Mehanizmi regulacije temperature čovečjeg tela

Kinichi Torikai, Koichi Suzuki i Eiji Inada, Department of Mechanical Engineeering Science, University of Tokyo, Noda-shi, Chiba, 278 Japan

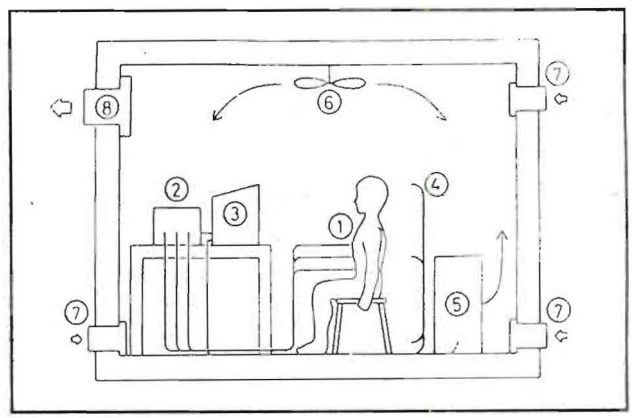
U radu se analizira postupak merenja raspodele temperature i toplotnog fluksa na površini čovečjeg tela, u uslovima mirovanja, na temperaturi sredine od 20, 25 i 30°C. Autori polaze od toga da je temperatura čovečjeg tela jedan od važnih faktora u oceni fizičkog stanja tela. Njeno održavanje na konstantnim vrednostima ostvaruje se uravnotežavanjem proizvodnje toplote u telu i toplotnih gubitaka tela.

Uvod

Čovekova telo osetljivo reaguje na stanje sredine i održava se na konstantnoj temperaturi. Po oceni regulacije temperature, čovekovo telo ima precizan i nadmoćan sistem u odnosu na bilo koji drugi veštački sistem regulacije temperature. Zbog toga temperatura čovekovog tela predstavlja jedan od važnijih faktora poznavanja fizičkog stanja čovekovog tela. Temperatura čovečjeg tela se održava konstantnom uravnotežavanjem proizvodnje toplote u telu i njenih gubitaka. Stopa proizvodnje toplote kod mnogih odraslih ljudi procenjuje se da iznosi 18% u velikom mozgu, 11% u srcu, 7% u bubrezima, 20% u jetri, 20% u kostima i mišićima, 5% u koži i 19% u ostalim delovima, u uslovima mirovanja i blage sobne temperature. Stopa gubitaka toplote grubo je procenjena na 67% zračenjem, 10% provođenjem i konvencijom i 23% isparavanjem vode (Kuroshima, 1981). Naravno, stopa proizvodnje toplote i njenih gubitaka varira, u zavisnosti od fizičkog i mentalnog stanja, kretanja ili aktivnog stanja i uslova sredine. Stopa isparavanja vode iz kože i respiratornih organa se povećava porastom temperature sredine i iznosi oko 90% ukupnih gubitaka toplote u toplom okruženju. Međutim, stopa znojenja se smanjuje povećanjem vlažnosti.

Mehanizam kontrole temperature čovečjeg tela se proučava u domenu medicinskih nauka i fiziologije. U poslednje vreme su mnoga iskustva iz mašinske tehnike i ostalih naučnih tehnologija primenjena u medicinskoj nauci. Posebno je nagli razvoj primećen u tehnologiji kliničkog ispitivanja, na primer, u vizuelnoj termografiji, rendgenskoj CT analizi i u analizatoru nuklearne magnetorezonancije CT. Zbog toga je započeto tretiranje fizioloških fenomena u okvirima mašinske tehnike (Kawashima i dr., 1978, Watanabe i Tomura, 1978, Ozoe i dr., 1987, Stoll, 1960).

Sistem kontrole temperature čovečjeg tela se može smatrati vrstom razmenjivača toplote. Štaviše, taj razmenjivač ima visoku osetljivost i samoregulabilnost u odnosu na spoljne uslove, što znači – razmenjivač toplote izvanredno dobrih karakteristika. Sa gledišta toplotne tehnike, to je interesantan pokušaj tretiranja sistema za kontrolu temperature kao jednog modela razmenjivača toplote. Pre modeliranja, neophodno je razumeti ili proceniti korelaciju između temperature kože, toplotnog fluksa prenesenog sa kože, stope isparavanja vode, pretvaranja energije putem metabolizma, stope prenosa energije u telu, aktivnih uslova i uslova sredine.



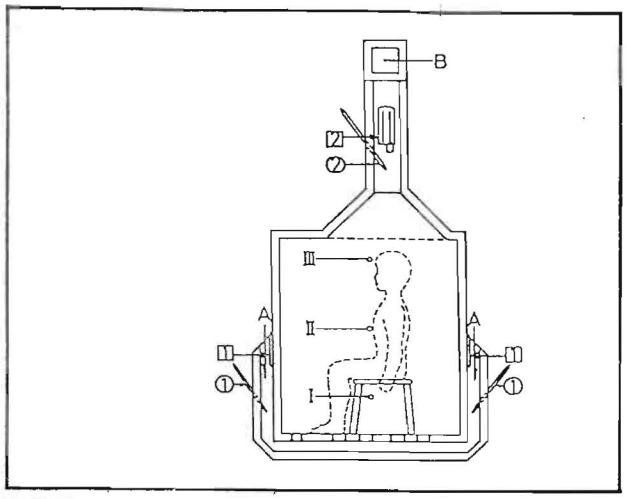
Sl. 1. Ilustracija eksperimentalnog aranžmana; 1 – senzori temperature i toplotnog fluksa; 2 – signal-procesor; 3 – monitor i rikorder; 4 – termometar i higrometar; 5 – klimatizer; 6 – cirkulator; 7 – usisni otvor; 8 – ventilator

Nedavni eksperiment je predstavljao ispitivanje korelacije između temperature površine, toplotnog fluksa i temperature sredine u uslovima mirovanja čovekovog tela, kao fundamentalno istraživanje modeliranja i mehanizma prenosa toplote u čovekovom telu.

