TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Nové možnosti rozvoje vzdělávání na Technické univerzitě v Liberci

Specifický cíl A2: Rozvoj v oblasti distanční výuky, online výuky a blended learning

NPO_TUL_MSMT-16598/2022

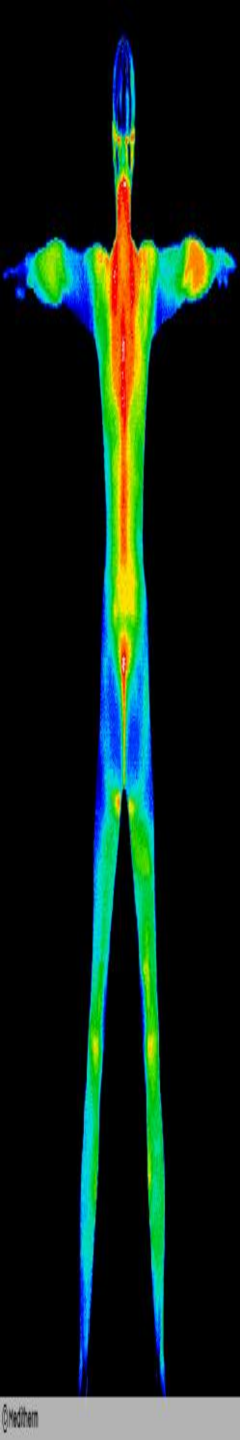
Smart oděvy

Zdeněk Kůs

Financováno Evropskou unií NextGenerationEU

Národní plán obnovy

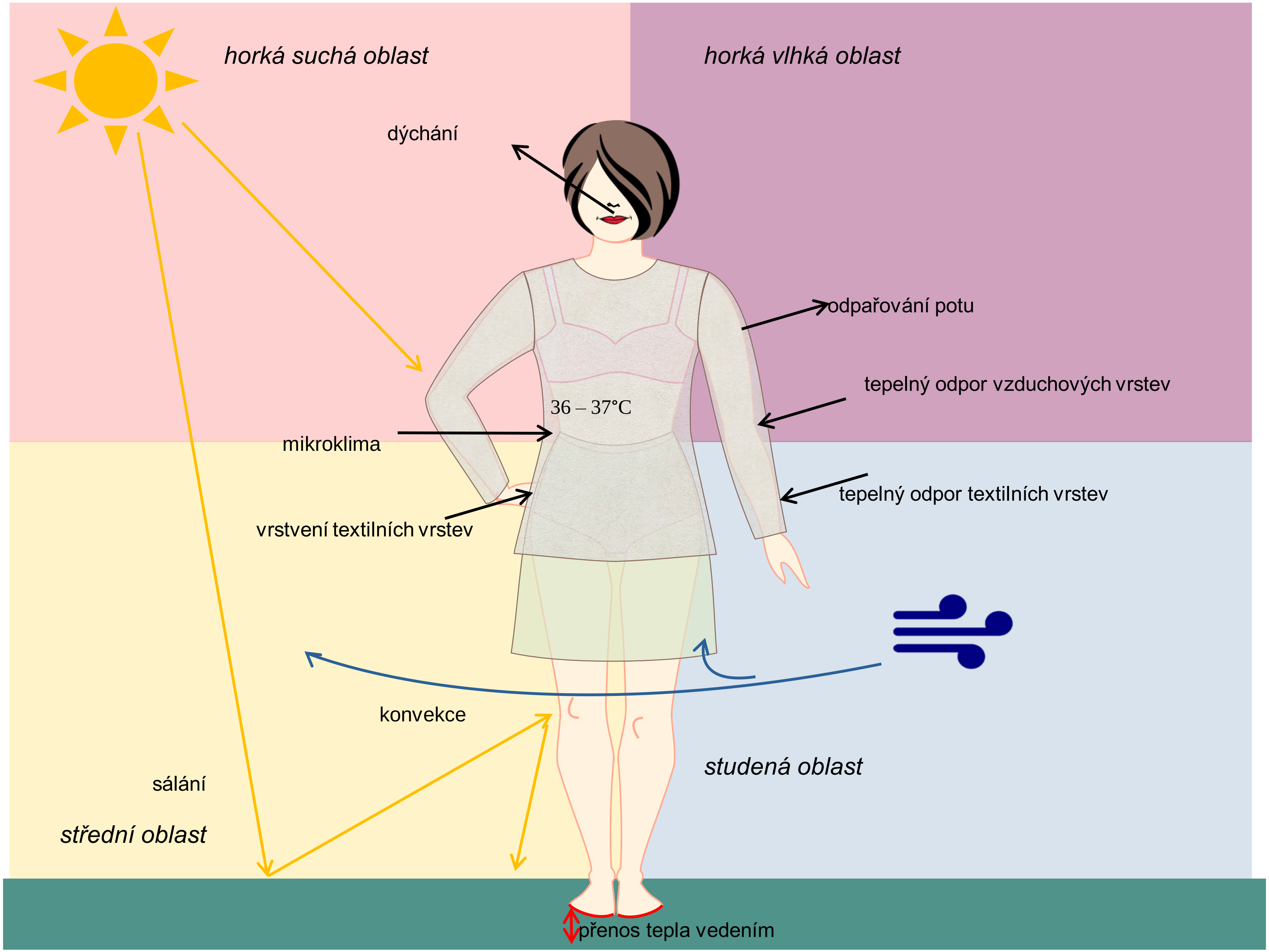
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



SOD

Smart oděvy

Komfort - teplo



horká suchá oblast
horká vlhká oblast
dýchání
odpařování potu
tepelný odpor vzduchových vrstev
36 – 37°C
mikroklima
tepelný odpor textilních vrstev
vrstvení textilních vrstev
konvekce
studená oblast
sálání
střední oblast
přenos tepla vedením

,

Zákony zachování

Lavoisier (1743-1794)

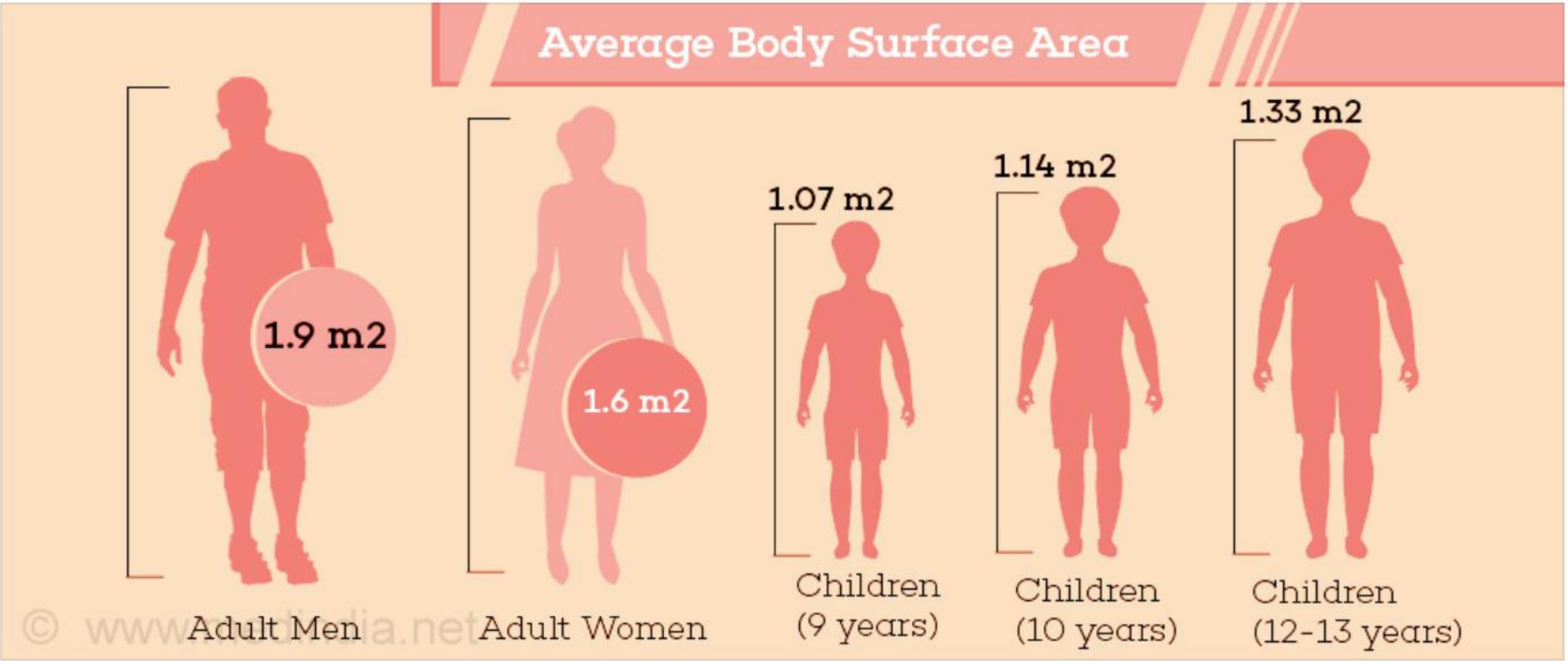
M.V.Lomonosov (1711-17665) – tepelné jevy jsou projevem pohybu částic

