

**FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA**

**Departman: Energetika i procesna tehnika**

**Predmet: MERENJE I REGULISANJE**

**Poglavlje #8 i #9:**

# MERENJE TEMPERATURE

## deo 2

- **GREŠKE KONTAKTNIH METODA MERENJA TEMPERATURA**
  - **MERENJE TEMPERATURE RADIJACIONIM METODAMA**
- 

**Predmetni nastavnik:**

dr Miroslav Kljajić, vanr. prof.

Prostorija 3, Blok F, SP

[kljajicm@uns.ac.rs](mailto:kljajicm@uns.ac.rs)

**Asistent:**

Vladimir Munćan, MSc

Prostorija 9, Blok F, SP

[vladimirmuncan@uns.ac.rs](mailto:vladimirmuncan@uns.ac.rs)

# GREŠKE KONTAKTNIH METODA MERENJA TEMPERATURA

---

- ▶ **TAČNOST MERENJA TEMPERATURA**, zavisi od izabranog **metoda (načina) merenja**, od **statičkih i dinamičkih karakteristika mernih uređaja**, od **uslova merenja (uključujući poremećaje i smetnje)** i niza drugih faktora.
- ▶ Pri korišćenju **KONTAKTNIH METODA** merenja temperatura neophodno je obezbediti takve uslove:
  - 1. da termoprijemnik dostigne temperaturu blisku temperaturi merene sredine i**
  - 2. da sam termoprijemnik što manje remeti temperatursko polje te sredine.**
- ▶ Osnovne greške kontaktnih metoda merenja stacionarnih temperatura, osim čisto instrumentalnih, nastaju zbog:
  - ▶ Razmene toplote zračenjem između termoprijemnika i okolnih tela
  - ▶ Provođenja toplote delovima termoprijemnika
  - ▶ Dopunskog zagrevanja termoprijemnika, usled trenja fluida.

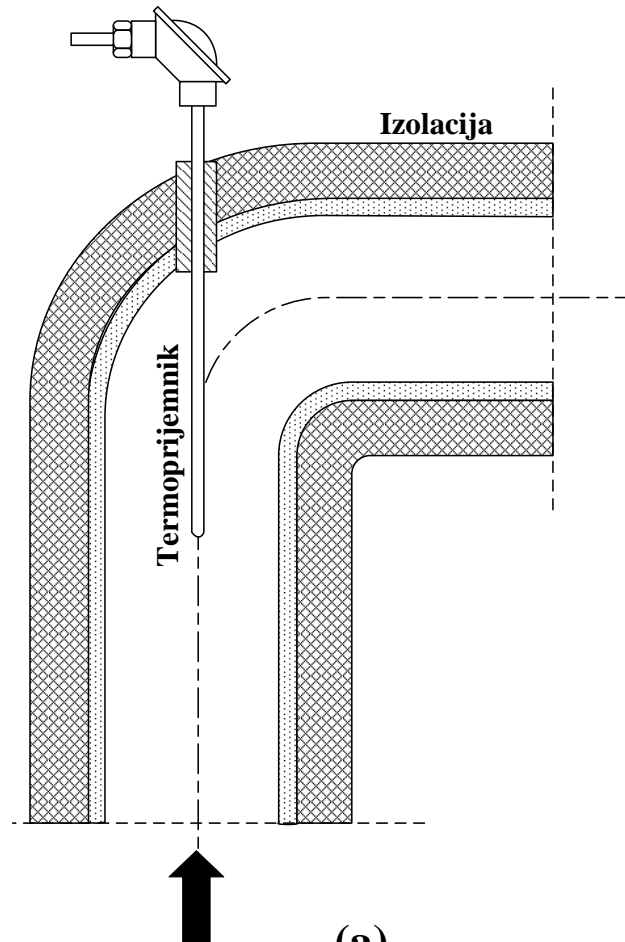
# Greške usled razmene toplote zračenjem

Pri merenju temperatura gasnih sredina u velikom broju slučajeva nastaje greška zbog razmene toplote zračenjem između termoprijemnika i okolnih tela.

*Pod termoprijemnikom podrazumevamo osetljivi element termometra, koji se nalazi u kontaktu sa merenom sredinom.*

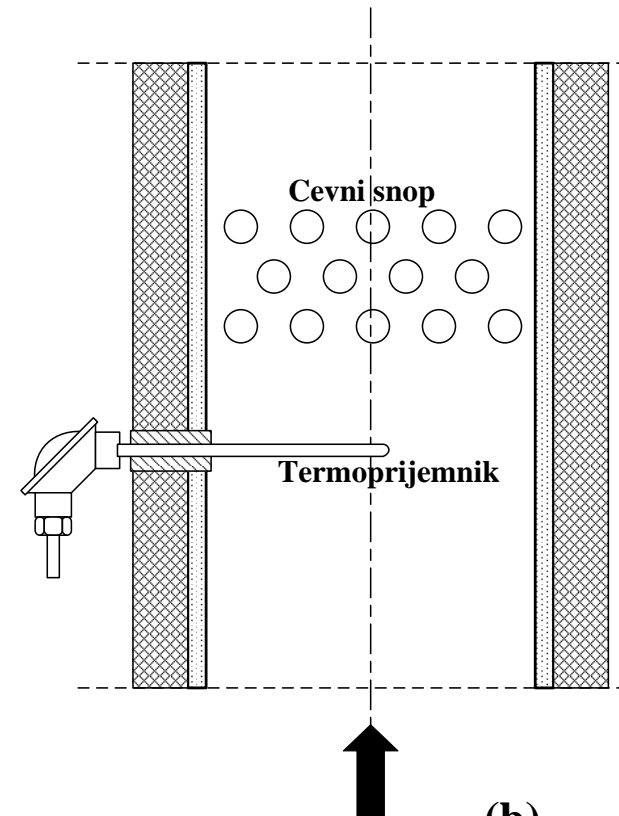
Pretpostavimo da je termoprijemnik konstantne temperature ( $\theta$ ) postavljen u kanal i koristi se za merenje temperature gasnog toka ( $t$ ).

Temperatura zidova kanala različita je od temperature gasa i označena je sa  $T_z$



(a)

*Varijante postavljanja termoprijemnika u gasni kanal*



(b)

# Greške usled razmene toplote zračenjem

Zanemaruje se toplotni protok kroz telo termoprijemnika.

## KONVEKTIVNI TOPLOTNI PROTOK JE:

$$Q_k = \alpha_k \cdot S \cdot (t - \theta)$$

Gde je:

$\alpha_k$  = Koeficijent prelaza toplote između termoprijemnika i gasa, W/(m<sup>2</sup>K),

S = Površina termoprijemnika, koja učestvuje u razmeni toplote sa gasom, m<sup>2</sup>,

$\theta$  = Srednja temperatura termoprijemnika, °C,

t = temperature gasnog toka ili mirnog gasa, °C.

## TOPLOTNI PROTOK ZRAČENJA JE:

$$Q_z = C_o \cdot \varepsilon_r \cdot S \left[ \left( \frac{\theta}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 \right]$$

Gde je:

$C_o$  = Stefan-Bolcmanova konstanta,  $C_o = 5,67$  W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>),

$\varepsilon_r$  = Redukovani koeficijent emisije između termoprijemnika i okolnih tela,

$\theta$  i  $T_z$  = Temperature termoprijemnika i zida kanala, K.

# Greške usled razmene toplote zračenjem

U momentu toplotne ravnoteže je:

$$\alpha_k \cdot S \cdot (t - \theta) = C_o \cdot \varepsilon_r \cdot S \cdot \left[ \left( \frac{\theta}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 \right]$$

**GREŠKA MERENJA TEMPERATURE GASA**, koja se javlja kao posledica uticaja zračenja jednaka je:

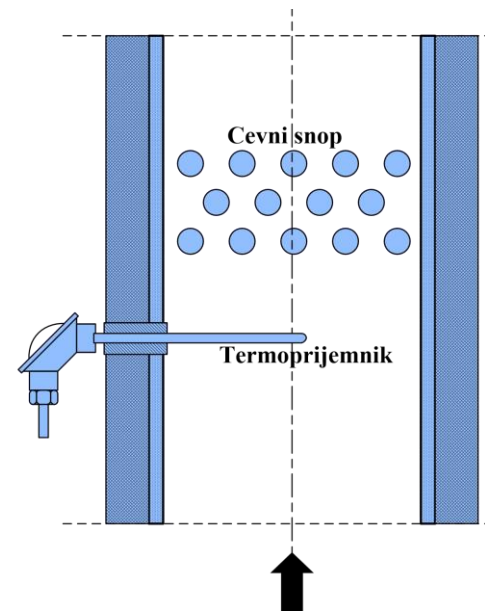
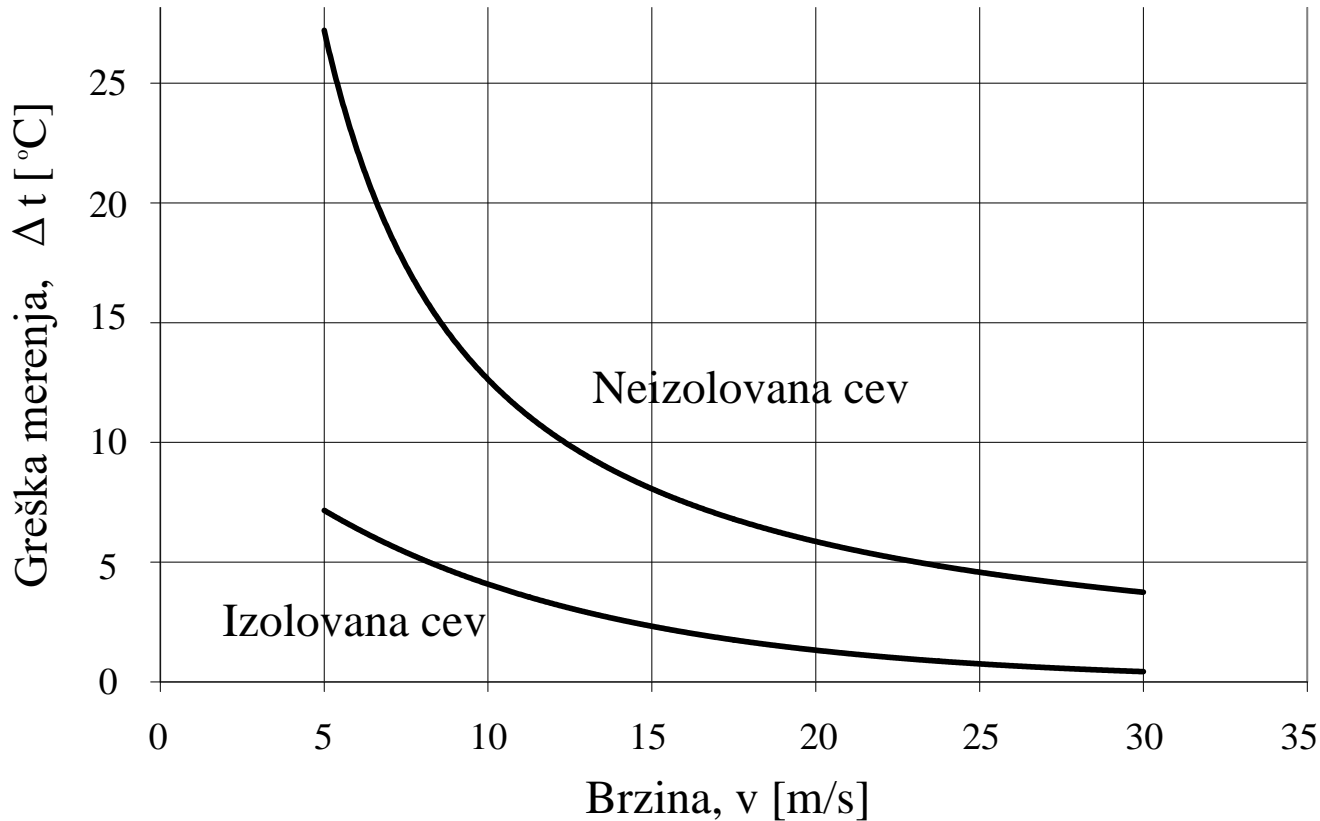
$$\Delta t = \theta - t = - \frac{C_o \cdot \varepsilon_r}{\alpha_k} \left[ \left( \frac{\theta}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 \right]$$

Iz jednačine sledi da je za smanjenje greške merenja nastale usled zračenja termoprijemnika na okolna čvrsta tela ili obrnuto, neophodno:

- Smanjiti koliko je to moguće koeficijent emisije termoprijemnika.** U tom smislu je potrebno zaštitnu čauru termoprijemnika izraditi sa glatkim i sjajnim površinama (*zaprljanjem termoprijemnika efekti ovih mera se gube*).
- Povećati koeficijent prelaza toplote  $\alpha_k$ .** U nizu slučajeva to je moguće postići postavljanjem termoprijemnika na mestima cevovoda ili kanala, gde su lokalne brzine veće (npr. suženja).
- Povećati temperaturu zida** (u slučaju  $\theta > T_z$ ), što se postiže izolovanjem cevovoda ili kanala.

