

Tepelně vlhkostní mikroklima

Člověk

Produkce tepla a jeho
výdej do prostředí



Produkce tepla a tepelná rovnováha

Účel:

1. Stanovení tepelné a vlhkostní produkce člověka pro tepelnou bilanci klimatizované místnosti.
2. Určení limitních podmínek prostředí, které je člověk schopen dlouhodobě snášet bez ohrožení zdraví.
3. Určení maximální doby expozice v prostředí, které není snesitelné dlouhodobě (stanovení režimu práce a odpočinku).

Metody a prostředky:

1. ČSN ISO 9886 Hodnocení tepelné zátěže podle fyziologických měření
2. ČSN ISO 9886 Ergonomie – Stanovení tepelné produkce organismu
3. ČSN EN 7993 Horká prostředí. Analytické stanovení a interpretace tepelné zátěže s použitím výpočtu požadované intenzity pocení.
4. Nařízení vlády č. 523/2002 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci

Rovnice tepelné bilance člověka

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K + C + R + E + S$$

produkce = výdej + akumulace

$$\mu = \frac{W}{M}$$

M energetický výdej

W mechanická práce

C_{res} ... výměna citelného tepla dýcháním

E_{res} ... výměna vázaného tepla dýcháním

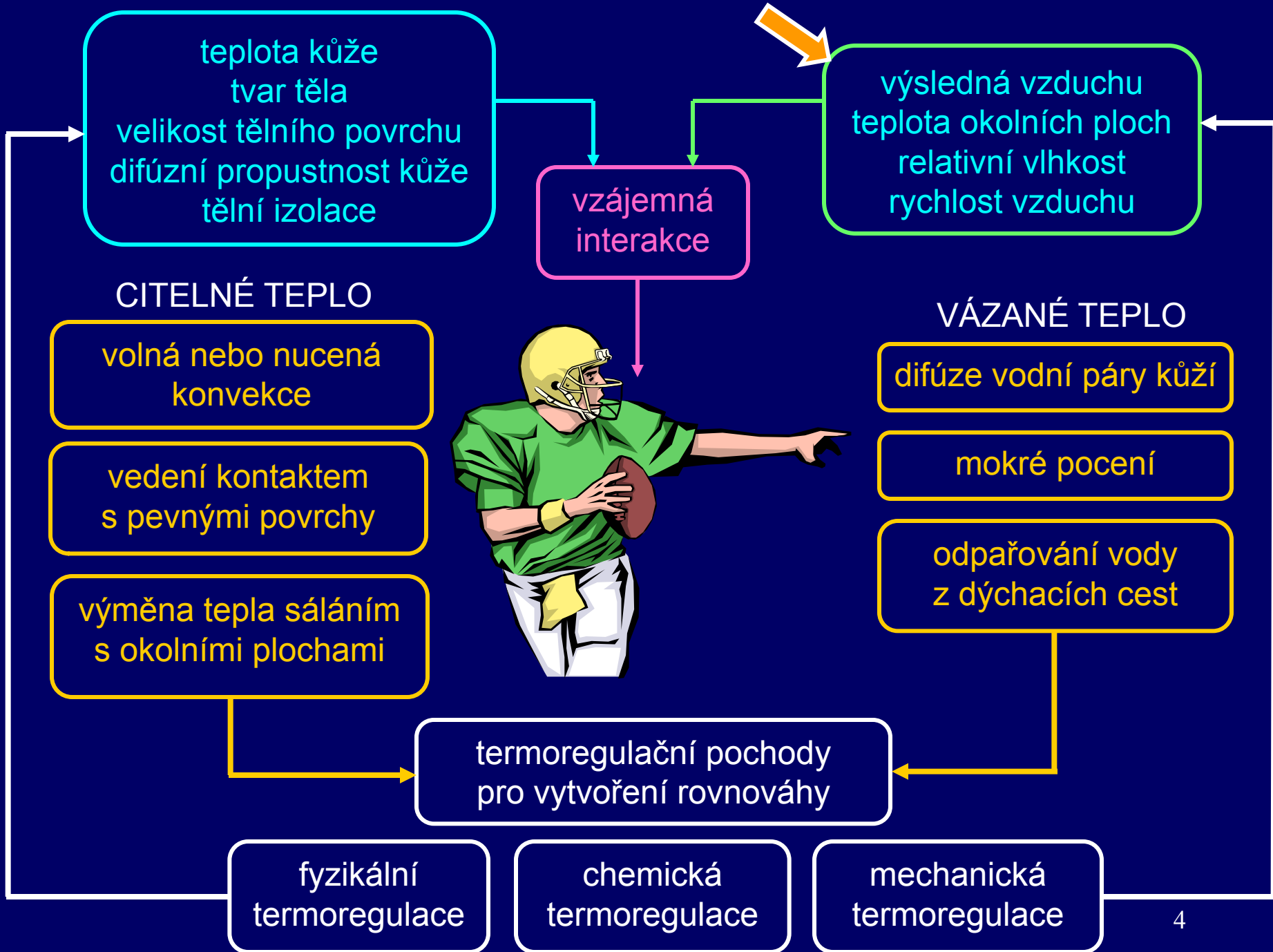
K výměna citelného tepla vedením

C výměna citelného tepla prouděním

R výměna citelného tepla sáláním

E výměna vázaného tepla odpařováním

S akumulace tepla v těle



Termoregulační mechanismy

V teplém prostředí:

1. **Vazodilatace** – rozšíření podkožních cév → zvýšení prokrvení pokožky → zvýšení povrchové teploty
2. **Aktivace potních žláz** – odpařování potu, krátkodobě až 4 l/h, dlouhodobě 1 l/h – 2,4 MJ tepla.
3. **Hypertermie** – přehřívání organismu (slabost, bolest hlavy, zrychlený dech)

V chladném prostředí:

1. **Vazokonstrikce** – snížení prokrvení pokožky → snížení povrchové teploty, postavení chloupků na kůži → ochrana mezní vrstvy
2. **Termogeneze** – svalový třes, až 10-ti násobné zvýšení tepelné produkce. Vnitřní teplota zůstává cca 37 °C, periferie mohou být chladnější jak 20 °C
3. **Hypotermie** – podchlazení těla (vzestup krevního tlaku a srdeční frekvence)

Tepelná produkce člověka energetický výdej M

- **Bazální metabolismus** – teplo je produktem biologických procesů (chemická energie potravy)
- **Svalový metabolismus** – teplo vedlejším produktem fyzické činnosti člověka (účinnost lidské práce je nízká)

Energetický výdej se vyjadřuje jako:

- Tepelný výkon průměrného (standardního) člověka (**W**)
- Tepelný výkon na jednotku plochy tělesného povrchu (**W/m²**)
- Tepelný výkon v jednotkách **met** (1 met odpovídá tepelné produkci sedícího člověka)

Hodnoty metabolismu brutto zahrnují i bazální metabolismus.

