

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Bilan

Zagreb, 2015

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić, dipl. ing.

Student:

Marko Bilan

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc Davoru Zvizdiću na ukazanom znanju i pruženoj pomoći tijekom izrade ovog završnog rada.

Marko Bilan

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. UMJERAVANJE TERMOMETRA U ZRAKU I DRUGIM PLINOVIMA	2
2.1. Prva metoda.....	2
2.2. Druga metoda	2
2.3. Treća metoda.....	3
3. MJERENJE TEMPERTATURE U STRUJAJUĆEM FLUIDU.....	4
3.2. Idealizirani plinsko-temperaturni odnosi	4
3.3. Recovery factor	8
3.4. Dinamički korekcijski faktor	10
4. POGREŠKE U KORIŠTENJU TERMOMETRA	13
4.1. Pogreške uslijed uranjanja termometra	13
4.2. Pogreške uslijed toplinskog kapaciteta termometra.....	14
4.3. Pogreške pri postavljanju odaziva sustava.....	15
5. POSTAVLJANJE TERMOMETRA U CIJEVI.....	17
6. PRIJELAZ TOPLINE NA TERMOMETAR.....	20
6.1. Shema prijelaza topline	20
6.2. Otpori provođenja	20
6.3. Otpori konvekcije.....	22
6.4. Otpori zračenja	24
7. ISPITIVANJE UTJECAJA ZRAČENJA NA TERMOMETAR U CIJEVI.....	25
7.1. Uvod.....	25
7.2. Utjecaj temperature stjenke na temperaturu termometra	26
7.3. Utjecaj emisijskog faktora	30
7.4. Utjecaj brzine strujanja plina	31
7.5. Prikaz utjecaja postavljanja ekrana oko termometra.....	31
8. ZAKLJUČAK.....	35
9. LITERATURA	36
PRILOZI.....	37

POPIS SLIKA

Slika 1. Tri slučaja koji ilustrira idealizirane odnose temperature plina	5
Slika 2. Recovery factor	9
Slika 3. Opći dinamički korekcijski faktori	11
Slika 4. Tok topline prema termometru	14
Slika 5. Prikaz odaziva sustava	16
Slika 6. Tipično postavljanje senzora uključujući zaštitnu cijev i zaštitnu glavu	17
Slika 7. Prikaz 3 vrste postavljanja senzora	18
Slika 8. Postavljanje zaštitne cijevi	19
Slika 9. Shema prijelaza topline sa plina i stijenke na termometar	20
Slika 10. Prikaz promjene temperature stijenke na temperaturu termometra	28
Slika 11. Za različite temperature plina prikaz pogreške mjerenja u funkciji promjene temperature stijenke	29
Slika 12. Prikaz utjecaja emisijskog faktora termometra	30
Slika 13. Prikaz utjecaja brzine strujanja plina	31
Slika 14. Prikaz utjecaja postavljanja ekrana	34

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz pogreške mjerenja temperature	28
---	----

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
w	m/s	Brzina strujanja plina
C _c	$5,67 \cdot 10^8$ W/m ² (100K)	Konstanta zračenja crnog tijela
ε	-	Emisijski faktor
d	m	Promjer termometra
Φ _{uk}	W	Ukupni toplinski tok
Φ _z	W	Toplinski tok predan zračenjem
Φ _k	W	Toplinski tok predan konvekcijom
A _t	m ²	Površina termometra
α _z	W/m ² K	Koeficijent prijelaza topline zračenjem
α _k	W/m ² K	Koeficijent prijelaza topline konvekcijom
Re	-	Reynoldsov broj
Pr	-	Prandlov broj
Nu		Nusseltov broj
λ	W/mK	Toplinska provodnost
T _{zraka}	K	Temperatura zraka
T _t	K	Temperatura termometra
T'	K	Temperatura međustijenke
A'	m ²	Površina međustijenke

SAŽETAK

Svrha ovog rada je prikazati utjecaj raznih veličina na pogreške mjerenja temperature. Ispravno postavljanje termometra je od bitne važnosti za ispravno mjerenje. Analizirano je utjecaj otpora provođenja, konvekcije i zračenja na rezultate mjerenja. Proračunom je prikazano utjecaj zračenja na termometar u cijevi kroz koje protječe plin. Proračun je proveden tako da se promjenom temperature stjenke cijevi pratila veličina pogreške termometra.

