

# Působení vysokých teplot na organismus

## Úvod

Člověk, jakožto teplokrevný (**homoiotermní**) živočich se vyznačuje tím, že je schopen za využití termoregulačních mechanismů udržovat **stálou teplotu jádra**, tj. hluboko uložených orgánů, téměř nezávislou na změnách okolního prostředí. Organismus jako otevřený systém je se svým okolím v neustálé interakci. Konstantní udržování teploty je možné pouze, je-li **produkce tepla v rovnováze s jeho výdejem**.

Z hlediska termodynamiky je lidský organismus **otevřeným termodynamickým systémem**. U takových systémů dochází k výměně látek, energie a informací s okolím. Za normálních podmínek organismus získává podstatnou část energie z potravy ve formě energie chemické. Nepatrnou část energie z okolního prostředí tvoří energie chemická, světelná, mechanická a **tepelná**, vyvolávající podráždění příslušných receptorů a následně adekvátní vjem.

Teplo v organismu vzniká převážně jako **vedlejší produkt jiných forem energie**, pouze výjimečně vzniká cíleně (chladový třes jako mechanismus termoregulace). Aby se toto teplo v organismu neakumulovalo a tím nezvyšovala jeho teplota, je organismus schopen do jisté míry jeho odvod do okolí regulovat. Vysoké teploty ochlazování organismu brání a mohou způsobit **zahřívání**.

Systém je schopný **regulovat v určitém rozmezí svou teplotu**, pokud se ale překročí a regulace teploty již není možná, teplota jádra (hluboko uložených orgánů) vzrůstá. Toto vede k přehřátí a kolapsu organismu.

**Autoregulace teploty je zpětnou vazbou organismu**. Její princip spočívá v tom, že regulační centrum neustále porovnává požadovanou teplotu se skutečnou teplotou jádra a na základě jejich rozdílu řídí příjem a výdej tepla.

Centrem regulace teploty je **hypothalamus**. V předním hypotalamu se nacházejí centrální termoreceptory. Dvě třetiny z nich reagují na teplo, třetina na chlad. Termoregulační centrum uložené v zadním hypotalamu samo o sobě není citlivé na teplotu, „propočítává“ však informace přicházející z periferních termoreceptorů, které se nacházejí především v kůži, a vysílají řídicí signály. Na periférii je desetkrát více chladových receptorů (*Krauseho tělíska*) než tepelných (*Ruffiniho tělíska*). (viz Termoregulace)

Stálá tělesná teplota člověka je nastavena na **37 °C**.

## Mechanismy výměny tepla a vlivy klimatických podmínek na organismus

Tepelná výměna probíhá do doby, než nastane rovnovážný stav.

Teplo přijaté (odevzdané) tělesem závisí na hmotnosti tělesa ( **$m$** ), na zvýšení (snížení) teploty tělesa ( **$t - t_0$** ), ( **$t_0 - t$** ) a na druhu látky  **$c$**  (měrná tepelná kapacita).

**Kalorimetrická rovnice:**

Teplo přijaté:  **$Q_1 = m \cdot c \cdot (t - t_0)$**

Teplo odevzdané:  **$Q_2 = m \cdot c \cdot (t_0 - t)$**

### Radiace

**Radiace** (sálání) je přenos tepla z jednoho tělesa na druhé o rozdílné teplotě **infračerveným elektromagnetickým zářením**, aniž by se oba předměty dotýkaly. Množství takto přeneseného tepla podle **Stefan-Boltzmannova zákona** odpovídá funkci čtvrté mocniny teploty sálajícího tělesa. Stejným mechanismem působí okolí zpětně na lidské tělo, to znamená, že celková vyzářená energie je úměrná rozdílu čtvrtých mocnin povrchové teploty těla a teploty objektů v okolí. Teplota vzduchu, kterým tepelné záření prochází, má na přenos tepla pouze malý vliv. V důsledku sálání tak osoba může pociťovat chlad v místnosti s chladnými stěnami, i když je vzduch v místnosti poměrně teplý. Osoba v chladném prostředí ztrácí teplo vedením do vzduchu, který ji obklopuje a sáláním na chladné předměty ve své blízkosti. Naopak, jedinec v teplejším prostředí, než je jeho tělo tělesná teplota, stejnými mechanismy teplo přijímá a jeho teplota stoupá. Za chladného slunečního dne se sluneční tepelné záření odráží od světlých předmětů a přispívá tak k oteplování. V našich klimatických podmínkách představuje sálání až **60 %** celkových tepelných ztrát.