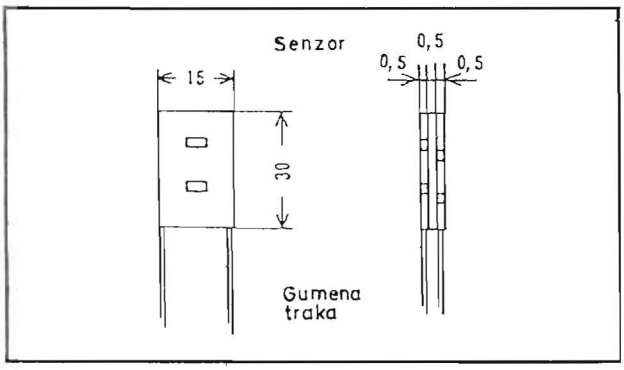
2. Eksperiment

2.1. Opšti koncept toplotne ravnoteže između proizvodnje i gubitaka toplote

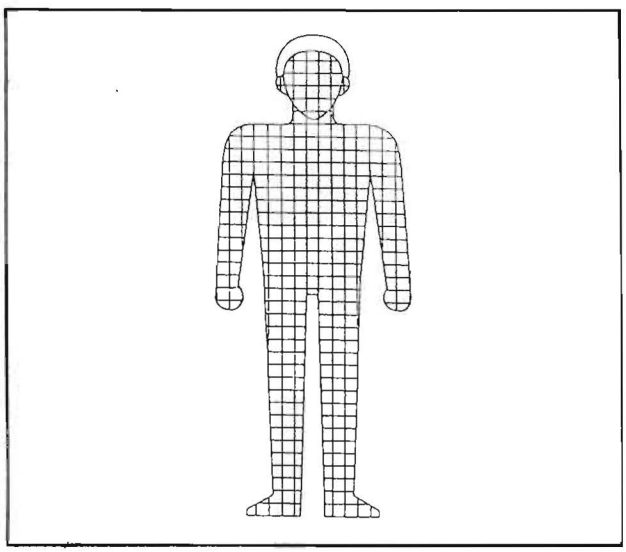
Temperaturu čovekovog tela određuje ravnoteža između proizvodnje i gubitaka toplote u telu. Toplotnu energiju proizvodi metabolizam, odnosno energija dobijena hranom pomoću životnih funkcija, a najmanja toplotna energija za život se zove bazalni metabolizam. Prosečna vrednost kod odraslih je približno 81 W. Toplota se prenosi na okolinu isparavanjem vode, provođenjem, konvekcijom i zračenjem.



Sl. 2. Ilustracija opitne prostorije; A – ulaz vazduha; B – odvod vazduha; □ – higrometar; O – termometar; I ~ III – termometar



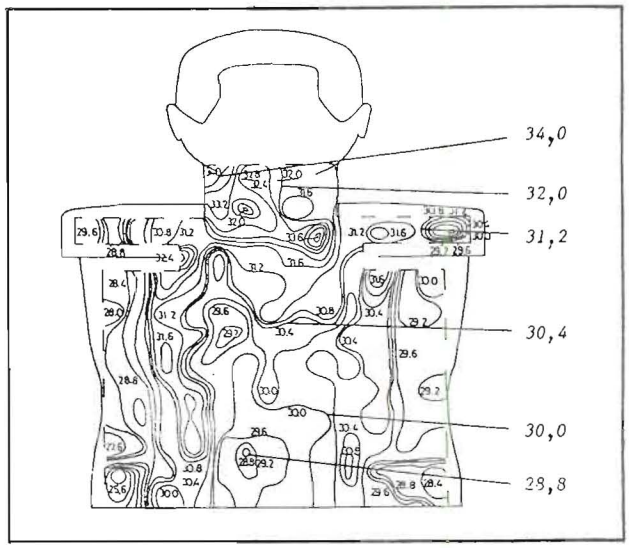
Sl. 3. Senzor toplotnog fluksa



Sl. 4. Merna podela čovečjeg tela

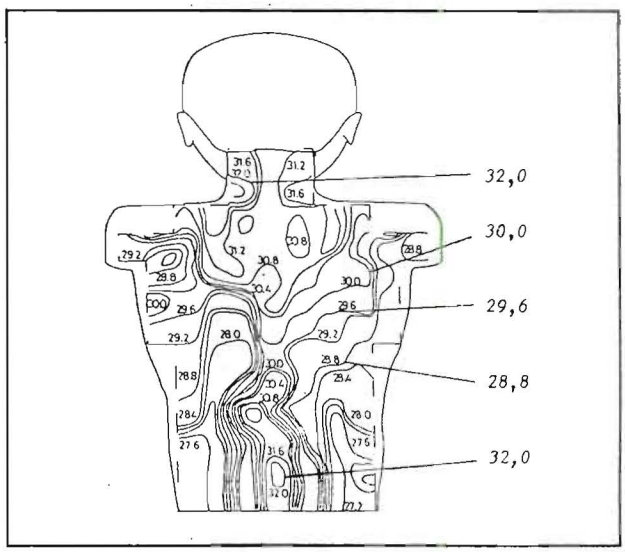
Toplotni gubitak iz kože putem kondukcije je obično veoma mali, u poređenju sa ostalim prenosom toplote, jer je toplotna provodljivost standardnog vazduha vrlo mala – 0,026 W/mK. Strujanje vazduha utiče veoma mnogo na gubitak toplote konvekcijom. U proceni gubitaka toplote zračenjem, taj gubitak je srazmeran četvrtom stepenu temperature površine grejanog objekta, dok je površina čovekovog tela pretpostavljena kao crno telo. Na primer, zračenje je približno 116 W na 294 K na temperaturi sredine i 304 K temperature kože (Kuroshima, 1981).

Isparavanje vode iz čovekovog tela se razlikuje po neosetnom isparavanju i po kontrolisanom isparavanju. Prvo se provodi sa kože i iz disajnih organa i nije ga moguće kontrolisati čovekovom voljom. Drugo je znojenje i dahtanje. Uopšte, ugodni uslovi ne dozvoljavaju da se čovek znoji, ali je neosetno isparavanje neizbežno. Stopa isparavanja iznosi približno 10 g/m^2 pri 293 K temperature sredine i linearno se povećava sa temperaturom sredine na oko 273 K, a voda postaje 26 g/m^{2}h pri 299 K. Od ukupno neosetnog isparavanja, 40% nastaje na površini glave, dlanova i tabana. Zatim. dnevno se 900 ml vode isparava putem kože, a 400 ml vode se isparava iz disajnih organa.



Sl. 5. Raspodela temperature na prednjoj strani tela, na 20°C

Naglo znojenje počinje preko 306 K temperature kože. U retkim slučajevima, količina vode od znojenja iznosi preko 4 l/h, dok je u nekim ranijim podacima 12 l dnevno. Isparela voda znojenjem iznosi približno 2,45 kJ za 1 kg vode na standardnoj sobnoj temperaturi. Zatim, čovekovo telo daje okolini 30 x 2,45 kJ energije znojenjem u toku jednog sata, ako je prosečno znojenje 30 g/h.

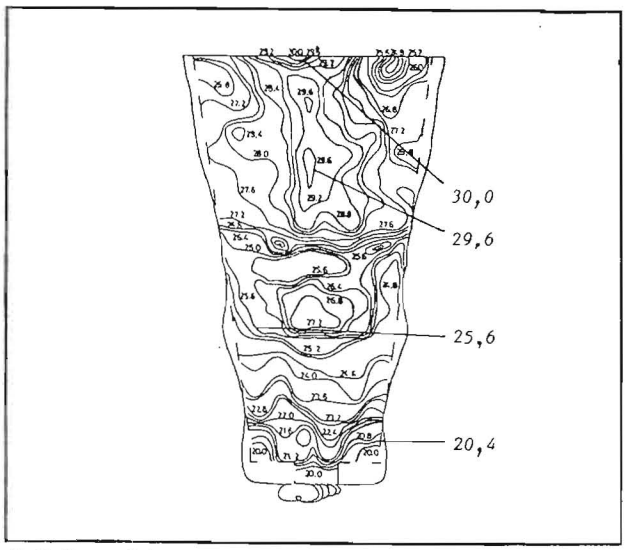


Sl. 6. Raspodela temperature na zadnjoj strani tela, na 20°C

2.2. Kontrola sredine

Uslovi sredine snažno utiču na prenos toplote iz čovekovog tela. U nedavnom eksperimentu, izgrađena je manja prostorija (sl. 1), u kojoj su regulisani temperatura i vlažnost, pomoću

jednog cirkulatora i klimatizera. Dimenzije prostorije su 2,5 x 2,5 x 2,5 m. Između zidnih panela su stavljeni toplotno-izolacioni materijali. Unutrašnji zid ima tamnu srebrnu površinu i istu emisivnost.

