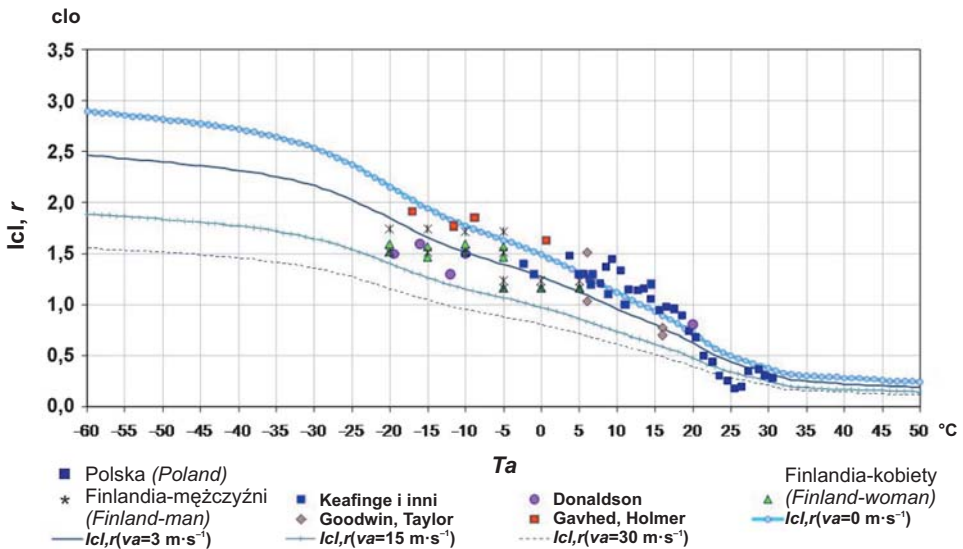
Wskaźnik *UTCI* jest definiowany jako ekwiwalentna temperatura powietrza, przy której w warunkach referencyjnych podstawowe parametry fizjologiczne organizmu przyjmują takie same wartości jak w warunkach rzeczywistych. Zakłada się zatem, że wymiana ciepła między człowiekiem a otoczeniem zależy tylko od temperatury powietrza (T_a), przy stałym poziomie pozostałych parametrów meteorologicznych. Aby określić taką właśnie temperaturę powietrza trzeba najpierw obliczyć bilans cieplny człowieka w warunkach rzeczywistych. Następnie, zakładając stałe warunki referencyjne, należy metodą kolejnych przybliżeń znaleźć taką temperaturę powietrza, przy której parametry fizjologiczne przyjmą takie same wartości jak w warunkach rzeczywistych. Jako referencyjne warunki meteorologiczne przyjęto:

- średnią temperaturę promieniowania (T_{mrt}) równą temperaturze powietrza (brak promieniowania słonecznego i ciepłego);
- prędkość wiatru (v_a) na wysokości 10 m nad gruntem, równą $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- względną prędkość ruchu powietrza (v') związaną z poruszaniem się, równą $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- ciśnienie pary wodnej (v_p) odpowiadające 50% wilgotności względnej (przy temperaturze $<29^\circ\text{C}$) i równą 20 hPa przy temperaturze wyższej od 29°C .

Przyjęto także stałe parametry fizjologiczne:

- metaboliczną produkcję ciepła (M) równą $135 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (co odpowiada marszowi z prędkością 4 km na godzinę);
- izolacyjność termiczną odzieży (I_{cl}) proporcjonalną do rzeczywistych warunków termicznych i wietrznych (ryc. 3).

Przyjęto 7 różnych parametrów fizjologicznych, istotnych dla prawidłowego funkcjonowania gospodarki cieplnej organizmu, dla których poszukiwano ekwiwalentnej temperatury *UTCI*. Poziom każdego z tych parametrów rozpatrywano po krótkiej (30 minut) i długiej (120 min) ekspozycji (tab. 1).



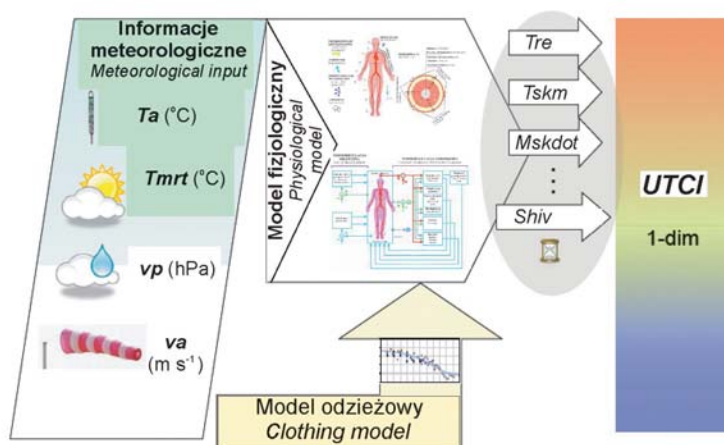
Ryc. 3. Wynikowa izolacyjność termiczna odzieży ($I_{cl, r}$) według różnych badań oraz według przyjętego modelu jako funkcja temperatury otoczenia (T_a) i prędkości wiatru (v_a)

Resultant thermal insulation of clothing ($I_{cl, r}$) due to different authors and new developed clothing model as a function of ambient temperature (T_a) and wind speed (v_a)

Tabela 1. Parametry fizjologiczne uwzględnione w wyznaczaniu wskaźnika $UTCI$
Physiological parameters considered at calculations of $UTCI$

Lp.	Parametr fizjologiczny <i>Physiological variable</i>	Symbol <i>Symbol</i>	Wymiar <i>Unit</i>
1	Temperatura rektalna <i>Rectal temperature</i>	T_{re}	°C
2	Średnia temperatura skóry <i>Mean skin temperature</i>	T_{skm}	°C
3	Temperatura skóry twarzy <i>Face skin temperature</i>	T_{skfc}	°C
4	Wydzielanie potu <i>Sweat secretion</i>	M_{skdot}	$g \cdot min^{-1}$
5	Ciepło wytworzone w termogenezie drżeniowej <i>Shivering thermogenesis</i>	$Shiv$	W
6	Uwilgotnienie skóry <i>Skin wettedness</i>	W_{etA}	% powierzchni ciała % of body area
7	Skórny przepływ krwi <i>Skin blood flow</i>	V_{blSk}	% wartości podstawowej % of basic value

Istotną cechą wskaźnika *UTCI* jest zastąpienie wielowymiarowych informacji wejściowych (T_a , T_{mrt} , vp , va , v' , M) i wyjściowych (T_{re} , T_{skm} , T_{skfc} , $Mskdot$, $Shiv$, $WettA$, $VblSk$) modelu Fialy jednowymiarową wartością (wyrażoną w stopniach Celsjusza), która zawiera podobny ładunek informacji o procesach fizjologicznych istotnych z punktu widzenia funkcjonowania organizmu człowieka w zmieniających się warunkach termicznych (ryc. 4).