Ključne riječi: pogreška termometra

SUMMARY

The purpose of this study is to show effect of different value on termometer error. The correct setting of termometer is the main importance for correct measurement. It is analyzed influence of conduction, convection and radiation resistance on result of measurement. The estimating was show influence of radiation on thermometer in tube with flowing gas. The changing temperature of tube it was also change temperature error.

Key words: thermometer error

1. UVOD

Prilikom mjerenja temperature dolazi do raznih pogrešaka mjerenja zbog vanjskih utjecaja. Zbog toplinskog kapaciteta termometra, termometar neće u datom trenutku prikazati potrebnu temperaturu nego će postojati određeno kašnjenje termometra. Također pri mjerenju temperaturu veliki utjecaj na pogrešku mjerenja ima prijelaz topline zračenjem. U ovom radu biti će analizirano utjecaj zračenja na temperaturu termometra i način smanjenja pogreške mjerenja temperature.

2. UMJERAVANJE TERMOMETRA U ZRAKU I DRUGIM PLINOVIMA

2.1. Prva metoda

Umjeravanje je povezano s korisnim volumenom prošireno od mjernog položaja u nenapunjenoj klima komori. Umjeravanje stoga pokriva:

- Odluku o induciranoj korekciji ili odstupanje mjerenja od referentnog mjernog mjesta
- Odluku o prostornim nehomogenostima u praznom korisnom volumenu
- Odluku o privremenoj nestabilnosti u praznom korisnom volumenu
- Odluku o efektu zračenja
- Odluku o efektu opterećenja na mjernoj lokaciji usporedbom napunjenog i praznog korisnog volumena kako korisnik zahtjeva

2.2. Druga metoda

Umjeravanje je povezano s korisnim volumenom prošireno od mjernog položaja u napunjenoj klima komori. Punjenje more biti ostvareno po korisnikovoj određenoj primjeni ili punjenje do 40 % korisnog volumena. Za pojedinačna ispitivanja i nesigurnost komponenata odredbe za prvu metodu su važeća. Utjecaj na punjenje je određeno dodatnim mjerenjem u glavnoj mjernoj lokaciji u praznom stanju. Umjeravanje također pokriva:

- Odluku o korekciji ili o odstupanju između mjerenja referentne lokacije i mjerene lokacije u napunjenom stanju
- Odluku o prostornim nehomogenostima u napunjenom korisnom volumenu
- Odluku o privremenoj nestabilnosti u napunjenom korisnom volumenu
- Odluku o efektu zračenja

- Odluku o utjecaju punjenja za referentnu lokaciju usporedbom napunjenog i praznog korisnog volumena

2.3. Treća metoda

Mjerenja povezana je s pojedinačnom lokacijom mjerenja u klimatskoj komori što ne uključuje korisni volumen. Umjeravanje dakle uključuje

- Odluku o korekciji ili o razlici između mjerenja na mjernom mjestu i referentnog mjesta.
- Odluku o privremenoj nestabilnosti mjerne lokacije
- Odluku o efektu zračenja u mjernoj lokaciji
- Odluku o utjecaju punjenja na mjernoj lokaciji usporedbom napunjenog i praznog korisnog volumena kako korisnik zahtjeva

3. MJERENJE TEMPERTATURE U STRUJAJUĆEM FLUIDU

3.1. Idealni plin

Formula za idealni plin glasi:

$$pv = RT$$

Koristi se još od 1834. godine kao referetna jednadžba za stanje plina, jednadžba stanja idealnog plina je najtočnija za jednoatomske plinove, kod visokih temperatura i kod manjih gustoća plinova. Povećanjem toplinske kinetičke energije tj. povećanjem temperature smanjuje se važnost međumolekularnog djelovanje. Određena opažanja koristeći jednadžbu stanja idealnog plina za realni plin :

- Izraz $pv=RT$ je najtočniji za realne plinove kada se tlak približava nuli kroz odgovarajuću izotermu.
- Kod malih tlakova gdje su intermolekularne sile zanemarive, transportna svojstva kao viskoznost i provođenje koje zavisi o veličini molekula također se moraju zanemariti.

