

URAVNAVANJE TELESNE TEMPERATURE PRI ČLOVEKU

► Boštjan Rituper

Človek je endotermen oz. toplokrven organizem, kar pomeni, da je sposoben vzdrževati stalno telesno temperaturo. Evolucijsko gledano je to prednost, saj nam stalna telesna temperatura omogoča boljšo prilagodljivost na razmere v okolju in lažje preživetje v hladnejših klimatskih pasovih.

📷 Infrardeča fotografija omogoča prikaz temperaturnih razlik med posameznimi območji človekovega telesa. Rdeče obarvani deli so najtoplejši, modro obarvani pa najhladnejši.

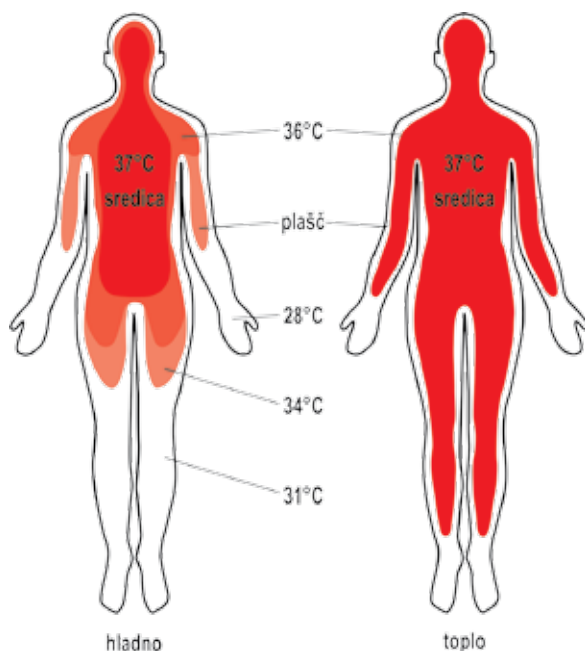
ČLOVEŠKO TELO LAHKO V OKVIRU URAVNAVANJA telesne temperature razdelimo na sredico in plašč, vendar je meja med njima nejasna in se spreminja s temperaturo okolja. Telesna temperatura sredice zdravega človeka, kamor spadajo notranji organi (jetra, srce, možgani ...), je med 36 in 37,5 °C ter se skoraj ne spreminja. V nasprotju s tem pa je temperatura kože, ki je del telesnega plašča, precej bolj izpostavljena temperaturnim spremembam v okolici in deluje kot izolativna plast med sredico in okoljem. Da se lahko vzdržuje stalna temperatura sredice, mora biti količina prejete toplote enaka količini oddane toplote. Z drugimi besedami, toplotna bilanca telesa mora biti ničelna. Za vzdrževanje ničelne toplotne bilance so se z evolucijo razvili mehanizmi, ki jim s skupnim imenom rečemo termoregulacija.

v notranjih organih, zelo občutljive na temperaturne spremembe. To se lepo pokaže pri hladnokrvnih oz. poikilotermnih živali (npr. kačah), ki so v hladnejšem delu dneva počasnejše in se morajo najprej ogreti na 'delovno' temperaturo. Resda se endotermni organizmi z mehanizmi termoregulacije temu izognejo,

📷 Sredica in plašč telesa pri različnih temperaturah okolice

► POMEN STALNE TEMPERATURE

Endotermne živali vzdržujejo stalno telesno temperaturo, saj so biokemijske presnovne reakcije, ki potekajo



a zato veliko slabše prenašajo podhladitev na temperature, pri katerih hladnokrvne živali nimajo posebnih težav. Poleg vpliva na metabolizem pa nihanje temperature vpliva na tkiva tudi neposredno. Zelo visoke temperature ($>45\text{ }^{\circ}\text{C}$) spremenijo tridimenzionalno strukturo (denaturacija) in s tem tudi funkcijo proteinov. Po drugi strani pa temperature, pri katerih prihaja do nastanka kristalov ledu, celice poškodujejo mehansko in tudi kemijsko, saj se ob zmrzovanju povečuje koncentracija znotrajceličnih ionov.