Ryc. 4. Koncepcja przejścia od wielowymiarowego pola informacji meteorologiczno-fizjologicznej do jednowymiarowego wskaźnika *UTCI*; T_a – temperatura powietrza, T_{mrt} – średnia temperatura promieniowania, vp – ciśnienie pary wodnej, va – prędkość wiatru

Concept of transient from multi-dimensional meteorological and physiological information to one-dimensional *UTCI*; T_a – air temperature, T_{mrt} – mean radiant temperature, vp – vapour pressure, va – wind speed

Procedura liczenia *UTCI*

Jak już wspomniano, pełny sposób wyznaczenia wartości *UTCI* polega na wielokrotnym obliczaniu bilansu cieplnego człowieka. Jest to zadanie bardzo czasochłonne, szczególnie w przypadku dużych zbiorów danych meteorologicznych. Dlatego zdecydowano się na utworzenie modelu regresyjnego, pozwalającego na szybkie określenie wartości *UTCI* w stosunkowo krótkim czasie i z dostatecznie dużą dokładnością. Wykorzystano w tym celu funkcję wykładniczą 6 stopnia:

$$UTCI = f(T_a, vp, va, dT_{mrt}),$$

gdzie: T_a – temperatura powietrza (°C), vp – ciśnienie pary wodnej (hPa), va – prędkość wiatru na wysokości 10 m nad gruntem, dT_{mrt} – różnica pomiędzy średnią temperaturą promieniowania a temperaturą powietrza (°C).

Samo równanie regresji składa się z 211 członów (aneks 1). Przygotowano zatem prosty w obsłudze program działający w środowisku DOS oraz arkusz kalkulacyjny EXCEL dla środowiska WINDOWS. Algorytmy *UTCI* zostały także zaimplementowane do wersji 2.6. programu BioKlima.

Ważnym elementem obliczania *UTCI* jest przygotowanie odpowiednich danych wejściowych. O ile przygotowanie zmiennych meteorologicznych: temperatury powietrza, ciśnienia pary wodnej oraz prędkości wiatru nie wymaga specjalnego komentarza, o tyle zmiennej nazywanej „średnia temperatura promieniowania” (*Tmrt*) należy poświęcić nieco uwagi. *Tmrt* oznacza temperaturę cienkiej warstwy powietrza otaczającej ciało człowieka. Kształtuje się ona pod wpływem strumieni promieniowania słonecznego (bezpośredniego – *Kdir*, rozproszonego – *Kdif*, odbitego od podłoża – *Kref*) i długofalowego (podłoża – *Lg*, zwrotnego atmosfery – *La*) docierającego do człowieka. Mówiąc inaczej, średnia temperatura promieniowania jest termicznym wymiarem pola promieniowania otaczającego ciało człowieka. *Tmrt* można określić jako funkcję:

$$Tmrt = f(Kdir, Kdif, Kref, La, Lg).$$

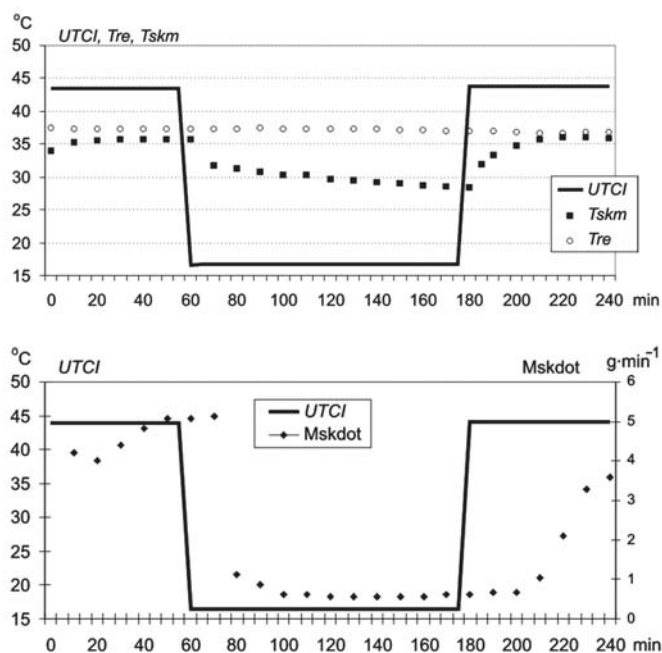
W praktyce obserwacji meteorologicznych pomiary strumieni promieniowania słonecznego i długofalowego należą do rzadkości. Do wyznaczenia wartości *Tmrt* trzeba zatem stosować niekiedy metody pośrednie szacowania strumieni promieniowania. Można tu wykorzystać procedury opracowane przez Niemieckie Stowarzyszenie Inżynierów (VDI..., 1994) lub procedury zaimplementowane w programie BioKlima© v.2.6. Obliczenie *Tmrt* według procedur VDI jest możliwe za pomocą programu Rayman (Matzarakis i Rutz, 2005). Program BioKlima jest dostępny na stronie www.igipz.pan.pl/geoekoklimat/blaz/bioklima.htm.

Weryfikacja *UTCI*

Weryfikację wskaźnika *UTCI* przeprowadzono poprzez porównanie jego wartości z niektórymi parametrami fizjologicznymi obserwowanymi eksperymentalnie oraz poprzez odniesienie *UTCI* do wartości innych wskaźników bioklimatycznych.

Rycina 5 ilustruje zmiany *UTCI* i niektórych parametrów fizjologicznych podczas trwającego 4 godziny eksperymentu (Stolwijk i Hardy, 1966). Przez pierwszą i ostatnią godzinę badana osoba przebywała w temperaturze 43°C, natomiast przez drugą i trzecią godzinę badań – w temperaturze 17°C. Wilgotność względna powietrza i prędkość ruchu powietrza nie zmieniły się w ciągu całego eksperymentu i wynosiły odpowiednio 30% i 0,2 m·s⁻¹. Średnia temperatura promieniowania była równa temperaturze powietrza. Widać wyraźne, synchroniczne zmiany *UTCI* oraz temperatury skóry i ilości wydzielonego potu. Obserwuje się przy tym pewne opóźnienie reakcji organizmu na zmianę bodźca

termicznego, zwłaszcza przy przejściu z temperatury umiarkowanej ($UTCI$ około 16°C) do wysokiej ($UTCI$ około 45°C).