Složky energetického výdeje M

Bazální metabolismus:

- muž 44 W/m²
- žena 41 W/m²

Svalový metabolismus:

- Poloha těla
 - V sedě 10 W/m²
 - V kleče 20 W/m²
 - Ve stoje 25 W/m²
- Druh a rychlost práce
 - Práce rukou 30 W/m²
 - Práce oběma pažemi 85 W/m²
 - Práce trupem 190 W/m²



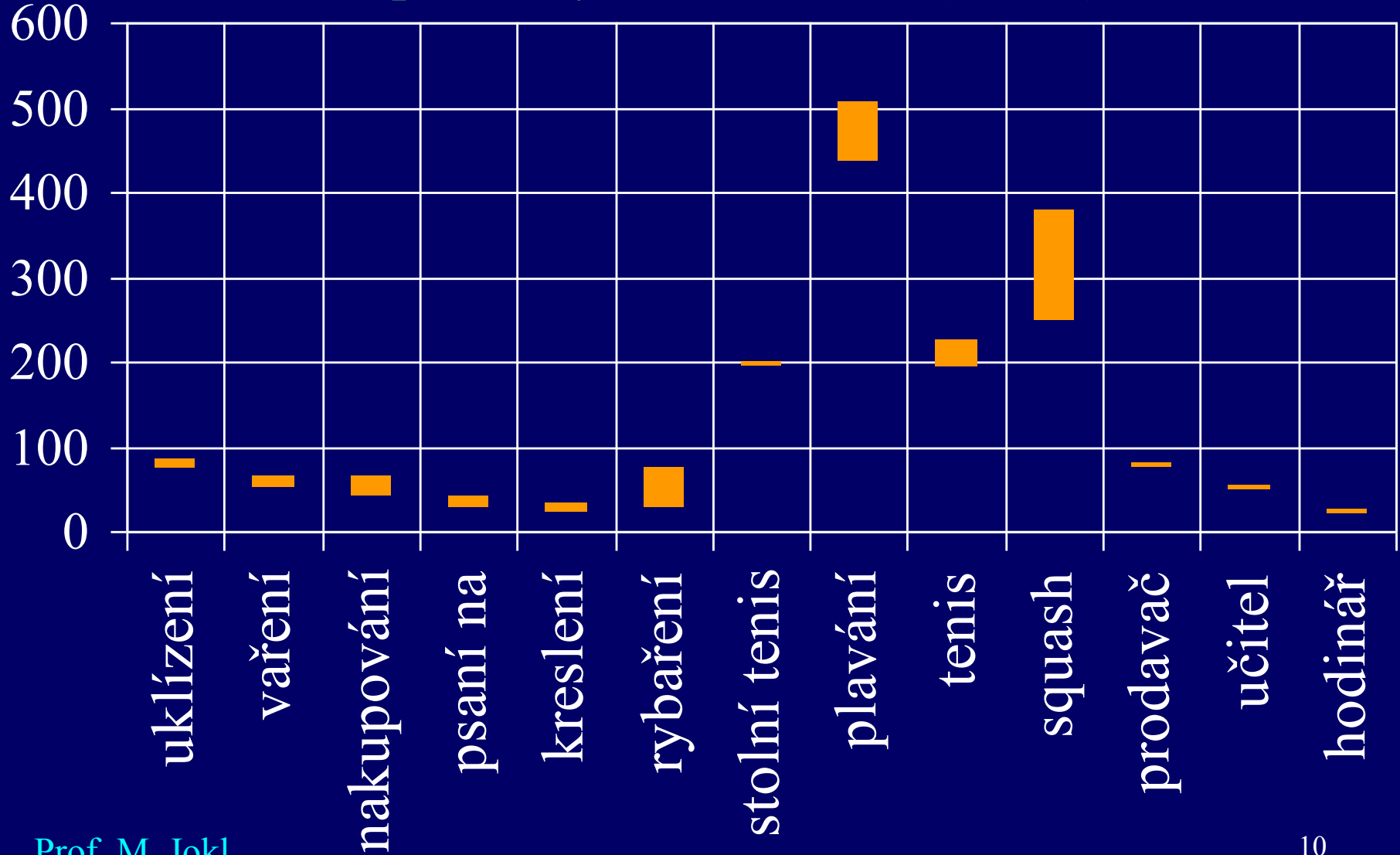
Metody - stupně pro stanovení *M* a tepelné bilance organismu

STUPEŇ	METODA	PŘESNOST	PROHLÍDKA PRACOVNÍHO MÍSTA
I	A – KLASIFIKACE PODLE DRUHU ČINNOSTI	HRUBÁ INFORMACE S VELKÝM RIZIKEM CHYBY	NENÍ NUTNÁ
	B – KLASIFIKACE PODLE POVOLÁNÍ		INFORMACE O TECHNICKÉM ZAŘÍZENÍ A ORGANIZACI PRÁCE
II	A – POUŽITÍ TABULEK PRO SLOŽKY PRACOVNÍ ČINNOSTI	VELKÉ RIZIKO CHYB 15%	JE TŘEBA ČASOVÁ STUDIE
	B – POUŽITÍ TABULEK ODHADU PRO JEDNOTLIVÉ ČINNOSTI		NENÍ TŘEBA
	C – MĚŘENÍ SRDEČNÍ FREKVENCE ZA DEFINOVANÝCH PODMÍNEK		
III	MĚŘENÍ SPOTŘEBY KYSLÍKU	RIZIKO CHYB JEN V MEZÍCH PŘESNOSTI MĚŘENÍ A ČASOVÉ STUDIE	JE TŘEBA ČASOVÁ STUDIE

Energetický výdej M podle činnosti

činnost	metabolismus		Mechanická účinnost
	W/m ²	met	-
Bazální metabolismus	45	0,8	0
Sezení, odpočívání	58	1	0
Stání, odpočívání	65	1,1	0
Běžná kancelářská práce	75	1,3	0
Lehká práce na strojích	150	2,6	0,1
Těžká manuální práce	250	4,3	0,1
Chůze po rovině 4km/h	140	2,4	0
Chůze po rovině 6km/h	200	3,5	0
Chůze se stoupáním 5% (4 km.h-1)	200	3,5	0
Chůze se stoupáním 5% (4 km.h-1)	340	5,7	0,2

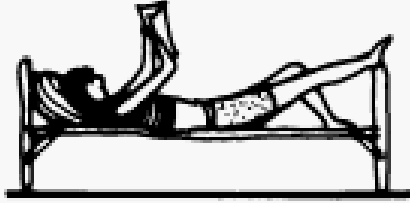
Metabolické teplo při různých činnostech (W/m^2)



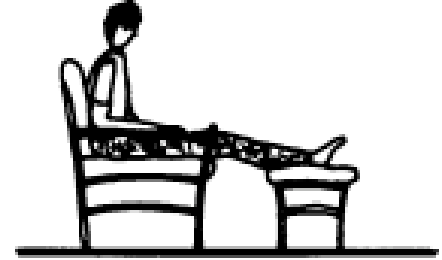
Hodnota metabolismumu (met)



0,7 met



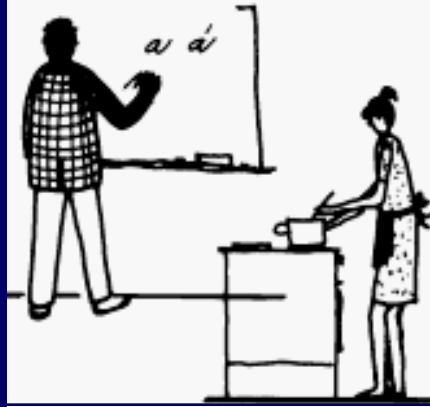
0,8 met



1,0 met



1,2 met



1,6 met



2,0 met



3,0 met



6,0 met



7,0 met

Maximální výkon člověka

Zdravý muž (20 let) může dosáhnout maxima $M = 12 \text{ met}$. Se stoupajícím věkem tato hodnota klesá. Ve věku 70 let je maximum $M = 7 \text{ met}$. Pro ženy platí hodnoty o zhruba 30 % nižší.