# Greške usled razmene toplote zračenjem

Kvantitativno dejstvo ovih mera



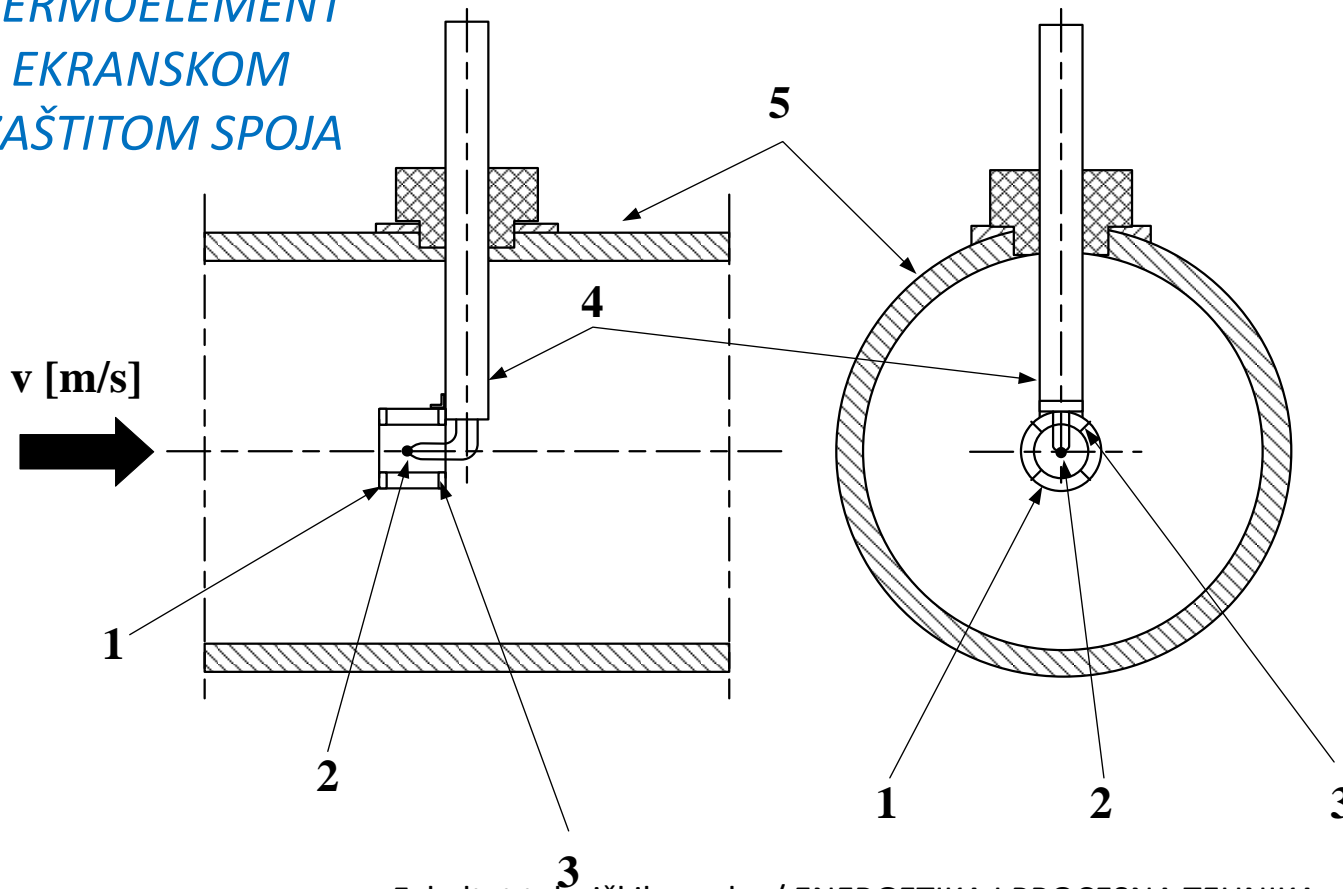
Međutim, u mnogim slučajevima te mere nisu dovoljne ili ne mogu biti realizovane. *Na primer (slika desno), ako je potrebno izmeriti temperaturu gasa u blizini cevnog snopa značajna greška će se pojaviti zbog toplotnog zračenja između termoprijemnika i znatno hladnijih površina cevi.*

# Greške usled razmene toplote zračenjem

Ova greška merenja temperature može da se smanji postavljanjem ekrana oko termoprijemnika ili samo oko njegovog osetljivog dela.

Ugradnjom ekrana oko osetljivog dela termoprijemnika **temperatura ekrana je znatno viša od temperature zida cevovoda (kanala)  $\rightarrow \Delta t \downarrow$ .**

TERMOELEMENT  
S EKRANSKOM  
ZAŠTITOM SPOJA



- 1 - dvostruki ekran od čeličnog lima;
- 2 - termoelement;
- 3 - držač spoljnjeg ekrana;
- 4 - zaštitna čaura termoelementa;
- 5 - cevovod

# Greške usled razmene toplote zračenjem

## TERMOELEMENT S EKRANSKOM ZAŠTITOM SPOJA

Ako se površine ekrana koje učestvuju u razmeni toplote konvekcijom i zračenjem označe sa  $S_k$  i  $S_z$ , jednačina toplotnog bilansa glasi:

$$2 \cdot \alpha_k \cdot S_k \cdot (t - t_e) = C_o \cdot \varepsilon_r \cdot S_z \cdot \left[ \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 \right]$$

Ako je  $S_k = S_z$  dobija se da je:

$$2 \cdot \alpha_k \cdot (t - t_e) = C_o \cdot \varepsilon_r \cdot \left[ \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 \right]$$

**Greška merenja temperature je:**

$$\Delta t = \theta - t = - \frac{C_o \cdot \varepsilon_{re}}{2 \cdot \alpha_k} \left[ \left( \frac{\theta}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 \right]$$

*Ovde je  $\varepsilon_{re}$  redukovani koeficijent emisije između termoprijemnika i ekrana.*

Ekrane treba tako izraditi i postaviti da što manje remete konvektivnu razmenu toplote. U protivnom može da nastane dopunska greška, koja ne može dovoljno pouzdano ni da se proceni.



# Greške usled razmene toplote zračenjem

---

## USLOVI PRIMENE EKCRANISANJA

Prema propisima o ispitivanju kotlova dozvoljeno je merenje temperature gasova u blizini hladnih površina sa neekranskim termometrima ako je:

- (a) brzina gasa veća od 5 m/s i  $t \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$  i
- (b) brzina gasa veća od 10 m/s i  $t \leq 300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

U ostalim slučajevima neophodno je ekranisanje.

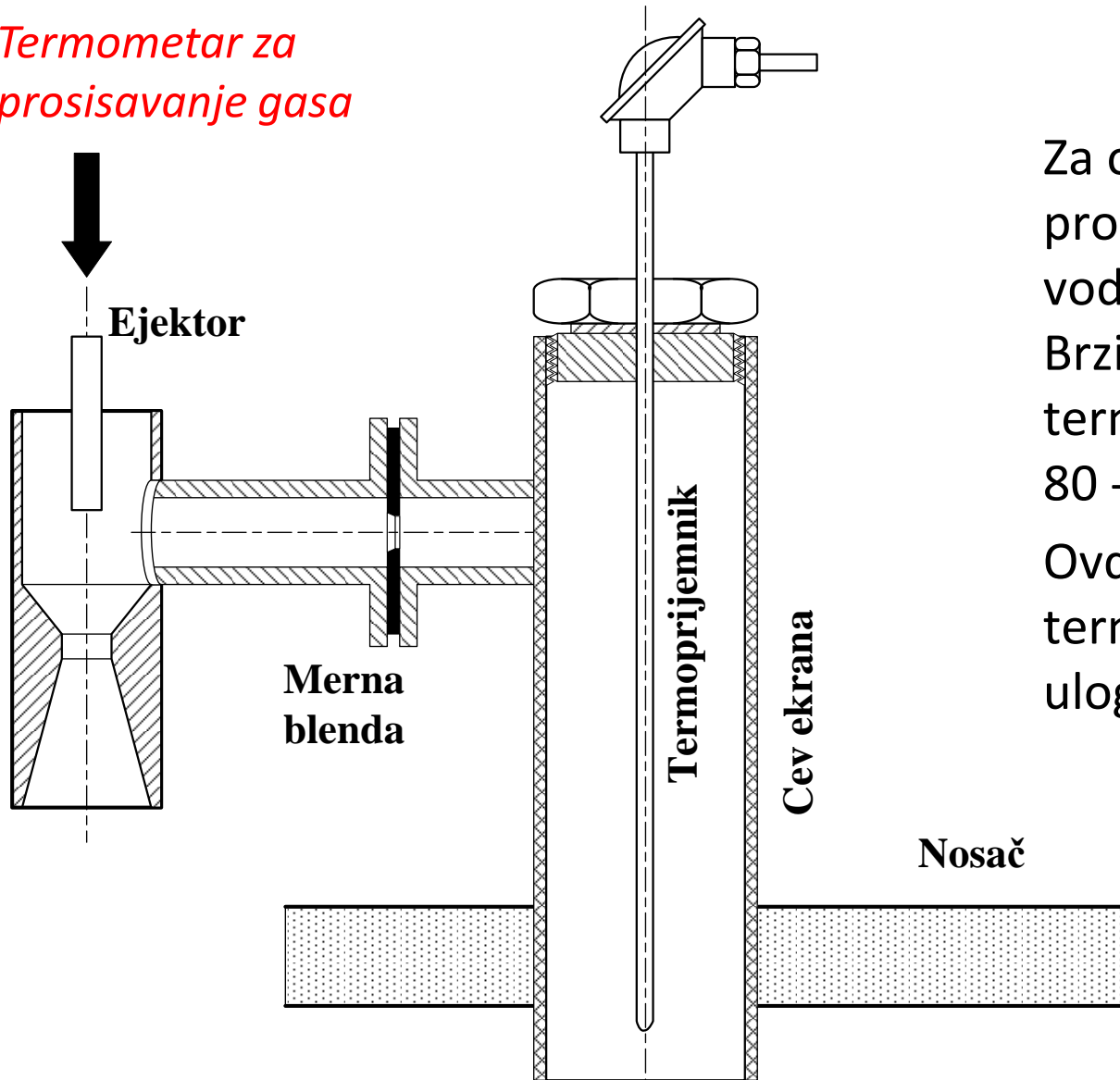
Ponekad je ekranisanje povezano sa velikim teškoćama, a ponekad i nedovoljno efikasno.

- ▶ Tada se greška nastala usled toplotnog zračenja smanjuje naglim povećanjem koeficijenta prelaza toplote  $\alpha_k$ , putem prosisavanja gasa velikom brzinom pored termoprijemnika.

U tu svrhu koriste se TERMOMETRI SA PROSISAVANJEM GASA

# Greške usled razmene toplote zračenjem

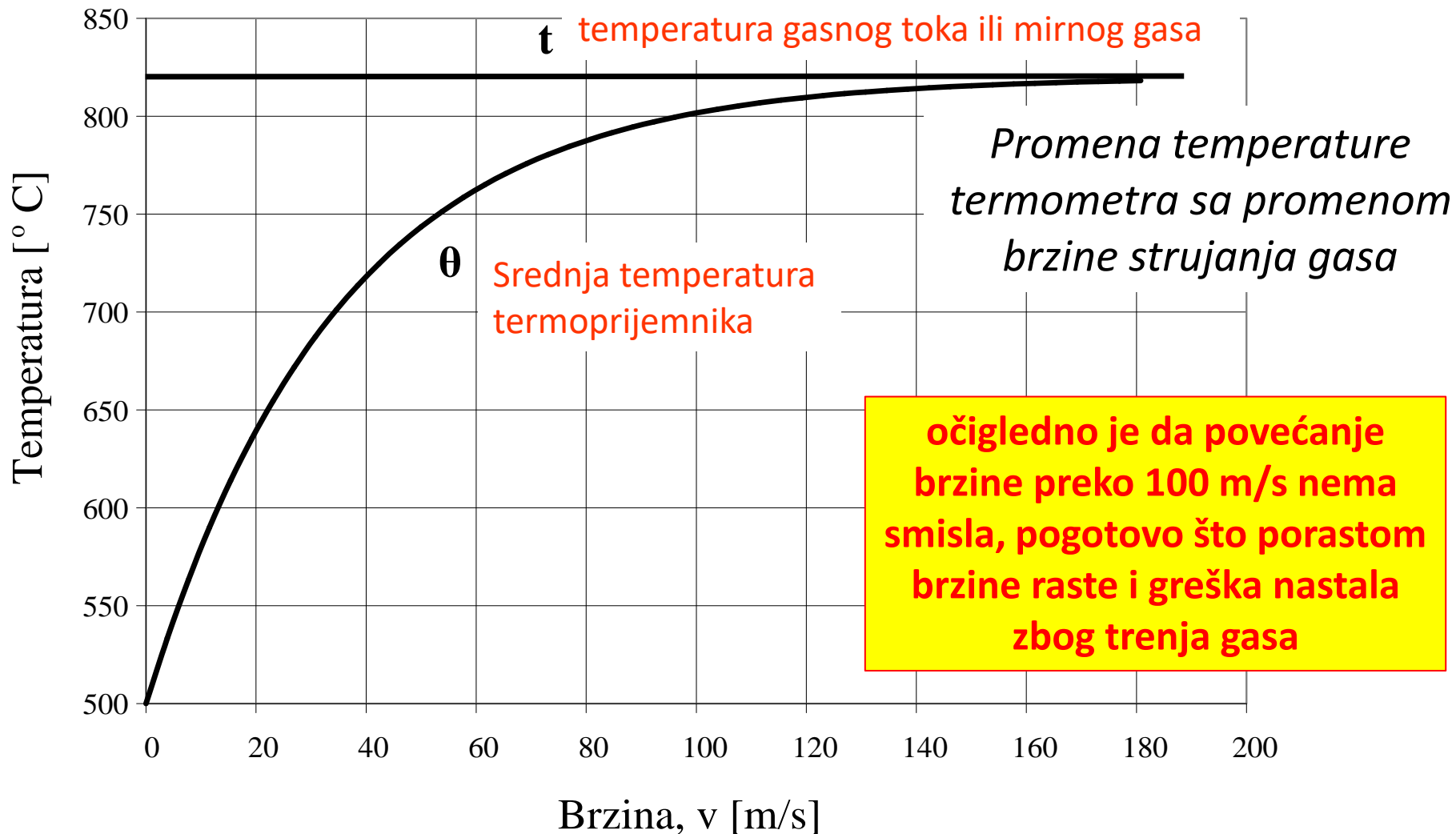
*Termometar za  
prosisavanje gasa*



Za ostvarivanje  
prosisavanja koriste se  
vodeni ili parni ejektor.  
Brzina kretanja gasa pored  
termoprijemnika dostiže  
80 - 100 m/s.

Ovde zaštitna čaura  
termoprijemnika ima  
ulogu ekrana.

# Greške usled razmene toplote zračenjem

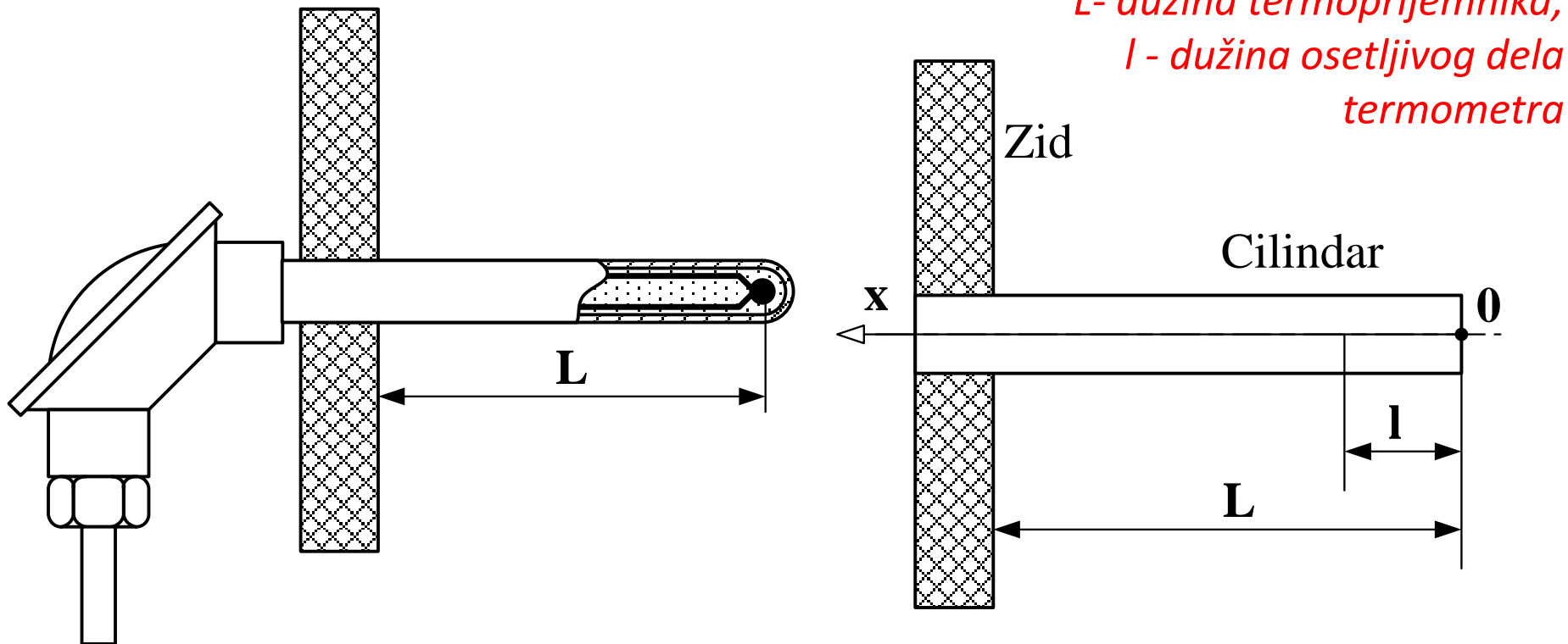


Primena termometra sa prosisavanjem gasa daje dobre rezultate, ali su oni složeni i brzo se prljaju, pa se koriste samo u specijalnim slučajevima.