Ryc. 5. Przebieg $UTCI$, temperatury rektalnej (Tre), średniej temperatury skóry ($Tskm$) i ilości wydzielonego potu ($Mskdot$) podczas 4-godzinnej ekspozycji w zmieniającej się temperaturze otoczenia ($17 \rightarrow 43 \rightarrow 17^{\circ}\text{C}$)

Changes in $UTCI$, rectal temperature (Tre), mean skin temperature ($Tskm$) and sweat secretion ($Mskdot$) during 4-hours exposure at different ambient temperature ($17 \rightarrow 43 \rightarrow 17^{\circ}\text{C}$)

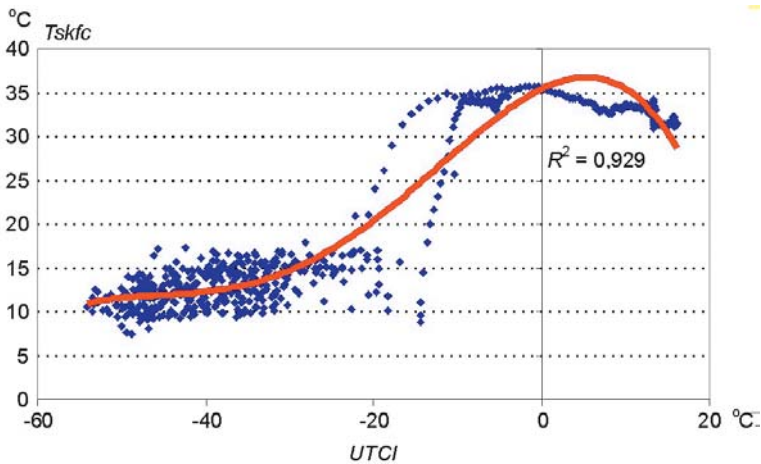
Drugi przykład weryfikacji wskaźnika $UTCI$ dotyczy klimatu polarnego Spitsbergenu. Podczas 12-godzinnego eksperymentu zaprojektowanego w IGiPZ PAN, a zrealizowanego przez dr. Andrzeja Araźnego z UMK, obserwator zarówno przebywał w pomieszczeniach jak i poruszał się w terenie otwartym. Widać wyraźną zgodność zmian temperatury skóry policzka wraz ze zmianami warunków termicznych określonych wskaźnikiem $UTCI$. Współczynnik determinacji dla badanego związku wynosi blisko 93% (ryc. 6).

W drugim etapie walidacji wskaźnika $UTCI$ porównano jego wartości z wartościami innych wskaźników bioklimatycznych, zarówno prostych, jak i opartych na analizie modeli bilansu cieplnego człowieka (MEMI, Klima-Michel, MENEX_2005, OUT_SET, Fanger). Do porównań wybrano zbiór blisko 65 tysięcy danych meteorologicznych reprezentujących wszystkie strefy klimatyczne. Temperatura powietrza zmieniała się od -50 do $+50^{\circ}\text{C}$, ciśnienie pary wod-

nej od 0,4 do 39 hPa, prędkość wiatru od 0,5 do 30 m·s⁻¹, a wartość dT_{mrt} od -10 do +70°C.

Obliczone wartości *UTCI* porównano z wartościami innych wskaźników często stosowanych w badaniach bioklimatycznych:

- 1) opartych na analizie bilansu cieplnego: *PT* (*Perceived Temperature*), *PET* (*Physiological Equivalent Temperature*), *SET** (*Standardized Equivalent Temperature*), *PST* (*Physiological Subjective Temperature*), *PhS* (*Physiological Strain*), *PMV* (*Predicted Mean Vote*),
- 2) prostych, łączących co najmniej dwa elementy meteorologiczne: *AT* (*Apparent Temperature*), *TE* (*Missenard Effective Temperature*), *HUMIDEX*, *WBGT* (*Wet Bulb Globe Temperature*), *WCT* (*Wind Chill Temperature*).



Ryc. 6. Związek między *UTCI* a temperaturą skóry policzka (*Tskfc*) podczas 12-godzinnej ekspozycji w warunkach klimatu polarnego Spitsbergenu

Relations between *UTCI* and cheek temperature (*Tskfc*) during 12-hours exposure at arctic climate of Svalbard

Okazało się, że wartości wskaźnika *UTCI* mają wysokie współczynniki korelacji z większością dotychczas stosowanych wskaźników. W przypadku wskaźników wyliczonych na podstawie modeli bilansu cieplnego współczynniki te przekraczają 0,975. Podobnie wysoki współczynnik korelacji występuje także w przypadku Temperatury Efektywnej Missenarda (*TE*). W odniesieniu do prawie wszystkich wskaźników (poza *PST* i *PhS*) zbadane związki mają charakter prostoliniowy. Współczynniki nachylenia prostej regresji wskazują, że najbardziej zbliżone do linii identity ($y=x$) są one w przypadku wskaźników: *SET**, *PT* i *TE* (tab. 2).

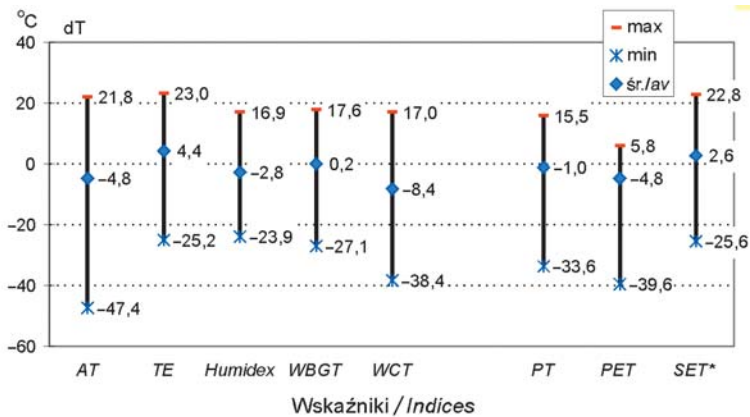
Tabela 2. Charakterystyki statystyczne związków pomiędzy UTCI a wybranymi wskaźnikami i parametrami meteorologicznymi

Statistical characteristics of relationships between UTCI and selected bioclimatic indices as well as meteorological variables

Wskaźnik <i>Index</i>	Współczynnik nachylenia prostej regresji <i>Regression line slope</i>	Współczynnik determinacji (%) <i>Determination coefficient</i>	Współczynnik korelacji <i>Correlation coefficient</i>
PET	0,8434	96,42	0,982
PT	0,9682	96,58	0,983
SET*	1,0210	97,54	0,988
PST ³	–	95,35	0,976
PhS (stosunek Bowena) ³	–	96,97	0,985
PMV	–	98,12	0,991
AT	0,7157	93,10	0,965
TE	0,9469	96,05	0,980
HUMIDEX ¹	0,7744	67,44	0,821
WBGT ¹	0,4679	64,91	0,806
WCT ²	0,8098	89,51	0,946
Ta	0,7025	93,04	0,965
Tmrt	0,8636	78,76	0,888

¹ Dla temperatury powietrza >5°C / For air temperature >5°C.² Dla temperatury powietrza <5°C / For air temperature <5°C.³ Funkcja wykładnicza / Polynomial function.