Hmotnosti

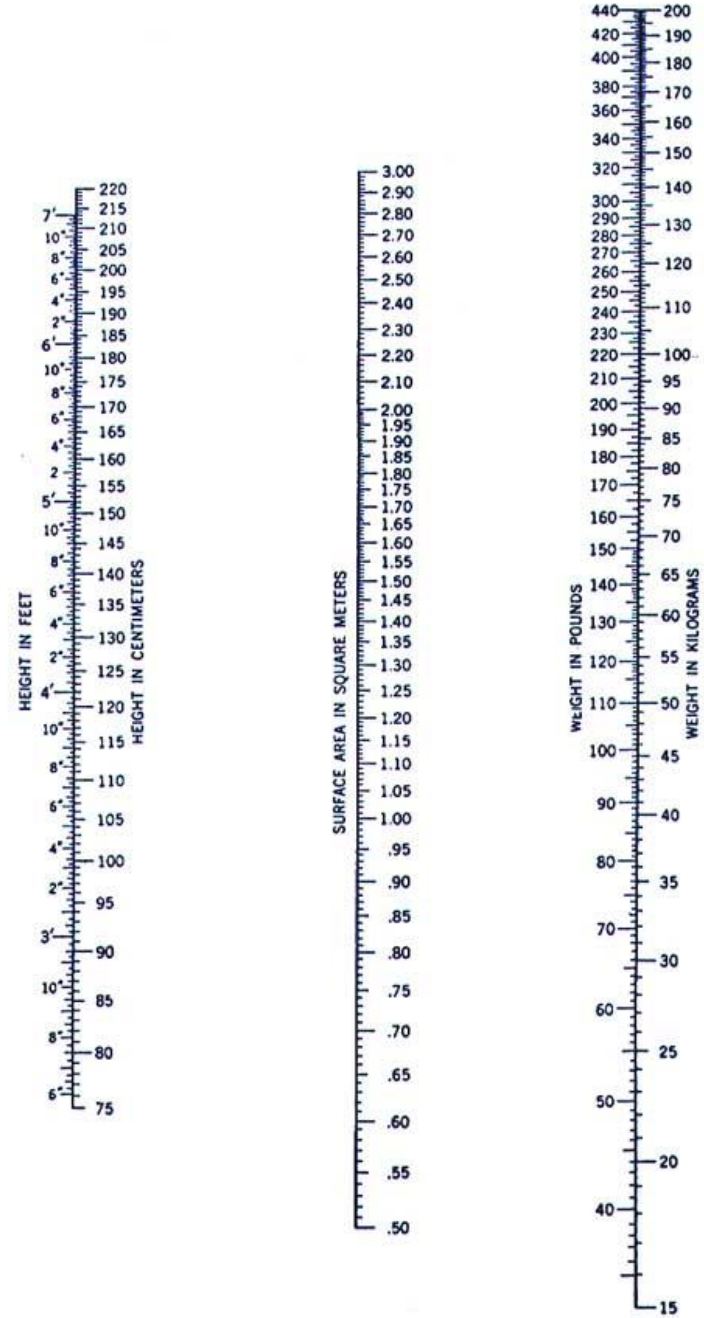
Energie

’

Lidské tělo – povrch ?

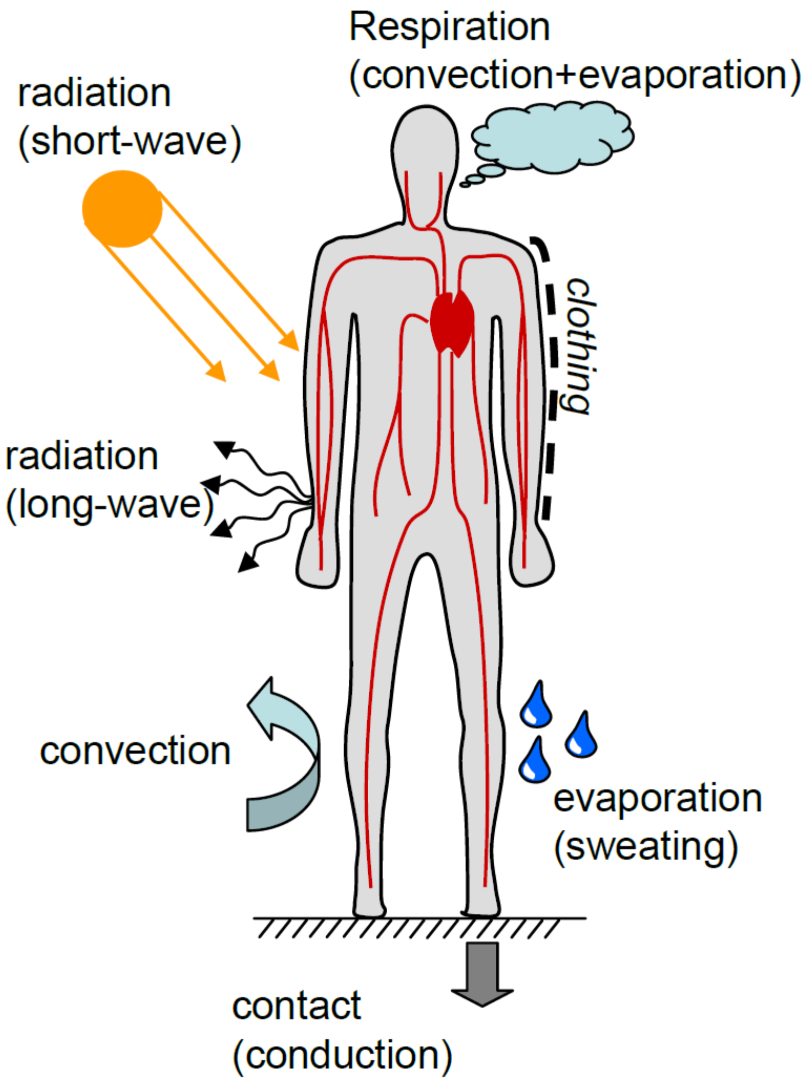


Lidské tělo – povrch ?



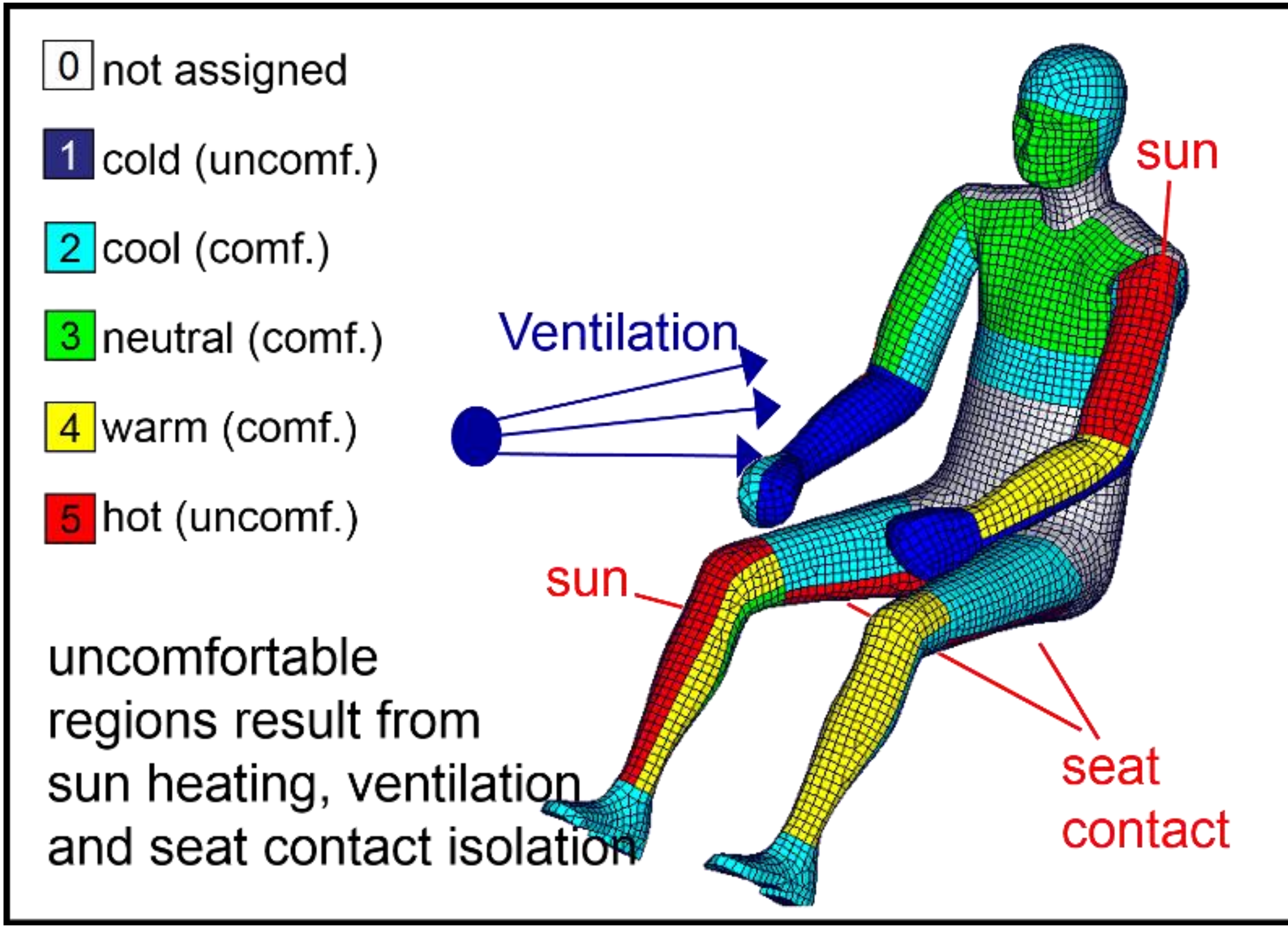
,

Lidské tělo – povrch ?



Passenger Thermal Comfort Simulation | Automotive (theseus-fe.com)

,

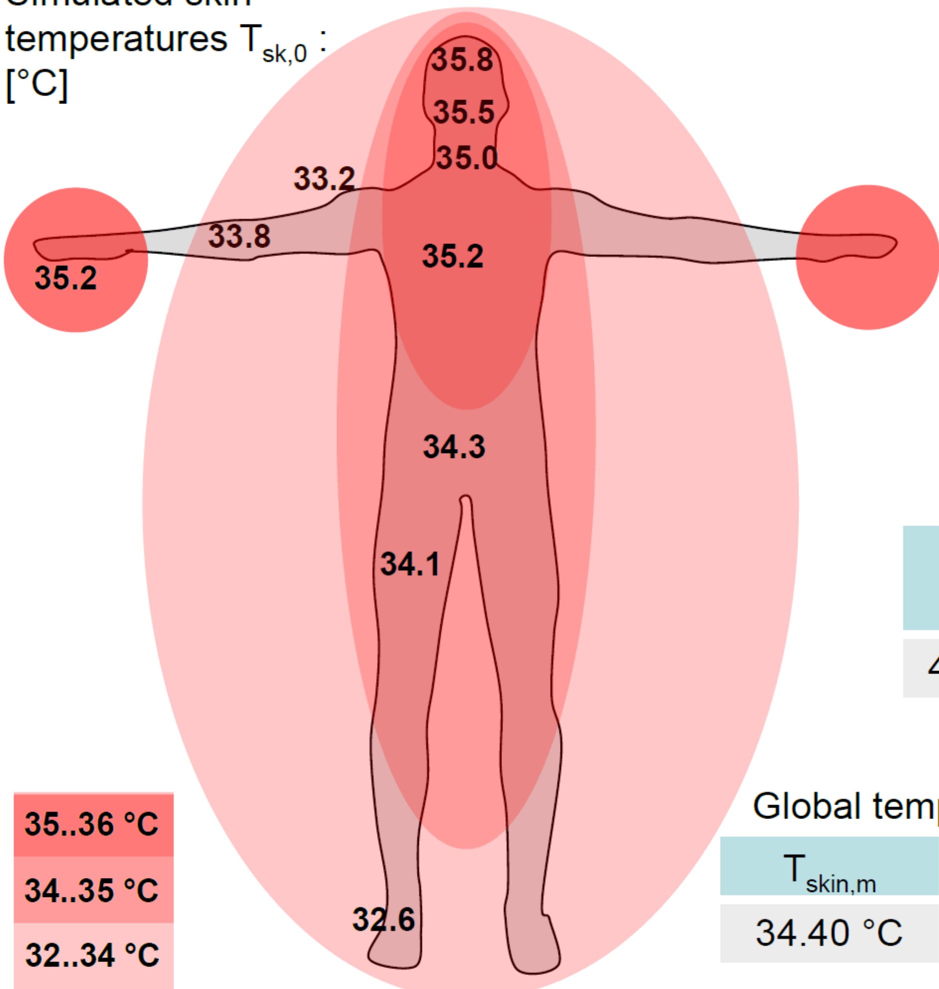


[Passenger Thermal Comfort Simulation | Automotive (theseus-fe.com)]