# Greške nastale provođenjem toplote

Termoprijemnik se najčešće postavlja u zid cevovoda čije se temperature obično razlikuju od temperature merene sredine. **Usled toga dolazi do provođenja toplote telom termoprijemnika.**

Ukoliko se uzme da je temperatura osetljivog elementa termometra (čaure)  $\theta_r$ , to će se ona razlikovati od stvarne temperature sredine  $t$ .



# Greške nastale provođenjem toplote

## PRETPOSTAVKE:

- ▶ Uticaj provođenja toplote na grešku merenja temperature obično se određuje uz pretpostavku da je termoprijemnik homogeni cilindar dužine  $L$ , čiji je jedan kraj učvršćen u zid i ima temperaturu  $t_z$ .
- ▶ Dalje, pretpostavimo da su u svim poprečnim presecima termoprijemnika temperature ravnomerne, tj. da se temperatura termoprijemnika  $\theta_x$  menja samo duž x-ose (jednodimenzionalno provođenje)

Jednačina provođenja toplote idealizovanog termoprijemnika (*tanak štap*) može da se zapiše u sledećem obliku:

$$\frac{d^2\theta(x)}{dx^2} - b^2[\theta(x) - t] = 0 \quad \text{gde je: } b = \sqrt{O\alpha / \lambda S}$$

Pri tome je:

$\alpha$  = koeficijent prelaza toplote (između termometra i sredine)

$O$  i  $S$  = obim i površina preseka cilindra

$\lambda$  = termička provodnost termoprijemnika

# Greške nastale provođenjem toplote

- ▶ Toplotni protok na čelu termoprijemnika ( $x = 0$ ) može da se zanemari u poređenju s ukupnim toplotnim protokom, tj.

$$\left. \frac{d\theta(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

Rešenje diferencijalne jednačine, uz uvažavanje graničnih uslova, je:

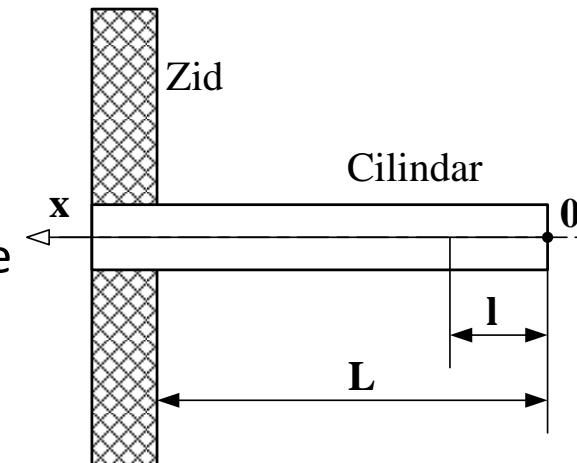
$$\frac{t - \theta(x)}{t - t_z} = \frac{\text{ch}(bx)}{\text{ch}(bL)}$$

**Greška merenja temperature**, ako je osetljivi element na kraju termoprijemnika (a „r“ je koordinata kugle termoprijemnika), jednaka je:

$$\Delta t = \theta_r - t = - \frac{t - t_z}{\text{ch}(bL)}$$

Ako osetljivi element zauzima neku dužinu  $l$ , tada se njegova **srednja temperatura**  $\theta_t$  određuje iz jednačine

$$\frac{t - \theta_t}{t - t_z} = \frac{1}{\text{ch}(bL)} \frac{\text{sh}(L\delta)}{bL\delta} \quad \text{gde je} \quad \delta = l / L$$



# Greške nastale provođenjem toplote

► Iz jednačine

$$\Delta t = \theta_r - t = -\frac{t - t_z}{\text{ch}(bL)}$$

je očigledno da greška zavisi od **dužine L uranjanja termometra**.  
Znatan uticaj ima i **temperatura zida  $t_z$**

Da bi se povećala ova temperatura i smanjila greška,

1. **neophodno je izolovati zid**
2. **a dužina L uranjanja termometra treba da bude veća**

► Konačno, greška se smanjuje i sa povećanjem parametra **b**,

$$b = \sqrt{O\alpha / \lambda S}$$

pa treba birati geometrijske karakteristike čaure tako da

- **odnos O/S bude što veći**,
- **a materijal čaure sa što manjom termičkom provodnošću  $\lambda$** .

# Greške nastale usled dopunskog zagrevanja termoprijemnika

---

- ▶ Pri merenju temperatura gasnih tokova **velikih brzina** javljaju se novi izvori grešaka, prouzrokovani dopunskim zagrevanjem gasa, usled trenja (pri kočenju gasa) u oblasti termoprijemnika.

**U tom procesu se kinetička energija pretvara u toplotnu, a entalpija i temperatura rastu.**

Ako se gas potpuno zakoči, a pri tome se toplota ne odvodi (adijabatski proces), to porast njegove temperature može da se odredi iz zakona o održanju energije

$$\frac{1}{2} m \cdot u^2 = m \cdot c_p (T_t - T_s)$$

Ovde su:

$c_p$  = Specifična toplota gasa pri konstantnom pritisku, [kJ/(kg K)];

$u$  = Brzina strujanja gasa, [m/s];

$T_s$  = Temperatura gasa u udaljenoj tački, [K];

$T_t$  = Temperatura gasa pri potpunom ili adijabatskom kočenju (totalna temperatura), [K].



# Greške nastale usled dopunskog zagrevanja termoprijemnika

► Iz prethodne jednačine sledi da je: 
$$T_t - T_s = \frac{u^2}{2 \cdot c_p}$$

U slučaju strujanja suvog vazduha, pri  $T = 473 \text{ K}$ ,  $c_p \sim 1000 \text{ J/kgK}$  i pri atmosferskom pritisku je:

u	m/s	10	50	100	150	200	300
$T_t - T_s$	K	0.05	1.25	5.00	11.25	20.0	45.00

Kao što se iz ovih vrednosti vidi, počevši od  $u = 50 \text{ m/s}$  razlika  $T_t - T_s$  naglo raste

- Na taj način svako telo (u našem slučaju termoprijemnik), postavljeno u gasni tok sa velikom brzinom, imaće temperaturu **T** koja je viša od temperature gasa **T<sub>s</sub>** na udaljenju od tela.

**Izdvojena toplotna energija u graničnom sloju** se odvodi provođenjem kroz čvrste elemente termoprovodnika i iskazuje korektivnim faktorom **r**:

$$r = \frac{T - T_s}{T_t - T_s} = \frac{T - T_s}{\frac{u^2}{2c_p}}$$

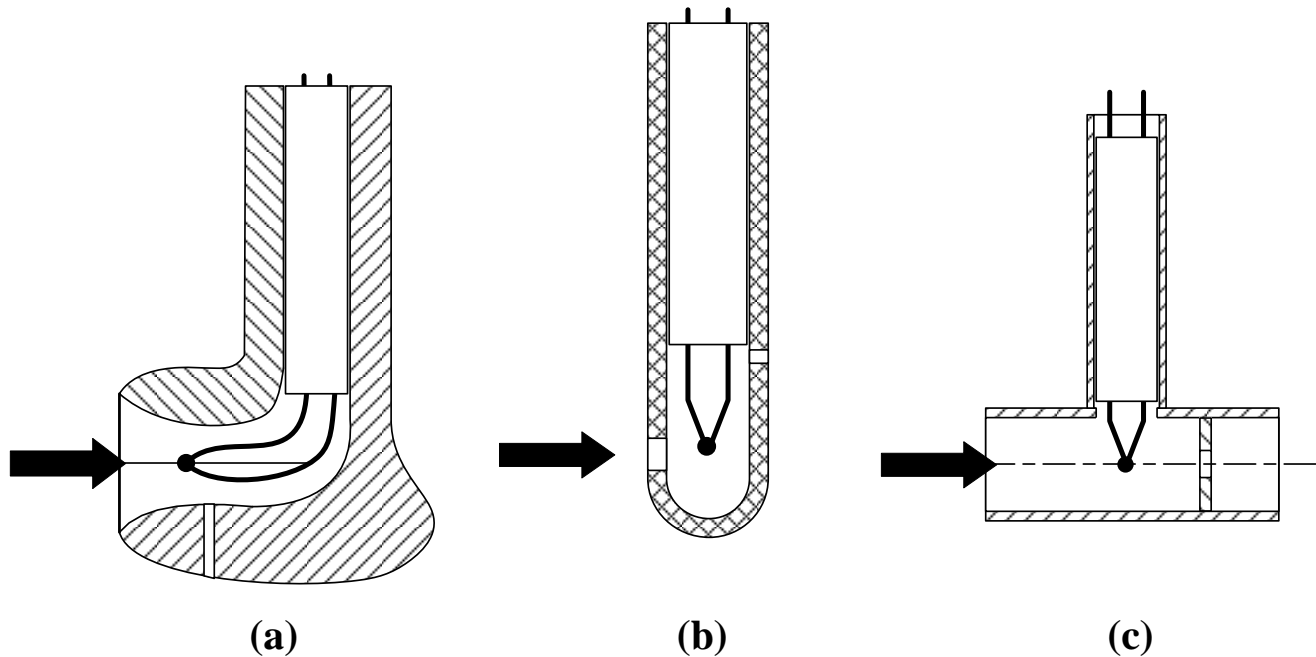
- pa je temperatura na površini termoprijemnika jednaka:

$$T = T_s + r \frac{u^2}{2c_p}$$

Korekcionni faktor **r** određuje se ekperimentalno.

# Greške nastale usled dopunskog zagrevanja termoprijemnika

Izgled termoprijemnika za merenje temperatura gasnih tokova velikih brzina.



*Različite konstrukcije  
termometara za  
merenje  
temperatura gasnih  
tokova velikih brzina*

$$T = T_s + r \frac{u^2}{2c_p}$$

Različite vrednosti korekcionog faktora  $r$  dobijaju se izborom ulaznog i izlaznog otvora, tako da se gas ne ohladi pri prolazu pored termoprijemnika.

Za ogoljenu žicu kružnog preseka pri poprečnom strujanju vazduha  $r \approx 0,65$ , a za podužno strujanje je  $r \approx 0,85-0,87$ . Za pločice postavljane u pravcu vazdušne struje je  $r \approx 0,85-0,87$ , za kuglicu  $r \approx 0,75$ , a na mestu pričvršćivanja elektroda je  $r \approx 0,72-0,83$ .

# Postupci za smanjenje grešaka pri merenju temperatura unutar tela i na njihovim površinama

---

Za merenje temperatura površina tela oko kojih je vazduh ili neki drugi gas ili tečnost, treba imati u vidu da temperatura sredine u blizini same površine znatno odstupa od temperature površine tela.

Tada pri merenju temperatura čvrstih tela kontaktnim metodama mogu da nastanu znatne greške zbog:

1. **Narušavanja stvarnog temperaturskog polja tela, a kao posledica provođenja toplote termoprijemnikom i**
2. **Nedovoljnog kontakta termoprijemnika sa površinom koja se meri.**

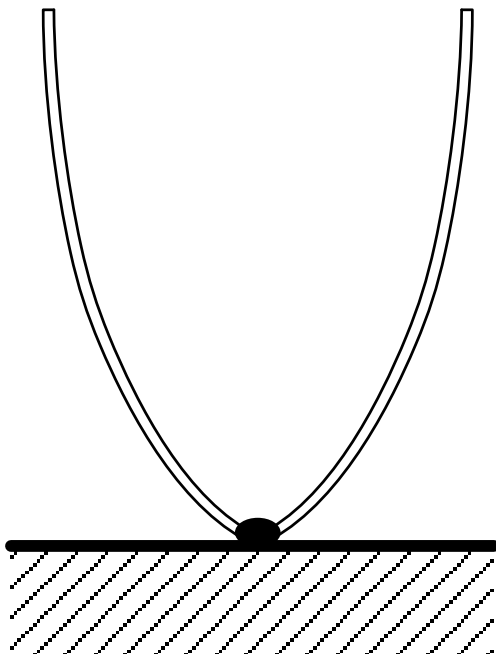
Zbog toga je prvi uslov tačnog merenja obezbeđivanje **DOBROG KONTAKTA** termoprijemnika sa površinom.

Kada je u pitanju merenje temperatura metalnih površina, kraj termoprijemnika se obično **zakiva ili zavaruje.**

# Postupci za smanjenje grešaka pri merenju temperatura unutar tela i na njihovim površinama

To je naročito važno ako je površina od materijala sa malom temperaturnom provodnošću.

Primeri pravilnog i nepravilnog merenja temperatura površina čvrstog tela



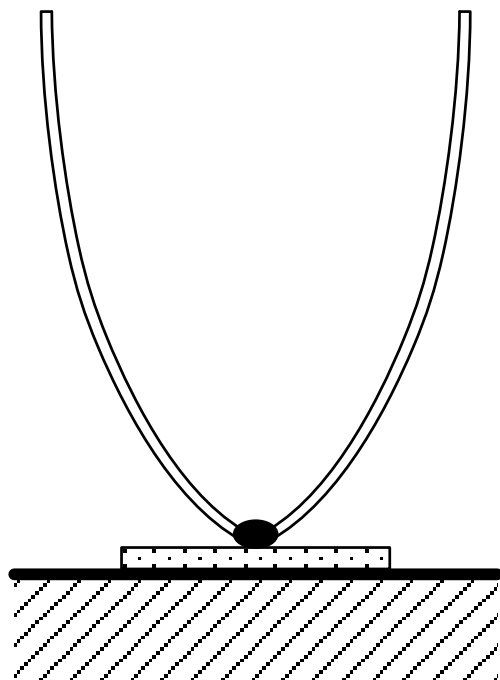
(a)

Provodnici su zavareni i postavljeni normalno na površinu. Provođenje toplote provodnicima izmieniće temperaturno polje na mestu merenja u odnosu na slučaj kada termoprijemnik nije postavljen.