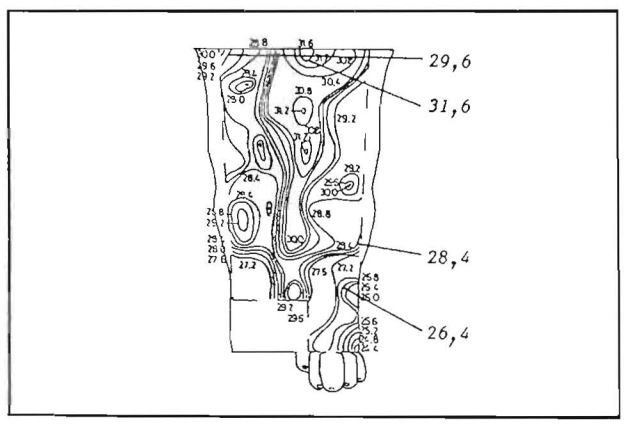


Sl. 7. Raspodela temperature na nogama, na 20°C

Radi merenja ukupnog gubitka toplote iz čovekovog tela, ispitivana osoba je smeštena u prostoriji kako pokazuje sl. 2. Soba je napravjena od stiro-penastog materijala. Vazduh se u sobu uvodi sa poda, a izbacuje sa vrha sobe. Ukupni gubitak toplote, uključujući isparavnje, izračunat je pomoću stope strujanja vazduha i povišenja temperature vazduha. Isparela voda je izračunata pomožu povećanja vlažnosti.

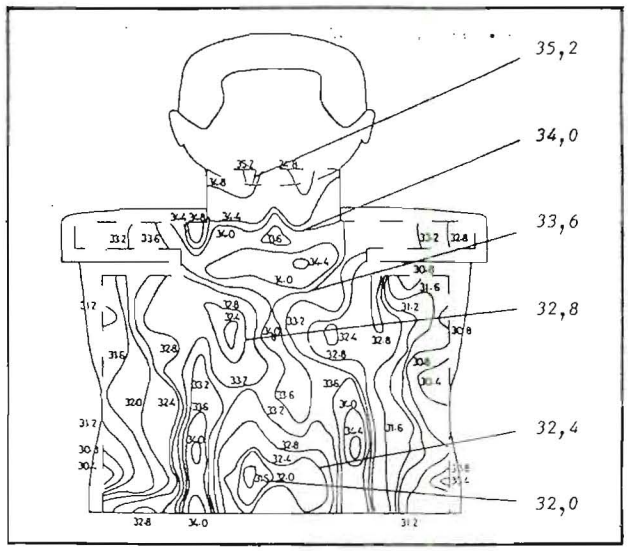
2.3. Merenje temperature i toplotnog fluksa

Kao temperaturni senzor, upotrebljen je termistorski film, radi merenja temperature kože. Veličine vrha senzora su 3 mm dužine, 1,6 mm širine i 0,5 m debljine. Vremenska konstanta je ispod 1 sekunde i ova osetljivost zadovoljava sadašnji eksperiment. Električna otpornost varira od 206,63 kΩ/cm pri 288 K, do 51,22 kΩ/cm pri 313 K. Svi senzori su kalibrisani pre merenja.



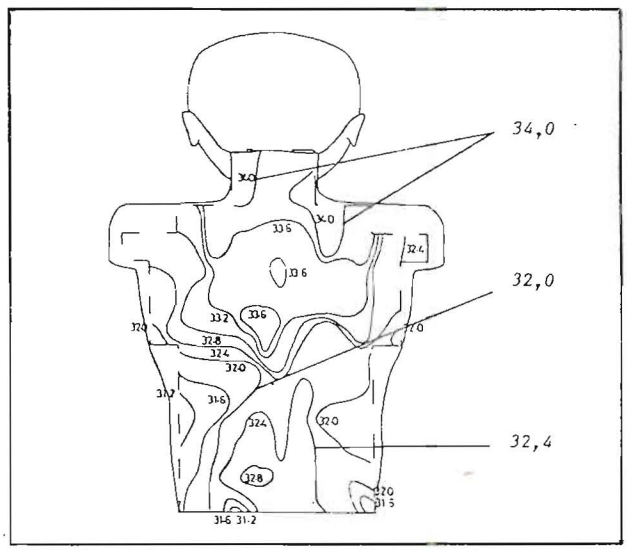
Sl. 8. Raspodela temperature na nogama, na 20°C

Toplotno-fluksni senzor je sačinjen montažom četiri temperaturna senzora i sa jednom gumenom trakom, kako pokazuje sl. 3. Toplotni fluks je izračunat putem temperaturne razlike i toplotne kondukcije kroz gumenu traku. Dimenzije te trake su: 30 mm duga, 15 mm široka i 0,5 debela. Provodljivost toplote i gumene trake iznosi 0,13 W/mK.



Sl. 9. Raspodela temperature na prednjoj strani tela, na 25°C

U praksi merenja, temperaturni senzori i senzori toplotnog fluksa su utisnuti direktno na površinu kože. Merne površine su klasfikovane u zone glave, lica, ruku, nogu, prednje i zadnje strane tela. Merne tačke su bile određene rešetkastim oznakama na površini čovekovog tela, kako se vidi na sl. 4. Zona površine pravouglih sekcija je približno 20 cm^2. Ukupan broj mernih tačaka je oko 700, a broj senzora je 5, za temperaturu, i 5 za toplotni fluks. Srednja temperatura sredine je određena na 293 K (20°C), 298 K (25°C) i 303 K (30°C). Vlažnost je podešena na 40% relativne vlage u svim uslovima. Ispitanik je bio zdravi, mladi čovek, 23 godine star, težak 60 kg i visok 175 cm. Raspodela temperature je pokazana putem izotermičkih linija, sa intervalom od 0,4 K. Raspodela toplotnog fluksa je prikazana putem ekvivalentnih linija toplotnog fluksa, sa intervalom od 10 W/cm^2. Merenja su obavljena bez odeće.