Boundary conditions of unclothed manikin

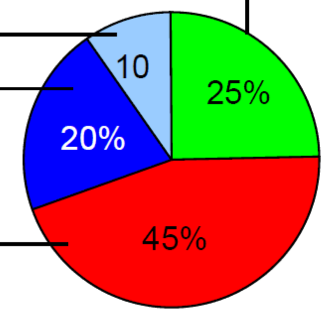
T_{air}	T_{wall}	v_{air}	humidity	metabolism
30.0 °C	30.0 °C	0.05 m/s	40 %	≈87 W

Simulated skin temperatures $T_{sk,0}$: [°C]



In the quasi-stationary state of neutrality the inner heat production is equal to the outer **heat loss** from

- convection
- respiration
- evaporation
- radiation



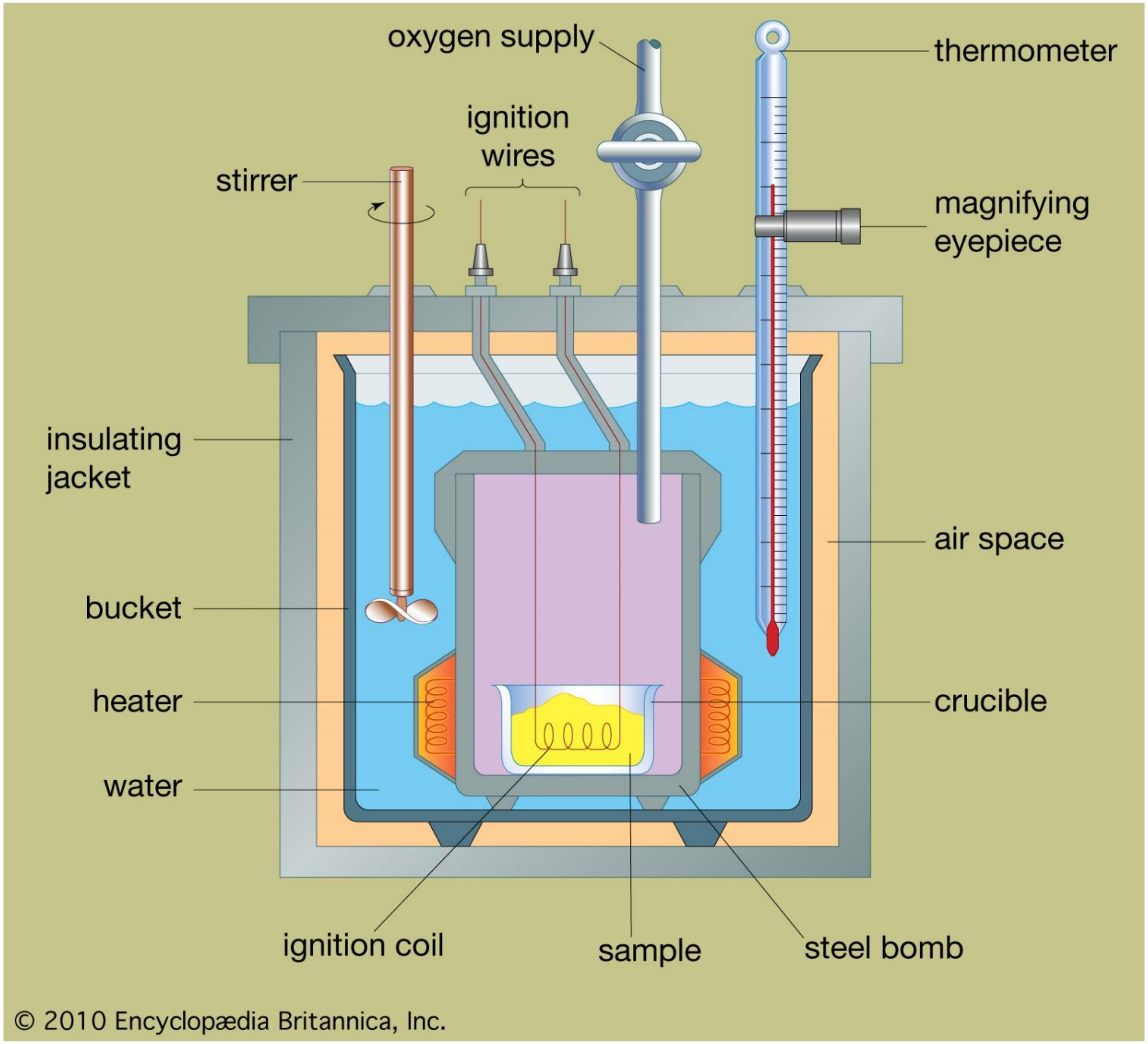
cardiac output	skin blood flow	mass loss
4.9 ltr/min	24.3 W/K	0.73 g/min

Global temperatures:

$T_{skin,m}$	$T_{muscle,m}$	$T_{hypothalamus}$	T_{rectal}
34.40 °C	36.20 °C	37.00 °C	36.88 °C

[Passenger Thermal Comfort Simulation | Automotive (theseus-fe.com)](theseus-fe.com)

Kalorimetr


oxygen supply
thermometer
ignition
wires
stirrer
magnifying
eyepiece
insulating
jacket
air space
bucket
heater
crucible
water
ignition coil
sample
steel bomb
© 2010 Encyclopædia Britannica, Inc.

Kalorimetr

Cílem je definovaně provádět výměnu tepla mezi tělesy

Měřit teploty, počáteční a koncovou

Proces musí probíhat **izolovaně od okolí**

V nejjednodušším případě dvě nádoby vsunuté do sebe, vzájemně izolované (podobně jako „termoska“)

Nutné dokonalé promísení kapalin - míchačka

Kalorimetrická rovnice

Tepelná výměna v izolované soustavě

Veškeré teplo, které jedno těleso odevzdá, jiné těleso přijme

$$\boldsymbol{c_1 \,.\, m_1 \,.\, (t_1 - t) = c_2 \,.\, m_2 \,.\, (t - t_2)}$$

m … hmotnosti těles

c … měrné tepelné kapacit

t … teploty těles, teplota výsledná

,

Příklad

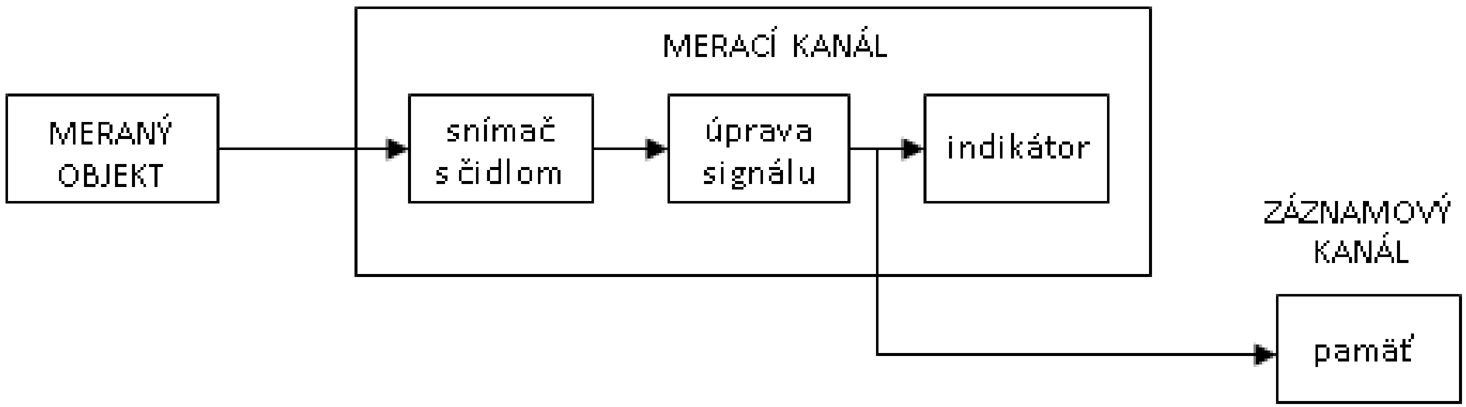
Do 1 kg vody o teplotě 20 °C vložíme 100g olověný váleček o teplotě 200 °C.