$$M = 12 = 12.58 = 686 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Pro standardní osobu } M = 1295 \text{ W}$$



Max. mechanická práce L. Armstrong $W = 500 \text{ W}$

Faktory ovlivňující tepelný výkon

- **Vnitřní prostředí**

- Teplota vzduchu
- Radiační teplota
- Vlhkost vzduchu
- Rychlost proudění vzduchu a jeho turbulence

Operativní
teplota

Efektivní
teplota

- **Osobní faktory**

- Hodnota metabolismu (fyzická aktivita)
- oblečení

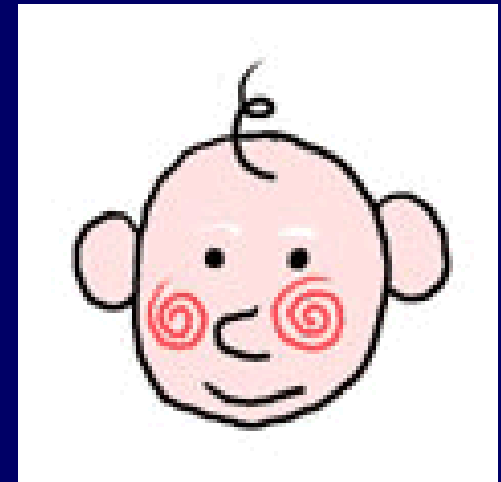
- **Doplňující faktory**

- Jídlo a pití
- Aklimatizace
- Aklimace
- Tělesná postava
- Věk a pohlaví

Vstupní veličiny subjektu

- Hmotnost m , výška h → povrch těla A_{DU} (m²)
- energetický výdej M (W/m²)
- vnější práce W (W/m²)
- tepelná izolace oděvu I_{clo} (m²K/W)
- difúzní odpor oděvu R_t (m²Pa/W)

$$A = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot h^{0,725}$$



Vstupní veličiny prostředí

- teplota vzduchu t_a (C)
- vlhkost vzduchu - parciální tlak vodní páry p (Pa)
- teplota stěn (radiální teplota) t_r (C)
- rychlost proudění vzduchu v_a (m/s)

Vstupní veličiny výměny tepla

- střední teplota kůže t_{sk} (C)
- relativní rychlost proudění vzduchu v_{ar} (m/s)
- součinitel přestupu tepla konvekcí h_c (W/m²K)
- součinitel přestupu tepla sáláním h_r (W/m²K)
- maximální intenzita pocení E_{max} (W/m²Pa)

Tepelná izolace oděvu (clo)

PÁNI



< 0,5



0,6 – 1,2



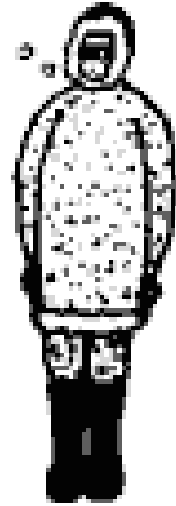
1,3 – 1,7



1,8 – 2,4

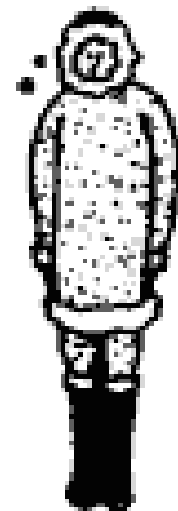


2,5 – 3,4



> 3,5

DÁMY



Energetický výdej pro jeden pracovní cyklus složený z více činností

M průměrný energetický výdej pracovního cyklu

M_i ... energetický výdej při i-té činnosti (W/m^2)

(W/m^2) **t_i** doba trvání i-té činnosti (s)

T doba trvání pracovního cyklu (s)

$$M = \frac{1}{T} \sum_{n=1} M_i \cdot t_i$$

standardní osoba

muž: $h=1,7\text{m}$, $m=70\text{kg}$, $A=1,8\text{m}^2$, věk 35 let

žena: $h=1,6\text{m}$, $m=60\text{kg}$, $A=1,6\text{m}^2$, věk 35 let

Hodnocení tepelné zátěže podle fyziologických měření

Odpověď organismu na pobyt v teplém nebo chladném prostředí

1. TEPLOTA TĚLESNÉHO JÁDRA

jícen, konečník, zažívací trakt, ústa, bubínek, zevní zvukovod

2. TEPLOTA KŮŽE

průměrná teplota na celém povrchu těla = vážený průměr souboru místních teplot

3. SRDEČNÍ FREKVENCE

Měření srdeční frekvence za definovaných podmínek

4. ZTRÁTA TĚLESNÉ HMOTNOSTI

Úbytek hmotnosti následkem pocení

Mezní hodnoty fyziologických měření

Gradient teploty $\Delta t = \text{max. } 1\text{K/hodina}$

Max. teplota tělesného jádra $t_j = 36 - 39 \text{ C}$

Teplota kůže na čele $t_{sk} = 17 - 45 \text{ C}$

Tepelná srdeční reaktivita $\Delta HR_t = \text{max. } 33 / \text{min.K}$

(zvýšení teploty o jádra o 1 C \rightarrow nárůst 33 tepů/min.)

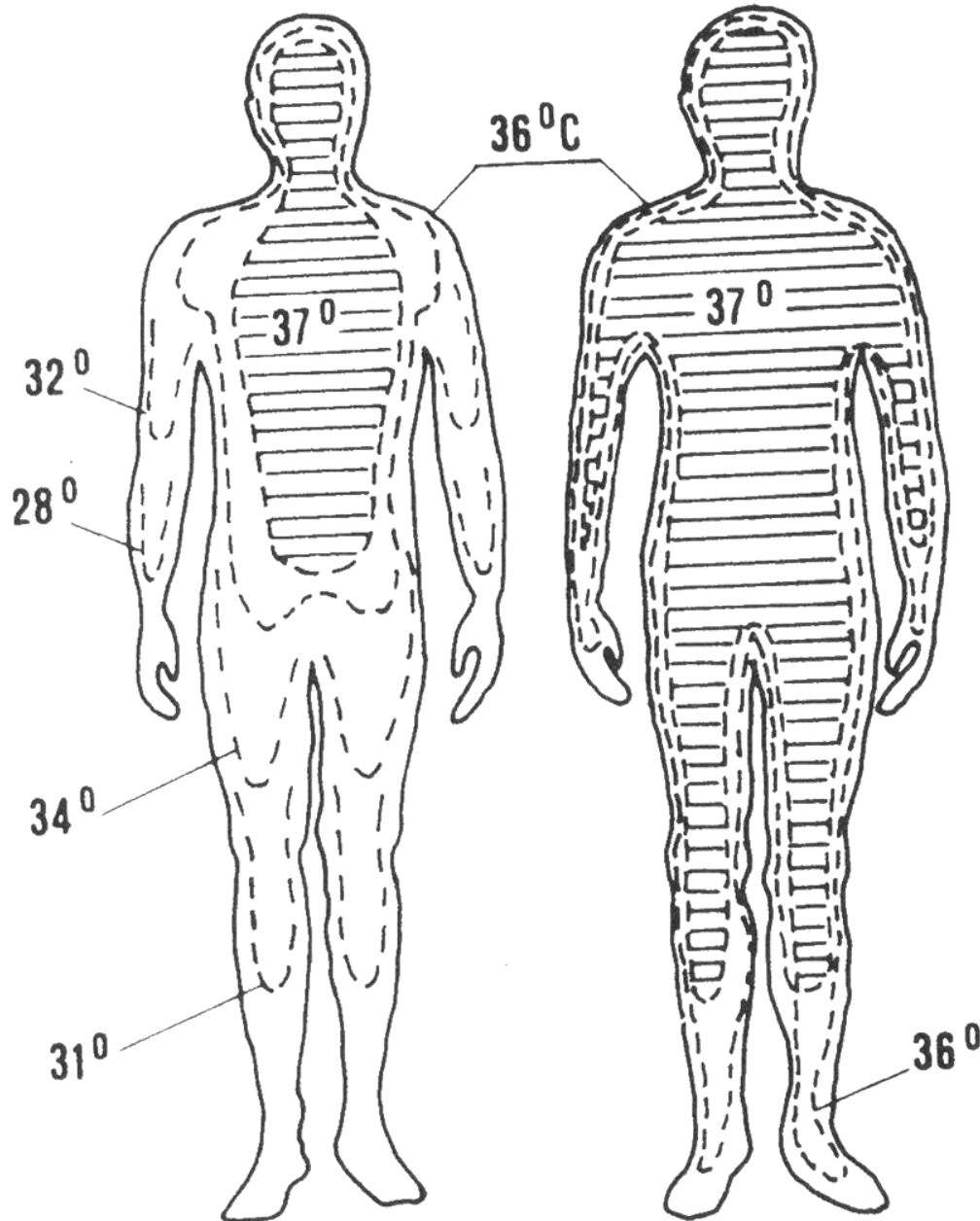
Na pracovišti $\Delta HR_t = 185 - 0,65.\text{věk}$