### Konduktce

**Konduktce** (vedení) je předávání tepla dotykem mezi dvěma různě teplými tělesy. Dochází při něm k **přenosu tepelné energie** z místa (tělesa) o vyšší teplotě do místa (tělesa) o nižší teplotě. Molekuly jsou v pohybu a energie jejich pohybu je úměrná teplotě. Molekuly teplejšího tělesa narážejí na molekuly tělesa chladnějšího a tím na ně přenášejí část své tepelné energie. Množství přeneseného tepla je úměrné rozdílu teplot obou dotýkajících se předmětů (tepelnému gradientu). Teplo může být předáváno vedením také okolnímu vzduchu. V lidském

organismu je nejvýznamnějším mechanismem přenosu tepla **krevní oběh**. Na druhou stranu tepelným izolantem v těle je **tuková tkáň** (má 3x menší tepelnou vodivost než krev). Vedením člověk ztrácí zhruba **15 %** teplené energie. Vzduch, který neproudí intenzivně, představuje tepelný izolant. Pokud je okolí těla voda nebo vlhký intenzivně proudící vzduch, pak budou ztráty tepla vedením rozhodující.

## Konvekce

**Konvekce** (proudění) je pohyb molekul vzduchu nebo vody ve směru od místa kontaktu na základě teplotního gradientu v prostředí. Konvekce úzce souvisí s vedením tepla. Zvyšuje výdej tepla kondukcí tím, že udržuje velký teplotní gradient. Teplo musí být nejprve předáno vedením látce, jejímž prouděním je pak odvedeno do okolí.

Množství tepla, které je za čas  $\tau$  odvedeno prouděním z povrchu těla o ploše  $S$  do okolí o teplotě nižší o  $\Delta t$ , lze vyjádřit vztahem:  $Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta t \cdot \tau$ .

$\alpha$  je koeficient přestupu tepla rozhraním, který se stanovuje experimentálně pomocí **alfametrů**. Předmět, který je v kontaktu se vzduchem rozdílné teploty mění jeho specifickou váhu, protože ovlivňuje jeho teplotu. Tím, že teplý vzduch stoupá a studený klesá, se dostává nový vzduch do kontaktu s předmětem. Konvekce se silně zvyšuje, pokud se objekt pohybuje v prostředí nebo pokud prostředí proudí kolem objektu (osoba, která plave ve vodě nebo ventilátor v místnosti). Vítr ochlazuje, protože nahrazuje teplý a vlhký vzduch z bezprostředního okolí těla vzduchem chladnějším a sušším. Účinky proudění a vedení tepla jsou patrné za extrémních klimatických podmínek. Organismus snáší mráz lépe při malé relativní vlhkosti vzduchu a za bezvětří než teplotu nad bodem mrazu při intenzivním proudění a vysoké vlhkosti vzduchu.

## Evaporace

Při velké tělesné námaze nestačí k ochraně těla před přehřátím pouze **radiace a kondukce**. Za těchto podmínek je výdej tepla zvýšen odpařováním (evaporací) vody při perspiraci. **Odpařením 1 g vody ztrácí organismus asi 0,6 kcal tepla**. Tekutina se na povrch kůže dostává difúzí a sekrecí z potních žláz. Odpařování ochlazuje kůži na teplotu nižší, než je teplota prostředí. Při teplotě prostředí vyšší než 36 °C je odvádění tepla efektivní pouze pomocí odpařování vody. Při teplotě prostředí výrazně vyšší než 37 °C získává tělo z prostředí teplo radiací a kondukcí. V tomto případě se udržuje rovnováha mezi příjmem a výdejem tepla profúzním pocením, jehož efektivita je nepřímo úměrná vlhkosti vzduchu. Jakmile vlhkost dosáhne určité hodnoty, schopnost, jakou se tělo může pocením ochlazovat, se stane limitovanou a vyloučený pot se z pokožky nebude odpařovat. **Jeden litr odpařené tekutiny odnímá tělu více než 2428 kJ (580 kcal)**. Tento mechanismus umožňuje snášet suché horko (např. poušť) při teplotách značně převyšujících tělesnou teplotu (v případě nahrazování ztrát tekutin a solí vzniklých pocením). Pokud je však okolní vzduch značně nasycen parami (tropická džungle), je znemožněno odpařování a je obtížné snášet teploty vyšší než 34 °C. Při vyšší vlhkosti vzduchu pociťuje člověk horko silněji. Odpařování probíhá z povrchu kapaliny za každé teploty, při které kapalná skupenství existuje. Rychlost odpařování každé kapaliny se zvýší, zvýší-li se teplota kapaliny, zvětší-li se obsah jejího povrchu a odstraňují-li se vzniklé páry nad kapalinou (odsávání, foukání, vítr).

Relativní podíl každého z výše popsaných procesů na odstraňování tepla z organismu závisí na **teplotě prostředí**. Při teplotách pod 19 °C je výdej tepla snížen díky minimálnímu prokrvení kůže v důsledku periferní vasokonstrikce. V rozmezí teplot 19–31 °C dokáže prokrvení kůže zajistit rovnováhu mezi produkovaným a odváděným teplem. Při teplotě nad 31 °C se přidává k záření, proudění a vedení tepla také vypařování. **Evaporace** je jediným možným mechanismem ochlazení v případech, kdy je teplota okolí vyšší než teplota těla.