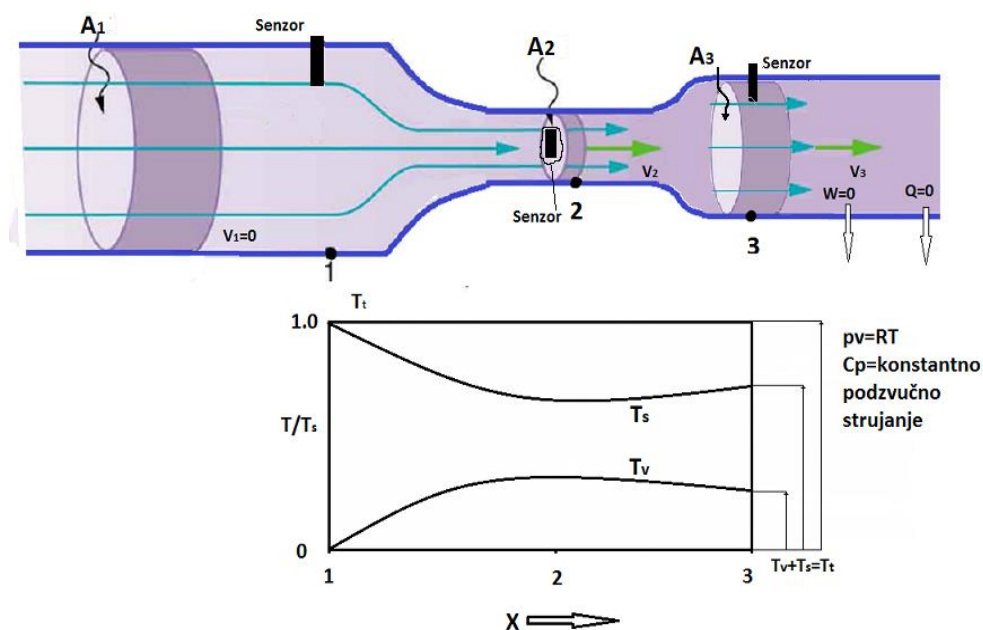
Idealizirani temperaturni senzori za mjerenje zraka su određeni proizvoljno. Prvi koji potpuno stoji u strujanju fluida i drugi koji je potpuno izoliran, nema prijelaza topline.

3.2. Idealizirani plinsko-temperaturni odnosi

Uzimajući u obzir nekoliko slučajeva koji svaki uključuje sljedeće: sustav s fiksnim granicama gdje nema izmjene topline i ne prenosi se mehanički rad, idealiziran je plin i senzor koji služi za mjerenje temperature plina. Prikazuje se preko tri slučaja.

1. Za slučaj da senzor i plin oboje miruju u odnosu na granice sustava, senzor će pokazati temperaturu plina. Temperatura može biti prikazana kao mjera osrednje nasumične translacijska kinetička energija molekula kontinuuma

2. Za slučaj da senzor se giba zajedno s plinom u odnosu na granice sustava, senzor će ponovno pokazati temperaturu plina. Međutim izmjerena lokalna temperatura plina mora biti izdvojena pažljivo od temperature 1. Temperatura za slučaj 2 je niža nego za slučaj 1 za iznos ekvivalentan djelu toplinske energije koja se sada pojavljuje u obliku kinetičke energije kontinuuma.
3. Za slučaj da senzor miruje u odnosu na plin, senzor neće samo pokazati temperaturu plina nego će i pokazati temperaturu, u dodatku, temperaturu ekvivalentnu kinetičkoj energiji gibanja plina. Ovaj drugi dio od neto naznačene temperature je dobiven stagniranjem lokalnog dijela kontinuuma plina. Senzor tako ponovno konvektira kinetičku energiju natrag u naizmjenični toplinski efekt. Neto naznačena temperatura je identična temperaturi plina za slučaj 1.



Slika 1. Tri slučaja koji ilustrira idealizirane odnose temperature plina

- I. *Statička temperatura (T_s)* – to je stvarna temperatura plina za gibanje i za mirovanje. Smatra se kao mjera od prosječne naizmjenične translatorne kinetičke energije molekula. Statičku temperature neće osjetiti adijabatski senzor u toplinskoj ravnoteži i u stanju mirovanja u odnosu na plin.
- II. *Dinamička temperatura (T_v)*- toplinska ravnoteža kinetičke energije kontinuuma plina je poznata kao dinamička temperatura.
- III. *Totalna temperatura (T_t)*- ova temperatura je sastavljena od zbroja statičke temperature i dinamičke temperature plina. Totalnu temperaturu će prikazati idealizirani senzor u stanju mirovanja na granicama sustava kada stagnira idealizirani plin.