# Postupci za smanjenje grešaka pri merenju temperatura unutar tela i na njihovim površinama

Ako je površina od materijala sa **malom temperaturnom provodnošću.**

Primeri pravilnog i nepravilnog merenja temperatura površina čvrstog tela



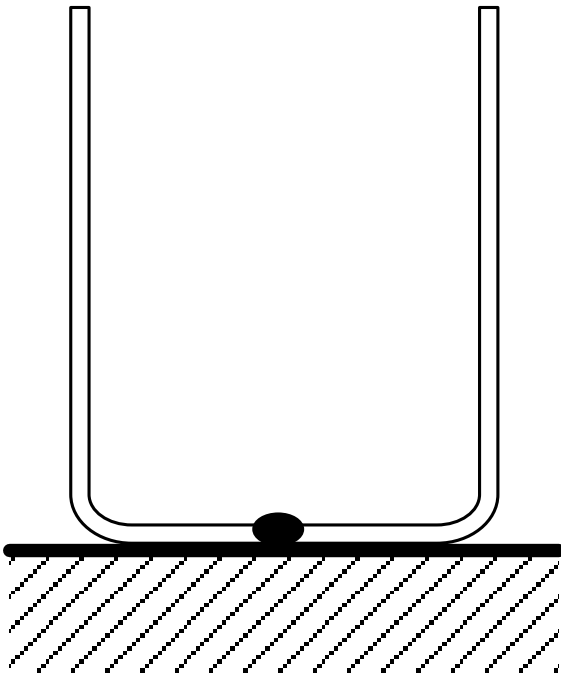
(b)

Provodnici su privareni za tanku pločicu (debljine 1 - 2 mm), izrađenu od materijala sa visokom vrednošću toplotne provodljivosti (srebro, bakar itd.) i dobro pričvršćenu za površinu. Time je dovod toplote pločice znatno bolji od odvoda termožicama, pa je deformacija temperaturnog polja znatno manja u odnosu na prethodni slučaj.

# Postupci za smanjenje grešaka pri merenju temperatura unutar tela i na njihovim površinama

Ako je površina od materijala sa **malom temperaturnom provodnošću.**

Primeri pravilnog i nepravilnog merenja temperatura površina čvrstog tela



(c)

Provodnici su postavljeni duž površine. Time je smanjeno provođenje toplote provodnicima.

Ova poslednje prikazana varijanta se najčešće sreće u praksi.

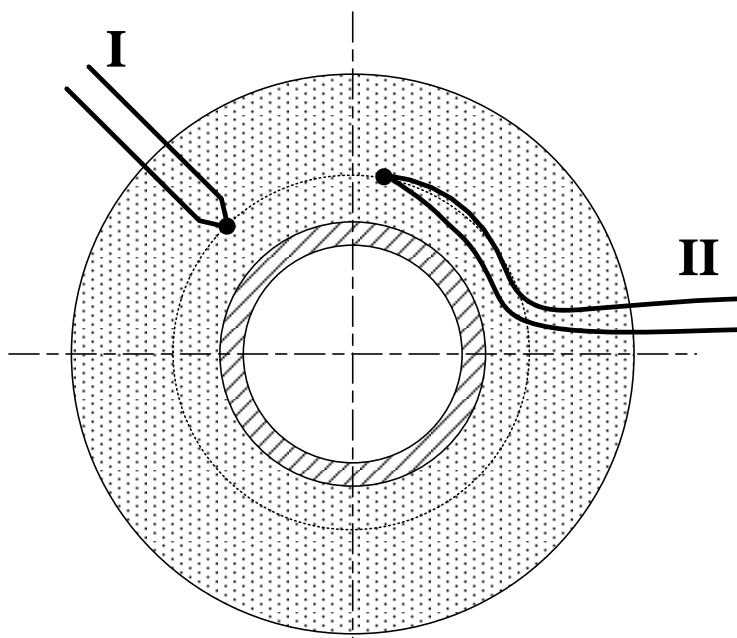
# Postupci za smanjenje grešaka pri merenju temperatura unutar tela i na njihovim površinama

---

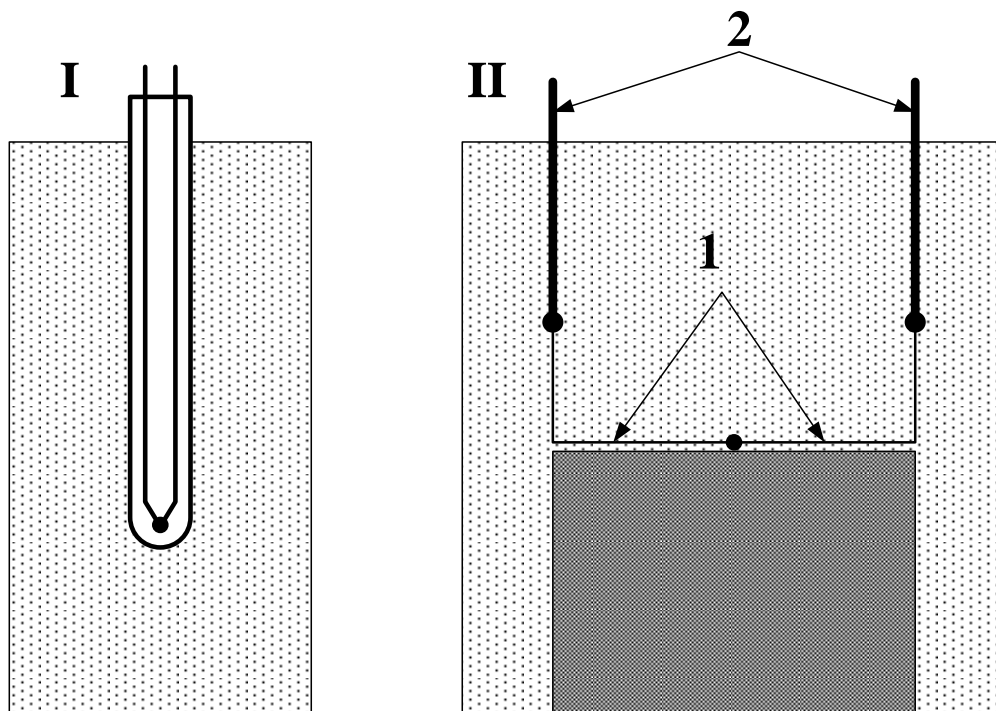
- Ako je zapremina materijala velika i pri tome je temperatursko polje ravnomerno, to merenje temperatura u telu ne predstavlja veći problem.
- Ako je telo male zapremine, a gradijent temperature veliki, merenje temperature u telu se suštinski usložnjava.
- Ako je materijal čija se temperatura meri dobar toplotni provodnik, termožice moraju da se izoluju (lakom ili na drugi način) ili postavu u izolacione cevčice.

# Postupci za smanjenje grešaka pri merenju temperatura unutar tela i na njihovim površinama

Primeri merenja temperatura unutrašnjeg sloja izolacije parovoda i šamotne obloge peći (materijali sa malom temperaturnom provodnošću)



a - merenje temperature unutar izolacije (I – nepravilno; II- pravilno)



b – merenje temperature unutrašnjeg sloja šamotne obloge peći (I – nepravilno; II-pravilno; 1-termožice; 2-kompenzacioni vodovi)



# Toplotna inercija termometra kao mogući izvor grešaka

---

Korišćenje kontaktnih metoda za merenje nestacionarnih temperatura zahteva poznavanje **TOPLOTNE INERCIJE TERMOMETRA**.

► **Inercija mora da se uzima u obzir i pri kratkovremenim merenjima stacionarnih temperatura, kada nije moguće da se uspostavi toplotna ravnoteža između termoprijemnika i merene sredine.**

## DEFINICIJA

Pod **toplotnom inercijom** nekog tela ili sistema podrazumeva se svojstvo istog da promeni temperaturu pod dejstvom promene temperature okoline.

Toplotna inercija je svojstvo svih fizičkih tela, što znači da nije moguće izraditi bezinercijalni kontaktni termometar.

- Teorijsko razmatranje promene temperature tela, uzrokovane promenom temperature okoline, zasnovano je na rešavanju osnovne jednačine provođenja toplote.

$$\alpha \times A \times \Delta t = - c \times V \times \rho \times dt/d\tau$$

# Toplotna inercija termometra kao mogući izvor grešaka

---

Rešenje jednačine provođenja toplote dobija se u obliku beskonačnog konvergentnog reda.

**Porastom vremena** konvergencija reda se ubrzava i konačno nastupa momenat  $\tau_1$  kada svi članovi reda postaju zanemarljivo mali u odnosu na prvi član.

► To znači da se u vremenskom periodu od  $\tau = 0$  do  $\tau = \tau_1$  promena temperatura termoprijemnika u različitim tačkama odvija po različitim zakonima, zavisno od početnih uslova.

Trenutak  $\tau = \tau_1$  naziva se **MOMENTOM REGULARIZACIJE**, a dalji proces promene temperature tela opisuje se samo prvim članom reda, tj. u svim tačkama termoprijemnika **promena temperature odvija se po eksponencijalnom zakonu.**

Ovaj proces naziva se **REGULARNI REŽIM PRVE VRSTE.**

# Toplotna inercija termometra kao mogući izvor grešaka

Za **REGULARNI REŽIM** važi (rešenje za slučaj skokovite promene temp.):

$$t_s - \theta(r, \tau) = [t_s - \theta(r, \tau_1)] \cdot \exp\left(-\frac{\tau - \tau_1}{T}\right)$$

**Veličina T naziva se konstanta toplotne inercije. Ova konstanta predstavlja vreme potrebno za promenu razlike temperatura između temp. termoprijemnika ( $\theta$ ) i nove temperature sredine ( $t_s$ ).**

Iz ove jednačine dobija se:

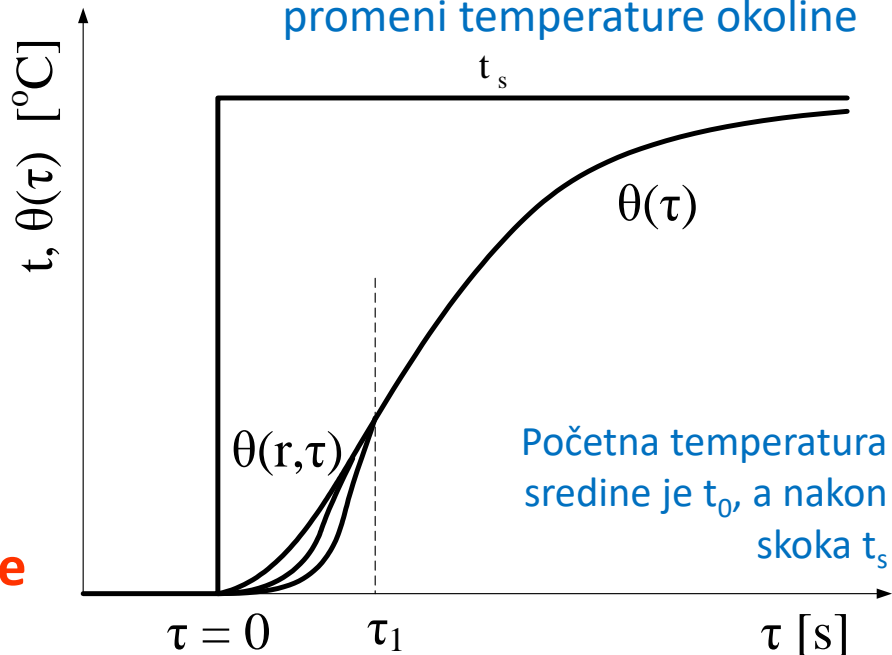
$$T = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\ln[t_s - \theta(\tau_1)] - \ln[t_s - \theta(\tau_2)]} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\ln v_1 - \ln v_2}$$

$$v_1 = t_s - \theta(\tau_1)$$

$$v_2 = t_s - \theta(\tau_2)$$

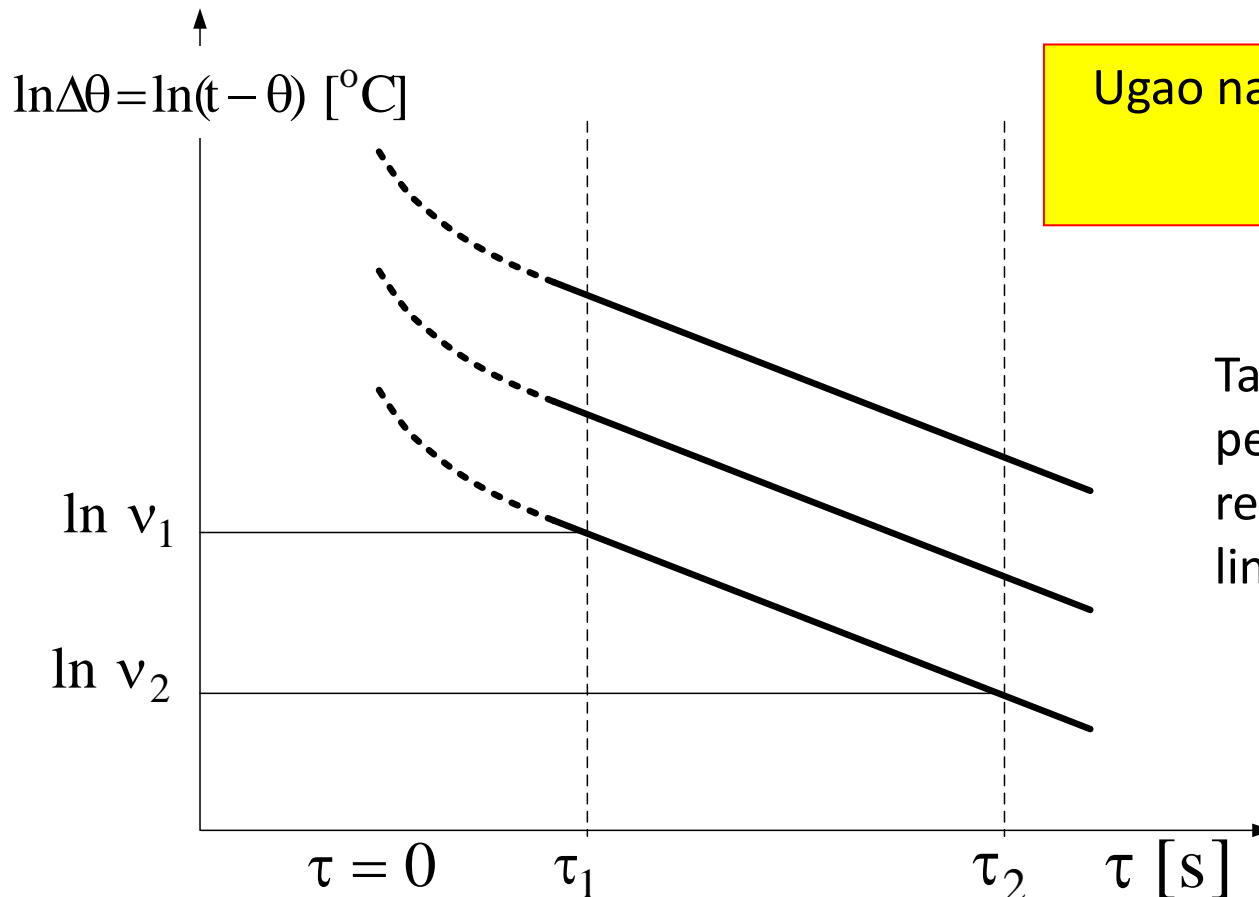
Na taj način, **veličina T** može biti određena na osnovu bilo koje dve temperature u oblasti regularnog toplotnog režima.