Sl. 10. Raspodela temperature na zadnjoj strani tela, na 25°C

3. Rezultati eksperimenta

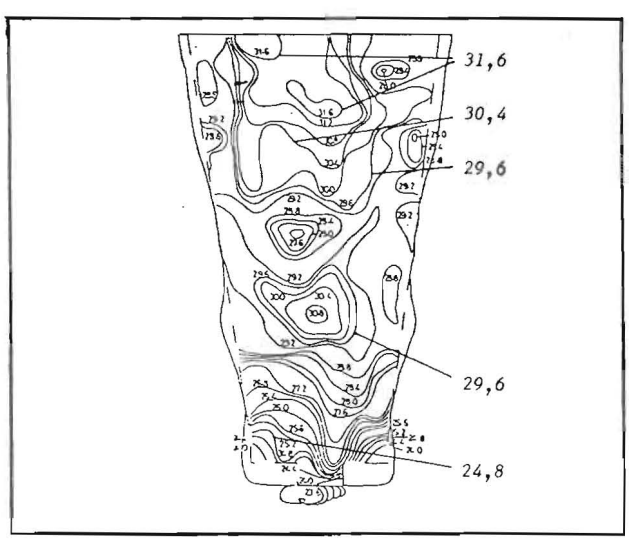
3.1. Temperatura površine čovekovog tela

Srednje temperature u zonama čovekovog tela izložene su u tabeli 1. Mape raspodele temperature na površini, pri 293 K temperature sredine, su na sl. 5. za prednju stranu tela, na sl. 6. za zadnju stranu tela i na sl. 7. i 8. za noge. Na slikama su površine čovekovog tela razvijene u dve dimenzionalne povr-

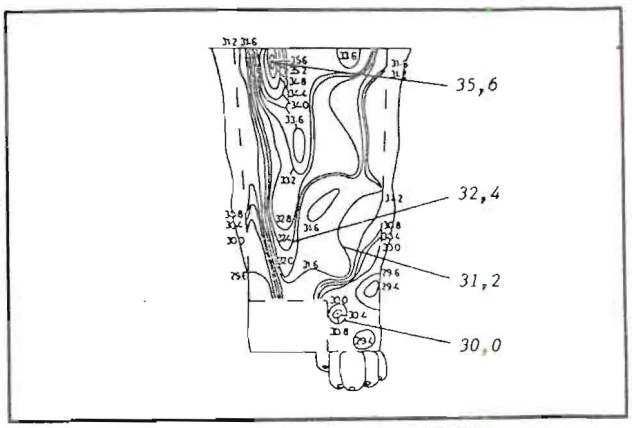
šine. Prema tabeli 1, temperatura površine glave je najviša, a površine nogu najniža u zonama tela pri bilo kojoj temperaturi sredine. Područje više temperature je primećeno duž središnje linije prednje strane tela i duž kičmene moždine na zadnjoj strani tela, kako pokazuju sl. 5. i 6. U području nogu, površinska temperatura se postepeno snižava od dna stopala. U području ruku, temperatura se postepeno snižava od ramena ka šaci. Ukratko, temperatura površine čovekovog tela postaje niža u spoljnim područjima, od centralne zone tela. Neverovatno zvuči, ali temperaturna razlika između obrva i vrha stopala iznosi 13 K.

Tabela 1. Srednje temperature zona čovekovog tela

Zona čovekovog tela		Temperatura sredine (°C)		
		20	25	30
Glava	Ukupno	31,5	33,9	35,1
	Čelo	32,9	34,7	35,6
	Lice	30,8	33,5	34,9
Vrat	Ukupno	31,8	34,1	35,2
Telo – prednji deo	Ukupno	29,8	32,6	35,2
	Ramena	31,8	33,4	34,8
	Grudi	30,3	32,7	35,1
	Gornji deo stomaka	29,7	32,4	35,3
	Donji deo stomaka	28,9	32,2,	35,3
Telo – zadnji deo	Ukupno	29,4	32,6	34,5
	Gornji deo	30,1	33,0	34,8
	Srednji deo	29,0	32,0	34,3
	Donji deo	28,7	32,3	34,2
Ruke i šake	Ukupno	28,9	31,3	34,7
	Gornji deo	29,6	32,4	34,8
	Donji deo	28,4	31,2	34,5
	Spoljna strana	26,3	30,0	34,6
Noga	Ukupno	26,3	29,1	32,9
	Gornji deo	27,8	29,9	33,0
	Koleno (gornji deo)	25,7	29,5	32,7
	Kolena (donji deo)	23,4	27,2	32,9
	Spoljna strana	20,6	24,7	33,9



Sl. 11. Raspodela temperature na nozi, na 25°C



Sl. 12. Raspodela temperature na ruci, na 25°C

Mape raspodele temperature za odgovarajuće zone tela, pri 298 K (25°C) temperature sredine, nalaze se na sl. 9. (za prednju stranu tela), sl. 10. (za zadnju stranu tela), na sl. 11. (za noge) i na sl. 12. (za ruke). Mape raspodele na 303 K (30°C) su na sl. 13. za prednju stranu, sl. 14. za zadnju stranu, sl. 15. za noge i na sl. 16. za ruke. Progresivno širenje zone više temperature prikazano je na sl. 17, koja je sačinjena prema podacima o raspodeli temperature. Na sl. 17. se zona više temperature širi, a primećeno je da se temperaturna razlika smanjuje sa povišenjem temperature sredine u bilo kojoj zoni. Odnosno, temperatura površine tela ima tendenciju da se izjednači sa povišenim temperaturama sredine. Najviša temperatura je primećena na obrvama, a najniža na vrhovima stopala i to pri bilo kojoj temperaturi sredine. Međutim, iznenađujuće je da temperaturna razlika postaje suviše mala sa povišenjem temperature sredine, od 11 K pri 289 K, do 3 K na 303 K.

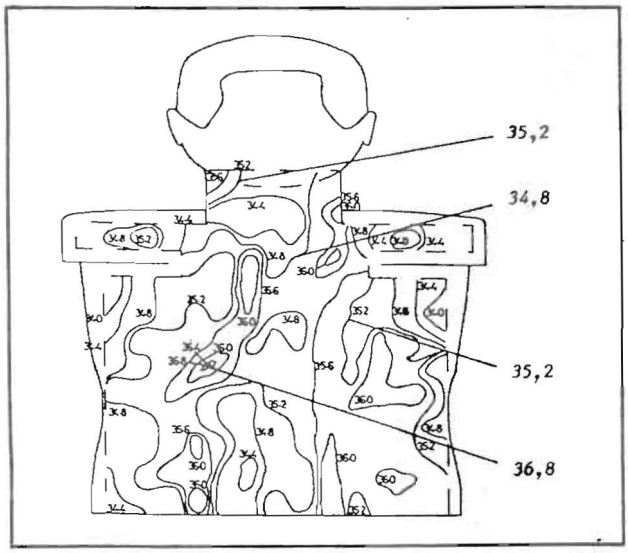
Tabela 2. Toplotni fluks čovekovog tela (W/m^2)

Zona čovekovog tela		Temperatura sredine (°C)		
		20	25	30
Glava	Ukupno	116,2	92,4	69,9
Vrat	Ukupno	92,5	73,5	63,2
Prednja strana tela	Ukupno	79,3	68,7	62,6
	Stomak	80,1	68,0	60,6
Zadnja strana tela	Ukupno	78,0	69,6	65,9
Ruka i šaka	Ukupno	73,5	60,6	64,5
	Gornji deo	85,1	60,8	62,9
	Donji deo	67,2	64,3	64,9
	Spoljna strana	53,3	64,9	68,0
Noga	Ukupno	55,2	52,8	62,4
	Gornji deo	63,7	56,2	61,2
	Koleno (gornji deo)	52,0	59,2	59,1
	Koleno (donji deo)	37,7	47,4	67,1
	Spoljna strana	24,0	22,4	67,9

3.2. Toplotni fluks sa površine čovečjeg tela

Srednje vrednosti toplotnog fluksa za zone čovečjeg tela, s obzirom na temperaturu sredine, nalaze se u tabeli 2. Raspodela toplotnih flukseva na 293 K (20°C) se vidi na sl. 18. za prednju stranu tela, na sl. 19. za zadnju stranu tela, sl. 20. za

noge i sl. 21. za ruke. Raspodela toplotnih flukseva na 298 K (25°C) i na 303 K (30°C) je prikazana na slikama 22-25. i 26-29.