Na horké okolní prostředí nebo stoupající produkci metabolického tepla reaguje tělo **vasodilací** (rozšířením podkožních cév). Teplo tělesného jádra je tímto způsobem předáno do krve a přeneseno na povrch těla, pokud je jeho teplota nižší než vnitřní teplota. Následkem zvýšení teploty kůže se zvýší odvod tepla z těla. Jestliže zvýšení teploty pokožky nemůže tepelnou rovnováhu obnovit, jsou aktivovány potní žlázy a začne probíhat chlazení odpařováním. Pokud tyto mechanismy neobnoví tepelnou rovnováhu těla, dojde k **hypertermii**, nárůstu teploty tělesného jádra a přehřívání organismu. V případě překročení schopnosti systému regulovat svou teplotu, se energie tepelných kmitů blíží energii slabých chemických vazeb, důsledkem je přehřátí a kolaps organismu. Prvními příznaky jsou: slabost, bolest hlavy, ztráta chuti, nevolnost, krátké dýchání, zrychlený tep (až 150/min), lesklé oči, duševní neklid, apatie nebo naopak vznětlivost. Při tepelném šoku teplota těla rychle stoupá přes 41 °C, zastaví se pocení, začne kóma a nastává smrt.

**Ideální teplota** zevního prostředí pro svlečeného člověka v klidových podmínkách je 28 °C, pro lehce pracujícího 25 °C, pro delší zatížení vytrvalostního charakteru 15 °C.

## Faktory ovlivňující tepelnou pohodu

1. Teplota vzduchu.
2. Radiační teplota ploch v prostoru.
3. Operativní teplota – teplota černého uzavřeného prostoru, ve kterém by organismus sdílel konvekci i sáláním stejné množství tepla, jako ve skutečném prostředí.
4. Efektivní teplota – teplota prostoru při relativní vlhkosti 50 %, která způsobí stejné celkové tepelné ztráty z pokožky jako ve skutečném prostředí.
5. Vlhkost vzduchu – tedy hmotnostní množství vodní páry v 1 kg suchého vzduchu.
6. Rychlost proudění vzduchu a jeho turbulence. Rychlost pohybu vzduchu ovlivňuje přenos tepla prouděním a odpařování vlhkosti z pokožky.
7. Hodnota metabolismu udává tepelný výkon člověka. Je závislá na aktivitě, osobě (postava, věk a fyzická

kondice) a podmínkách, ve kterých se osoba nachází.

8. Oblečení je důležitý faktor ovlivňující odvod tepla z těla do okolí.

9. Tělesná postava a podkožní tuk. Produkce tepla je úměrná tělesné hmotě, tepelné ztráty však závisí na povrchu těla.

10. Věk a pohlaví. Starší lidé mají užší rozsah optimálních teplot, ženy často upřednostňují vyšší teplotu prostředí než muži.

## Vliv vysokých teplot na organismus

### Účinky na lidský organismus

1. *Vazodilatace* (rozšíření kožních cév – zvyšuje přenos tepla do kůže).
2. *Pocení* (probíhá od 37 °C; ztráty vody v teplém prostředí mohou být až 5 litrů za hodinu, současně dochází ke ztrátám iontů; díky vyšší produkci aldosteronu zabráněno nadměrným ztrátám Na a Cl).
3. *Omezení produkce tepla*.
4. *Intenzivnější dýchání*.
5. *Urychlení krevního oběhu*.
6. *Snížení svalového napětí, relaxační účinky*.
7. *Zvýšení permeability kapilár*.

### Šokové stavy organismu spojené s vysokou teplotou

#### Úpal

Úpal (*síriasis*) je šokový stav organismu způsobený nahromaděním tepla v těle. Nastává, když organismus není schopen za pomoci termoregulace odvést z těla dostatečné množství tepla. Teplota organismu je vnějšími vlivy zvýšena **nad 40,5 °C<sup>[1]</sup>**. Úpal vzniká především selháním termoregulace, jmenovitě výpadkem sekrece potu, nástupem paradoxního „chladového“ třesu, deliria, křečí. <sup>[2]</sup> Úpal může způsobit těžké poškození mozku, často rychle vedoucí k smrti.

#### Úžeh

Úžeh (*insolace*) vzniká zejména přímým slunečním zářením dopadajícím na oblast hlavy a šíje, kdy dochází k rychlému vzestupu teploty v termoregulačních centrech. Vede k malátnosti, poruše koncentrace, bolesti hlavy, závratím, nevolnosti, zvracení, ztuhnutí šíje. Vyvolává překrvení mozkových plen (až edém mozku), může být smrtelný.