Vypočítejte teplotu vody s válečkem poté, co se teploty vyrovnají

Měrná tepelná kapacita pro vodu je 4181 J/kgK

Měrná tepelná kapacita pro ocel je 129 J/kgK

Měření teploty



1. Přenos tepla v soustavě – organismus – oděv – prostředí

- kondukcí (vedením)
- konvencí (prouděním)
- radiací (zářením)
- evaporací (odpařováním potu)
- respirací (dýcháním)

Přenos tepla

- Stacionární (ustálený) – teplotní rozdíl je stálý, v čase se nemění
- Nestacionární (neustálený) – dochází k vyrovnávání teplotních rozdílů v průběhu času

1. Přenos tepla kondukcí (vedením)

Částice látky s vyšší teplotou předávají část své střední energie při srážkách částicím s místech s nižší teplotou (ty mají nižší střední energii)

Částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh

Nastává obvykle na styku dvou těles z pevných látek při jejich kontaktu

Přenos tepla ve směru klesající teploty (u plynů a kapalin se kromě toho uplatňuje také přenos tepla prouděním) nebo může být doplněno přenosem radiací (sáláním)

Platí **zákon zachování energie**
Platí **zákony vedení tepla**

Přenos tepla vedením

- *Jean-Babtiste Joseph Fourier*
- *(1768-1830)*

- *Zjistil, že* ***teplo prošlé tělesem je přímo úměrné teplotním spádu, času a ploše***

- *Tok tepla mezi dvěma blízkými místy v tělese je úměrný rozdílu jejich teplot*

Přenos tepla kondukcí (vedením) pro textilní vrstvu

Měrný tepelný tok q [w/m^2]

FOURIERŮV ZÁKON

$$q = -\lambda \, (T_2 - T_1)$$

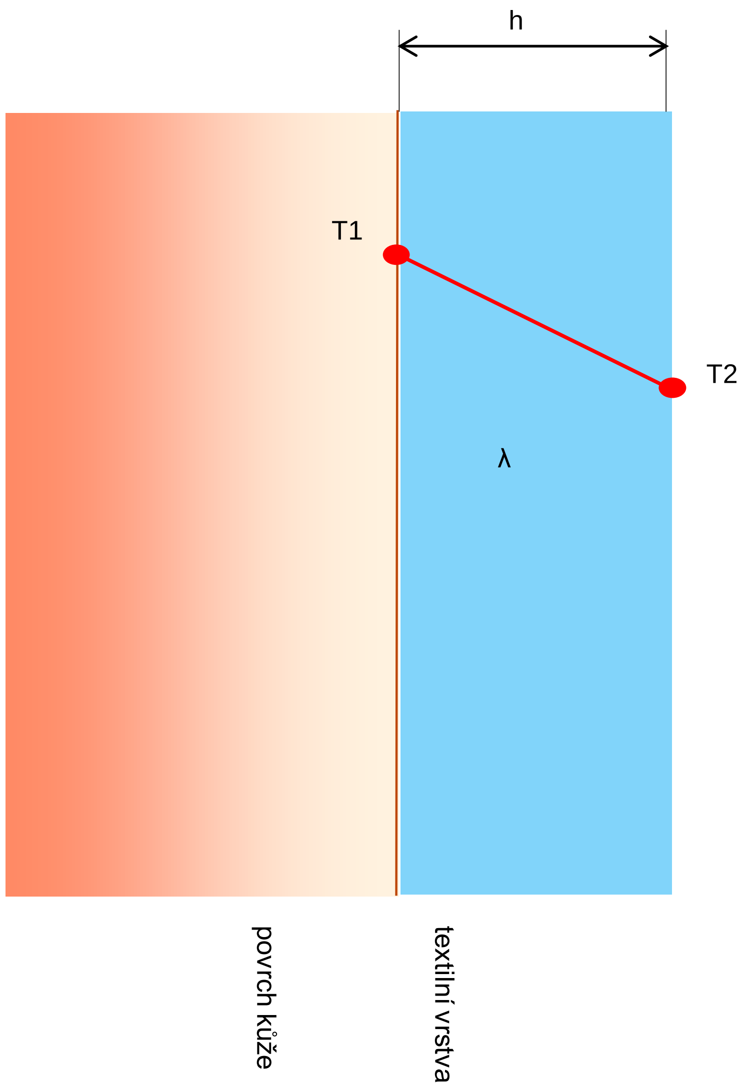
λ – součinitel tepelné vodivosti [W/mK]

Tepelný odpor R [m^2.K/W]

$$\mathbf{R = h / \lambda}$$

h - tloušťka

Pro více vrstev R = R1 + R2 + R3 + …



Přenos tepla kondukcí – vedením - pro textilní vrstvu

Tepelná vodivost - příklady

vzduch v klidu, 20°C -	0,026 W/m*K
voda	0,6 W/m*K

Proto tedy například vlhký oděv lépe vede teplo, je nám v něm pocitově „chladněji“

Přenos tepla kondukcí – vedením

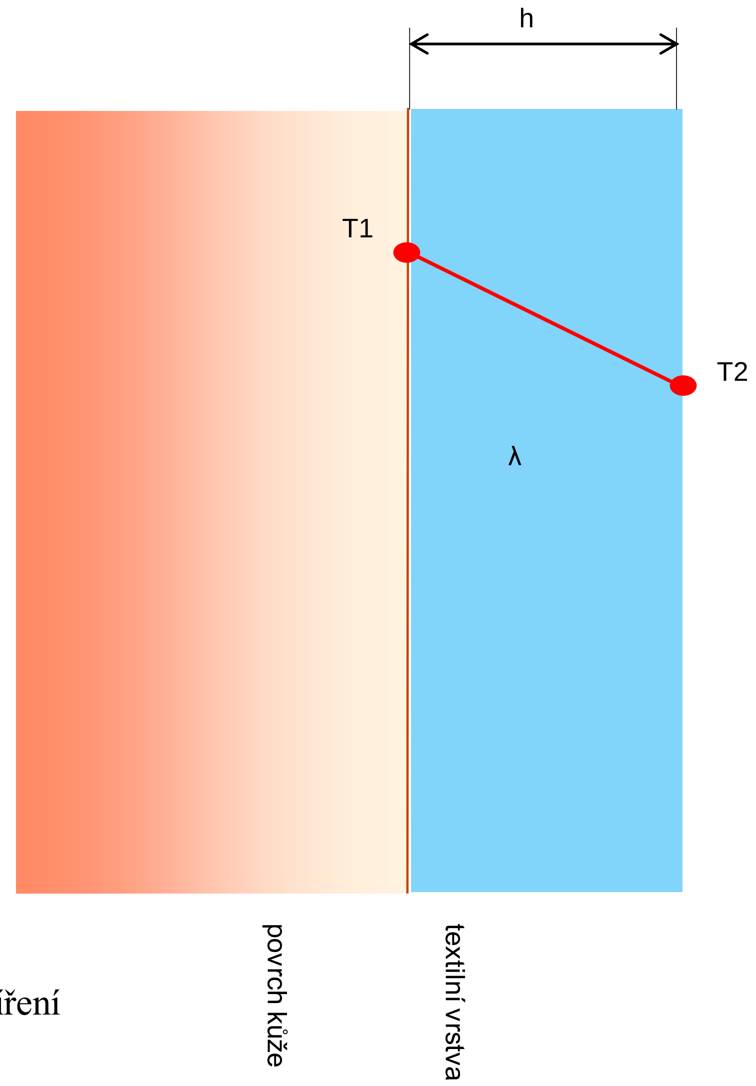
- pro textilní vrstvu

Totéž s gradientem

$$q = -\lambda \ \mathrm{dT/dx}$$

$$q = -\lambda \,\mathrm{grad\ T}$$

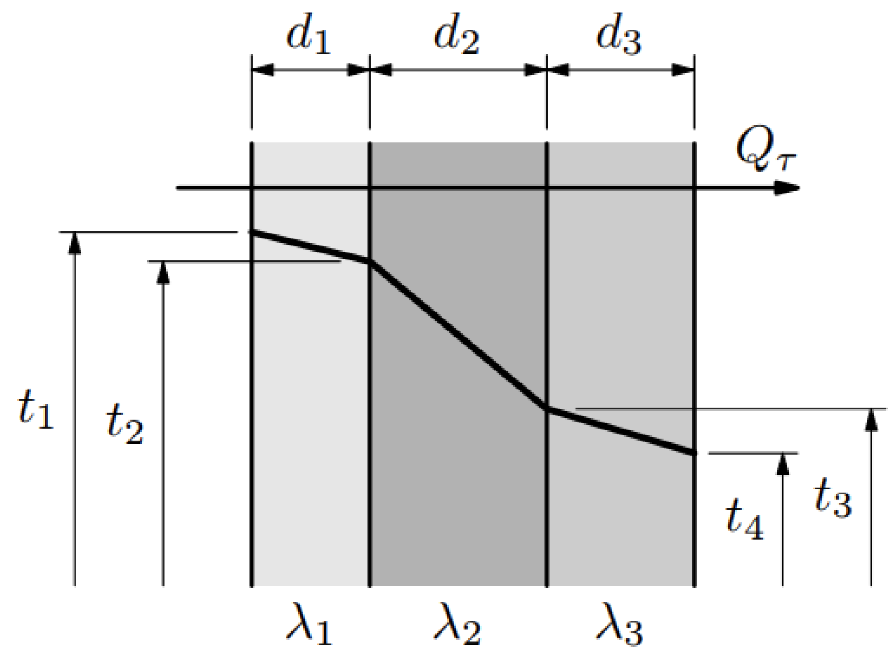
dT/dx, grad T - jak rychle roste teplota ve směru šíření



Přenos tepla kondukcí – vedením

- Pro více vrstev – součinitel prostupu tepla

- $k = \dfrac{1}{\frac{d_1}{\lambda_1}+\frac{d_2}{\lambda_2}+\frac{d3}{\lambda 3}}$



Přenos tepla kondukcí - vedením

· v třírozměrném tělese v čase τ popisuje rovnice:

$$\frac{\delta t}{\delta \tau} = a \cdot \left(\frac{\delta^2 t}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 t}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 t}{\delta z^2} \right) = a \cdot \blacktriangledown^2 t$$

- kde t [s] je teplotní pole a **a** [m^2/s] teplotní vodivost

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

potom

$$\rho \cdot c \frac{\delta t}{\delta \tau} = \lambda \cdot \left(\frac{\delta^2 t}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 t}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 t}{\delta z^2} \right)$$

a pro 1D

$$\rho \cdot c \frac{\delta t}{\delta \tau} = \frac{\lambda \cdot \delta^2 t}{\delta x^2}$$