Prikazane temperature su povezane na način da pretpostavimo stacionarni protok fluida i da se za jednadžbu prvog glavnog stavka termodinamike primjeni da je idealizirani plin u direktnom gibanju u odnosu na granice sustava.

$$\partial Q + \partial W = du + d(pv) + \frac{VdV}{g}$$

Uvođenjem formule za definiciju entalpije $h=u+pv$ postaje

$$\partial Q + \partial W = dh + \frac{VdV}{g} \quad \partial Q + \partial W = dh + \frac{VdV}{g}$$

∂Q -prijenos topline kroz granice sustava

∂W -prijenos mehaničkog rada kroz granice sustava

dh -promjena entalpije između dva termodinamička stanja u sustavu.

$\left(\frac{VdV}{g} \right)$ - neto promjena direktne kinetičke energije između dva termodinamička stanja u sustavu.

Ako izostavimo mehanički rad i prijenos topline kroz granice sustava onda prikazujemo kao

$$M \cdot g \cdot J \cdot c_p (T_2 - T_1) = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

J- mehanički ekvivalent topline (4.1850 J/cal).

Temperatura za mirujući plin ($T_2 - T_1$) je uvijek veća od temperature plina u gibanju ($T_1 - T_s$) za količinu ekvivalentnu kinetičkoj energiji plina.

$$T_t = T_s + \frac{V^2}{2Jc_p} = T_s + T_v$$

Viskozne posmične sile što su prikazane kao sinonim za sile trenja u fluidu. Tako efekti u graničnom sloju povezani sa viskoznošću i provođenjem topline što je u sukobu za izentropsku pretpostavku. Viskoznost i provođenje topline su uzbudni efekti glavnom toku fluida i njihove relativne i njihova relativna važnost je indicirana Prandlovim brojem, gdje je Prandlov broj je omjer difuzije impulsa i toplinske difuzije .

$$\text{Pr} = \frac{\eta c_p}{\lambda}$$

Zamjenjujući izentropsku pretpostavku s pretpostavkom da je Prandlov broj 1, nije potrebno uzeti u obzir efekte kondukcije ili viskoznošću.

3.3. Recovery factor

Fluide na kojima vršimo ispitivanja ne obilježava uvijek da Prandlov broj bude 1. Skoro nemoguće je uspjeti da mirujući realni fluid bude izentropski. Stoga se mora ponovno izmjeniti pojednostavljena slika uspostave temperature. Za plin recovery factor iznosi

$$T_{pi} = T_s + \alpha T_v$$

Ali iako recovery factor je izražen kao neki postotak dinamičke temperature ne postoji upletenost recovery factora koji označava samo stupanj konverzije direktne kinetičke energije u toplinski efekt i tako recovery factor od vrijednosti 1 je maksimalno dostižan.