Ztráta tělesné hmotnosti $\Delta m = 800 \text{ až } 1300 \text{ g/h}$

(standardní osoba)

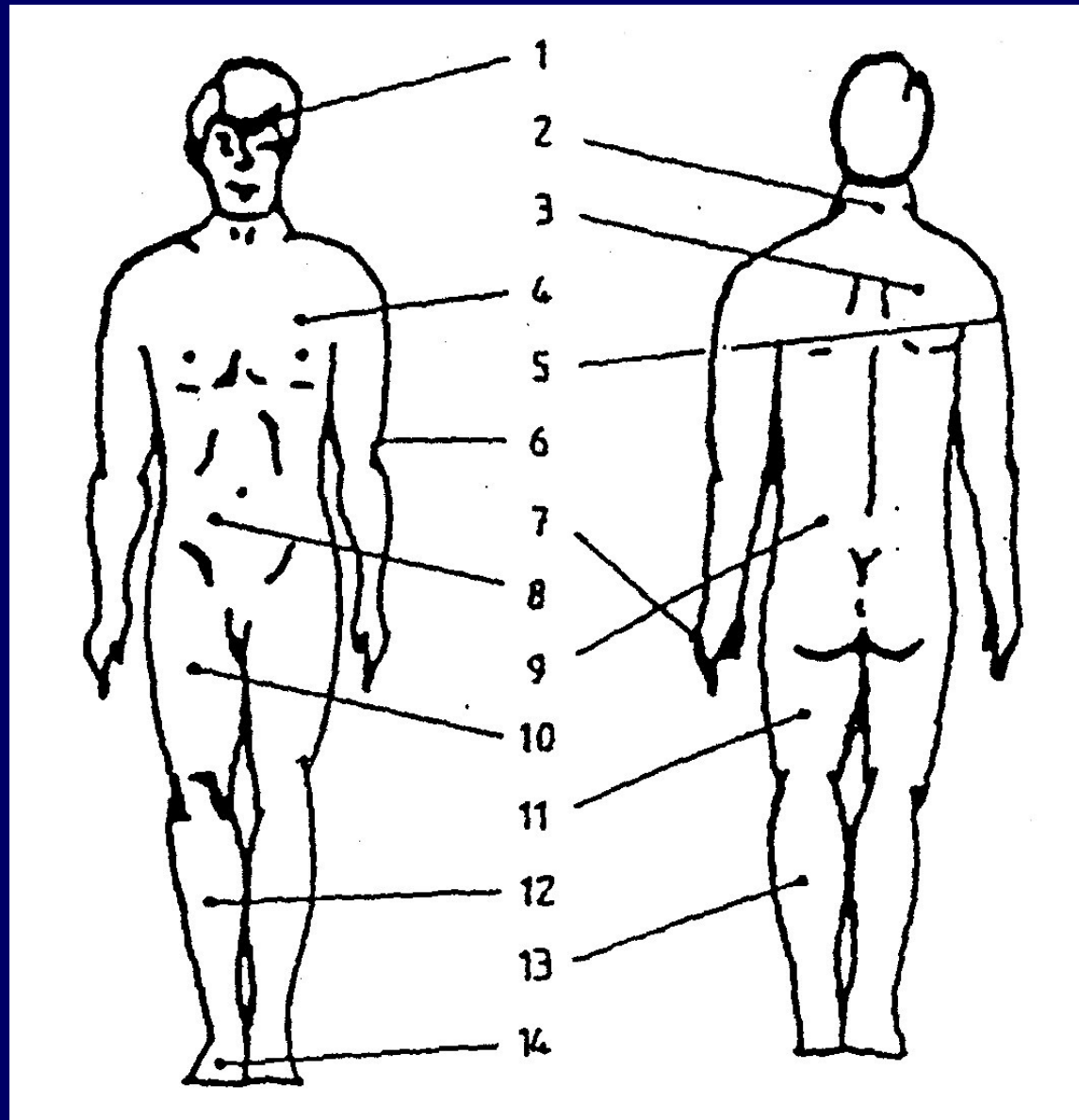
Teplota kůže v prostředí

chladném

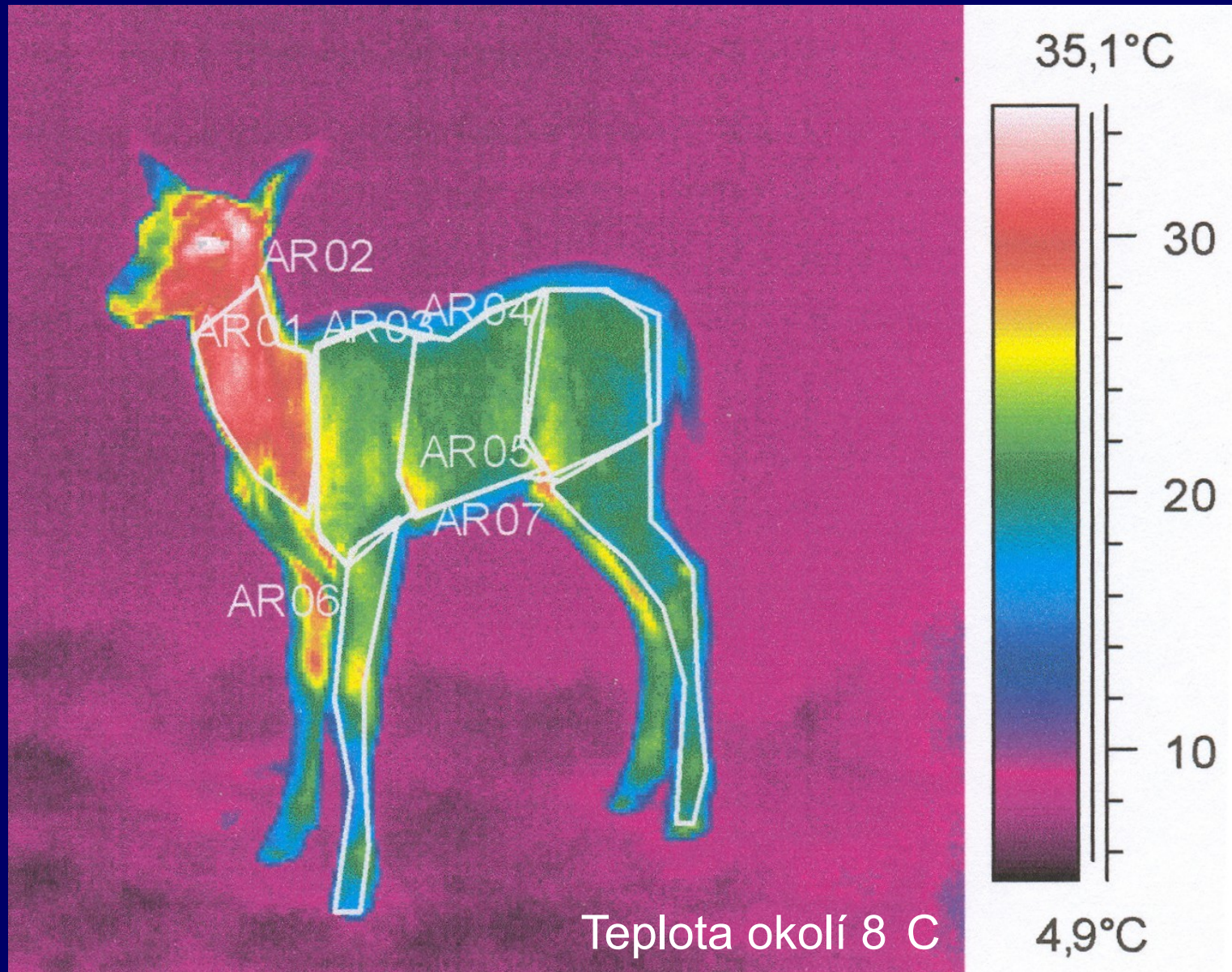


teplém

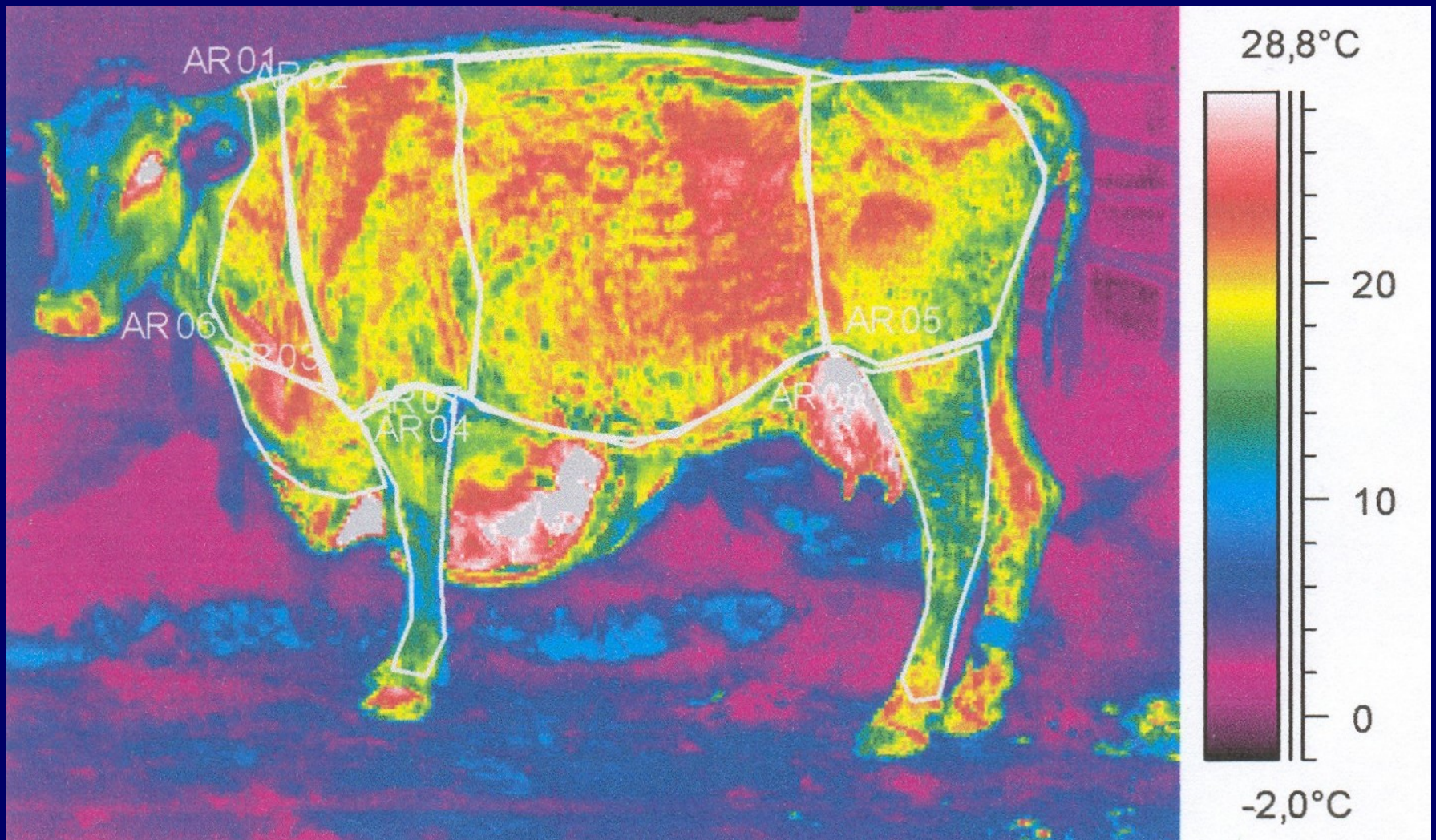
Měření teploty kůže – referenční body



Rozložení povrchové teploty

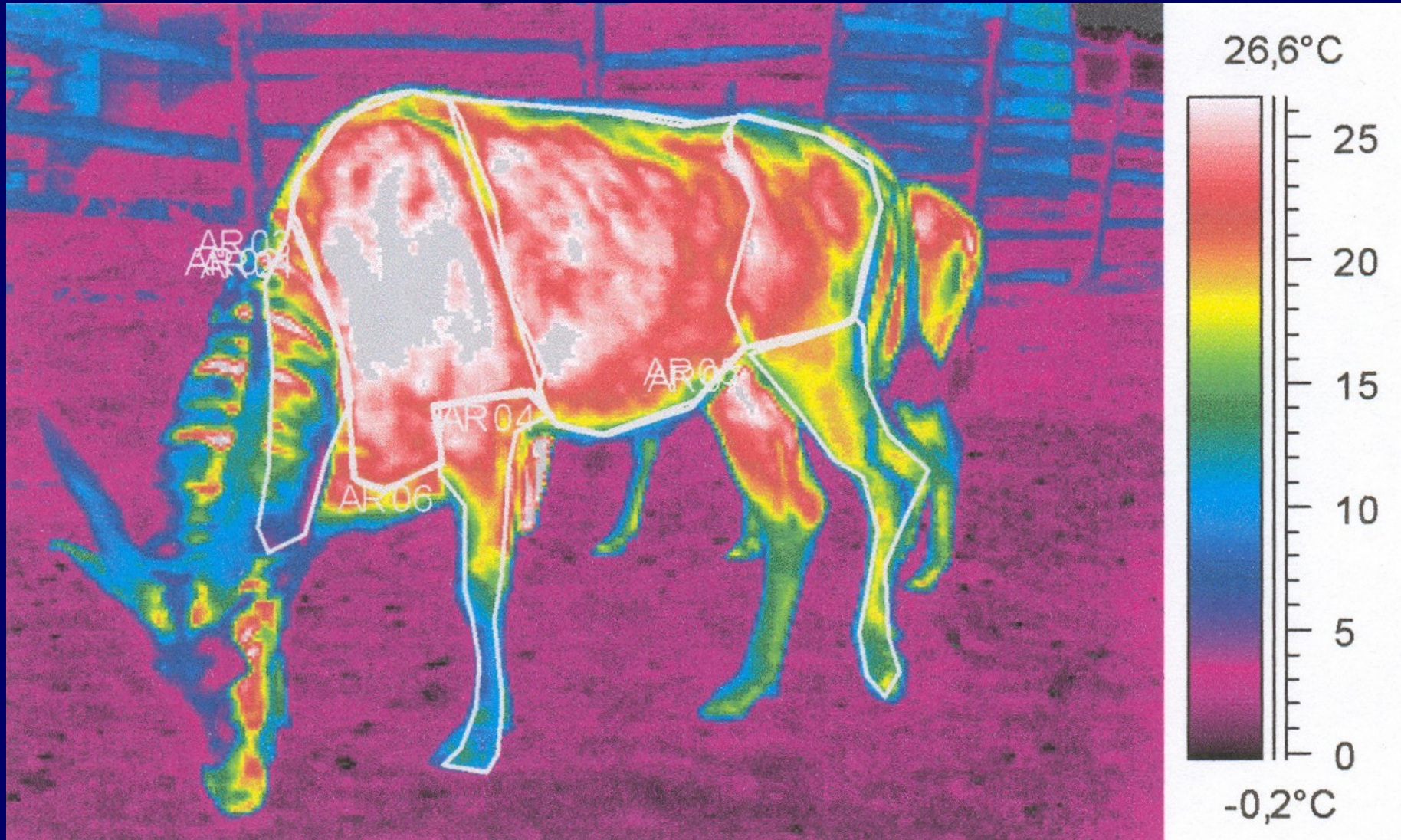


Rozložení povrchové teploty



Teplota okolí 4 C

Rozložení povrchové teploty



Teplota okolí 4 C

SRDEČNÍ FREKVENCE

$$HR = HR_0 + \Delta HR_m + \Delta HR_s + \Delta HR_t + \Delta HR_n + \Delta HR_e$$

HR_0 klidová hodnota s.f. při $M = 58 \text{ W/m}^2$

ΔHR_m ... zvýšení s.f. způsobené dynamickým svalovým zatížením

ΔHR_s ... zvýšení s.f. způsobené statickou svalovou prací

ΔHR_t ... zvýšení s.f. způsobené tepelnou zátěží

ΔHR_n ... zvýšení s.f. způsobené mentální zátěží

ΔHR_e ... reziduální složka s.f. (např. vlivy dýchání)

Odhad M dle srdeční frekvence $M = 4 \cdot HR - 255$

ZTRÁTA TĚLESNÉ HMOTNOSTI (následkem pocení)

$$\Delta m_g = \Delta m_{sw} + \Delta m_{res} + \Delta m_o + \Delta m_{wat} + \Delta m_{sol} + \Delta m_{clo}$$

Δm ztráta hmotnosti v důsledku:

Δm_{sw} ... ztráty potu během časového intervalu

Δm_{res} ... ztráty potu odpařování v dýchacím ústrojí

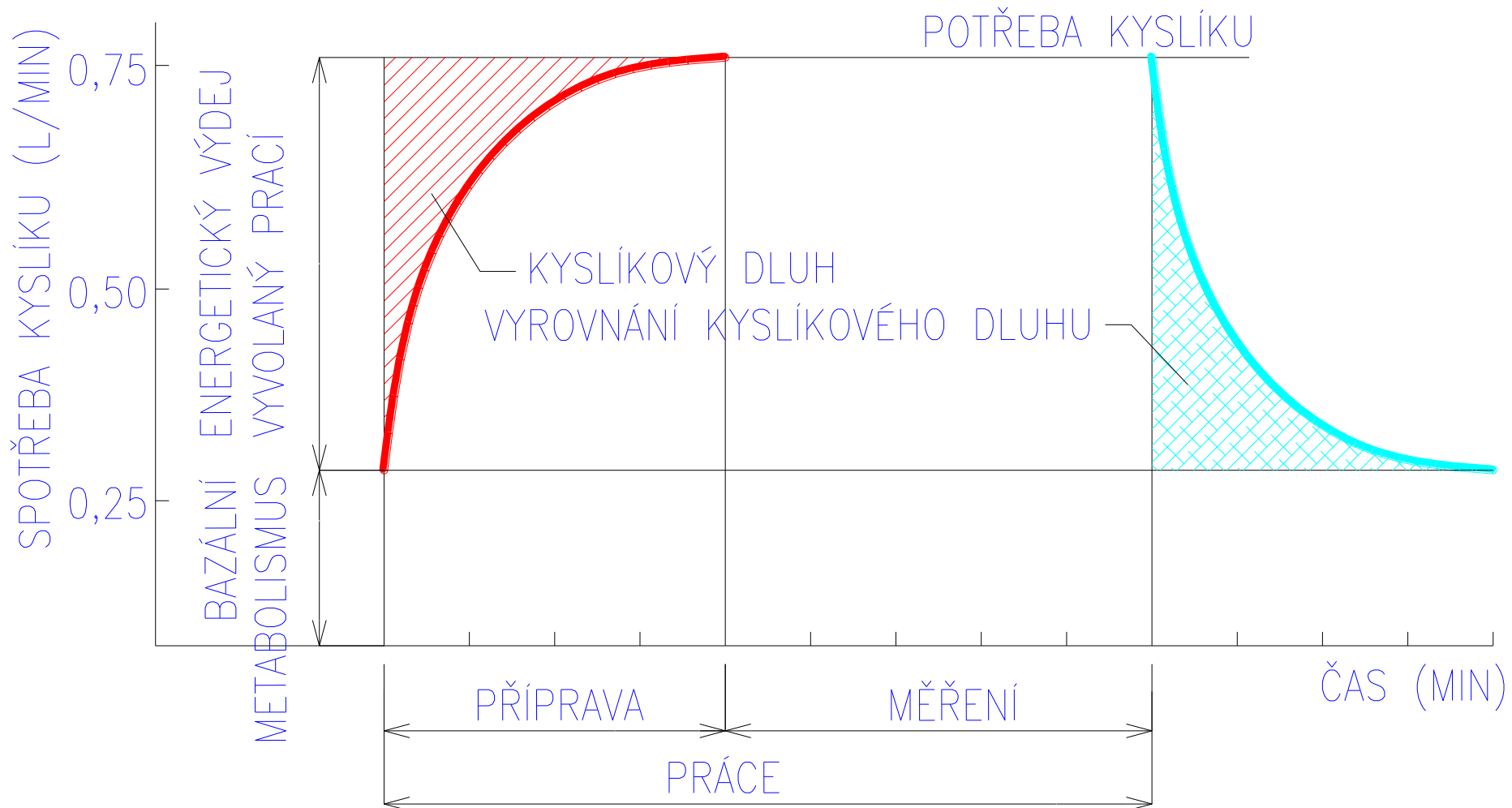
Δm_o rozdíl mezi hmotnostmi CO_2 a O_2

Δm_{wat} ... příjmu a vylučování (moč) vody

Δm_{sol} ... příjmu (potrava) a vylučování (stolice) pevných látek

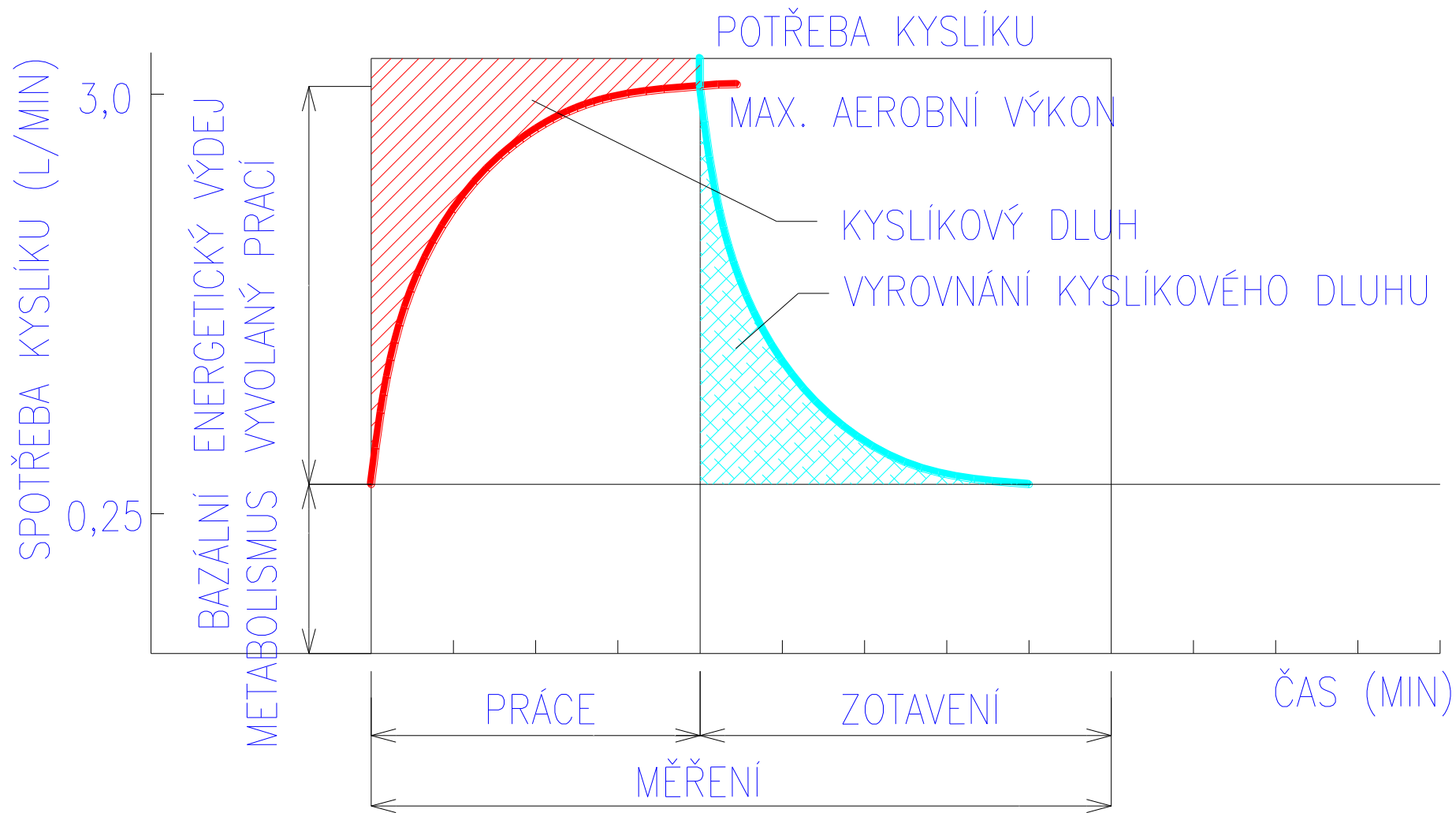
Δm_{clo} ... změny hmotnosti oblečení v důsledku změn v oblečení a akumulace potu v oděvu