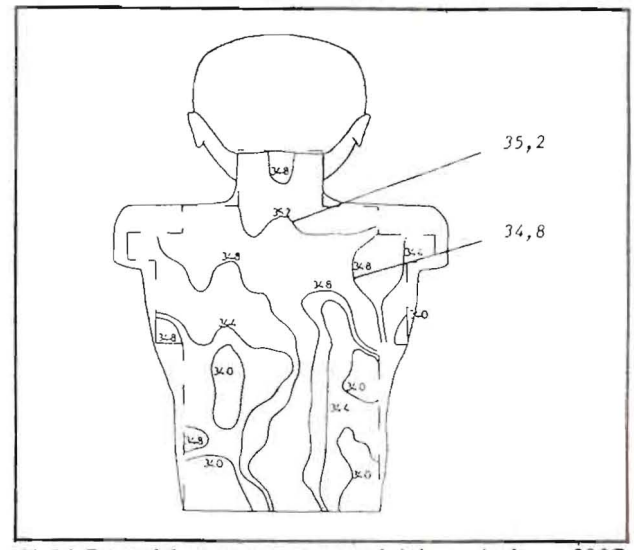
Sl. 13. Raspodela temperature na prednjoj strani tela, na 30°C

Tabela 3. Toplotni gubici iz čovečjeg tela (W)

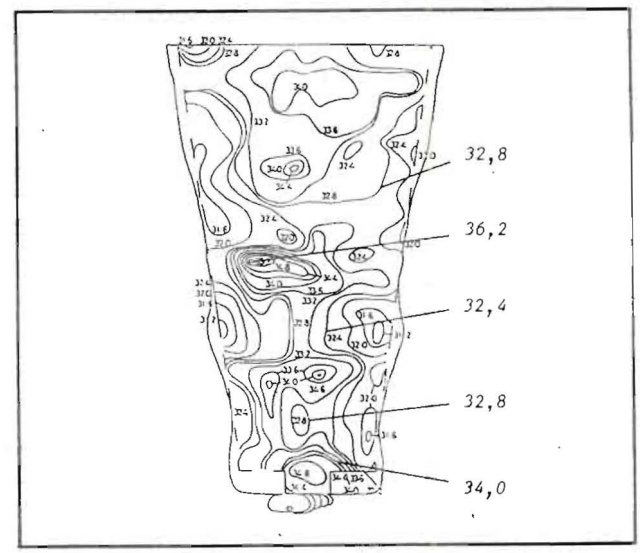
Zona čovečjeg tela	Temperatura sredine (°C)		
	20	25	30
Ukupno	131,3	114,2	114,3
Glava	18,3	14,6	11,0
	(14,0%)	(12,8%)	(9,7%)
Vrat	3,2	2,5	2,2
	(2,4%)	(2,2%)	(1,9%)
Telo	45,7	39,7	36,1
	(34,8%)	(34,7%)	(31,6%)
Ruka i šaka	29,4	24,3	25,8
	(22,4%)	(21,2%)	(22,6%)
Gornji deo	16,3	11,8	12,3
Donji deo	9,2	8,8	8,9
Spoljna strana	3,6	3,6	4,6
Noga	34,6	33,1	39,1
	(26,3%)	(29,0%)	(34,2%)
Gornji deo	12,2	10,7	11,7
Kolena (gornji deo)	6,4	7,3	7,3
Kolena (donji deo)	3,4	4,2	6,0
Spoljna strana	1,2	1,1	3,4

Raspodela toplotnih flukseva odgovara onima na temperaturi površine u najčešćim slučajevima, a veći toplotni fluks je primećen na glavi, vratu i gornjim delovima tela, na bilo kojoj temperaturi sredine, kakav je i slučaj sa raspodelom temperature. Najmanji toplotni fluks je na stopalama, osim na 303 K. Toplotni fluks za sve sekcije se povećava sa povišenjem temperature sredine (tabela 2). Razlika između najvećeg i najmanjeg toplotnog fluksa se smanjuje sa povišenjem temperature sredine i one iznose 60 W/m^2 pri 293 K, 40 W/m^2 na 298 K i 20 W/m^2 na 303 K.

Gubitak toplote prenesen sa površine čovekovog tela je prikazan u tabeli 3. Te vrednosti su izračunate pomoću proizvoda zona sekcija i toplotnih flukseva nabrojanih u tabeli 2. Ukupan gubitak toplote sa čovekovog tela iznosi 131 W na 293 K, 114 W na 298 K i 114 W na 303 K. Gubitak toplote tela iznosi 34,8% od ukupnog gubitka toplote na 293 K i 34,7% na 298 K, dok delimičan gubitak toplote ima maksimalnu stopu od 34,2% za noge na 303 K, a za telo je 31,6%. Ukupan gubitak toplote izmeren u sobi za ispitivanje, prikazan na sl. 1, 2. i 3, iznosio je 130 W na 298 K temperaturi vazduha uvedenog u ispitnu sobu. Razlika iznosi 16% ukupnog gubitka toplote merenog u sobi. Ova razlika se pripisuje isparavanju.