▶ MEHANIZMI NASTAJANJA IN ODDAJANJA TOPLOTE

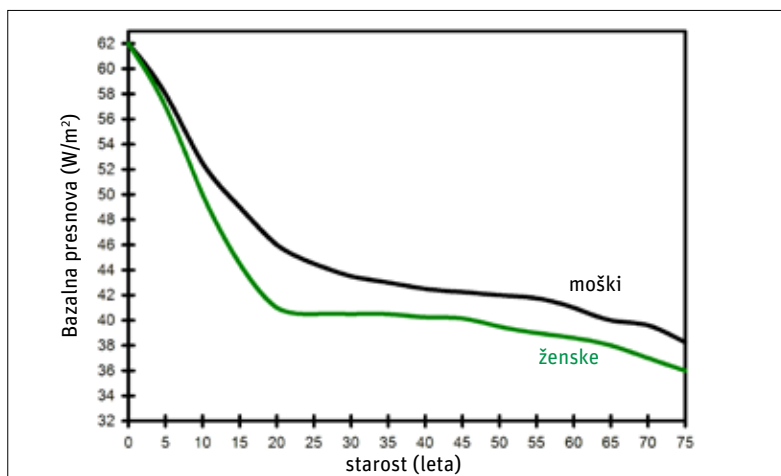
Med mirovanjem večina toplote nastane v sredici telesa kot posledica presnovnih biokemijskih reakcij. Dejavniki, ki pomembno vplivajo na to t. i. bazalno presnovo, so starost, spol, nekateri hormoni in prebava. Najvišjo bazalno presnovo in s tem največje nastajanje toplote na kilogram mase imajo dojenčki. Bazalna presnova z leti upada, je pa pri moških za okoli 20 % višja kot pri ženskah (moški v mirovanju povprečno

ustvari okoli 300 kJ toplote na uro). Na bazalno presnovo vplivata tudi adrenalin in ščitnični hormon tiroksin, ki delujeta tako, da spodbujata oksidativne presnovne procese v celicah, pospešujeta delovanje srca in dihanje ter tako povečujeta nastajanje toplote. Večje sproščanje tiroksina in večja ščitnica verjetno pomagata Eskimom pri preživetju v polarnih območjih, pomembno vlogo pa igra tudi prehrana, saj se presnova po zaužitju obroka za nekaj ur poveča za 10–20 %. Toplota nastaja tudi med mišično dejavnostjo. Tako se nastajanje toplote med intenzivnim delom lahko poveča tudi do desetkrat. Razlog je v relativni neučinkovitosti mišic pri pretvorbi kemične energije v mehansko. Največji izkoristek mišic je namreč 25–30 %.

Odvečna toplota se v okolico oddaja prek kože, in sicer v obliki štirih fizikalnih procesov: sevanja, prevajanja, konvekcije in izparevanja.

Sevanje (radiacija) pomeni izgubo toplote v obliki infrardečih elektromagnetnih valov z valovnimi dolžinami od 5 do 20 μm . Količina toplote, ki se lahko odda na ta način, je odvisna od temperaturne razlike

↳ Podobno kakor ljudje lahko tudi nevrnske mreže v oblakih prepoznajo različne podobe. (Vir: Peter Zidar, DeepDream)



med telesom in okolico ter od površine telesa. Običajno tako oddamo 60 % toplote. Če je temperatura okolice višja od temperature telesa, se telo s sevanjem ogreva.

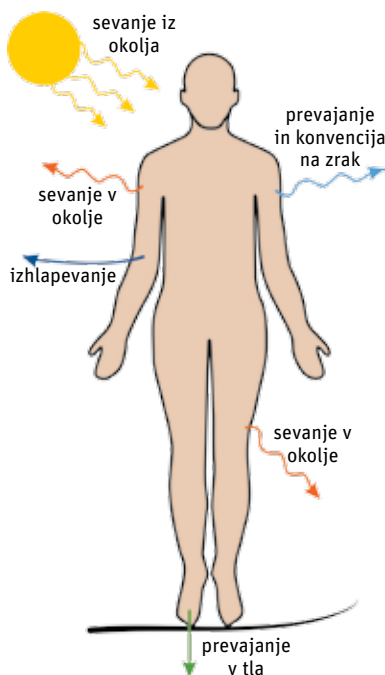
Prevajanje pomeni neposreden prenos toplote z ene površine (kože) na drugo. Toplota je namreč kinetična energija molekul, ki nenehno vibrirajo, te vibracije pa se ob stiku prenesejo. S prevajanjem toplote neposredno na zrak, ki pride v stik s kožo, običajno izgubimo okoli 15 % toplote. Ta delež se ob vetrovnem vremenu ali v vodi (glej spodaj) lahko močno poveča.