Přenos tepla konvekcí - prouděním

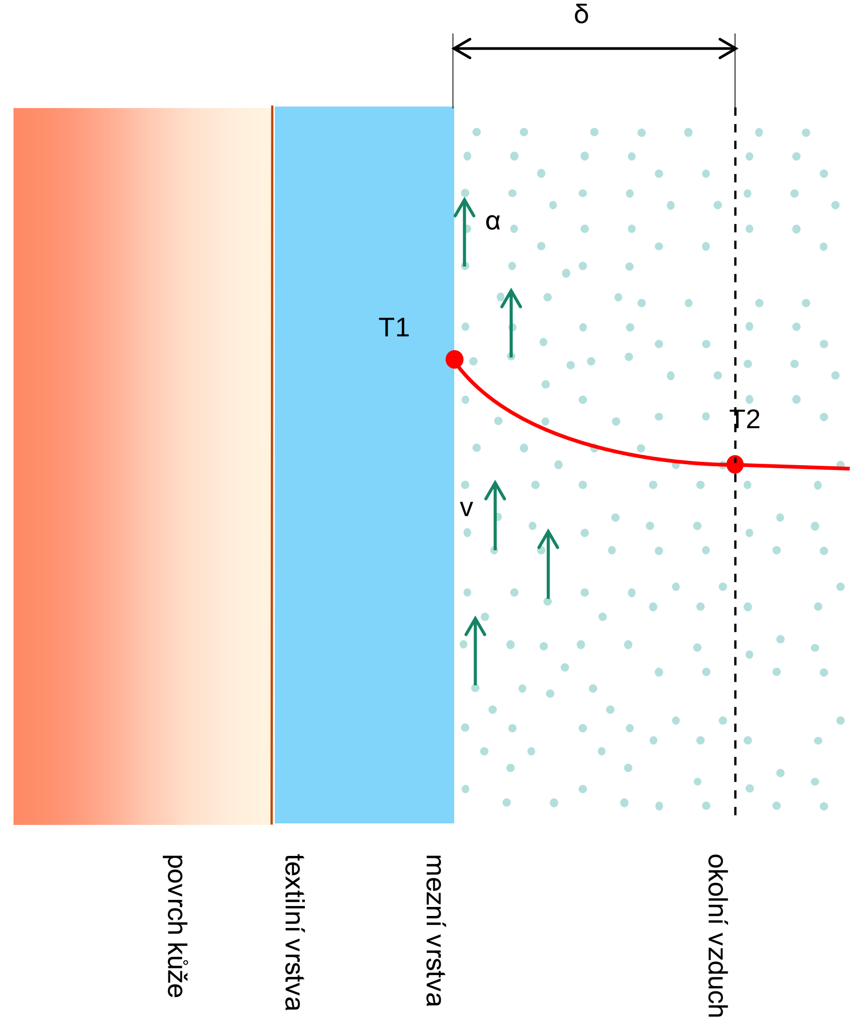
- pro textilní vrstvu a mezeru

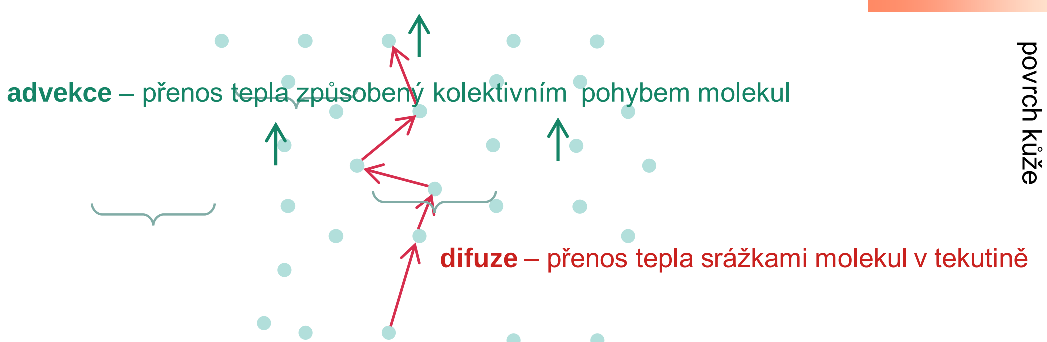
Měrný tepelný tok q [w/m^2]

NEWTONŮV ZÁKON

$$q = \alpha \cdot (T1 - T2)$$

α je součinitel přestupu tepla

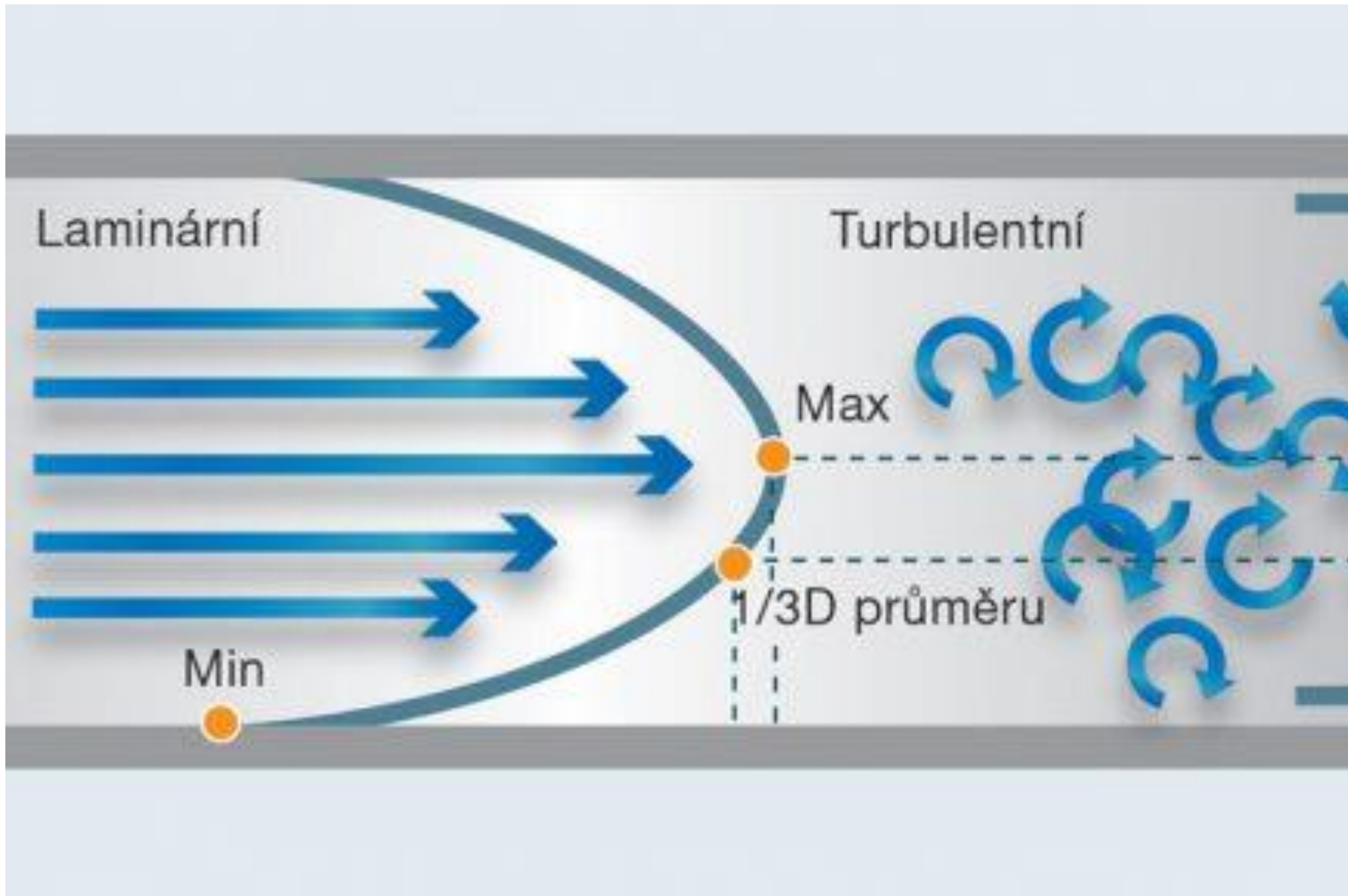




Přenos tepla konvekcí – prouděním

Proudění

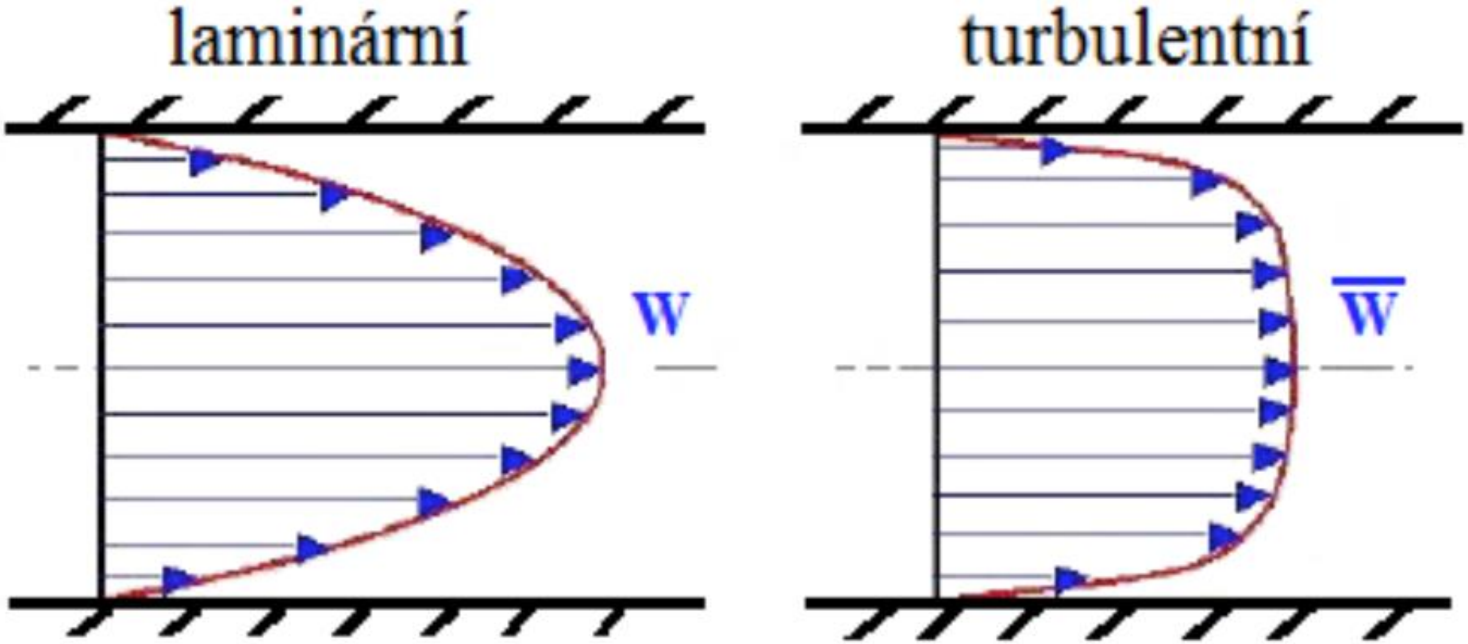
- **Laminární**
- **Turbulentní**



Přenos tepla konvekcí – prouděním

Proudění

- **Laminární**
- **Turbulentní**



Přenos tepla konvekcí – prouděním

Proudění

- **Laminární**
- **Turbulentní**

Lze charakterizovat pomocí Reynoldsova čísla - bezrozměrná veličina, která dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu (tedy odpor prostředí v důsledku vnitřního tření).