Sl. 14. Raspodela temperature na zadnjoj strani tela, na 30 °C

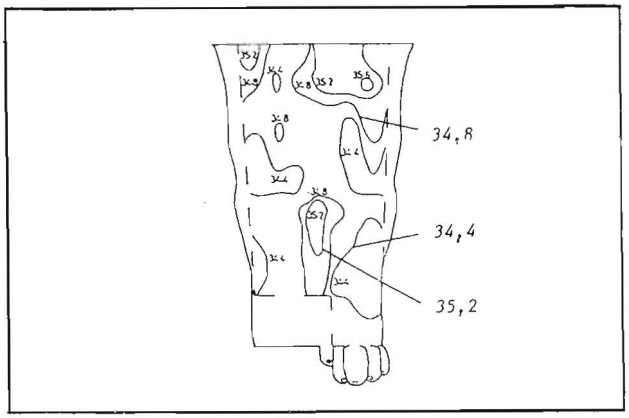


Sl. 15. Raspodela temperature na nozi, na 30°C

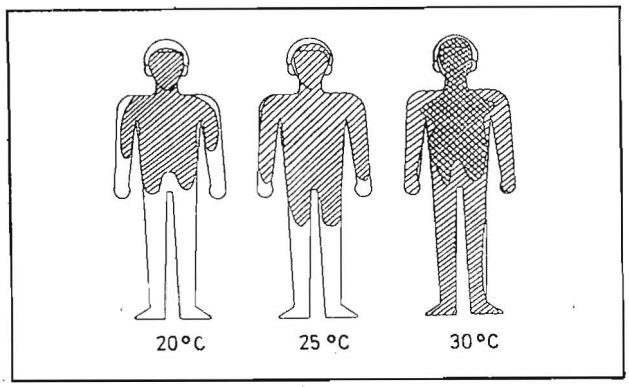
4. Analiza problema

Prema rezultatima eksperimenta, čovekovo telo precizno reguliše temperaturu kože i toplotni fluks, u odnosu na temperaturu sredine i zadržava unutrašnju temperaturu čovekovog tela konstantnom. U tabelama 1. i 2. temperatura čovekovog tela raste sa povišenjem temperature sredine, dok se toplotni fluks smanjuje, osim zona nogu i ruku. Temperaturni opseg čovečjeg tela je veoma mali za normalno fizičko stanje, tj. oko 35-37°C. Temperatura površine raste sa povišenjem temperature sredine, ali je stopa povišenja vrlo mala u poređenju sa onom koju ima temperatura sredine, pa razlika obe temperature postaje mala. Otuda, toplotni fluks se smanjuje sa povišenjem temperature sredine. Međutim, stopa povišenja

temperature na nogama i rukama je veća od one u ostalim zonama tela i toplotni fluks znatno raste, u opsegu od 298 do 303 K. Toplotni fluks se povećava za 9,6 W/m^2 sa nogu i 3,9 W/m^2 sa ruku. Posebno, noga pokazuje zanimljivo ponašanje u pogledu toplotnog fluksa. U zoni nogu, toplotni fluks sa nižih zona kolena iznosi 37,7 W/m^2, a toplotni fluks sa spoljne strane iznosi 24,0 W/m^2, dok je izuzetno mali u bilo kojoj drugoj zoni. Kada temperatura sredine raste na 303 K, toplotni fluks na nogama znatno raste do 67,1 W/m^2, kao i toplotni fluks sa spoljne strane nogu od 67,9 W/m^2.



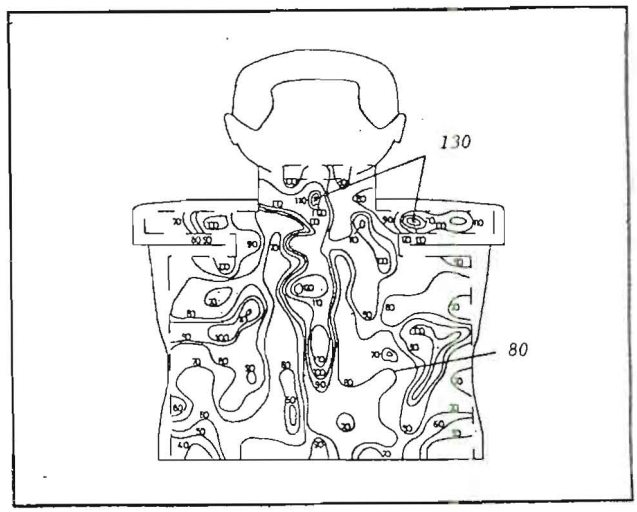
Sl. 16. Raspodela temperature na ruci, na 30°C



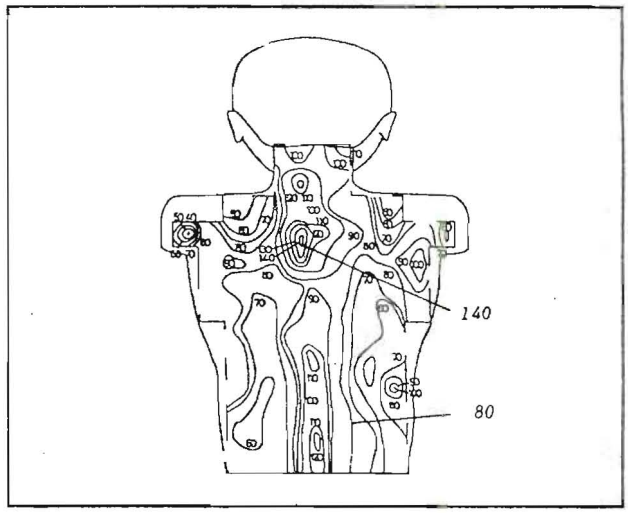
Sl. 17. Progresivno širenje zone visoke temperature na površini čovečjeg tela

U okruženju sa višom temperaturom, čovekovo telo povišava temperaturu da bi se povećao toplotni fluks, ali temperaturna razlika između površine tela i okoline postaje mala i toplotni fluks se smanjuje. Međutim, temperatura na površini nogu i ruku, posebno na stopalama, znatno raste i toplotni fluks se znatno povećava, da bi kompenzovao smanjenje toplotnog fluksa sa telesnih zona. Ista tendencija je primećena u podacima o gubicima toplote, navedenim u tabeli 3. Odnos toplotnog gubitka iz zona na čovekovom telu i ukupnih toplotnih gubitaka se smanjuje sa povišenjem temperature sredine, osim iz one na nogama. Gubitak toplote iz zone nogu menja se od 26% ukupnih gubitaka toplote, na 34,2%, sa povišenjem temperature sredine. Osobito toplotni fluks iz nižih zona nogu i iz stopala na 303 K je dvaput veći odnosno tri puta na 293 K. U odnosu toplotnog fluksa na rukama i temperature sredine nije primećena znatna promena, ali se toplotni fluks ruku povećava za oko 30% od onog na 293 K u eksperimentu.

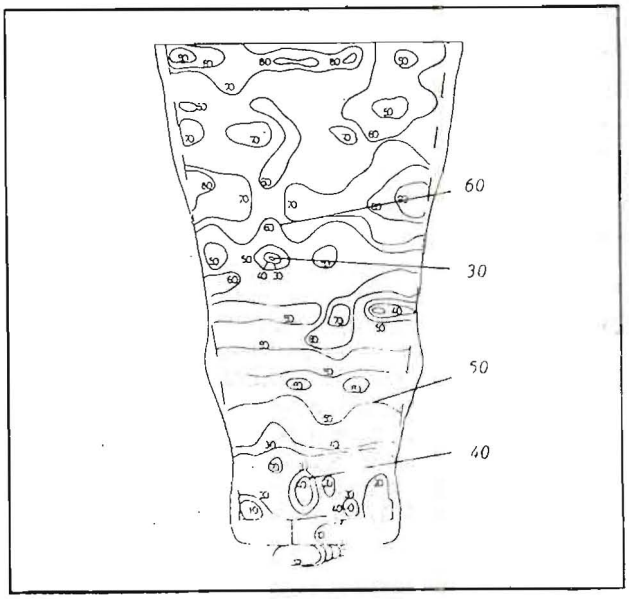
Prema eksperimentalnim rezultatima i analizi, niže zone nogu i ruku imaju ulogu važnih elemenata "radijatora" za čovekovo telo. Važni i glavni organi, kao što su mozak, srce, pluća, jetra i ostali organi, spojeni su u zonu glave i zonu tela. Smatra se da se temperatura u zoni glave i zoni tela mora održavati u opsegu pogodnih vrednosti, da bi se sačuvali normalna fizička kondicija i potrebni uslovi življenja, dok su noge i ruke pomoćni regulacioni temperaturni sistem čovečjeg tela. Kao tipičan primer, dobro je poznato da beba ili dete regulišu svoje toplotne gubitka za vreme spavanja zračenjem sa nogu i stopala.