Konvekcija pomeni izgubo toplote zaradi gibanja zračnih (ali drugih) mas in je zmeraj sklopljena s prevajanjem. Ker se zrak okoli nas ves čas premika, se molekule zraka, ki smo jih že ogreli, sproti nadomeščajo z novimi.

Najučinkoviteje pa človek oddaja toploto s pomočjo *izhlapevanja* znoja. Z vsakim mililitrom izhlapljenega znoja gre v okolico okoli 2,4 kJ toplote. Ta proces poteka tudi, ko je temperatura okolice višja od temperature telesa, in omogoča preživetje v vročih klimatskih pasovih. Edini pogoj je, da zrak v okolici ni stoočtostno nasičen z vlago, saj takrat izhlapevanje ni mogoče.

► ZGRADBA TERMO-REGULACIJSKEGA SISTEMA

Tako kot večino uravnanih količin človeško telo tudi temperaturo primarno uravnava po principu negativne povratne zanke. To pomeni, da se, če se uravnavana količina (temperatura telesa) zmanjša, sprožijo mehanizmi, ki to količino spet približajo začetni vrednosti. Vsako negativno zanko sestavljajo



Med fizikalne procese oddajanja in prejemanja toplote spadajo sevanje (radiacija), prevajanje (kondukcija), konvekcija in izhlapevanje (evaporacija).

trije ključni sestavni deli: receptorji, nadzorni center in efektorji.

Da lahko telo vzdržuje stalno telesno temperaturo, je potreben neprekinjen dotok informacij iz termoreceptorjev – elementov, ki v telesu zaznavajo temperaturo. Najdemo jih predvsem v možganih in koži, delimo pa jih na centralne in periferne. Centralni receptorji so živčne celice v posebnem predelu možganov, ki je namenjen vzdrževanju notranjega okolja telesa (hipotalamus). Večina centralnih receptorjev zaznava povišanje, slaba tretjina pa znižanje temperature sredice telesa. Glavna naloga centralnih receptorjev je torej preprečevanje pregrevanja telesa. Periferne receptorje najdemo predvsem v koži in nekaj tudi drugje. Ti prosti živčni končiči so v primerjavi s centralnimi večinoma občutljivi na padec temperature. Njihova naloga je preprečevanje podhladitve telesa.

Informacije iz termoreceptorjev se prek živčnih povezav stekajo v hipotalamus, kjer je nadzorni center mehanizmov termoregulacije. Ta deluje podobno kot termostat: ko ugotovi, da se telo segreva, sproži mehanizme, ki povečajo oddajanje ter hkrati zmanjšajo nastajanje toplote in obratno. To stori prek t. i. efektorjev – organov, ki imajo sposobnost prilagajanja proizvodnje ali oddajanja toplote. Med pomembnejše efektorje pri človeku spadajo koža, mišice in žleze znojnice.

▶ **MEHANIZMI TERMOREGULACIJE**

Predstavljajte si maratonca sredi poletja. Zaradi povečanega mišičnega dela se nastajanje toplote v telesu nekajkrat poveča. Ob nespremenjenem oddajanju bi bilanca toplote postala pozitivna in telo bi se pregrelo, vendar zaradi učinkovite termoregulacije kljub visoki zunanji temperaturi do tega ne pride. Poglejmo, kako deluje termoregulacija.

Kmalu po začetku teka začne telesna temperatura naraščati. Porast zaznajo periferni in centralni receptorji za toplo ter informacije