Je pomocí něj možné určit, zda je proudění tekutiny laminární, nebo turbulentní.

Čím je Reynoldsovo číslo vyšší, tím nižší je vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor. (turbulentní >2300)

Přenos tepla konvekcí – prouděním

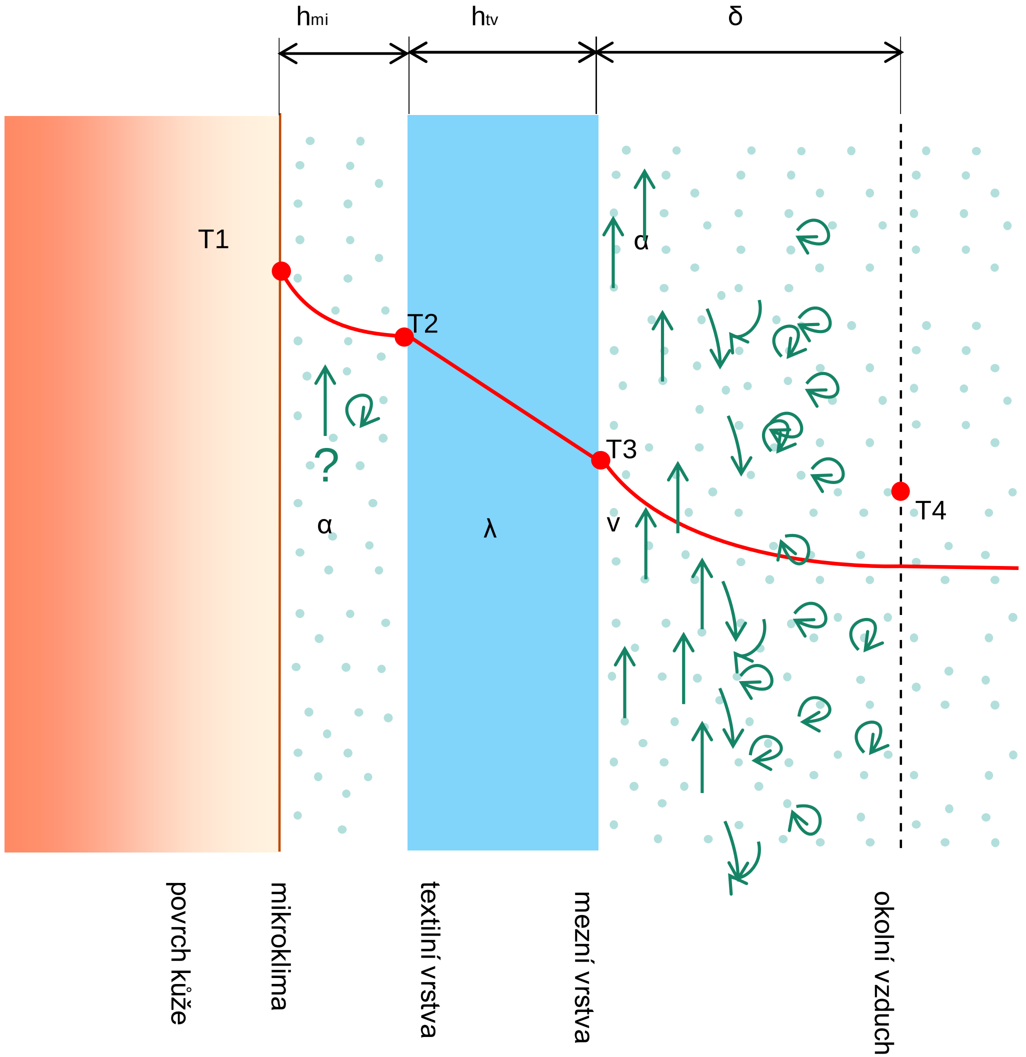
- α je součinitel přestupu tepla

- zahrnuje všechny parametry, které ovlivňují konvekci

$\alpha = f($	u	rychlost
	d	charakteristický rozměr
	ρ	hustota
	v	viskozita
	c	měrná tepelná kapacita
	$\lambda)$	měrná tepelná vodivost

- vztah mezi těmito parametry vyjadřují tzv. bezrozměrná kritéria

Komplexní odvod tepla oděvem od pokožky do prostředí



Přenos tepla

- Teploty před a za stěnou jsou konstantní
- Sdílení prouděním – vedením – prouděním

- Zákon zachování energie:

$Qt_1 = Qt_2 = Qt_3 = Qt$

$Qt_1 = \alpha_1 S (t_1 - t_{s1})$

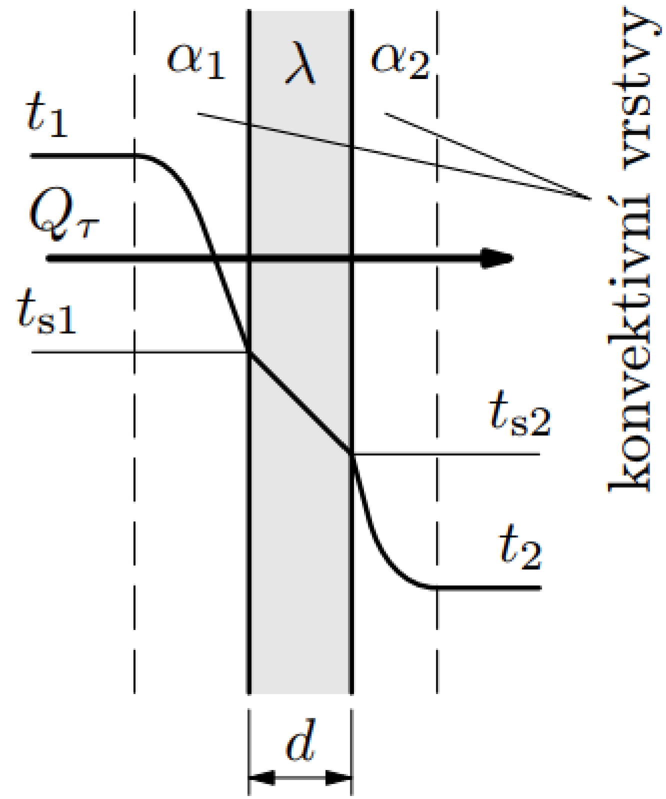
$Qt_2 = \lambda/d\, S (t_{s1} - t_{s2})$

$Qt_3 = \alpha_2 S (t_{s2} - t_2)$

$t_1 - t_{s1} = Qt/(\alpha_1 S)$

$t_{s1} - t_{s2} = Qt\, d/\lambda S$

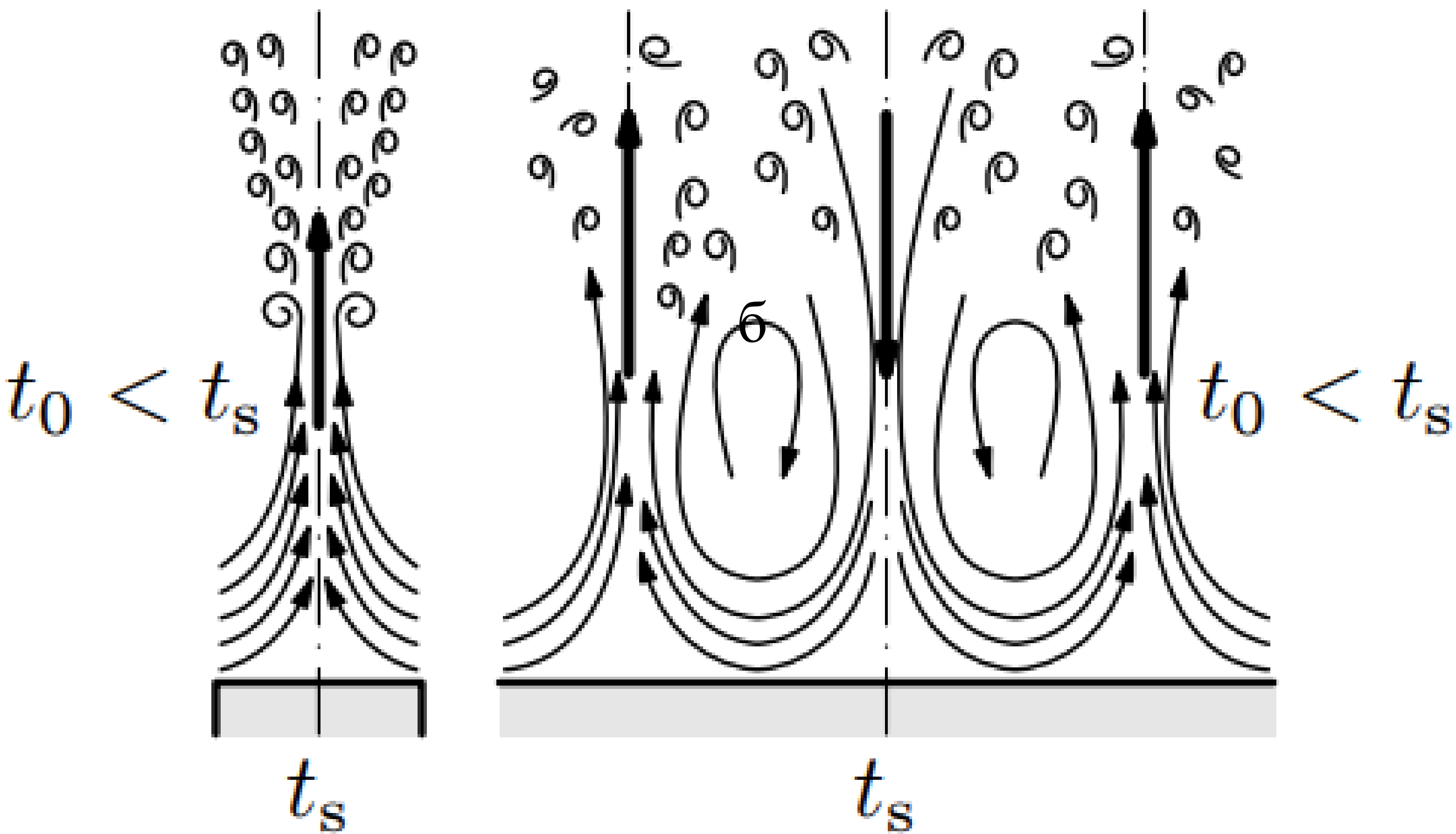
….