Analizowano także różnice pomiędzy wartościami UTCI a wartościami poszczególnych wskaźników. Spośród wskaźników obliczonych dla całego zakresu zmiennych meteorologicznych, najmniejsze średnie różnice znaleziono dla PT i SET*. Ogólnie biorąc, dla wszystkich wskaźników większe różnice z wartością UTCI występowały przy niskiej niż przy wysokiej temperaturze powietrza. Jest to związane z innym sposobem modelowania termoizolacyjnych właściwości odzieży w modelu Fialy i w pozostałych modelach bilansu cieplnego. Biorąc pod uwagę wszystkie przeanalizowane charakterystyki statystyczne można stwierdzić, że najbardziej zbliżone do siebie wartości uzyskuje się za pomocą wskaźników UTCI i SET*, a następnie UTCI i PT oraz UTCI i TE. Bardzo wysokie związki korelacyjne uzyskano także dla UTCI i wskaźników nietermicznych – PMV i PhS.



Ryc. 7. Największe (max), najmniejsze (min) i średnie (sr.) różnice (dT) pomiędzy wartością *UTCI* i wybranymi wskaźnikami bioklimatycznych

The biggest (max), the lowest (min) and average (av) differences (dT) between *UTCI* and selected bioclimatic indices

Skala oceny *UTCI*

Jednym z podstawowych zadań *UTCI*, podobnie jak innych wskaźników, jest zobiektywizowana ocena warunków bioklimatycznych. Większość dotychczas stosowanych wskaźników była stosowana do oceny odczuć cieplnych człowieka. Pomimo możliwości obliczenia ich wartości dla szerokiego spektrum warunków środowiskowych stosowane skale odczuć cieplnych różnią się bardzo między sobą. Są często zawężone do wybranego zakresu temperatury, co uniemożliwia ich stosowanie w skali globalnej (tab. 3).

W związku z tym w odniesieniu do *UTCI* skalę oceny postanowiono oprzeć nie na subiektywnych odczuciach cieplnych (procesy aklimatyzacyjne do odmiennych warunków klimatycznych sprawiają, że te same wartości parametrów meteorologicznych są w różnych populacjach odmiennie oceniane), lecz na obiektywnych zmianach parametrów fizjologicznych organizmu, zachodzących pod wpływem warunków środowiskowych. Wartości wskaźnika *UTCI* są zatem miarą obciążeń cieplnych organizmu (tab. 4).

Poszczególne progi *UTCI* są wyznaczone na podstawie istotnych zmian parametrów fizjologicznych. W warunkach ciepła najistotniejszy jest poziom temperatury skóry i temperatury wewnętrznej oraz tempo wydzielania potu. W warunkach zimna najważniejszymi parametrami fizjologicznymi są zmiany temperatury ciała, zwłaszcza dłoni i twarzy, oraz proces termogenezy drzewnej (tab. 5).

Tabela 3. Progi termiczne (°C) poszczególnych odczuć cieplnych przyjmowane przy różnych wskaźnikach bioklimatycznych

Thermal thresholds (°C) of particular thermal sensations used in various bioclimatic indices

Odczucie cieplne <i>Thermal sensation</i>	Wskaźnik / <i>Index</i>								
	<i>HI</i>	<i>Humidex</i>	<i>ET</i>	<i>WBGT</i>	<i>WCT</i>	<i>SET*</i>	<i>PET</i>	<i>PT</i>	<i>PST</i>
Mroźnie <i>Frosty</i>					<-60			<-39	<-36
Bardzo zimno <i>Very cold</i>					-60- -45		<4	-39- -26	-36- -16
Zimno <i>Cold</i>			<9		-45- -25		4-8	-26- -13	-16-4
Chłodno <i>Cool</i>			9-17		-25- -10	<17	8-18	-13-0	4-14
Komfortowo <i>Comfortable</i>		<30	17-21	<18	>-10	17-30	18-23	0-20	14-24
Ciepło <i>Warm</i>	27-32	30-40	21-23	18-24		30-34	23-35	20-26	24-34
Gorąco <i>Hot</i>	32-41	40-45	23-27	24-28		34-37	35-41	26-32	34-44
Bardzo gorąco <i>Very hot</i>	41-54	45-55	>27	28-30		>37	>41	32-38	44-54
Upalnie <i>Sweltering</i>	>54	>55		>30				>38	>54

Tabela 4. Skala oceny obciążeń cieplnych organizmu według wskaźnika *UTCI*
UTCI assessment scale of heat load in man

<i>UTCI</i> (°C)	Obciążenie cieplne <i>Stress category</i>	Sposób przeciwdziałania <i>Possible protection</i>
> +46	Nieznosny stres ciepła <i>Extreme heat stress</i>	Niezbędne okresowe schładzanie organizmu, konieczne uzupełnianie płynów >0,5 l/godz. Należy unikać dużego wysiłku fizycznego. <i>Temporary body cooling and drinking >0.5 l/h necessary. No physical activity.</i>
+38 - +46	Bardzo silny stres ciepła <i>Very strong heat stress</i>	Konieczne okresowe korzystanie z pomieszczeń klimatyzowanych lub miejsc zacienionych, niezbędne uzupełnianie płynów >0,5 l/godz. Należy ograniczyć wysiłek fizyczny. <i>Temporary use of air condition or shaded places necessary. Drinking >0.5 l/h. Reduce physical activity.</i>
+32- +38	Silny stres ciepła <i>Strong heat stress</i>	Niezbędne uzupełnianie płynów 0,25 l/godz., pożądane korzystanie z miejsc zacienionych i okresowe zmniejszanie wysiłku fizycznego. <i>Drinking >0.25 l/h. Use shaded places and temporary reduce physical activity.</i>
+26- +32	Umiarkowany stres ciepła <i>Moderate heat stress</i>	Niezbędne uzupełnianie płynów 0,25 l/godz. <i>Drinking >0.25 l/h.</i>
+9- +26	Brak obciążeń cieplnych <i>No thermal stress</i>	Fizjologiczne procesy termoregulacji są wystarczające do zachowania komfortu cieplnego. <i>Physiological thermoregulation sufficient to keep thermal comfort</i>
0- +9	Łagodny stres zimna <i>Slight cold stress</i>	Pożądane używanie rękawiczek i nakrycia głowy. <i>Use gloves and hat.</i>
-13-0	Umiarkowany stres zimna <i>Moderate cold stress</i>	Należy zwiększyć wysiłek fizyczny oraz chronić kończyny i twarz przed wychłodzeniem. <i>Intensify activity and protect face and extremities against cooling.</i>
-27- -13	Silny stres zimna <i>Strong cold stress</i>	Należy zwiększyć wysiłek fizyczny oraz chronić kończyny i twarz przed wychłodzeniem. Pożądane zwiększenie termoizolacyjności odzieży. <i>Intensify activity and protect face and extremities against cooling. Use warmer clothing.</i>
-40+ -27	Bardzo silny stres zimna <i>Very strong cold stress</i>	Należy zwiększyć wysiłek fizyczny oraz chronić kończyny i twarz przed wychłodzeniem. Niezbędne zwiększenie termoizolacyjności odzieży i ograniczenie czasu przebywania w terenie otwartym. <i>Intensify activity and protect face and extremities against cooling. Use warmer clothing. Reduce outdoor exposure time.</i>
<-40	Nieznosny stres zimna <i>Extreme cold stress</i>	Czas przebywania ograniczyć do niezbędnego minimum. Niezbędne zwiększenie termoizolacyjności i wiatrochronności odzieży. <i>Stay at home. If outdoor exposure is necessary use heavy and wind protected clothing.</i>