Promena temperatura tela pri skokovitoj promeni temperature okoline



# Toplotna inercija termometra kao mogući izvor grešaka

Temperaturna razlika između okolne sredine i tela, *ako su pretpostavke regularnog režima zadovoljene* ( $t_s = \text{const.}$ ,  $\alpha = \text{const.}$ ), je u logaritamskom koordinatnom sistemu predstavljena pravom linijom, **čiji ugaoni koeficijent predstavlja konstantu toplotne inercije T.**



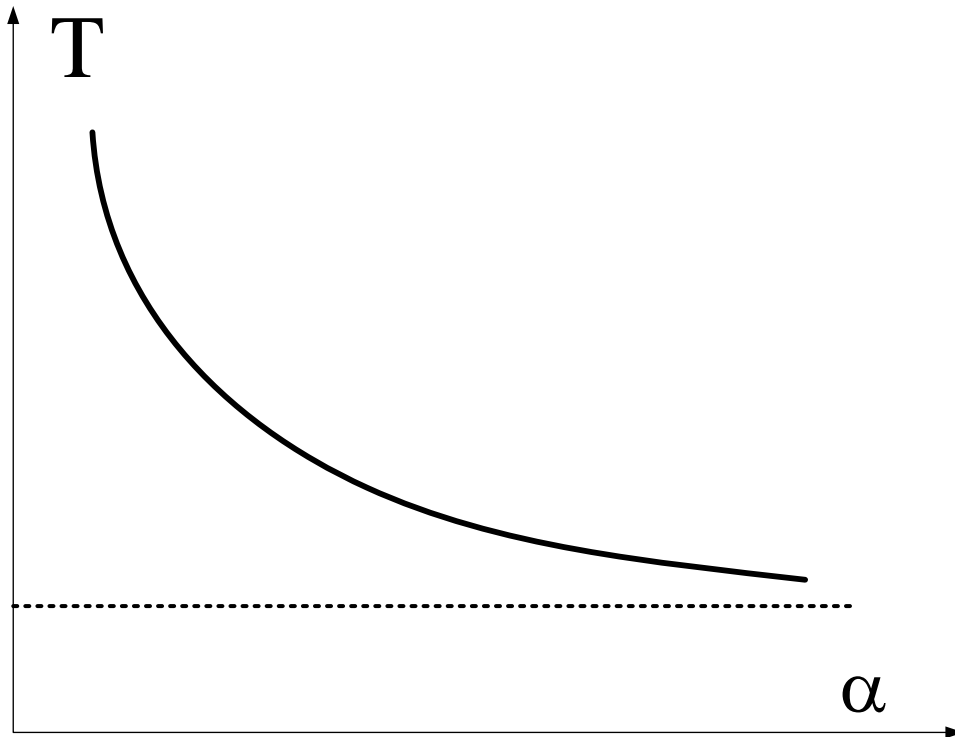
Ugao nagiba veći → inercija manja  
I obrnuto!

Tačke koje se odnose na period pre regularnog režima ne pripadaju pravoj liniji.

# Toplotna inercija termometra kao mogući izvor grešaka

Konstanta toplotne inercije tela  $T$  zavisi od uslova za prelaz toplote na površini tela.

**Porastom koeficijenta prelaza toplote konstanta toplotne inercije se smanjuje**, približavajući se asimptotski ka minimalnoj vrednosti, koja odgovara beskonačnom koeficijentu prelaza toplote na površini tela.



Kriva kojom se definiše zavisnost  $T$  od  $\alpha$  naziva se **karakteristična funkcija**

# Toplotna inercija termometra kao mogući izvor grešaka

---

Konstantom  $T$  može da se izračuna **vreme  $\Delta\tau$** , za koje termoprijemnik reaguje uz očekivanu grešku merenja, pri prelazu iz sredine sa temperaturom  $t_0$  u sredinu sa temperaturom  $t_s$ , tj.

$$\Delta\tau = \tau - \tau_1 = T \ln \frac{t_s - \theta(\tau_1)}{\Delta t}$$

**VREME USPOSTAVLJANJA  $\Delta\tau$  odgovara regularnom toplotnom režimu, a ne vremenu od početka prelaznog procesa.**

## **NAPOMENA:**

Konstanta toplotne inercije ne odražava u potpunosti toplotnu inerciju termometra, jer ta veličina ne uzima u obzir period pre regularnog režima. Prema tome, konstanta  $T$  nije dovoljna za ocenu inercionih karakteristika termometra u uslovima složenog prelaza toplote.

# MERENJE TEMPERATURE RADIJACIONIM METODAMA

---

Merenje temperature radijacionim metodama ima značajnih prednosti u odnosu na kontaktne metode.

**Najveća od svih su beskontaktno merenje temperature i mogućnost merenja vrlo visokih temperatura.**

Osim toga telo, čija se temperatura meri, može biti pokretno, što predstavlja posebnu teškoću pri primeni kontaktnih metoda.

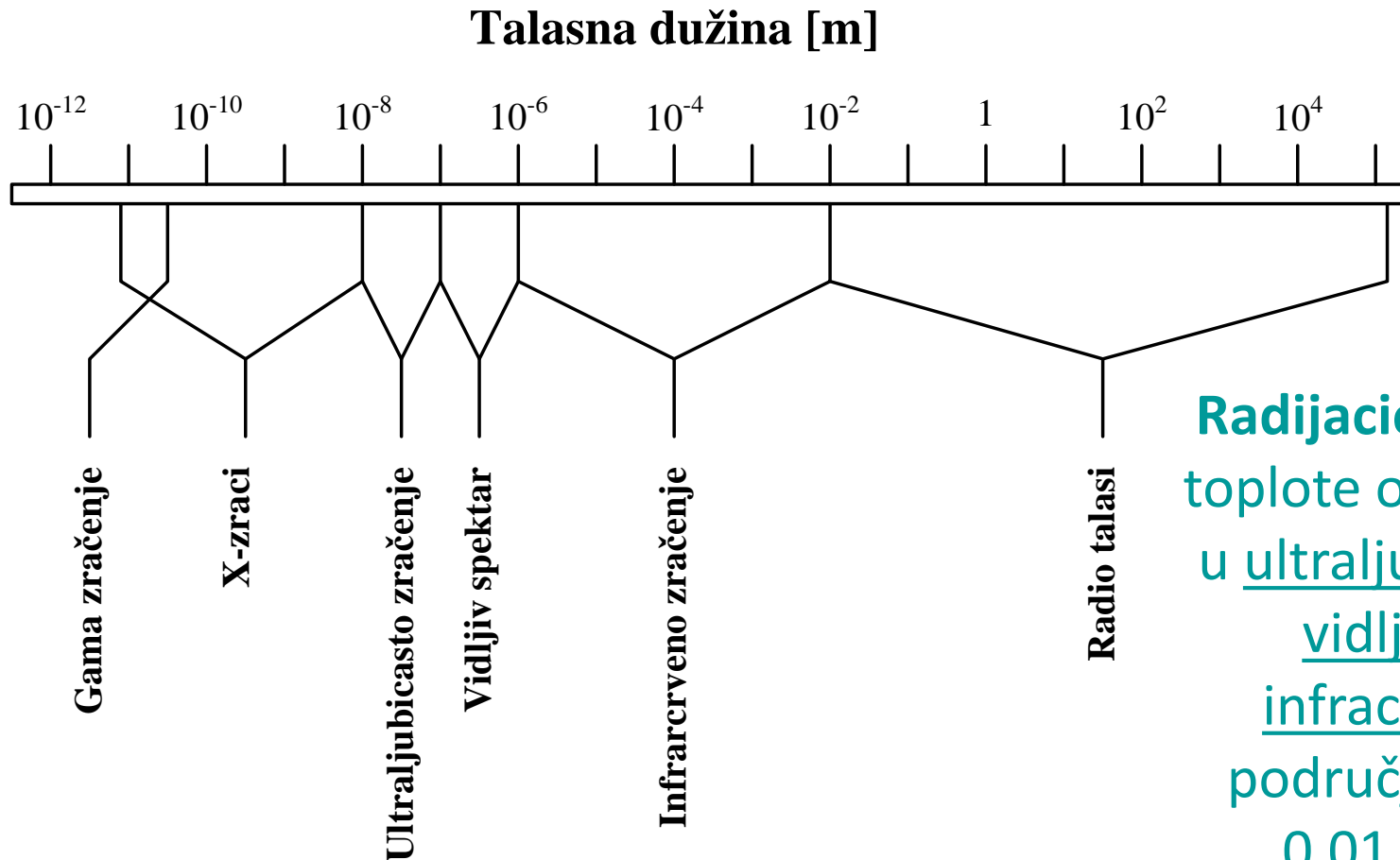
## **OPSEG:**

Uopšteno govoreći, nema gornje granice temperature koja može da se meri radijacionim metodama.

Instrumenti za radijaciono merenje temperature uglavnom se upotrebljavaju za temperature iznad 1063 °C, mada se ove metode sve više koriste i za znatno niže temperature, zbog pomenutih prednosti u odnosu na kontaktne metode merenja temperatura.

# MERENJE TEMPERATURE RADIJACIONIM METODAMA

Energija zračenja se prenosi u obliku elektromagnetskih talasa.



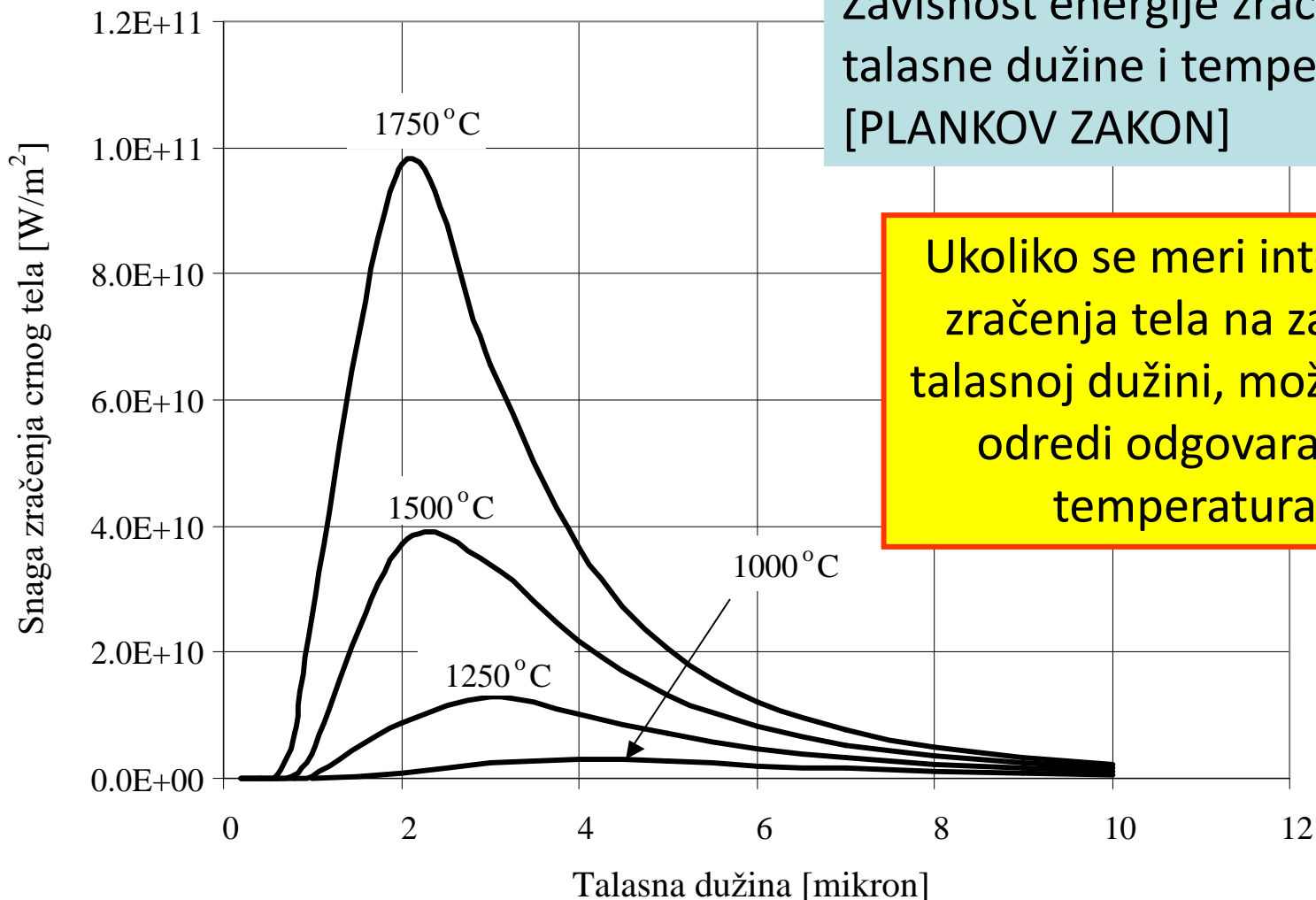
*Infracrveni spektar od 0.7 do 1000 mikrona*

**Radijacioni prenos toplote ostvaruje se u ultraljubičastom, vidljivom i infracrvenom području od oko 0.01 do 100 mikrona.**



# PRINCIPI RADA RADIJACIONIH TERMOMETARA

Merenje **totalne energije zračenja** nekog zagrejanog tela može biti upotrebjeno za merenje temperature.



# PRINCIPI RADA RADIJACIONIH TERMOMETARA

Ukupna radijaciona energija brojčano može da se odredi Štefan-Bolcmanovim zakonom:

$$Q = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

gde je:

Q - radijacioni protok [W]

$\sigma$  - Štefan-Bolcmanova konstanta,  $5.667 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>]

A - površina crnog tela [m<sup>2</sup>] i T - temperatura [K]

Ovim zakonom izražava se razmena energije zračenja dvaju tela:

$$Q = \sigma \cdot A \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

*pri čemu je jedno telo na višoj temperaturi  $T_2$  a drugo na nižoj  $T_1$ .*

U drugom obliku je:

$$Q = k \cdot A \cdot \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right]$$

Gde su:

Q – razmenjena energija zračenja u vremenu, protok [W];

k – radijaciona konstanta 0,172 [W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>]

# a. RADIJACIONI SENZORI

Svrha pogodnih uređaja za radijaciono merenje temperature je pretvaranje primljene radijacione energije crnog tela u merljivu temperaturu.