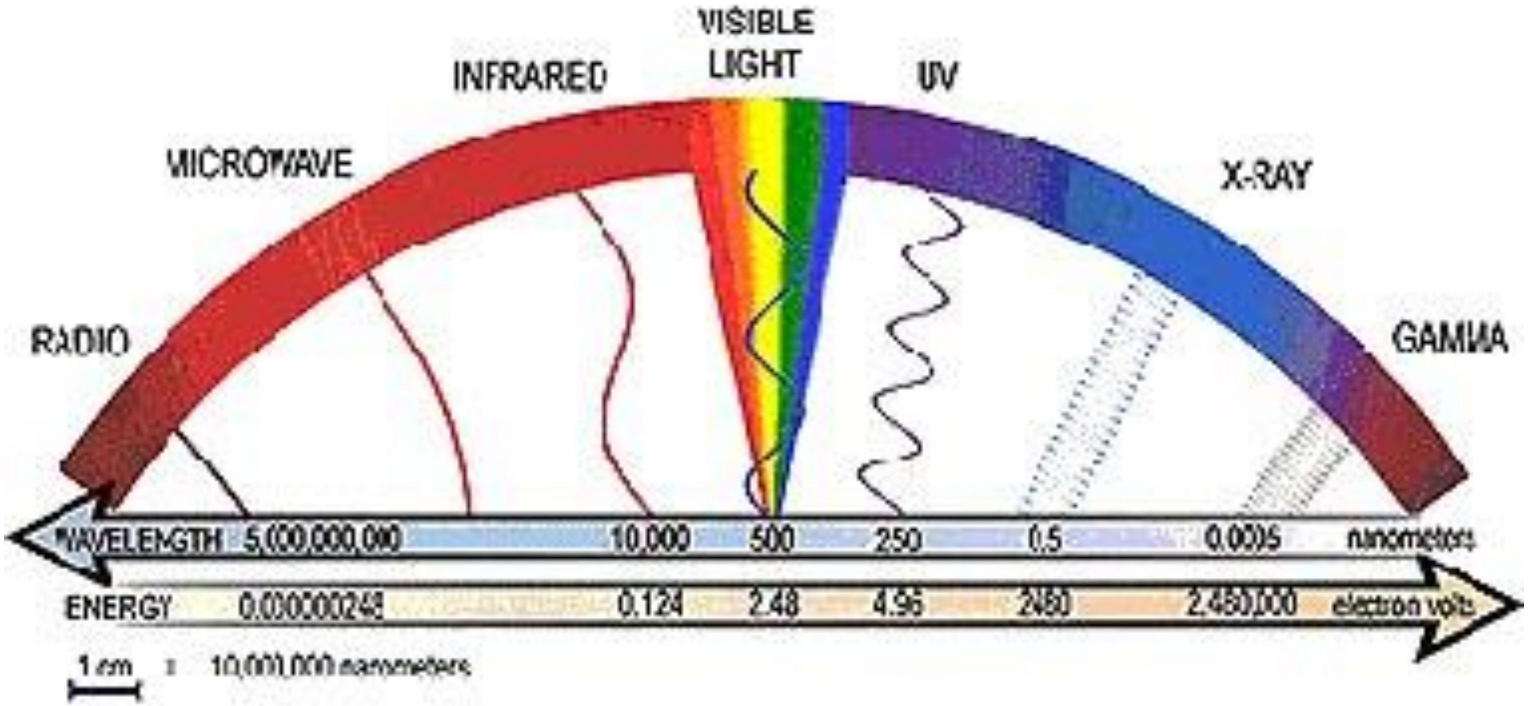
$t_1 - t_2 = Qt/S (1/\alpha_1 + 1/\lambda + 1/\alpha_2)$

$k = 1/(1/\alpha_1 + 1/\lambda + 1/\alpha_2)$ …. Celková tepelná vodivost stěny

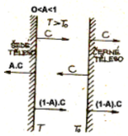
Přenos tepla - proudění



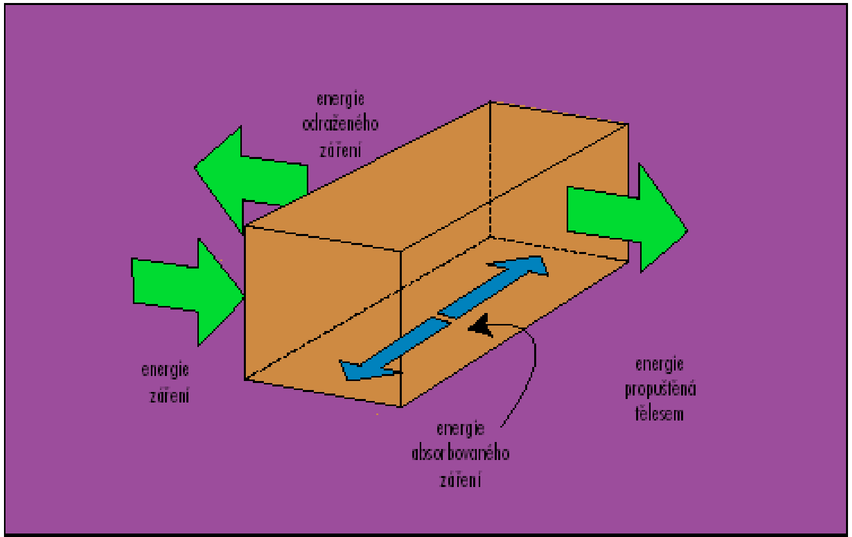
Elektromagnetické záření



Přenos tepla radiací - zákony



- Kirchhoffův zákon
- $C/A = C_1/A_1 = C_0$
- Poměr sálavosti a pohltivosti tepelného záření je pro všechna tělesa při téže teplotě stejné a rovná se sálavosti černého tělesa
- 1 = alfa + ro + tau
- $1 = \alpha + \rho + \tau$
- Absorpce, reflexe, transmise



Obr. 2-1: Energetická rovnováha objektu

Přenos tepla radiací - zákony

- *Planckův zákon*
- *Molekuly nevyzařují energii spojitě ale po dávkách,* ***kvantech***
- $\mathbf{E = h \cdot f = h \cdot c/\lambda}$

Přenos tepla radiací – sáláním - pro textilní vrstvu

Měrný tepelný tok q [w/m^2]

STEPHAN - BOLTZMANNŮV ZÁKON

$q = б \;.\; (T_1^4 – T_2^4) \;/\; [(1/Ɛ_1) + (1/Ɛ_2) - 1\,]$

- pro vrstvy oblečení

$q = б \;.\; Ɛ\,(T_1^4 – T_2^4)$

- pro objekt a vzdálené okolí

- σ - Stephan-Boltzmannova konstanta 5,57.10-8 W/m2K4
- ε - emisivita (0 až 1 (černé těleso))

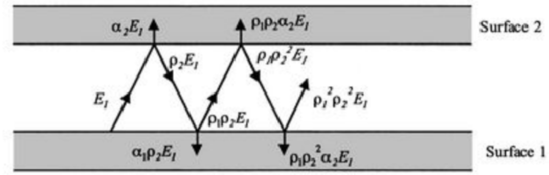


Figure 19.5: Path of a photon between two gray surfaces

Consider the two infinite gray surfaces shown in Figure 19.5. We suppose that the surfaces are thick enough so that $\alpha + \rho = 1$ (no radiation transmitted $\text{transmittance} = 0$). Consider a photon emitted from Surface 1 (remembering that the reflectance $\rho = 1 - \alpha$):

Surface 1 emits	E_1
Surface 2 absorbs	$E_1\alpha_2$
Surface 2 reflects	$E_1(1-\alpha_2)$
Surface 1 absorbs	$E_1(1-\alpha_2)\alpha_1$
Surface 1 reflects	$E_1(1-\alpha_2)(1-\alpha_1)$
Surface 2 absorbs	$E_1(1-\alpha_2)(1-\alpha_1)\alpha_2$
Surface 2 reflects	$E_1(1-\alpha_2)(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)$
Surface 1 absorbs	$E_1(1-\alpha_2)(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)\alpha_1$
...	

The same can be said for a photon emitted from Surface 2:

Surface 2 emits	E_2
Surface 1 absorbs	$E_2\alpha_1$
Surface 1 reflects	$E_2(1-\alpha_1)$
Surface 2 absorbs	$E_2(1-\alpha_1)\alpha_2$
Surface 2 reflects	$E_2(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)$

We can add up all the energy E_1 absorbed in 1 and all the energy E_2 absorbed in 2. In doing the bookkeeping, it is helpful to define $\beta = (1-\alpha_1)(1-\alpha_2)$. The energy E_1 absorbed in 1 is

$$E_1(1-\alpha_2)\alpha_1 + E_1(1-\alpha_2)\alpha_1(1-\alpha_2)(1-\alpha_1) + \ldots$$

This is equal to

$$E_1(1-\alpha_2)\alpha_1(1+\beta+\beta^2+\ldots).$$

However

$$\frac{1}{1-\beta} = (1-\beta)^{-1} = 1+\beta+\beta^2+\ldots$$

We thus observe that the radiation absorbed by surface 1 can be written as

$$\frac{E_1(1-\alpha_2)\alpha_1}{1-\beta}.$$

Likewise

$$\frac{E_2(1-\alpha_1)\alpha_2}{1-\beta}$$

is the radiation generated at 2 and absorbed there as well. Putting this all together we find that

$$E_2 - \left(\frac{E_2(1-\alpha_1)\alpha_2}{1-\beta}\right) = \frac{E_2\alpha_1}{1-\beta}$$

is absorbed by 1. The net heat flux from 1 to 2 is

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\text{net 1 to 2}} &= E_1 - \frac{E_1(1-\alpha_2)\alpha_1}{1-\beta} - \frac{E_2\alpha_1}{1-\beta}\\ &= \frac{E_1 - E_1(1-\alpha_1-\alpha_2+\alpha_1\alpha_2) - E_1\alpha_1 + E_1\alpha_1\alpha_2 - E_2\alpha_1}{1-(1-\alpha_1-\alpha_2+\alpha_1\alpha_2)}\end{aligned}$$

or

$$\dot{q}_{\text{net 1 to 2}} = \frac{E_1\alpha_2 - E_2\alpha_1}{\alpha_1+\alpha_2-\alpha_1\alpha_2}. \qquad (19..2)$$

If $T_1 = T_2$, we would have $\dot{q} = 0$, so from Equation 19.2,

$$\frac{E_1}{\alpha_1} = \frac{E_2}{\alpha_2} = f(T).$$

If body 2 is black, $\alpha_2 = 1$, and $E_2 = \sigma T^4$.

$$\frac{E_1}{\alpha_1} = \sigma T^4,$$

$$\frac{\varepsilon_1 \sigma T^4}{\alpha_1} = \sigma T^4.$$

Therefore, again, $\varepsilon_1 = \alpha_1$ for any gray surface (Kirchhoff's Law).