Tabela 5. Krytyczne poziomy reakcji fizjologicznych organizmu obserwowane przy różnych wartościach *UTCI* (wg Jendritzky i inni, red., 2009)
 Critical levels of physiological reactions in man observed at various *UTCI* values (according to Jendritzky et al., eds., 2009)

<i>UTCI</i> (°C)	Reakcje fizjologiczne <i>Physiological criterions</i>
48	Zwiększenie tempa wzrostu temperatury rektalnej. Stopniowa utrata zdolności oddawania ciepła do otoczenia.
46	Wzrastające wydzielanie potu do >650 g/godz.
40	Zmniejszenie w ciągu 30 min gradientu temperatury pomiędzy wnętrzem i powierzchnią ciała do <1°C.
38	Wzrost temperatury rektalnej po 30 min ekspozycji.
36	Dynamiczne odczucie cieplne po 2 godz. „bardzo gorąco”.
33	Średnie wydzielanie potu >200 g/godz. Wzrost temperatury rektalnej po 2 godz. ekspozycji.
32	Straty ciepła na parowanie po 30 min >40 W. Stopniowy wzrost temperatury skóry.
30	Zmiana w tempie wzrostu wydzielania potu, temperatury skóry, temperatury rektalnej, oraz temperatury twarzy i dłoni. Pojawienie się pocenia po 30 min ekspozycji. Stopniowy wzrost uwilgotnienia skóry.
26	Średnie wydzielanie potu >100 g/godz. Dynamiczne odczucie ciepła „ciepło”.
18	Dynamiczne odczucie ciepła „komfortowo”. Straty ciepła na parowanie średnio >40 W.
14	Brak zmian temperatury rektalnej w czasie 2-godzinnej ekspozycji.
13	Dynamiczne odczucie ciepła po 2 godz. ekspozycji „komfortowo”.
12	Straty ciepła na parowanie >40 W po 2 godz. ekspozycji.
9	Dynamiczne odczucie ciepła po 2 godz. ekspozycji „zimno”. Lokalne obniżenie temperatury dłoni (należy włożyć rękawiczki).
8	Zmiana tempa spadku średniej temperatury skóry.
0	Dynamiczne odczucie ciepła po 2 godz. ekspozycji „bardzo zimno”. Zmniejszenie tempa skórniego przepływu krwi.
-2	Temperatura twarzy po 2 godz. ekspozycji <15°C (uczucie bólu).
-10	Znaczny spadek temperatury dłoni. Rozpoczyna się spadek temperatury rektalnej.
-13	Temperatura twarzy po 30 min ekspozycji <15°C (uczucie bólu). Spadek średniej temperatury skóry podczas 2 godz. ekspozycji o 2°C.
-14	Temperatura twarzy po 2 godz. ekspozycji <7°C (drętwienie).
-20	Średnia temperatura twarzy <7°C (drętwienie).
-22	Spadek temperatury rektalnej o 0,1°C/godz.
-26	Zwiększenie gradientu temperatury pomiędzy wnętrzem i powierzchnią ciała.
-27	Temperatura twarzy po 2 godz. ekspozycji <0°C (ryzyko odmrożenia).
-30	Wzrost tempa obniżania się temperatury rektalnej.
-32	Temperatura twarzy po 30 min <7°C (drętwienie).
-32	Początek termogenezy drżeniowej.
-33	Spadek temperatury rektalnej o 0,2°C/godz.
-35	Temperatura twarzy po 2 godz. ekspozycji <-5°C (duże ryzyko odmrożenia).
-40	Spadek temperatury rektalnej o 0,3°C/godz.
-48	Temperatura twarzy po 30 min <0°C (ryzyko odmrożenia).

Podsumowanie

Kilkuletni wysiłek badawczy kilku zespołów naukowych z Europy i krajów pozaeuropejskich pozwolił na stworzenie nowego wskaźnika obciążeń cieplnych człowieka *UTCI*, definiowanego jako temperatura ekwiwalentna, przy której w warunkach referencyjnych podstawowe parametry fizjologiczne organizmu przyjmują takie same wartości jak w warunkach rzeczywistych.

UTCI dostarcza informacji na temat rzeczywistych procesów regulacji temperatury ciała, które są zależne od warunków meteorologicznych otoczenia. Cechy populacyjne oraz subiektywne cechy osobnicze i poziom aklimatyzacji nie odgrywają istotnej roli w kształtowaniu ich poziomu. Wiadomo jedynie, że taki sam poziom parametrów fizjologicznych organizmu może być różnie oceniany przez poszczególne osoby (np. reakcje fizjologiczne mówiące o łagodnym stresie zimna mogą być przez niektórych ludzi oceniane jako komfortowe, a przez innych jako wiążące się z odczuciem chłodu lub nawet zimna).

Konieczne są zatem dalsze badania eksperymentalne wiążące obiektywnie występujące reakcje fizjologiczne z subiektywnymi ocenami odczuć cieplnych osób w różnych strefach klimatycznych.

Autorzy mają nadzieję, że *UTCI* znajdzie szerokie zastosowanie w badaniach biometeorologicznych i bioklimatycznych podejmowanych w różnych skalach czasowych i przestrzennych. Już obecnie Światowa Organizacja Meteorologii podjęła decyzję o wprowadzeniu *UTCI* do działań operacyjnych służb meteorologicznych na całym świecie.