Za pretvaranje gotovo svi elementi za merenje temp. mogu da se upotrebe!

**Merni spojevi** koji su glatki i crni - obezbeđuju dobro apsorpciono svojstvo.

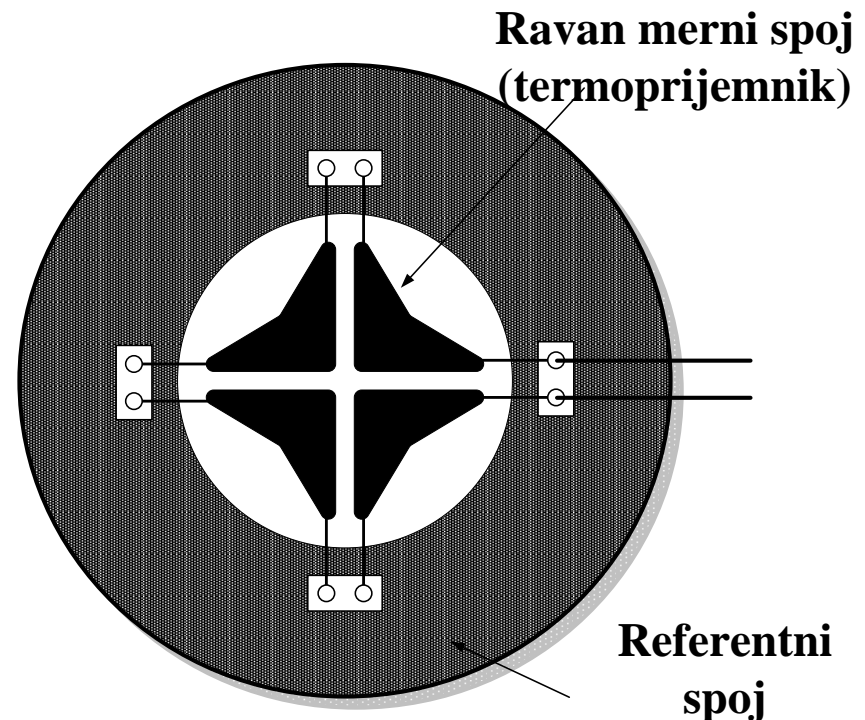
Termogrupa može da ima 8 do 16 ili čak i više takvih mernih spojeva.

**Referentni spoj** termogrupe smešten je na spoljašnjem prstenu.

Radijaciona energija fokusira se u centar termogrupe, a porast temperature mernog spoja zavisi od:

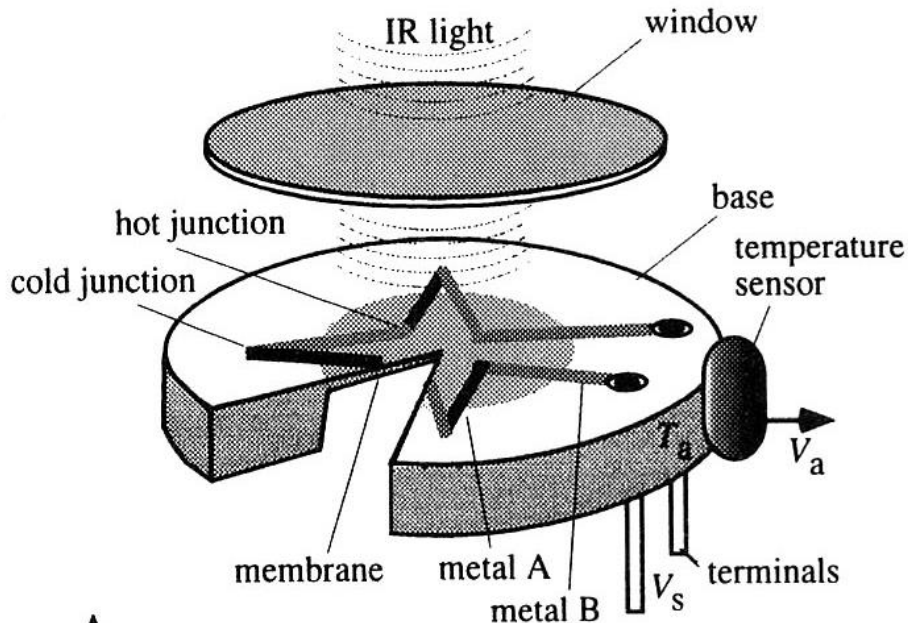
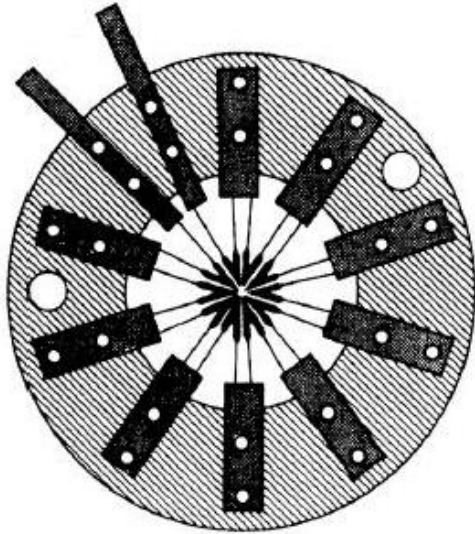
1. Iznosa primljene radijacione energije,
2. Toplotnog gubitka radijacione energije i provođenja toplote termoparskih žica.

**Termogrupa korišćena kao radijacioni prijemnik - VIŠE TERMOPAROVA SPOJENIH REDNO**

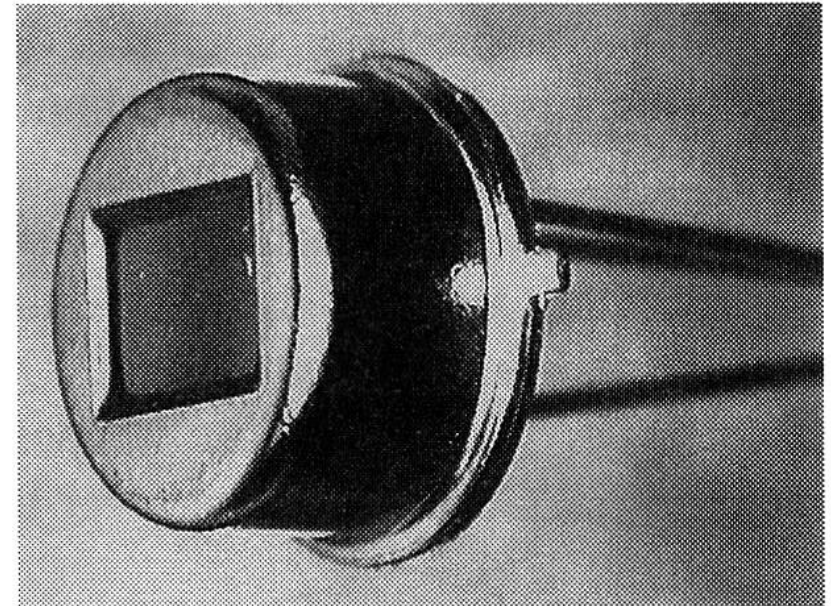


# a. RADIJACIONI SENZORI

Termogrupa korišćena kao radijacioni prijemnik - VIŠE TERMOPAROVA SPOJENIH REDNO



A



B

**FIGURE 13.20.** Thermopile for detecting thermal radiation. A: An equivalent schematic with a reference temperature sensor attached, A and B are different metals; B: sensor in a TO-5 packaging.

# a. RADIJACIONI SENZORI

**Termopar u vakuumu** sastoji se od vakuumirane staklene čaure u kojoj je postavljen termopar

**Merni spoj** termopara nosi termoprijemnik od lisnate zacrnjene platinske pločice i postavljen je u centar staklene čaure.

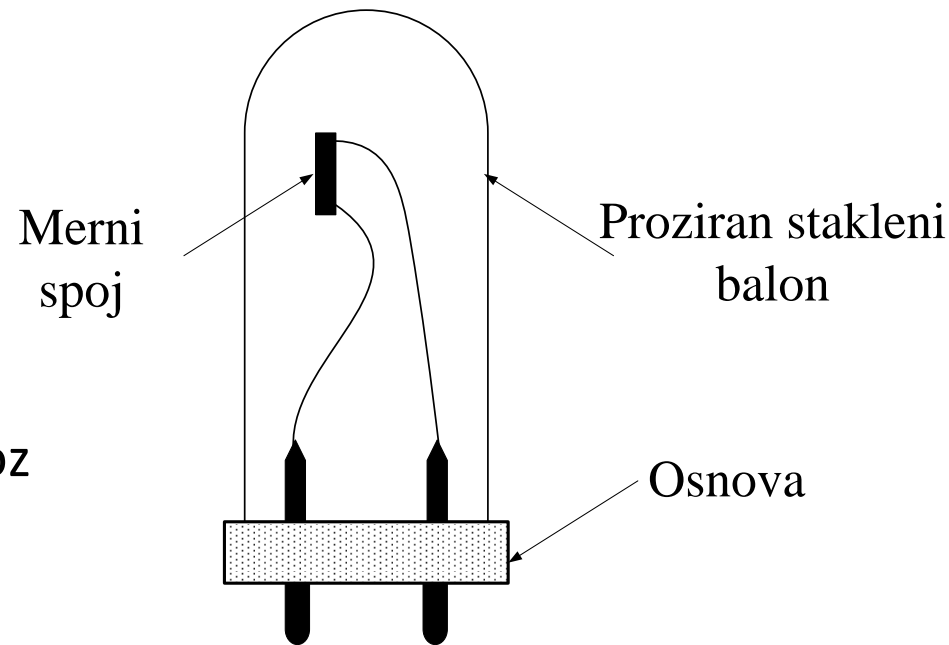
**Referenti spoj** obično je smešten u osnovi jedinice.

Radijaciona energija usmerava se kroz staklenu čauru do zacrnjene pločice, što će izazvati pojavu TEMS.

Gubitak toplote termopara konvekcijom je znatno smanjen upotrebom vakuumirane čaure, a mali prečnici žice termopara smanjuju gubitke usled provođenja.

**Rezultujuća temperatura mernog spoja direktno zavisi od radijacione energije, a ova od temperature tela, čiju temperaturu merimo.**

## Vakuumski termopar



# a. RADIJACIONI SENZORI

**Bolometar** je otporni termometar, izrađen od lima presvučenog niklom debljine oko 0,1 mikrona, oko 10 mm dužine i dovoljne debljine da postigne otpornost od oko 10  $\Omega$ .

Presvlaka od nikla prekrivena je sa zacrtnjenim zlatom ili platinom, radi povećanja apsorpcionog svojstva senzora.

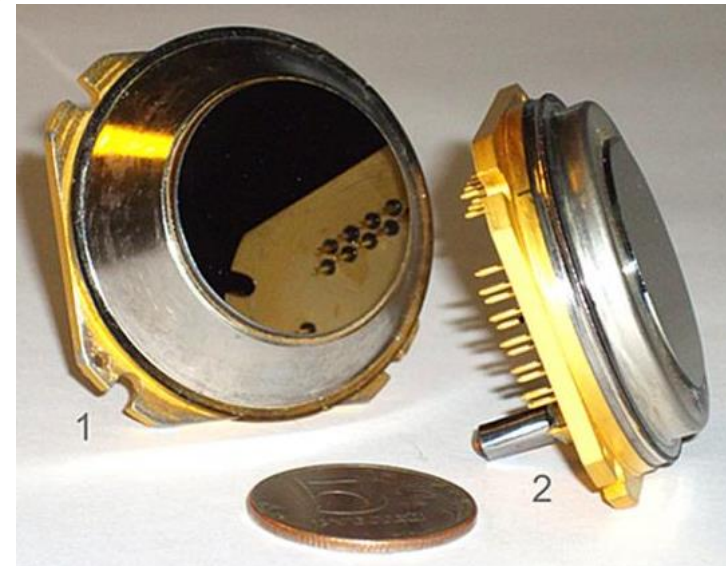
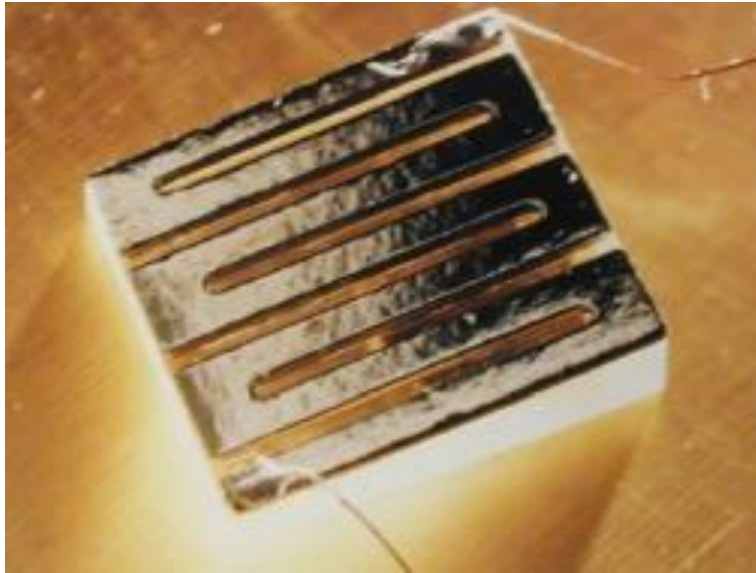
Povišenje temperature presvlake zavisi od izvora apsorbovane energije zračenja i toplotnih gubitaka zračenjem i kondukcijom.