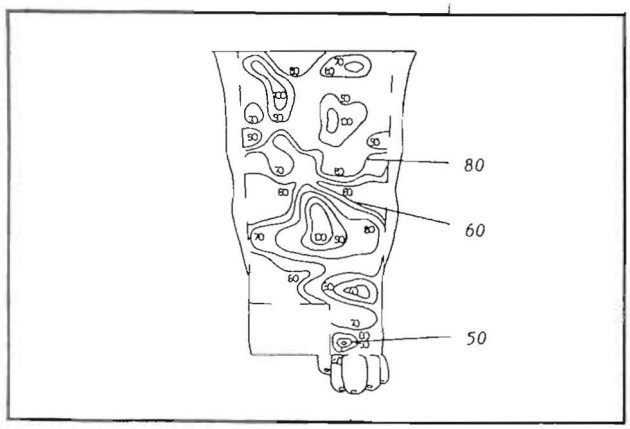
Sl. 18. Toplotni fluks na prednjoj strani, na 20°C



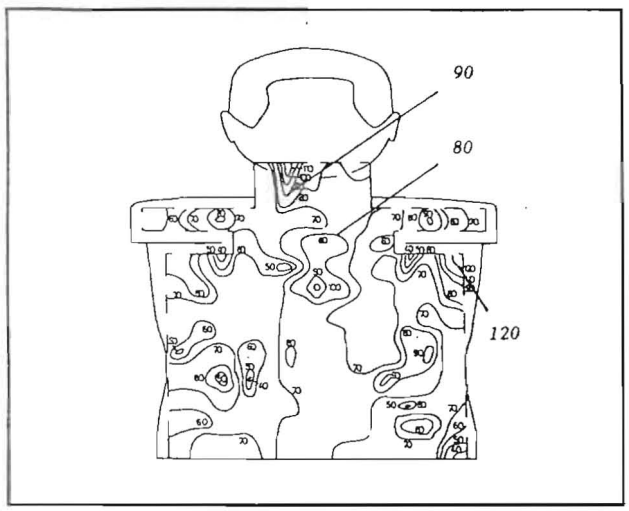
Sl. 19. Toplotni fluks na zadnjoj strani, na 20°C



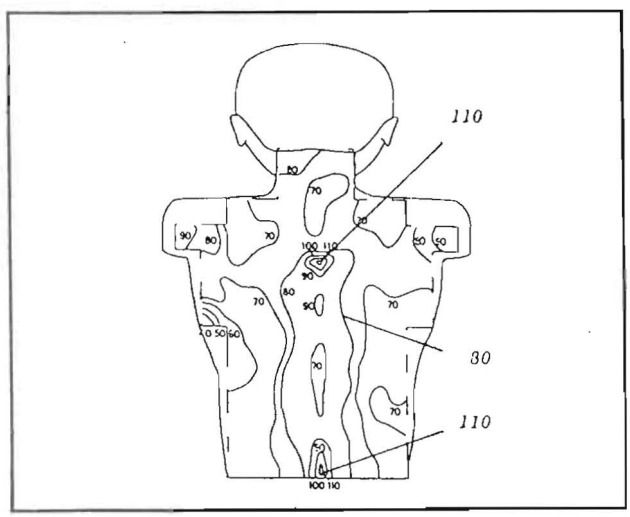
Sl. 20. Toplotni fluks na nozi, na 20°C



Sl. 21. Toplotni fluks na ruci, na 20°C

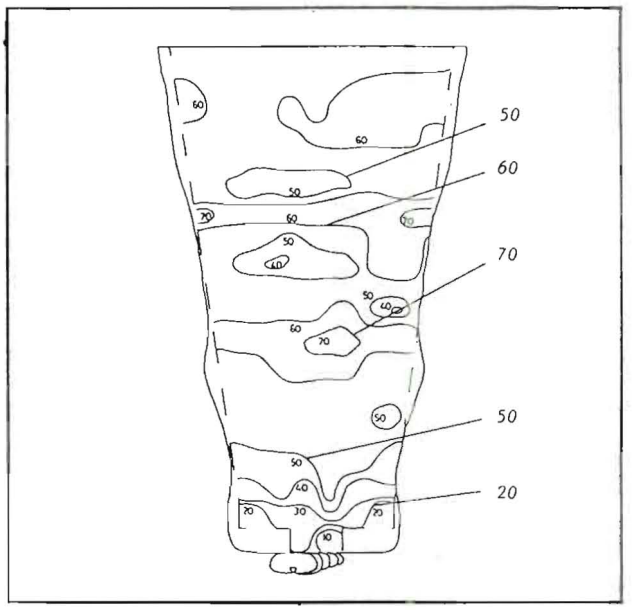


Sl. 22. Toplotni fluks na prednjoj strani, na 25°C

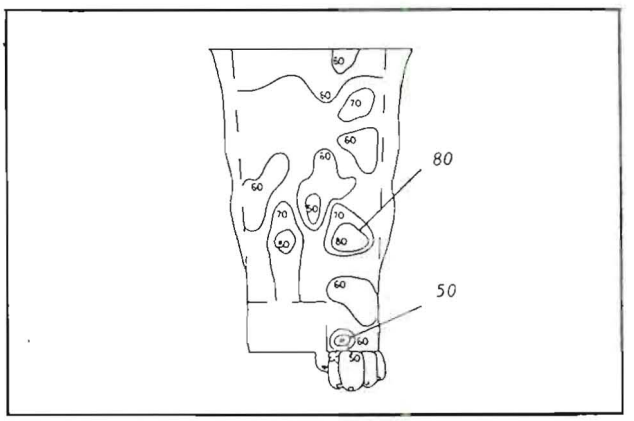


Sl. 23. Toplotni fluks na zadnjoj strani, na 25°C

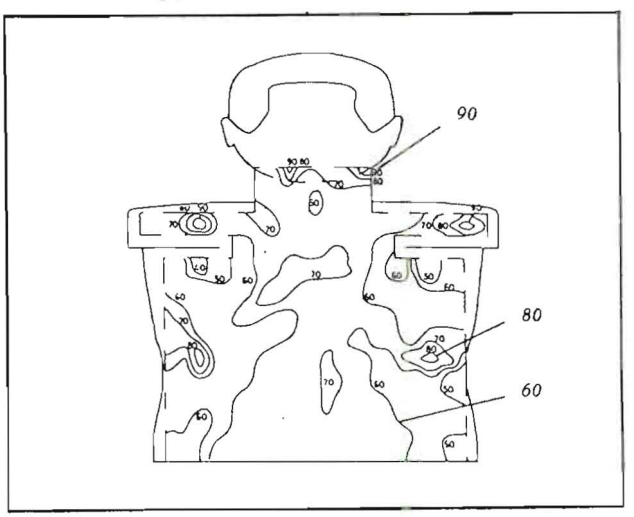
Sistem cirkulacije krvi je važan ne samo za prenos kiseonika i ostalih vitalnih materijala, već i toplotne energije. Tako čovekovo telo reguliše gubitak toplote nasuprot uslovima sredine, regulisanjem provršinske zone kože i stope strujanja krvi (Kuroshima, 1982). Podaci dobijeni u navedenom eksperimentu su oni o samo jednoj osobi. Tačnije govoreći, oni su za svaku osobu različiti, i zavise od pola, rase i uzrasta. Međutim, taj eksperiment daje tačne i brojne podatke i informacije o tendencijama regulisanja temperature čovekovog tela.