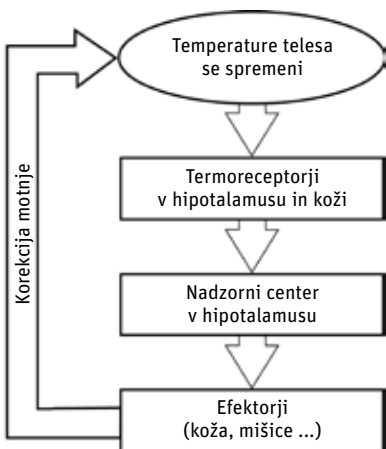
prenesejo v hipotalamični termoregulatorni center, kjer se zaznana temperatura primerja s prednastavljeno vrednostjo. Ker je nastavljena vrednost nižja od zaznane, center sproži mehanizme, ki povečajo oddajanje toplote in zmanjšajo nje nastajanje. Najprej se razširijo krvne žile v koži (vazodilatacija). Pretok krvi prek kože lahko primerjamo s pretokom hladilne tekočine skozi radiator v avtomobilskem motorju. Ker se vsa toplota oddaja v okolje prek kože, se s povečanjem pretoka krvi, ki dostavlja toploto iz sredice telesa, sposobnost oddajanja toplote v okolico močno poveča. Maksimalna vazodilatacija poveča pretok krvi prek kože za tridesetkrat in prenos toplote na telesno površino okoli osemkrat. Ob tem se sproži tudi znojenje, zaradi česar se sposobnost oddajanja toplote v okolico poveča do desetkrat. Sprožijo se še mehanizmi, ki zmanjšujejo nastajanje toplote. Med te spadata zaviranje mišične aktivnosti (prepreči se drgetanje) in presnove, kar pri maratoncu seveda ne pride v poštev. Se pa lahko ta poslužuje vedenjskih prilagoditev, kot sta polivanje s hladno vodo in počitek v senci. Do obratnih procesov pride, če se telo podhladi.

▶ **ODKLONI OD NORMALNE TEMPERATURE**

Če smo izpostavljeni okoliščinam, ki presega sposobnost prilagajanja termoregulacijskih mehanizmov, pa tudi v primeru bolezni, ki vplivajo na termoregulacijski sistem, lahko pride do podhladitev (hipotermija) ali pregretja telesa (hipertermija).

Nenamerna (akcidentalna) hipotermija se običajno razvije v hladnej-

↻ **Termoregulacijski sistem je sestavljen iz termoreceptorjev v hipotalamusu in koži, nadzornega centra v hipotalamusu in efektorskih organov, kamor spadajo koža in mišice.**



ših klimatskih pasovih kot posledica različnih nesreč (alpinizem, brodolom), zelo redko pa nastane zaradi bolezenskih procesov v območju hipotalamusa. K razvoju hipotermije so bolj nagnjene osebe, ki imajo manj učinkovito termoregulacijo (starejši in dojenčki, osebe pod vplivom alkohola in drugih psihoaktivnih drog, zdravil, slabše prehranjeni ter osebe z boleznimi ščitnice), in osebe, ki so službeno ali rekreativno bolj izpostavljene mrazu (vojaki, alpinisti ...). Prvi znak podhladitve telesa je drgetanje, s katerim telo za štiri- do petkrat poveča nastajanje toplote. Hkrati se skrčijo tudi žile v koži, kar zmanjšuje izgubo toplote, zaradi neugodja pa začne človek iskati zatočišče. Če ti obrambni mehanizmi ne zadoštujejo ali so zaradi bolezni oz. drugih dejavnikov okvarjeni in je bilanca toplote še naprej negativna, pri temperaturi sredice telesa okoli 32 °C začne termoregulacija odpovedovati. Na tej točki namreč zaradi neposrednega vpliva temperature na presnovo ta ne zadošča več trenutnim potrebam. Razvijejo se zmedenost, dezorientiranost ter motnje ravnotežja in govora. Zmedenost je najverjetneje razlog, da okoli polovico vseh ponesrečencev najdejo golih (paradokсно slačenje). Pri hudi hipotermiji (<28 °C) počasi ugasnejo refleksi, zmanjšata se dihanje in delovanje srca, pogosto se razvijejo tudi motnje srčnega ritma. Smrt pri človeku nastopi pri temperaturi telesne sredice okoli 25 °C, in sicer najpogosteje zaradi odpovedi delovanja možganskega debla ali srca. Zlasti hitro do podhladitve pride pri brodolomcih ali pri potapljanju v hladnih vodah. Voda ima namreč v primerjavi z zrakom več-

tisočkrat večjo specifično toploto in okoli dvajsetkrat večjo toplotno prevodnost, kar pomeni, da se v okolico mnogo hitreje izgublja veliko več toplote. Padec v vodo s temperaturo 10 °C je lahko usoden že po eni uri, v vodo s temperaturo blizu zmrzišča pa po 15 minutah.

Veliko pogostejše kot podhladitev celotnega telesa so lokalne poškodbe zaradi delovanja mraza. Mednje spadajo ozeblina in omrzlina, ki so posledica prekinitve krvnega obtoka (t. i. ishemična poškodba) in nastanka ledenih kristalov, ki tkivo poškodujejo mehansko. Običajno so prizadeti prsti na rokah ali nogah, nos, lica in ušesa.