#### Kolaps z horka

Je zvláštní formou ortostatického kolapsu. Extrémní vasodilatace při tepelné zátěži v klidném stoji vede k „nahromaděním“ větších objemů krve v žilách nohou a břicha, a tím k poklesu tlaku krve a bezvědomí. Je relativně bez nebezpečí. <sup>[2]</sup>

### Adaptace organismu na teplo

1. **Sekrece potu se až zdvojnásobuje.**
2. **Práh pocení se posouvá k nižším teplotám jádra.**
3. **sníží se koncentrace iontů v potu** (<https://is.muni.cz/elportal/estud/fspjs/js07/fyzio/texty/ch09s02.html>)
4. **Zvyšuje se pocit žízně.**

## Využití tepla

Působení tepla má v určitých případech terapeutické účinky na organismus. Termoterapie patří mezi základní fyzikální léčebné postupy používané zejména v lázeňské medicíně, kde je využíván především její analgetický a spasmolytický účinek.

- Termoterapie
- Hypertermie
- Mikrovlnná termoterapie

## Tepelná bilance organismu

Tepelnou bilanci lidského těla je možné vyjádřit rovnicí:

$$M \pm R \pm C_v \pm C_d - Ediff - Ers - Eresp - L = \Delta S(W)$$

**M** – hodnota metabolismu; **R** – tepelná ztráta (zisk) sáláním; **C<sub>v</sub>** – tepelná ztráta (zisk) prouděním; **C<sub>d</sub>** – tepelná ztráta (zisk) vedením; **Ediff** – tepelná ztráta difúzí pokožky; **Ers** – tepelná ztráta běžným pocením; **Eresp** – tepelná ztráta dýcháním (latentní); **L** – tepelná ztráta dýcháním (citelná); **ΔS** – změna tepelné kapacity.

## Konkrétní příklady energetické a tepelné výměny v organismu:

### Průměrný příjem potravin během 24 hodin:

Bílkoviny – 250 g, tj. 5550 kJ

Tuky – 80 g, tj. 3112 kJ

Sacharidy – 150 g, tj. 2565 kJ

Celkový energetický příjem z potravin 11227 kJ.

**Hodnota metabolismu:** 8 hodin kancelářské práce, tj.  $8 \times 75 = 600 \text{ W/m}^2$

8 hodin spánku:  $8 \times 50 = 400$

2 hodiny lehká chůze:  $2 \times 140 = 280$

6 hodin odpočinek:  $6 \times 65 = 390$

Celkem za 24 hodin:  $1670 \text{ W/m}^2 = 1942 \text{ kcal/m}^2 = 7\,769 \text{ kJ} \times 1,72 \text{ m}^2 = 13\,363 \text{ kJ}$

**Přenos tepla radiací** = teplota těla<sup>4</sup> – teplota okolních objektů<sup>4</sup>

**Průměrné pocení**, 600 ml potu za den, vzniklá energetická ztráta 1200 kJ

Jedna **hodina strávená na sluníčku** během letního odpoledne, příjem tepla  $700 \text{ W.m}^{-2} = 1628 \text{ kcal} \times 1,72 = 2800 \text{ kcal} = 11\,724 \text{ kJ}$

## Odkazy


### Související články

- Vlivy extrémních teplot na živé organismy
- Termoregulace
- Termoterapie

### Použitá literatura

- NAVRÁTIL, Leoš a JOZEF ROSINA, et al. *Medicínská biofyzika*. 1. vydání. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
- SCHMIDT, Robert. *Memorix - Fyziologie*. 1. vydání. SCIENTIA MEDICA, 1993. 336 s. ISBN 80-85526-18-2.
- GANONG, William F.. *Přehled lékařské fyziologie*. 1. vydání. H and H, 1995. 685 s. ISBN 80-85787-36-9.
- BARTUŠKA, RNDr. Karel, et al. *Molekulová fyzika a termika - Fyzika pro gymnázia*. 4. vydání. Prometheus Praha, 2000. 244 s. ISBN 80-7196-200-7.

### Externí odkazy

- Fyziologie tělesné zátěže (<https://is.muni.cz/elportal/estud/fsps/js07/fyzio/texty/ch09s02.html>)
- Tepelná pohoda a nepohoda (<http://www.tzb-info.cz/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda>)
-  Pohybová aktivita v horku (<http://mefanet.lfp.cuni.cz/clanky.php?aid=268>)

### Reference

1. SILBERNAGL, Stefan a FLORIAN LANG. *Atlas patofyziologie člověka*. 1. české vydání. Praha : Grada, 2001. 390 s. ISBN 80-7169-968-3.
2. SCHMIDT, Robert. *Memorix - Fyziologie*. 1.. vydání. SCIENTIA MEDICA, 1993. 336 s. ISBN 80-85526-18-2.