Rezultujuća promena otpora može biti određena pomoću mernog mosta.  
**Ovaj otpor je u direktnoj vezi sa temperaturom senzora.**

# a. RADIJACIONI SENZORI

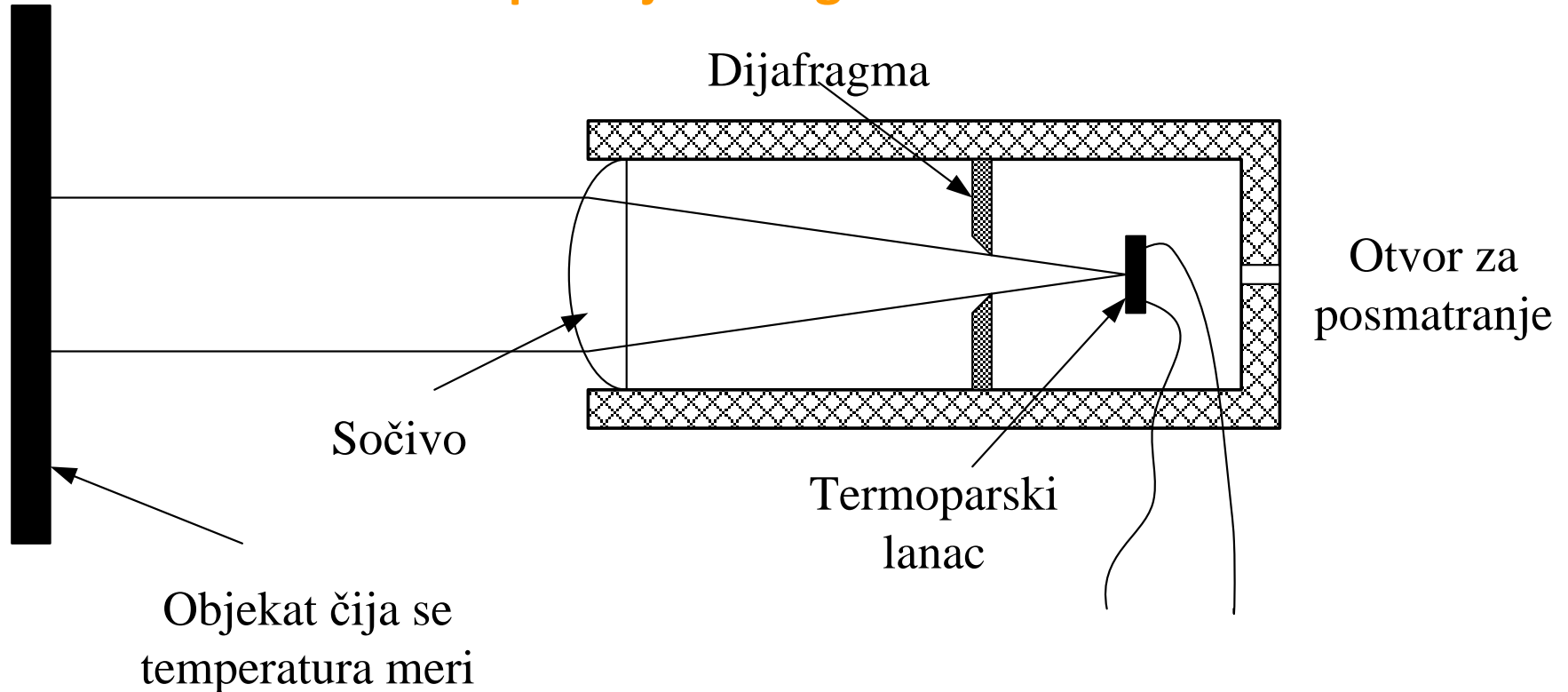
## Bolometar



## b. RADIJACIONI TERMOMETRI (PIROMETRI)

Sočivo se koristi za fokusiranje radijacione energije na senzor koji u ovom slučaju može biti **termogrupa** ili **vakuumski termopar** (ranije prikazani)

### Jedan tip radijacionog termometra



Putem otvora za posmatranje obavlja se usmeravanje prema objektu merenja i fokusiranje.

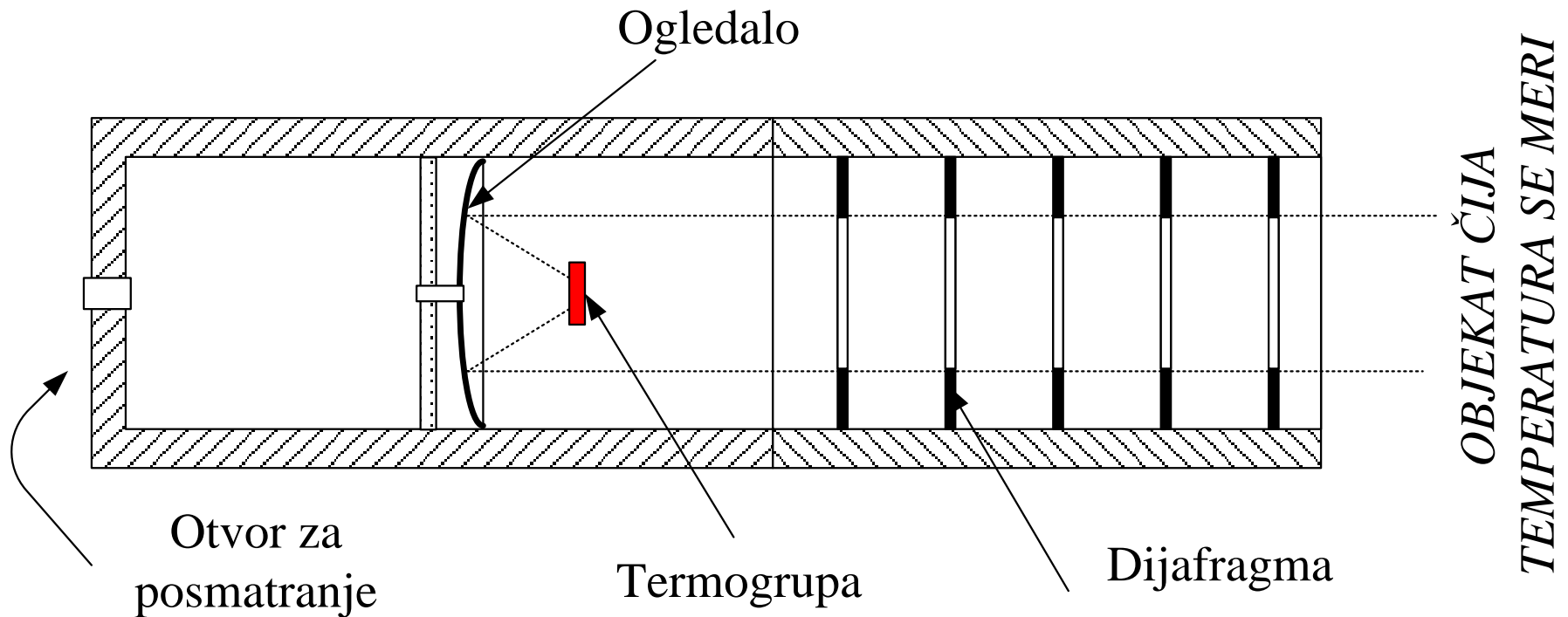


## b. RADIJACIONI TERMOMETRI (PIROMETRI)

Radijacioni termometar: ovde se dijafragma zajedno s ogledalom koristi za fokusiranje radijacije na termogrupu.

► Ova jedinica ima prednosti u odnosu na sočivo, jer je izbegnuta refleksija i apsorpcija sočiva.

### Radijacioni termometar s ogledalom



## b. RADIJACIONI TERMOMETRI (PIROMETRI)



## b. RADIJACIONI TERMOMETRI (PIROMETRI)

---

**TAČNOST MERENJA** temperatura radijacionim termometrima zavisi od

1. Referentnog spoja termopara,
2. Udaljenja od objekta merenja,
3. Apsorpcionih svojstava sredine i
4. Efekata emisije.

**1. Temperaturu referentnog spoja** termopara trebalo bi održavati konstantnom, jer TEMS zavisi od temperature merenja i referentnog spoja. *Referentni spoj je u kontaktu sa kućištem uređaja i ako temperatura kućišta raste, temperaturni rast mernog spoja i referentnog spoja su približno isti.*

**Prema tome, ukoliko je TEMS termogrupe konstantna, greška je mala.**

- Pri merenju niskih temperatura, TEMS je mala i greška je značajna.
- Pri merenju visokih temperatura, TEMS je velika i greška je neznatna.

*Kada se temperatura kućišta povisi više od 150 °C mora da se obezbedi hlađenje vazduhom ili vodom. Time se održava i konstantna temperatura referentnog spoja.*

## b. RADIJACIONI TERMOMETRI (PIROMETRI)

---

**2. Razmak od ciljne površine do prijelnika** i veličina površine cilja mora da se uzima u obzir, pri instalaciji radijacionog mernog uređaja.

Kod svih vrsta radijacionih prijelnika površina cilja mora biti dovoljno velika i vidljiva u celini. U protivnom će biti primljena nedovoljna energija zračenja, a posledica će biti negativna statička greška.

*Rastojanje prijelnika od cilja treba da je od 10 do 20 puta veće od prečnika cilja.*

**3. Apsorpciona sredina** u prostoru između cilja i termogrupe smanjuju iznos prijema radijacije.

Takve materije kao dim, prljavština i gas apsorbuju radijaciju i uzrok su nižih temperatura očitavanja.

S druge strane, topao gas, plamen i visokotemperaturske čestice ugljenika mogu da povećavaju radijaciju i uzrokuju očitavanje viših temperatura.

*Gasovi kao što su ugljen-dioksid, sumpor-dioksid, vodena para i amonijak imaju apsorpciona i radijaciona svojstva, koja mogu značajno da uvećaju grešku merenja.*

## b. RADIJACIONI TERMOMETRI (PIROMETRI)

---

### 4. Efekat emisije.

- Emisivnost ili faktor emisivnosti je pojam koji predstavlja sposobnost materijala da emituje toplotno zračenje.
- Svaki materijal ima drugu emisivnost, a određivanje tačne emisivnosti nekog materijala je poprilično teško.
- Emisivnost materijala se kreće od 0,00 (glatke i sjajne površine, koja imaju maksimalnu refleksiju a minimalnu apsorpciju) do 1,00 (površina „apsolutno crnog tela“). Između vrednosti 0,00 i 1,00 su tzv. „siva tela“.
- Emisivnost zavisi od niza faktora, npr: spektralni opseg zračenja, ugao zračenja, temperatura, stanje površine materijala čija se temperatura meri i dr.

# b. RADIJACIONI TERMOMETRI (PIROMETRI)

## 4. Efekat emisije.

EMISIVNOST MATERIJALA

MATERIAL	OPIS	EMISIVNOST
Aluminijum	oksidisani	0.30
	polirani	0.02-0.04
Mesing	oksidisani	0.50
	polirani	0.02-0.05
Zlato		0.01-0.10
Gvožđe	oksidisani	0.70
Čelik	polirani	0.70-0.90
Azbest		0.95
Gips		0.80-0.90
Asvalt		0.95
Stena		0.70
Drvo		0.90-0.95
Ugalj	mleveni	0.96
Ugljenik		0.85
Lakirano	bez sjaja	0.97
Ugljeni cement		0.90
Mehuri sapuna		0.75-0.80
Voda		0.93
Sneg		0.83-0.90
Led		0.96-0.98
Smrznuta hrana		0.95

MATERIJAL	OPIS	EMISIVNOST
Keramika		0.95
Krečnjak		0.98
Boja		0.93
Ljudska koža		0.98
Grafit	oksidisani	0.20-0.60
Plastika	neprovidna	0.95
Guma		0.95
Plastični cement		0.85-0.90
Beton		0.95
Cement		0.96
Flo		0.90-0.98
Malter		0.89-0.91
Cigla		0.90-0.96
Mermer		0.94
Tekstil		0.90
Zagrejana hrana		0.95
Plastika		0.95
Ulje		0.94
Gvožđe i Čelik		0.80-0.90
Vuna	prirodna	0.94
Olovo	oksidisani	0.50

# c. FOTOELEKTRIČNI PIROMETRI

---

## PRIMENA:

Instrument za radijaciono merenje temperature, proizveden kao fotoelektričan uređaj, nema tako široku upotrebu kao radijacioni pirometar, ali je jednostavan i pogodan za mnoge industrijske operacije.

Instrument ima malu inerciju, pa se koristi za merenje temperature pokretnih objekata kakvi se mogu naći npr. u valjaonicama čelika.

## PRINCIP RADA:

Fotovoltačna ćelija fotoefektom neposredno proizvodi elektromotornu silu, proporcionalnu iznosu primljene radijacije.

## OPSEG:

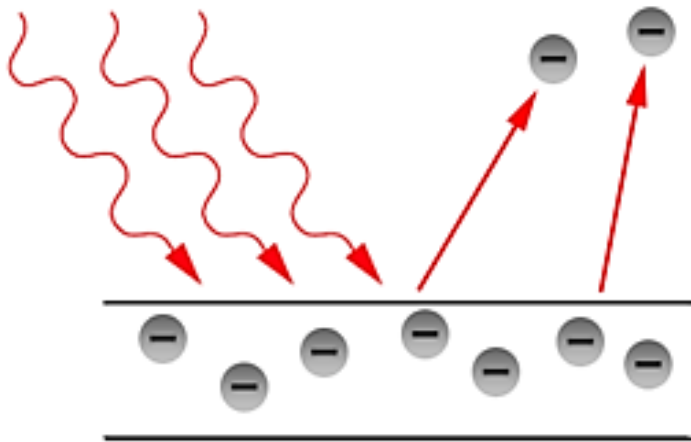
Obično je upotrebljen u **opsegu temperatura** od 816 do 1.650 °C

## ODZIV:

Fotoelektrične metode imaju znatne prednosti u brzini, pošto je odgovor fotoosetljive ćelije na promenu energije zračenja veoma brz.

**Fotoefekt** je fizikalna pojava kod koje delovanjem elektromagnetnog zračenja (*svetlost je deo spektra e.m. zračenja iz opsega  $\lambda$  vidljivih golim okom*) dovoljno kratke talasne dužine (*npr. u vidljivom ili ultraljubičastom području spektra*) dolazi do izbivanja elektrona iz obasjanog materijala.

Fotoni svetla (*svetlosne čestice*) imaju tačno određenu količinu energije (*energija ulaznog fotona svetlosti*) potrebnu za raskidanje veze s atomom. Ponekad se ti izbačeni elektroni nazivaju “fotoelektroni”. Ovu pojavu je prvi primetio Heinrich Herz.