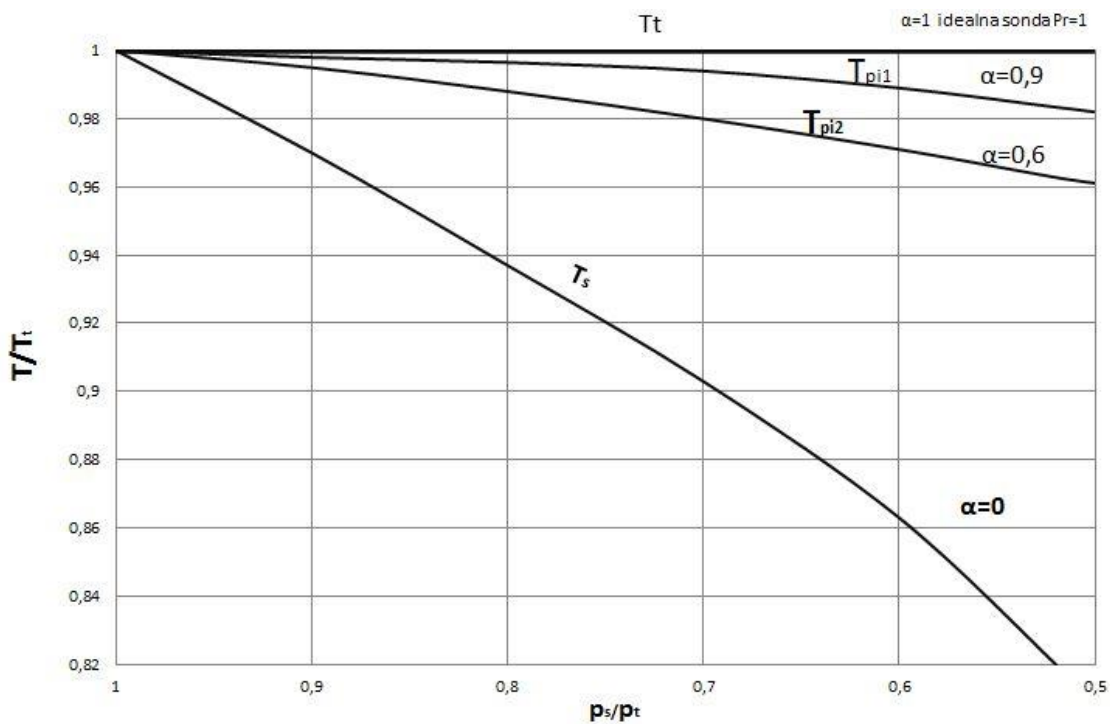
Na primjer za plinove koji imaju Prandlov broj manji od jedan, efekt toplinske provodnosti zasjenjuje viskozne efekte i idealizirani senzor će prikazati temperaturu manju od totalne temperature ($\alpha < 1$).

Za Prandlov broj iznad jedan idealizirani senzor će doći u ravnotežu za temperaturu veće od totalne temperature ($\alpha > 1$).

Za idealne senzore za određeni plin i određene granice sustava recovery faktor je skoro neovisan od Machovom i Reynoldsovom broju. Prikazano je sljedećom jednadžbom:

$$\alpha = \frac{(T_{pi} - T_s)}{(T_t - T_s)}$$

Pohlhausen u 1921 je otkrio da recovery factor za ravne površine u laminarnom strujanju zraka koji iznosi $\alpha=f(\text{Pr})=0,844$. Emmons i Brainerd u 1941 i Squire 1942 otkrili da za laminarno strujanje kroz ravne površine recovery factor iznosi $\alpha=\text{Pr}^{1/2}$. Prandlov broj se kreće između vrijednosti 0.5 i 2 a Machov između vrijednosti 0 i 10. Za zrak recovery factor iznosi 0,846.



Slika 2.Recovery factor

Za turbulentni granični sloj znamo u stvarnosti toplinska difuzija (d) i kinematička viskoznost (ν) povećavaju se zbog vrtložnog mehanizma difuzije (ϵ) zajedno s molekularnom difuzijom. Ako se pretpostavi da povećanje prividnog viskoznog efekta je identičan s povećanjem prividnog efekta prijelaza topline efektivni Prandlov broj je definiran kao

$$Pr_{eff} = \frac{(\nu + \epsilon)}{(d + \epsilon)}$$

Tako, ako je $Pr > 1$, toplinska difuzija (d) će se povećati za veći postotak i temperatura na senzor će se smanjiti u turbulentnom strujanju u odnosu na laminarno strujanje. Za $Pr < 1$

Vrijede suprotne vrijednosti od navedenih. Stoga za bilo koji Prandlov broj, senzor u turbulentnom strujanju u adijabatskoj ravnoteži će ostvariti temperaturu koja je uvijek bliža totalnoj temperaturi koju će postići senzoru laminarnom strujanju.

Emmons i Brainerd su otkrili da lokalni recovery factor može se veoma približno prikazati kao:

$$\alpha = \text{Pr}^{1/3}$$

Prethodna formula se koristi za ravne površine s visokim Reynoldsovim brojem. Eckert i Weise ukazali da recovery factor je veoma blizak konstantnom laminarnom strujanju iznad cilindra. Taj recovery factor za cilindar je sličan recovery factoru za ravnu površinu točke razdvajanja, ili do završetka turbulentnog graničnog sloja. Pod tim uvjetima čak i adijabatski senzor će kompletno mirovati u realnom plinu i neće pokazati totalnu temperaturu.

$$T_{pi} = T_s + \alpha T_v \neq T_t$$

Oznaka α je recovery factor koji ako se zasniva na lokalnim vrijednostima brzine i statičke temperature približno je neovisan od Machova i Reynoldsova broja i prikazuje se $\alpha = \text{Pr}^{1/2}$ za laminarno strujanje i $\alpha = \text{Pr}^{1/3}$ za turbulentno strujanje.