Poleg akcidentalne poznamo tudi *terapevtsko hipotermijo*, kjer učinko podhladitve telesa uporabimo v zdravstvene namene. Zaradi vpliva na presnovne procese se v podhlajenem telesu zmanjša potreba po kisiku, s tem pa se podaljša preživetje celic, ki so ostale brez pretoka krvi. To s pridom izkoriščamo pri operacijah, kjer je treba ustaviti srce, s podhlajevanjem pa zmanjšamo možnost poškodbe možganov med operacijo. Poleg tega je podhlajevanje zelo pomemben postopek tudi pri osebah, ki so doživele akutni infarkt srca, saj bistveno zmanjša umrljivost teh bolnikov. Bralec pa bo verjetno imel več izkušenj z lokalnim podhlajevanjem tkiva, ki pri zvitem gležnju zmanjša oteklino in bolečino.



Omzrlina
(foto: Dr. S. Falz;
Wikimedia)

Hipertemija oz. pregretje telesa se razvije, če zunanje razmere onemogočajo zadostno oddajanje toplote (eksogena hipertermija), ob različnih okužbah (vročina), pri nekaterih boleznih ter – redko – med anestezijo (maligna hipertermija). O hipertemiji govorimo, ko temperatura sredice telesa preseže 37,5 °C. Najpogostejši vzrok zanjo so okužbe, ko skupaj s povzročiteljem pridejo v telo različne molekule, ki spodbujajo delovanje imunskega sistema. Takšnim molekulam rečemo eksogeni pirogeni (gr. pyr = ogenj; genein = ustvariti). Delujejo tako, da pri imunskih celicah izzovejo sproščanje endogenih pirogenov, ti pa učinkujejo na hipotalamus, kjer spremenijo vrednost predstavljene temperature. Telo se na spremembo odzove tako, da vključi mehanizme, ki ustvarijo pozitivno toplotno bilanco. Zaradi skrčenja žil v koži postane ta hladna, človek pa se zaradi povečane mišične aktivnosti trese (drgeta). Temu pojavu, s katerim je bralec nedvomno že seznanjen, rečemo mrzlica. Zdravila, s katerimi zdravimo vročino (antipiretiki, npr. lekadol in aspirin), delujejo tako, da zavirajo učinek endogenih pirogenov na hipotalamus.

Eksogena hipertermija je posledica bivanja v okolju, kjer je tempera-

tura višja od telesne, izhlapevanje znoja oteženo, človek pa je telesno dejaven (npr. vojaki v džungli). Zaradi pozitivne toplotne bilance se sprožijo mehanizmi za oddajanje toplote (potenje, vazodilatacija v koži). Če ti niso dovolj učinkoviti in se začne sredica telesa pregrevati, se lahko razvije vročinska kap. Gre za nujno stanje, ki nastopi pri segretju sredice nad 41 °C, ko začne termoregulacija odpovedovati. Pojavita se zmedenost in bruhanje, v nadaljevanju pa nezavest in koma. Do smrti pride zaradi odpovedi delovanja notranjih organov.

Urnavaanje telesne temperature je eden najpomembnejših mehanizmov, ki omogoča vzdrževanje notranjega telesnega okolja. Že razmeroma majhne spremembe telesne temperature močno vplivajo na presnovo in s tem na delovanje telesa. Zato so negativne povratne zanke, ki se vpletajo v urnavanje te količine, visoko na telesni prioritetni lestvici in imajo prednost pred večino drugih mehanizmov homeostaze. V praksi to pomeni, da bi naš maratonec v primeru pretiravanja umrl zaradi dehidracije (zaradi potenja) in ne zaradi pregretja (hipertermije).

🔗 Vročinska izčrpanost po koncu teka (foto: Eckhard Pecher; Wikimedia)



VIRI IN LITERATURA

- ▶ John E. Hall: Textbook of medical physiology; Elsevier Health Sciences, 2010.
- ▶ Dennis Kasper in sod.: Harrison's Principles of Internal Medicine; McGraw Hill Professional, 2015.

SPLETNI NASLOVI

- ▶ <http://sl.wikipedia.org/wiki/Termoregulacija>
- ▶ <http://en.wikipedia.org/wiki/Hypothermia>
- ▶ <http://en.wikipedia.org/wiki/Hyperthermia>

oglas