Piśmiennictwo

- Błażejczyk K., 2004, *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 192, Warszawa.
- , 2007, *Multiannual and seasonal weather fluctuations and tourism in Poland*, [w:] B. Amelung, K. Błażejczyk, A. Matzarakis (red.), *Climate Change and Tourism Assessment and Copying Strategies*, IGiPZ PAN, Maastricht-Warsaw-Freiburg, s. 69–90.
- Bradtke F., Liese W., 1958, *Pomiary klimatyczne wewnątrz i na zewnątrz budynków*, Arkady, Warszawa.
- Fanger P.O., 1970, *Thermal Comfort. Analysis and Application in Environment Engineering*, Danish Technical Press, Copenhagen.
- Flach E., 1981, *Human bioclimatology*, [w:] H.E. Landsberg (red.), *World Survey of Climatology. General Climatology*, 3, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York, s. 2–187.
- Fiala D., Lomas K.J., Stohrer M., 1999, *A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system*, *Journal of Applied Physiology*, 87, 5, s. 1957–1972.

- , 2001, *Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions*, International Journal of Biometeorology, 45, s. 143–159.
- , 2003, *First principles modelling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions*, ASHRAE Transactions: Research, 109, 1, s. 179–186.
- Fiala D., Laschewski G., Jendritzky G., 2005, *Comparison of human thermal and regulatory responses predicted by simple and multi-node complete heat budget models*, Annalen der Meteorologie, DWD Offenbach, 41, 1, s. 318–319.
- Gagge A.P., Stolwijk J., Nishi Y., 1971, *An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response*, ASHRAE Transactions, 77, 1, s. 247–262.
- Höppe P., 1999, *The physiological equivalent temperature – A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*, International Journal of Biometeorology, 43, s. 71–75.
- Huizenga C., Zhang H., Arens E., 2001, *A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments*, Building and Environment, 36, s. 691–699.
- Jankowiak J. (red.), 1976, *Biometeorologia człowieka*, PZWL, Warszawa.
- Jendritzky G., 1990, *Bioklimatische Bewertungsgrundlage der Räume am Beispiel von mesoskaligen Bioklimakarten*, [w:] G. Jendritzky, H. Schirmer, G. Menz, W. Schmidt-Kessen (red.), *Methode zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschrieben Klima-Michel-Modell)*, Akademie für Räumforschung und Landesplanung, Hannover, 114, s. 7–69.
- Jendritzky G., Havenith G., Weihs P., Batchvarova E. (red.), 2009, *Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being*, Final Report COST Action 730; www.utci.org/cost.php.
- Jendritzky G., Maarouf A., Fiala D., Staiger H., 2002, *An update on the development of a Universal Thermal Climate Index*, [w:] 15th Conference of Biometeorology and Aerobiology and 16th International Congress of Biometeorology ICB02, 27 Oct–1 Nov 2002, American Meteorology Society, Kansas City, s. 129–133.
- Jokl M., 1965, *Hodnoceni mikroklimatickych podminek na pracovistich*, Pracovni Lekarstvi, 17, 9, s. 408–423.
- Kielczewski B., Bogucki J., 1972, *Zarys biometeorologii sportu*, Sport i Turystyka, Warszawa.
- Klonowicz S., Kozłowski S., 1970, *Człowiek a środowisko termiczne*, PZWL, Warszawa.
- Kozłowska-Szczęśna T., Błażejczyk K., Krawczyk B., 1997, *Bioklimatologia człowieka. Metody i ich zastosowania w badaniach bioklimatu Polski*, Monografie IGiPZ PAN, 1, Warszawa.
- Matzarakis A., Rutz F., 2005, *Application of RayMan for tourism and climate investigations*, Annalen der Meteorologie, DWD Offenbach, 41, 2, s. 631–636.
- Landsberg H.E., 1972, *The assessment of human bioclimate. A limited review of physical parameters*, WMO Technical Note, 123, Geneva.
- Lee D.H.K., 1980, *Seventy-five years of searching for a heat index*, Environmental Research, 22, s. 331–356.
- Parsons K.C., 2003, *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance*, Taylor & Francis, London-New York.
- Pickup J., de Dear R., 2000, *An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT_SET*)*. Part I – *The Model and its Assumptions*, [w:] R. de Dear, J. Kalma, T. Oke, A. Auliciems (red.), *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millenium. Selected*

- Papers from the Conference ICB-ICUC'99 (Sydney, 8–12 Nov. 1999)*, WMO, Geneva, WCASP-50, s. 279–283.
- Steadman R.G., 1984, *A universal scale of apparent temperature*, Journal on Climate and Applied Meteorology, 23, s. 1674–1687.
- Stolwijk J.A.J. i Hardy J.D. (1966) *Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients*, Journal of Applied Physiology, 21, s. 967–977.
- Tanabe S.I., Kobayashi K., Nakano J., Ozeki Y., Konishi M., (2002) *Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD)*, Energy and Buildings, 34, s. 637–646.
- VDI 3789, 1994, *Environmental Meteorology, Interactions Between Atmosphere and Surfaces. Calculation of Short-wave and Long-wave Radiation. Part 2*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

[Wpłynęło: sierpień; poprawiono: grudzień 2009 r.]

K. BŁAŻEJCZYK, P. BROEDE, D. FIALA, G. HAVENITH,
I. HOLMER, G. JERNITZKY, B. KAMPMANN

UTCI – NEW INDEX FOR ASSESSMENT OF HEAT STRESS IN MAN

During the last century about 100 indices were developed to assess influences of the atmosphere on human being. However, most of them have not close relationships with physiological reactions in man. In the second half of 20th century various simple human heat balance models were developed for bioclimatic applications. The last years bring new generation of models, co called multi node models that consider all mechanism of thermoregulation. In 1999 International Society of Biometeorology established special study group do develop new Universal Thermal Climate Index (*UTCI*). Since 2005 these efforts have been reinforced by the COST Action 730 (Cooperation in Science and Technical Development) of the European Science Foundation ESF that provides the basis that at least the European researchers plus experts from abroad can join together on a regular basis in order to achieve significant progress in deriving such an index.

The new *UTCI* index represents air temperature of the reference condition with the same physiological response as the actual condition. The following physiological variables were taken into consideration when calculating *UTCI*: rectal temperature, mean skin temperature, face skin temperature, sweat production, heat generated by shivering, skin wettedness, skin blood flow. In routine applications calculations of *UTCI* cannot be served by real time execution of the physiological model because of its time-consuming repetition need. Thus, alternative approach – an approximating regression function – to fast *UTCI* calculation without the repetitive need to run the actual physiological model but rather using a one off calculation of all relevant conditions was considered and validated. The *UTCI* can be approximated by a polynomial function in T_a , v_a , v_p , $T_{mrt}-T_a$ up to 6th order. The least square estimates of the 210 coefficients were found (annex 1).