3.4. Dinamički korekcijski faktor

Realna sonda uronjena u realni fluid teži zračenju u okolinu. Također ima tendenciju da provodi toplinu duž cijele sonde. Spomenuta dva efekta su uravnoteženi konvekcijskim prijenosom topline između sonde i fluida što mora biti uzeto u obzir kada se stvarna temperatura sonde razlikuje od adijabatske temperature sonde.

Realne sonde ne miruju uvijek učinkovito kod fluida u gibanju. To je važno kada je fluid kompresibilan; unatoč tome mirovati će u točki, većina sonde koje služe za mjerenje temperature pokazuju nižu temperaturu i efekt cijele geometrije mora se uzeti u obzir. Tako više nije potrebno smatrati idealnu sondu kao što treba uzeti u obzir fluid čije efekte viskoznosti i kondukcije su zanemarivi.

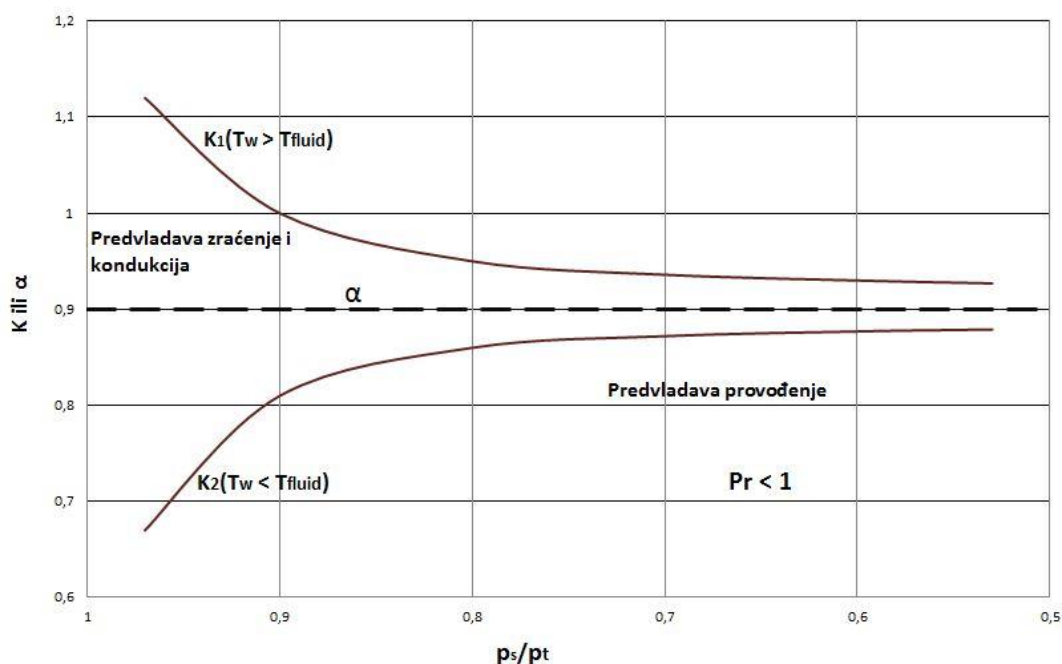
Dinamički korekcijski faktor K , služi za ispravljanje djelovanja adijabatske sonde koja pokušava stagnirati u realnom gibajućem plinu može se definirati kao:

$$T_p = T_s + KT_v$$

Gdje temperatura T_p je ravnotežna temperatura očitana na stacionarnoj realnoj sondi. Tu je zgodno napomenuti da sva zabilježena eksperimentalna mjerenja od temperaturnog recovery faktora su nužnost da bi se odredio dinamički korekcijski faktor gdje razlike između K i α ukazuju na odstupanja od pretpostavke idealne sonde.

Nasuprotno recovery faktoru, na dinamički korekcijski faktor posebno utječu promjene u Machovom i Reynoldsovom broju i u okolini fiksne granične temperature.