Using Kirchhoff's Law we find,

$$\dot{q}_{\text{net 1 to 2}} = \frac{\varepsilon_1 \sigma T_1^4 \varepsilon_2 - \varepsilon_2 \sigma T_2^4 \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2},$$

or, as the final expression for heat transfer between gray, planar, surfaces,

$$\dot{q}_{\text{net 1 to 2}} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

19.3 Radiation Heat Transfer Between Planar Surfaces (mit.edu)

19.3.1 Example 1: Use of a thermos bottle to reduce heat transfer

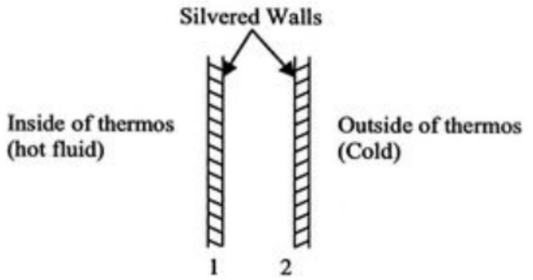


Figure 19.6: Schematic of a thermos wall

$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.02$ for silvered walls. $T_1 = 100°\mathrm{C} = 373\ \mathrm{K}$; $T_2 = 20°\mathrm{C} = 293\ \mathrm{K}$.

$$\dot{q}_{\mathrm{net\ 1\ to\ 2}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \dot{q}_{\mathrm{net\ 1\ to\ 2}}$$

$$= \frac{(5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2K^4})((373\ \mathrm{K})^4 - (293\ \mathrm{K})^4)}{\dfrac{1}{0.02} + \dfrac{1}{0.02} - 1} = 6.9\ \mathrm{W/m^2}.$$

For the same ΔT , if we had cork insulation with $k = 0.04\ \mathrm{W/m\text{-}K}$, what thickness would be needed?

$\dot{q} = \frac{k\Delta T}{L}$ so a thickness $L = \frac{k\Delta T}{\dot{q}} = \frac{(0.04\ \mathrm{W/m\text{-}K})(80\ \mathrm{K})}{6.9\ \mathrm{W/m^2}} = 0.47\ \mathrm{m}$ would be needed! The thermos is indeed a good insulator.

19.4 Radiation Heat Transfer Between Black Surfaces of Arbitrary Geometry

In general, for any two objects in space, a given object 1 radiates to object 2, and to other places as well, as shown in Figure 19.10.

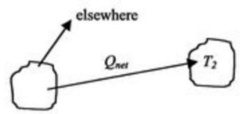


Figure 19.10: Radiation between two bodies

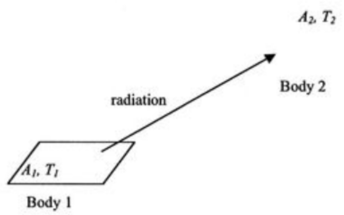


Figure 19.11: Radiation between two arbitrary surfaces

We want a general expression for energy interchange between two surfaces at different temperatures. This is given by the radiation **shape factor** or **view factor**, F_{i-j} . For the situation in Figure 19.11,

F_{1-2} =	fraction of energy leaving 1 which reaches 2
F_{2-1} =	fraction of energy leaving 2 which reaches 1
F_{1-2} , F_{2-1}	are functions of geometry only

For body 1, we know that E_b is the emissive power of a black body, so the energy leaving body 1 is $E_{b1}A_1$. The energy leaving body 1 and arriving (and being absorbed) at body 2 is $E_{b1}A_1F_{1-2}$. The energy leaving body 2 and being absorbed at body 1 is $E_{b2}A_2F_{2-1}$. The net energy interchange from body 1 to body 2 is

$$E_{b1}A_1F_{1-2} - E_{b2}A_2F_{2-1} = \dot{Q}_{1-2}. \tag{19..4}$$

Suppose both surfaces are at the same temperature so there is no net heat exchange. If so,

$$E_{b1}A_1F_{1-2} - E_{b2}A_2F_{2-1} = 0,$$

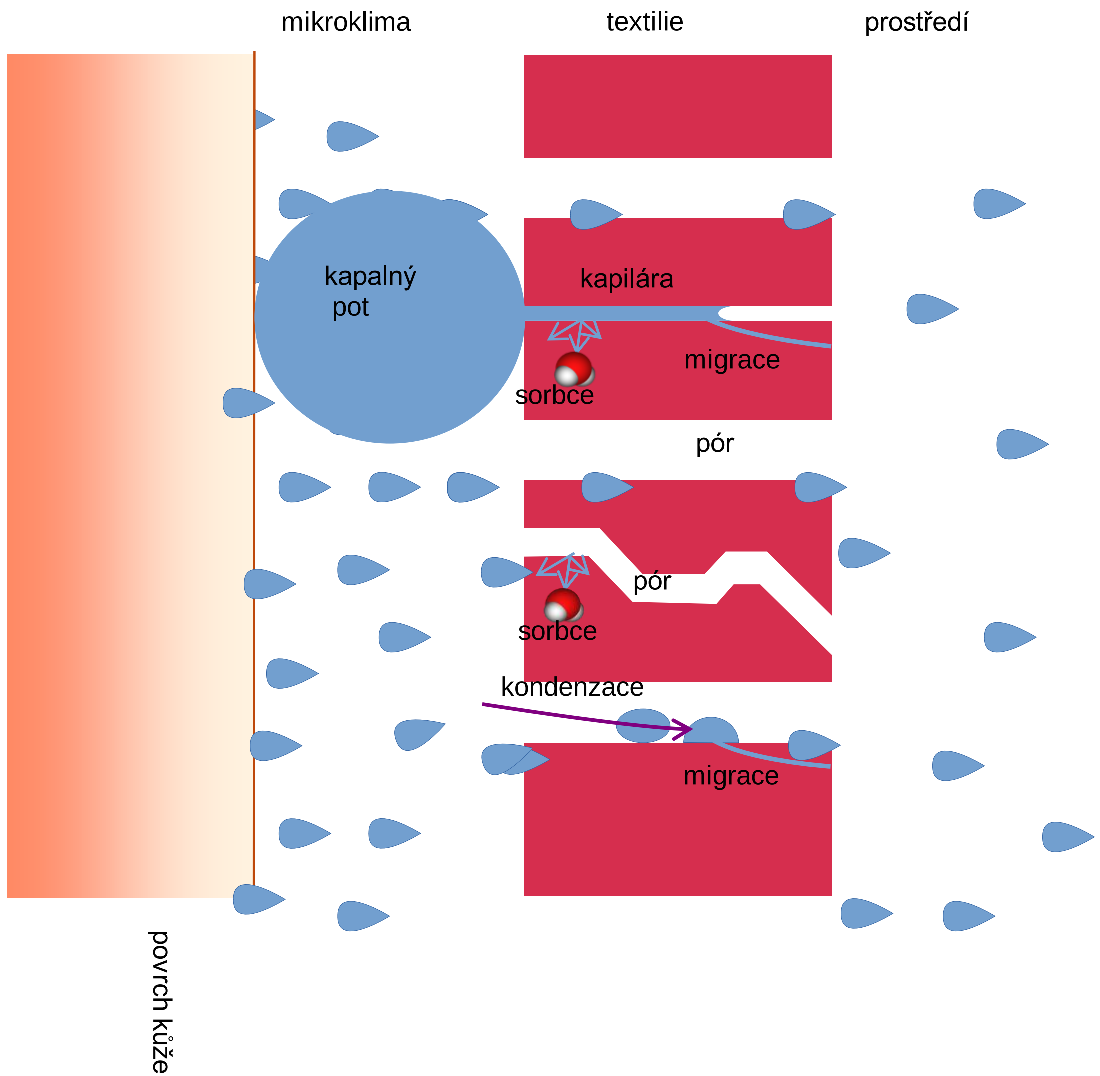
but also $E_{b1} = E_{b2}$. Thus

$$A_1F_{1-2} = A_2F_{2-1}.$$

Equation (19.4) is the **shape factor reciprocity relation**. The net heat exchange between the two surfaces is

$$\dot{Q}_{1-2} = A_1F_{1-2}(E_{b1} - E_{b2}) \qquad [\text{or} \quad A_2F_{2-1}(E_{b1} - E_{b2})].$$

Přenos tepla evaporací – odpařováním potu



paropropustnost
(odpařovací odpor)

r [Pa.m2/W]

Závisí na měrném výparném teple a na rozdílu parciálních tlaků vodní páry

Přenos tepla respirací– dýcháním

- Způsoben rozdílem energie vdechnutých a vydechnutých vodních par

	Přenos a způsob přenosu tepla ovlivňuje:	**Odvod a způsob odvodu vlhkosti ovlivňuje:**
chemická podstata vlákna	λ vlákna (záření + vedení)	sorbce +
tvar vlákna	+ lesk/mat +	kapilarita závislá na smáčivosti vláken migrace + velikost kapilár a pórů v textilii
vlastnosti textilie	λ vzduchu v mezerách mezi vlákny tloušťka textilie + přiléhavost/přítomnost a velikost vzduchových mezer (+ proudění), α	tloušťka textilie hydrofilnost/hydrofobita + přiléhavost/přítomnost a velikost vzduchových mezer (+ proudění), α
vlastnosti oděvu člověk	počet a překrývání vrstev (každá vrstva může násobit vlivy uvedené výše) + tvar a velikost těla pohyb těla (množství vydaného tepla a vliv pohybu na velikost a chování vzduchových mezer) záření těla +	počet a překrývání vrstev (každá vrstva může násobit vlivy uvedené výše) hydrofobní/hydrofilní + tvar a velikost těla pohyb těla (množství vydaného potu a vliv pohybu na velikost a chování vzduchových mezer)
prostředí	teplota okolního vzduchu tlak okolního vzduchu	+ vlhkost okolního vzduchu tlak par + tvar a velikost
manekýn	záření prostředí	povrch/použití „kůže“ a její vlastnosti způsob dodání vlhkosti metoda měření odpařovacího odporu (úbytek vlhkost/úbytek tepla) schopnost dodržet izotermické podmínky rychlost dodávání potu
		rychlost chůze

Konec