The index base on Fiala model that is one of the most advanced multi-node thermophysiological models and include the capability to predict both whole body thermal effects (hypothermia and hyperthermia; heat and cold discomfort), and local effects

(facial, hands and feet cooling and frostbite). The model consists of two interacting systems: the controlling active system; and the controlled passive system. The passive system simulates the physical human body and the dynamic heat transfer phenomena that occur inside the body and at its surface. The active system is a cybernetic model predicting the thermoregulatory defence reactions of the central nervous system. The model furthermore incorporates a thermal comfort model which predicts human perceptual responses dynamically from physiological states.

The assessment scale of *UTCI* base on the intensity of objective physiological reactions to environmental heat stress in wide range of weather and climates. The index can be applicable in various research dealing with: bioclimatological assessments, bioclimatic mapping in all scales (from micro to macro), urban design, engineering of outdoor spaces, consultancy for where to live, outdoor recreation and climatotherapy, epidemiology and climate impact research. *UTCI* is actually recommended by World Meteorological Organisation for operational use in meteorological services all over the world.

Aneks 1. Współczynniki równania regresji do wyznaczenia wskaźnika *UTCI* ($UTCI=Ta+Offset$)

Annex 1. Coefficients of regression equation for the calculations of UTCI ($UTCI=Ta+Offset$)

Wyrażenie <i>Polynomial term</i>	Współczynnik <i>Coefficient</i>	Wyrażenie <i>Polynomial term</i>	Współczynnik <i>Coefficient</i>
Stała <i>Constant</i>	6,07562052 E-01	tm·vp	-3,69476348 E-02
Ta	-2,27712343 E-02	Ta·tm·vp	1,62325322 E-03
Ta ²	8,06470249 E-04	Ta ² ·tm·vp	-3,14279680 E-05
Ta ³	-1,54271372 E-04	Ta ³ ·tm·vp	2,59835559 E-06
Ta ⁴	-3,24651735 E-06	Ta ⁴ ·tm·vp	-4,77136523 E-08
Ta ⁵	7,32602852 E-08	v·tm·vp	8,64203390 E-03
Ta ⁶	1,35959073 E-09	Ta·v·tm·vp	-6,87405181 E-04
v	-2,25836520 E+00	Ta ² ·v·tm·vp	-9,13863872 E-06
Ta·v	8,80326035 E-02	Ta ³ ·v·tm·vp	5,15916806 E-07
Ta ² ·v	2,16844454 E-03	v ² ·tm·vp	-3,59217476 E-05
Ta ³ ·v	-1,53347087 E-05	Ta·v ² ·tm·vp	3,28696511 E-05
Ta ⁴ ·v	-5,72983704 E-07	Ta ² ·v ² ·tm·vp	-7,10542454 E-07
Ta ⁵ ·v	-2,55090145 E-09	v ³ ·tm·vp	-1,24382300 E-05
v ²	-7,51269505 E-01	Ta·v ³ ·tm·vp	-7,38584400 E-09
Ta·v ²	-4,08350271 E-03	v ⁴ ·tm·vp	2,20609296 E-07
Ta ² ·v ²	-5,21670675 E-05	tm ² ·vp	-7,32469180 E-04
Ta ³ ·v ²	1,94544667 E-06	Ta·tm ² ·vp	-1,87381964 E-05
Ta ⁴ ·v ²	1,14099531 E-08	Ta ² ·tm ² ·vp	4,80925239 E-06
v ³	1,58137256 E-01	Ta ³ ·tm ² ·vp	-8,75492040 E-08
Ta·v ³	-6,57263143 E-05	v·tm ² ·vp	2,77862930 E-05
Ta ² ·v ³	2,22697524 E-07	Ta·v·tm ² ·vp	-5,06004592 E-06
Ta ³ ·v ³	-4,16117031 E-08	Ta ² ·v·tm ² ·vp	1,14325367 E-07
v ⁴	-1,27762753 E-02	v ² ·tm ² ·vp	2,53016723 E-06
Ta·v ⁴	9,66891875 E-06	Ta·v ² ·tm ² ·vp	-1,72857035 E-08
Ta ² ·v ⁴	2,52785852 E-09	v ³ ·tm ² ·vp	-3,95079398 E-08
v ⁵	4,56306672 E-04	tm ³ ·vp	-3,59413173 E-07
Ta·v ⁵	-1,74202546 E-07	Ta·tm ³ ·vp	7,04388046 E-07
v ⁶	-5,91491269 E-06	Ta ² ·tm ³ ·vp	-1,89309167 E-08
tm	3,98374029 E-01	v·tm ³ ·vp	-4,79768731 E-07
Ta·tm	1,83945314 E-04	Ta·v·tm ³ ·vp	7,96079978 E-09
Ta ² ·tm	-1,73754510 E-04	v ² ·tm ³ ·vp	1,62897058 E-09
Ta ³ ·tm	-7,60781159 E-07	tm ⁴ ·vp	3,94367674 E-08
Ta ⁴ ·tm	3,77830287 E-08	Ta·tm ⁴ ·vp	-1,18566247 E-09
Ta ⁵ ·tm	5,43079673 E-10	v·tm ⁴ ·vp	3,34678041 E-10
v·tm	-2,00518269 E-02	tm ⁵ ·vp	-1,15606447 E-10
Ta·v·tm	8,92859837 E-04	vp ²	-2,80626406 E+00
Ta ² ·v·tm	3,45433048 E-06	Ta·vp ²	5,48712484 E-01
Ta ³ ·v·tm	-3,77925774 E-07	Ta ² ·vp ²	-3,99428410 E-03
Ta ⁴ ·v·tm	-1,69699377 E-09	Ta ³ ·vp ²	-9,54009191 E-04
v ² ·tm	1,69992415 E-04	Ta ⁴ ·vp ²	1,93090978 E-05
Ta·v ² ·tm	-4,99204314 E-05	v·vp ²	-3,08806365 E-01
Ta ² ·v ² ·tm	2,47417178 E-07	Ta·v·vp ²	1,16952364 E-02
Ta ³ ·v ² ·tm	1,07596466 E-08	Ta ² ·v·vp ²	4,95271903 E-04
v ³ ·tm	8,49242932 E-05	Ta ³ ·v·vp ²	-1,90710882 E-05
Ta·v ³ ·tm	1,35191328 E-06	v ² ·vp ²	2,10787756 E-03
Ta ² ·v ³ ·tm	-6,21531254 E-09	Ta·v ² ·vp ²	-6,98445738 E-04
v ⁴ ·tm	-4,99410301 E-06	Ta ² ·v ² ·vp ²	2,30109073 E-05
Ta·v ⁴ ·tm	-1,89489258 E-08	v ³ ·vp ²	4,17856590 E-04
v ⁵ ·tm	8,15300114 E-08	Ta·v ³ ·vp ²	-1,27043871 E-05
tm ²	7,55043090 E-04	v ⁴ ·vp ²	-3,04620472 E-06
Ta·tm ²	-5,65095215 E-05	tm·vp ²	5,14507424 E-02
Ta ² ·tm ²	-4,52166564 E-07	Ta·tm·vp ²	-4,32510997 E-03
Ta ³ ·tm ²	2,46688878 E-08	Ta ² ·tm·vp ²	8,99281156 E-05
Ta ⁴ ·tm ²	2,42674348 E-10	Ta ³ ·tm·vp ²	-7,14663943 E-07
v·tm ²	1,54547250 E-04	v·tm·vp ²	-2,66016305 E-04