Měření spotřeby kyslíku PARCIÁLNÍ METODA



Měření spotřeby kyslíku

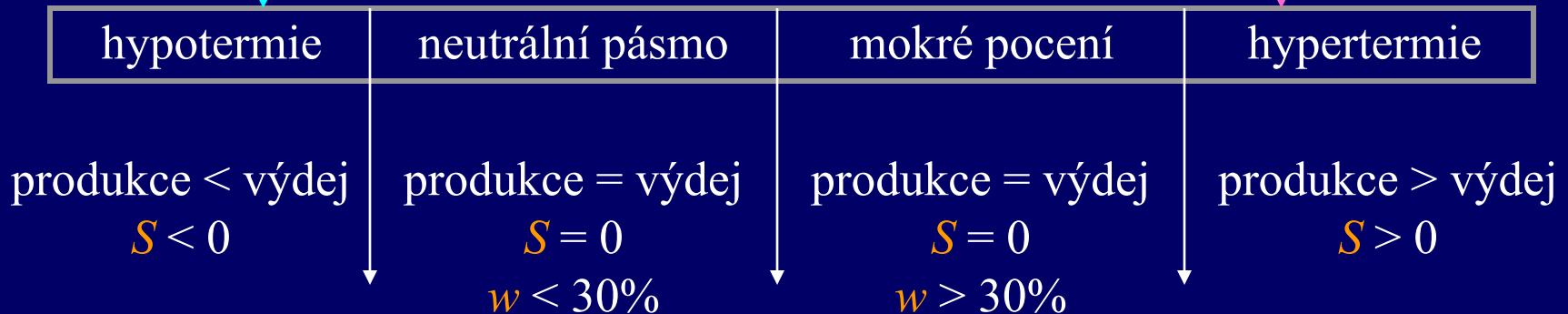
INTEGRÁLNÍ METODA



Reakce lidského těla na prostředí

produkce = výdej + akumulace

Tepelná bilance člověka



w ... vlhkost kůže (%) je definovaná jako odpovídající podíl povrchu kůže, který lze pokládat za úplně mokré. Za optimálních podmínek vodní páru pohltí okolní vzduch a pokožka zůstává suchá.