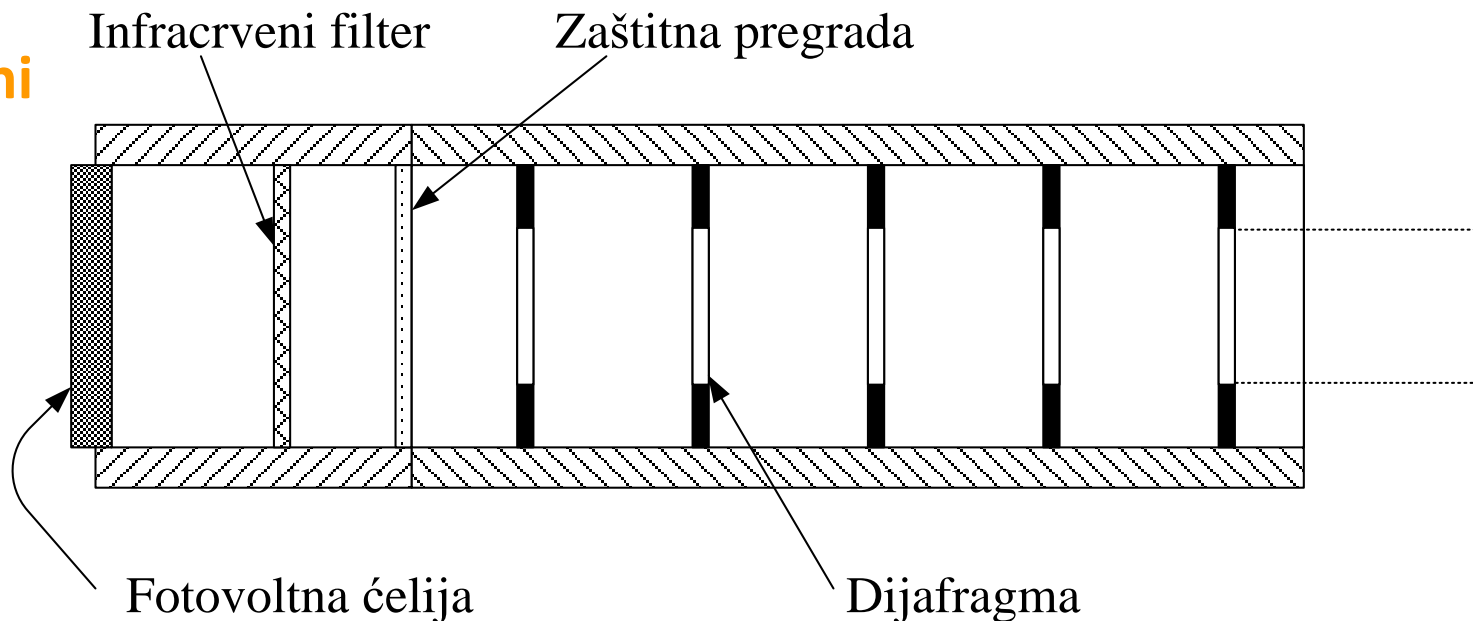
Zračenje s talasnom dužinom većom od granične ne izbija elektrone, jer elektroni ne mogu dobiti dovoljno energije za raskidanje veze s atomom.



## c. FOTOELEKTRIČNI PIROMETRI

Prijemnik za radijaciono merenje temperature **fotovoltnom ćelijom**.

Fotoelektrični  
radijacioni  
prijemnik



Zaštitni prozor je od tankog stakla i služi za zaštitu filtera ćelije.

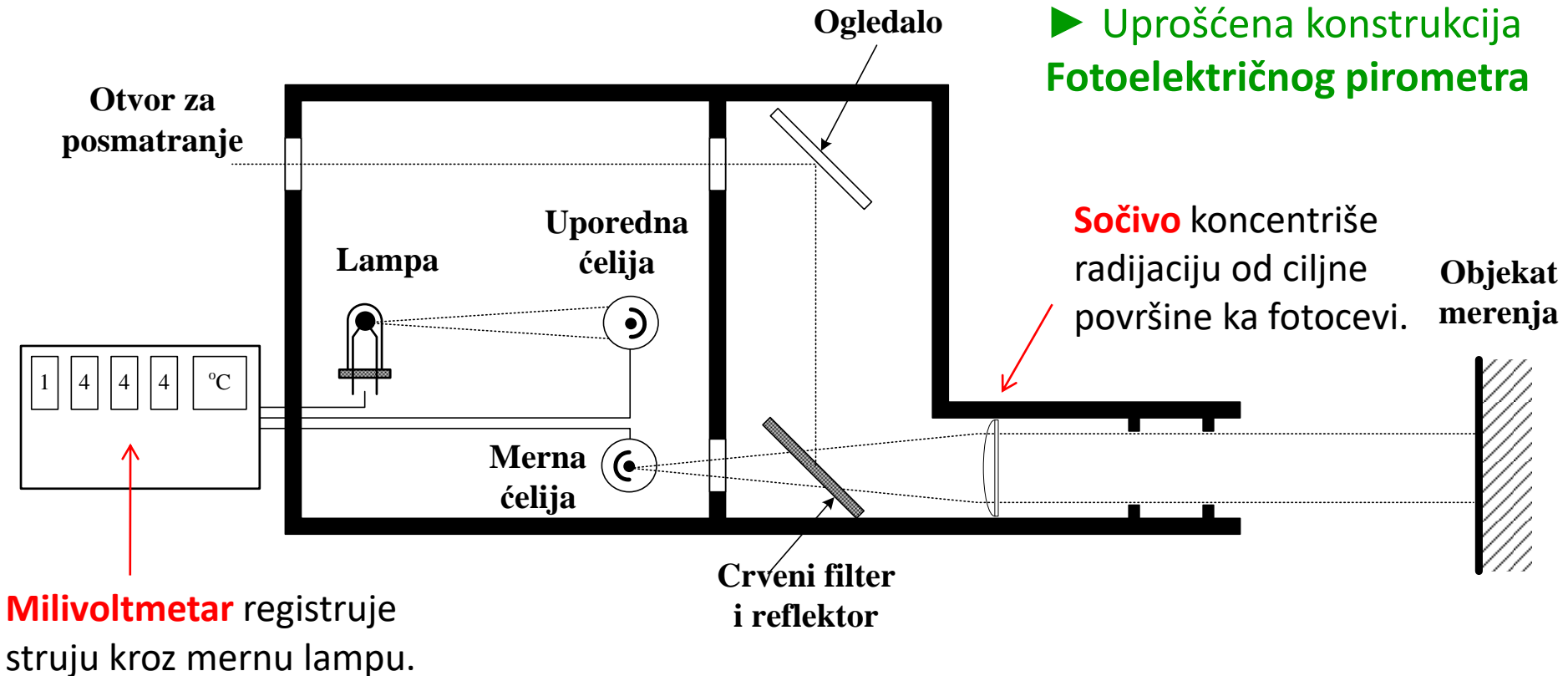
Filter se upotrebljava za merenje temperatura u opsegu od 83 do 1.205°C.  
On pomaže u zaštiti ćelije od pregrevanja.

# c. FOTOELEKTRIČNI PIROMETRI

PRINCIP RADA (uprošćena šema):

Automatsko prilagođavanje radijacije od mernog izvora i radijacije od ciljne površine. Lampom se podešava radijacija na uporednu ćeliju.

**Fotoemisiona vakuumaska cev proizvodi električnu struju, koja je proporcionalna intenzitetu radijacije.**



## c. FOTOELEKTRIČNI PIROMETRI

---

### TAČNOST:

Upotreba dveju identičnih fotocevi ima za cilj poništenje njihovih karakteristika i tačnost ove vrste fotoelektričnih pirometara je zbog toga dobra.

Fotoelektrični pirometar deluje relativno nezavisno od promene temperature okoline i nema značajan uticaj na razmak ciljne površine, dokle god je vidno polje dobro.

### PRIMENA:

Prednost upotrebe fotoćelijskih prijemnika je njihova brzina odziva (instrument ima malu inerciju), prosti su za upotrebu i robustni. Često se koriste za merenje temperatura u pećima kao i pokretnih objekata.

# c. FOTOELEKTRIČNI PIROMETRI



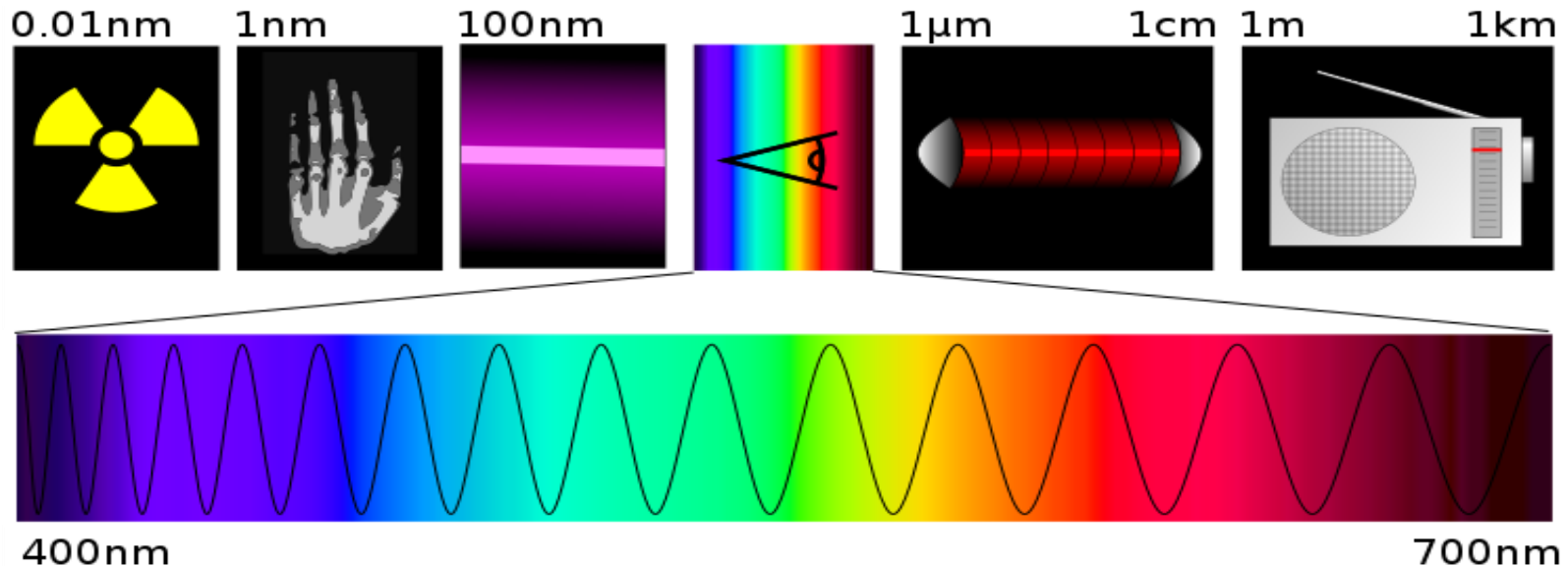
# d. OPTIČKI TERMOMETRI (PIROMETRI)

## KARAKTERISTIKE:

Široko se primenjuju za opseg temperatura od 550 do 2800 °C.

Rade sa gotovo **monohromatskom svetlošću** (*sadrži samo jednu frekvenciju (boju) vidljivog dela spektra elektromagnetnog zračenja*).

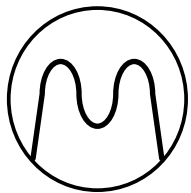
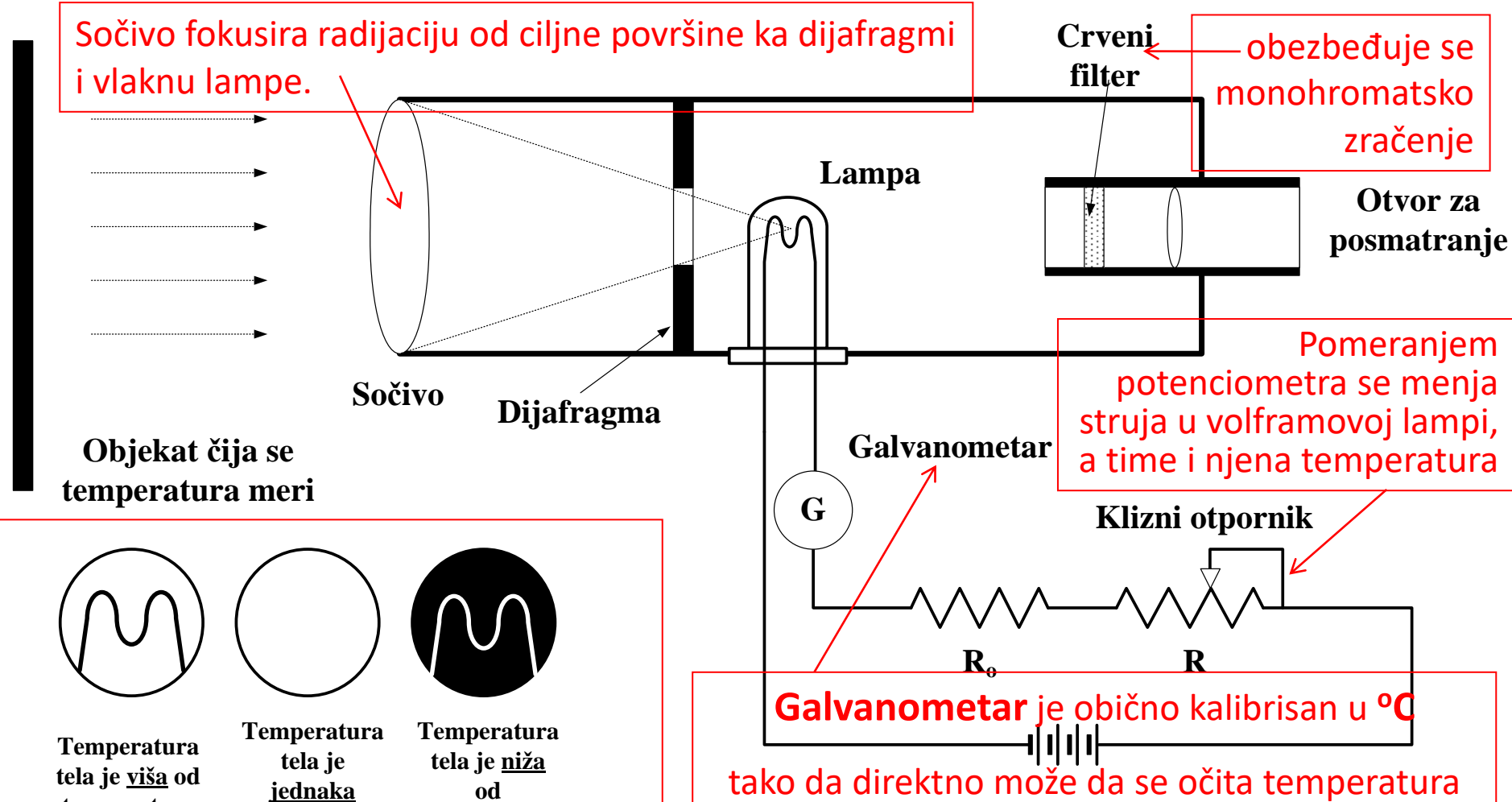
Talasna dužina je obično u području širine od oko 0,01 mikrona na talasnoj dužini od oko **0,65 mikrona (crveni deo vidljivog spektra)**.



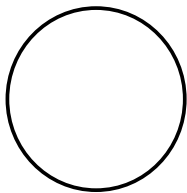
Tačnost merenja je odlična i temperatura u području visokih temperatura može biti određena unutar oko  $\pm 5^{\circ}\text{C}$

# d. OPTIČKI TERMOMETRI (PIROMETRI)

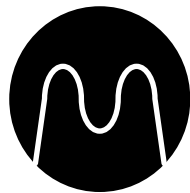
Zračenje od merenog objekta se poredi sa podesivim intenzitetom zračenja izvora sa standardnom volframovom lampom.



Temperatura tela je viša od temperature niti



Temperatura tela je jednaka temperaturi niti



Temperatura tela je niža od temperature niti

Vlakno lampe na pozadini od objekta koji se meri može da se vidi u obliku niti

Operator podešava struju lampe dok se ne izgubi njen lik, što je znak da su temperature tela i niti jednake

## d. OPTIČKI TERMOMETRI (PIROMETRI)