Wyrażenie <i>Polynomial term</i>	Współczynnik <i>Coefficient</i>	Wyrażenie <i>Polynomial term</i>	Współczynnik <i>Coefficient</i>
Ta·v·tm ²	5,24110970 E-06	Ta·v·tm·vp ²	2,63789586 E-04
Ta ² ·v·tm ²	-8,75874982 E-08	Ta ² ·v·tm·vp ²	-7,01199003 E-06
Ta ³ ·v·tm ²	-1,50743064 E-09	v ² ·tm·vp ²	-1,06823306 E-04
v ² ·tm ²	-1,56236307 E-05	Ta·v ² ·tm·vp ²	3,61341136 E-06
Ta·v ² ·tm ²	-1,33895614 E-07	v ³ ·tm·vp ²	2,29748967 E-07
Ta ² ·v ² ·tm ²	2,49709824 E-09	tm ² ·vp ²	3,04788893 E-04
v ³ ·tm ²	6,51711721 E-07	Ta·tm ² ·vp ²	-6,42070836 E-05
Ta·v ³ ·tm ²	1,94960053 E-09	Ta ² ·tm ² ·vp ²	1,16257971 E-06
v ⁴ ·tm ²	-1,00361113 E-08	v·tm ² ·vp ²	7,68023384 E-06
tm ³	-1,21206673 E-05	Ta·v·tm ² ·vp ²	-5,47446896 E-07
Ta·tm ³	-2,18203660 E-07	v ² ·tm ² ·vp ²	-3,59937910 E-08
Ta ² ·tm ³	7,51269482 E-09	tm ³ ·vp ²	-4,36497725 E-06
Ta ³ ·tm ³	9,79063848 E-11	Ta·tm ³ ·vp ²	1,68737969 E-07
v·tm ³	1,25006734 E-06	v·tm ³ ·vp ²	2,67489271 E-08
Ta·v·tm ³	-1,81584736 E-09	tm ⁴ ·vp ²	3,23926897 E-09
Ta ² ·v·tm ³	-3,52197671 E-10	vp ³	-3,53874123 E-02
v ² ·tm ³	-3,36514630 E-08	Ta·vp ³	-2,21201190 E-01
Ta·v ² ·tm ³	1,35908359 E-10	Ta ² ·vp ³	1,55126038 E-02
v ³ ·tm ³	4,17032620 E-10	Ta ³ ·vp ³	-2,63917279 E-04
tm ⁴	-1,30369025 E-09	v·vp ³	4,53433455 E-02
Ta·tm ⁴	4,13908461 E-10	Ta·v·vp ³	-4,32943862 E-03
Ta ² ·tm ⁴	9,22652254 E-12	Ta ² ·v·vp ³	1,45389826 E-04
v·tm ⁴	-5,08220384 E-09	v ² ·vp ³	2,17508610 E-04
Ta·v·tm ⁴	-2,24730961 E-11	Ta·v ² ·vp ³	-6,66724702 E-05
v ² ·tm ⁴	1,17139133 E-10	v ³ ·vp ³	3,33217140 E-05
tm ⁵	6,62154879 E-10	tm·vp ³	-2,26921615 E-03
Ta·tm ⁵	4,03863260 E-13	Ta·tm·vp ³	3,80261982 E-04
v·tm ⁵	1,95087203 E-12	Ta ² ·tm·vp ³	-5,45314314 E-09
tm ⁶	-4,73602469 E-12	v·tm·vp ³	-7,96355448 E-04
vp	5,12733497 E+00	Ta·v·tm·vp ³	2,53458034 E-05
Ta·vp	-3,12788561 E-01	v ² ·tm·vp ³	-6,31223658 E-06
Ta ² ·vp	-1,96701861 E-02	tm ² ·vp ³	3,02122035 E-04
Ta ³ ·vp	9,99690870 E-04	Ta·tm ² ·vp ³	-4,77403547 E-06
Ta ⁴ ·vp	9,51738512 E-06	v·tm ² ·vp ³	1,73825715 E-06
Ta ⁵ ·vp	-4,66426341 E-07	tm ³ ·vp ³	-4,09087898 E-07
v·vp	5,48050612 E-01	vp ⁴	6,14155345 E-01
Ta·v·vp	-3,30552823 E-03	Ta·vp ⁴	-6,16755931 E-02
Ta ² ·v·vp	-1,64119440 E-03	Ta ² ·vp ⁴	1,33374846 E-03
Ta ³ ·v·vp	-5,16670694 E-06	v·vp ⁴	3,55375387 E-03
Ta ⁴ ·v·vp	9,52692432 E-07	Ta·v·vp ⁴	-5,13027851 E-04
v ² ·vp	-4,29223622 E-02	v ² ·vp ⁴	1,02449757 E-04
Ta·v ² ·vp	5,00845667 E-03	tm·vp ⁴	-1,48526421 E-03
Ta ² ·v ² ·vp	1,00601257 E-06	Ta·tm·vp ⁴	-4,11469183 E-05
Ta ³ ·v ² ·vp	-1,81748644 E-06	v·tm·vp ⁴	-6,80434415 E-06
v ³ ·vp	-1,25813502 E-03	tm ² ·vp ⁴	-9,77675906 E-06
Ta·v ³ ·vp	-1,79330391 E-04	vp ⁵	8,82773108 E-02
Ta ² ·v ³ ·vp	2,34994441 E-06	Ta·vp ⁵	-3,01859306 E-03
v ⁴ ·vp	1,29735808 E-04	v·vp ⁵	1,04452989 E-03
Ta·v ⁴ ·vp	1,29064870 E-06	tm·vp ⁵	2,47090539 E-04
v ⁵ ·vp	-2,28558686 E-06	vp ⁶	1,48348065 E-03

Objaśnienia symboli: / *Symbols' explanations:*

Ta – temperatura powietrza / *air temperature* (°C)

v – prędkość wiatru na wysokości 10 m / *wind speed at 10 m height* (m·s⁻¹)

tm – =Tmrt-Ta (°C)

Tmrt – średnia temperatura promieniowania / *mean radiant temperature* (°C)

vp – ciśnienie pary wodnej / *water vapour pressure* (kPa)