Sl. 24. Toplotni fluks na nozi, na 25°C



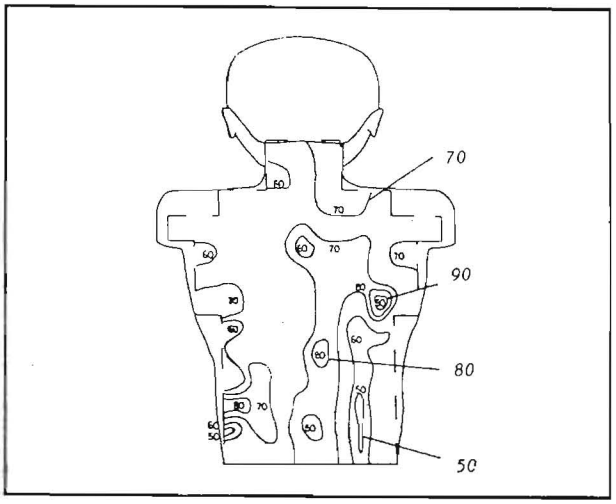
Sl. 25. Toplotni fluks na ruci, na 25°C



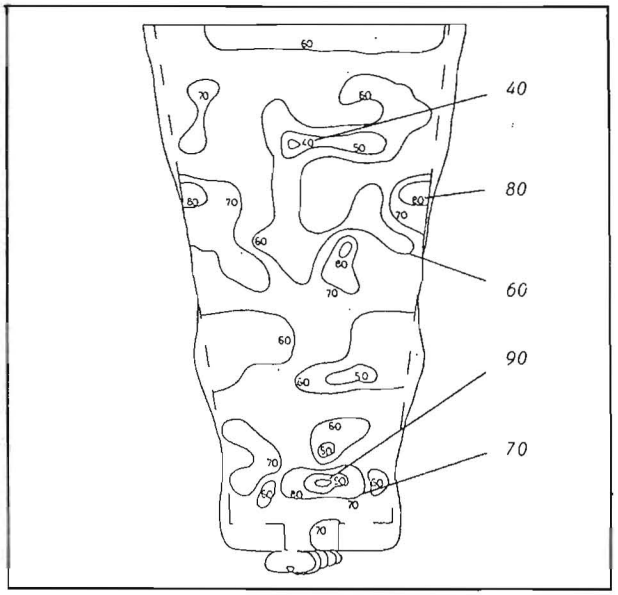
Sl. 26. Toplotni fluks na prednjoj strani, na 30°C

5. Zaključak

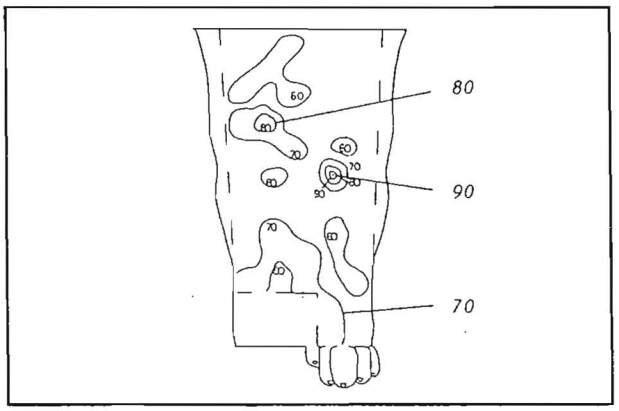
Raspored temperature i toplotnog fluksa na površini čovekovog tela mereni su detaljno u uslovima mirovanja, na 20, 25 i 30°C temperature sredine.



Sl. 27. Toplotni fluks na zadnjoj strani, na 30°C



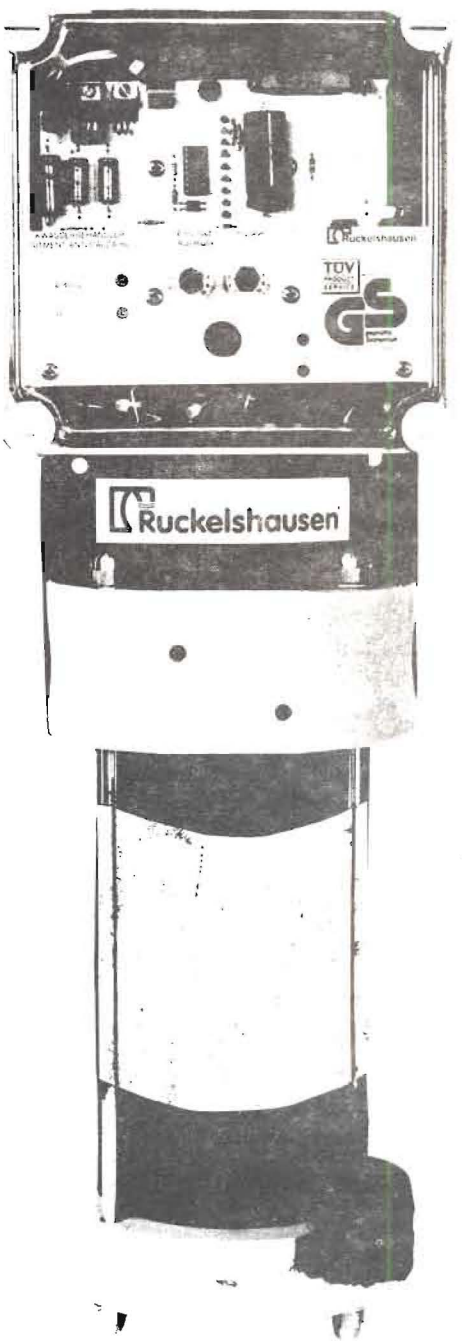
Sl. 28. Toplotni fluks na nozi, na 30°C



Sl. 29. Toplotni fluks na ruci, na 30°C

Temperatura površine raste i ima tendenciju da se izjednači na čitavoj površini, sa povišenjem temperature sredine. Posebno, povišenje temperature je znatno u nižim zonama nogu i stopala. Zona više temperature je upadljiva na glavi i u srednjem delu tela, na bilo kojoj temperaturi sredine.

ЕВРО-ИНЖЕЊЕРИНГ
МАРКЕТИНГ, КОНСАЛТИНГ, ИНОВАЦИЈЕ
11000 Београд, Груја Мишићевића [illegible] тел: 011/558-685



kgh