Tepelná bilance v horkém prostředí

tepelná rovnováha při suchém pocení

Pro zachování tepelné pohody udává Fanger vztah pro maximální tepelný tok odpařováním potu:

$$SW_{max} = 0,42 \cdot (M - \mu) - 58$$

když:

• $E \ll E_{max} \rightarrow S = 0$

• $E < E_{max} \rightarrow S = 0 \rightarrow$ tepelná rovnováha při mokřém pocení

• $E > E_{max} \rightarrow S = (E_{max} - E)$

mokřé pocení nestačí k odvodu tepla do okolí \rightarrow akumulace tepla v těle
Časově omezený pobyt v prostředí.

Tepelná bilance v horkém prostředí

Výpočet požadované intenzity pocení

$$E = M - W - C_{res} - E_{res} - K - C - R$$

$$E_{max} = \frac{p_{sk} - p_a}{R_T}$$

$$E_{max, 35} = h_c \cdot (622 - p_a)$$

$$w_{35} = 100 \cdot \frac{E_{35}}{E_{max, 35}}$$

E_{max} ... maximální intenzita pocení (W/m²)

$E_{max, 35}$... maximální intenzita pocení pro teplotu kůže 35 C (W/m²)

p_{sk} ... tlak nasycené vodní páry při teplotě kůže (kPa)

p_a ... tlak vodní páry v okolním prostředí (kPa)

R_t ... celkový odpařovací odpor oděvu (m²kPa/W)

w ... vlhkost kůže při 35 C

SW ... tepelný tok odpařováním potu (W/m²)

Tepelná bilance v horkém prostředí

Výpočet požadované intenzity pocení

Aktuální stav vlhkosti kůže při různých hodnotách w :

$w = 20-30\%$

elektrický odpor kůže na čele, dlaních a trupu prudce klesá, kůže (s výjimkou podpaždí) však zůstává na pohmat prakticky suchá, v klidu začíná být pocíťován diskomfort

$w = 30-40\%$

hmatné, ale sotva viditelné ovlhčení čela, dlaní, břicha a beder. Oděv zůstává prakticky suchý, při fyzické aktivitě začíná být pocíťován diskomfort

$w = 50-70\%$

silné, ale sotva viditelné ovlhčení čela, dlaní, břicha a beder, mírné ovlhčení tváří, zad a prsou, event. horních končetin. Oděv zvlhčen hlavně v pase. Při tělesném klidu značný diskomfort

$w > 70\%$

silné ovlhčení téměř celého těla, stoupající provlhčení oděvu. Při fyzické práci značný diskomfort, začíná odkapávání potu

Tepelná bilance v horkém prostředí

Výpočet požadované intenzity pocení

ČSN EN 7993

$$E < E_{max} \rightarrow S = 0$$

Maximální vlhkost kůže pro neklimatizovanou osobu je stanovena dle ČSN EN 12 515 na 85%, pro aklimatizovanou 100%. Tím je dána maximální intenzita pocení pro neklimatizované osoby $100 - 150 \text{ W/m}^2$, pro aklimatizované $200 - 300 \text{ W/m}^2$, což odpovídá ztrátě potu standardní osoby 260 – 390 g/h pro osoby neklimatizované, 520 – 780 g/h pro osoby aklimatizované.

$$E > E_{max} \rightarrow S = (E_{max} - E)$$

Krátkodobě únosná tepelná zátěž je kritérium pro stav organismu již za hranicí tepelné rovnováhy, kdy dochází k akumulaci tepla v těle, které nesmi pro aklimatizované i neaklimatizované osoby překročit 180 kJ/m^2 (50 Wh/m^2).

Této hodnotě odpovídá vzestup teploty tělesného jádra o 0,8 K, vzestup teploty kůže o 3,5 K a vzestup srdeční frekvence na max. 150 /min.

$E > E_{max} \rightarrow S > S_{max} \rightarrow$ časové omezení expozice

Pokud je dosaženo požadované intenzity odpařování, rozdíl $E_{req} - E_{max}$ představuje teplo akumulované v těle, které vede ke zvýšení tělesné teploty. Přípustná doba expozice se stanoví na základě maximální hodnoty akumulace tepla v těle Q_{max} a ztráty vody D_{max} . Omezení doby expozice v minutách lze vyjádřit vzorcem:

$$DLE_1 = \frac{60 \cdot Q_{max}}{E_{req} - E_{max}}$$

Pokud však předpovídaná intenzita pocení je spojena nadměrnou ztrátou vody, musí být doba expozice omezena maximální ztrátou vody v těle D_{max} :

$$DLE_2 = \frac{60 \cdot D_{max}}{SW_{max}}$$

Maximální ztráta vody v těle je pro neklimatizované osoby stanovena $D_{max} = 1000 - 1250 \text{ Wh/m}^2$ pro neaklimatizované a $1500 - 2000 \text{ Wh/m}^2$ pro aklimatizované osoby. Nižší z hodnot je pro stav „ohrožení“, vyšší pro stav „nebezpečí“. Hodnoty odpovídají ztrátě tekutin $D_{max} = 2600 - 3250 \text{ g/směnu}$ pro neaklimatizované a $3900 - 5200 \text{ g/směnu}$ pro aklimatizované osoby.

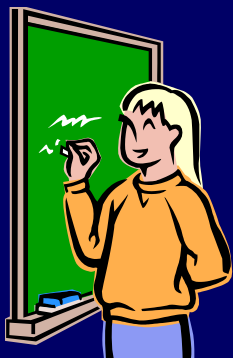
NV 523/2002 Sb., kterým se mění nařízení vlády č. 178/2001 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci

Třída práce	Energetický výdej	Optimální teplota	Rychlost proudění	Intenzita pocení	
	W/m ²	C	m/s	g/h	g/směna
I	≤ 80	22	0,1 – 0,2	107	856
IIa	81 - 105	20	0,1 – 0,2	136	1091
IIb	106 - 130	16	0,2 - 0,3	171	1386
IIIa	131 - 160	12	0,2 - 0,3	256	2045
IIIb	161 - 200	12	0,2 - 0,3	359	2649

Práce třídy:

IIIa z hlediska energetického výdeje není celosměnově únosná pro ženy

IIIb z hlediska energetického výdeje není celosměnově únosná pro muže



Příklad – Stanovení energetického výdeje

Úlohu řešte ve skupinách po 3 studentech, z každé skupiny vyhotovte protokol, který předložíte k zápočtu.

Zvolte si vhodný typ činnosti, kterou jste schopni s dostupnými pomůckami simulovat a stanovte energetický výdej pro tuto zvolenou činnost:

1. Klasifikací dle druhu činnosti dle tab. A.1. ČSN EN 28 996
2. Klasifikací podle povolání dle tab. B
3. Klasifikací podle polohy a pohybu těla a druhu práce dle tab. D.1 až D3 ČSN EN 28 996
4. Měřením srdeční frekvence v klidu a při činnosti parciální metodou podle vztahu $M = 4 \cdot HR - 255$ [W/m²]. Určete také max.hodnotu srdeční frekvence, jaké může být pokusná osoba vystavena dle vztahu $HR = 185 - 0,65 \cdot věk$.
5. Stanovte tepelný odpor oděvu při měření a určete tělesný povrch měřené osoby. Určete teplotu vzduchu při měření.
6. Zatříd'te činnost do třídy práce dle tab. č.1 NV 523/2002 Sb. a uveďte průměrný energetický výdej podle této třídy.
7. Stanovte průměrnou teplotu kůže v klidu a při činnosti pro 4 měřící body dle tab.1 ČSN ISO 9886.

Příště – Vlhkost v budovách