Pri malim brzinama u pravocrtnom gibanju, na temperaturu sonde će više utjecati kondukcija i radijacija od provođenja topline i za dinamički korekcijski faktor možemo pretpostaviti bilo koju vrijednost. Ipak ako se u pravocrtnom gibanju brzine povećavaju, dinamički korekcijski faktor približava se recovery faktoru.



Slika 3. Opći dinamički korekcijski faktori

Temperaturu koju prikazuje realna sonda uronjena u realni plin može biti prikazana u obliku odstupanja od totalne temperature:

$$T_t - T_p = (1 - K)T_p$$

Stvarno mjerenje temperature u strujanju plina, realna sonda pokazuje ravnotežu temperature koja se razlikuje od totalne temperature.

$$T_p = T_s + KT_v$$

K je dinamički korekcijski faktor koji uzima u obzir efekte sudara, viskoznosti i toplinske provodnosti i dijabatske sondine efekte i ostale efekte od relativne važnosti.

4. POGREŠKE U KORIŠTENJU TERMOMETRA

Česta zabluda koja se dogodi kod mnogo korisnika koji koriste termometre je ta će termometar kada je postavljen u sustav na kraju pokazati temperaturu tog sustava.

Broj pogrešaka koji se javlja u svakom mjerenju čini da je teško izvesti posve točno mjerenje temperature. Te pogreške se događaju uslijed činjenice da stvarna toplinska ravnoteža između termometra i sustava nikada ne postoji ili da umetanje termometra uzrokuje narušavanje ravnoteže.

4.1. Pogreške uslijed uranjanja termometra

Zbog toga što su termometri rijetko cijeli uronjeni u medij od interesa, problem uranjanja nastupa najviše u temperaturnom mjerenju. Držak termometra, obloga, žice za provođenje osiguravaju put kontinuiranom toku topline između medija i okoline.

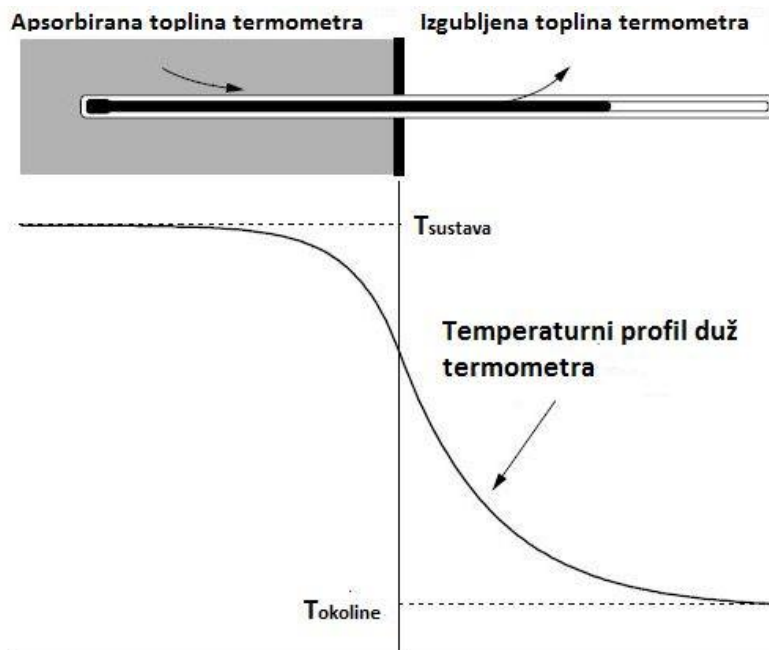
Pošto se toplina može prelaziti samo kada postoji temperaturna razlika, tok topline je dokaz da nagovještaj termometra je blago različite temperature medija od interesa.

Temperaturni profil kroz termometar varira kontinuirano. Vrući kraj termometra pokazuje temperaturu sustava koju mjerimo dok hladni kraj je bliži temperaturi okoline. Tok topline u graničnom sloju oko termometra i površina od senzora znači da glavni dio termometra nema istu temperaturu kao i sustav.

Toplinski tok oko termometra zavisi o temperaturnom gradijentu oko termometra i udaljavajući se od termometra u sustavu toplinski tok slabi.

Jednostavni model toplinskog toka u termometru blizu glavnog tijela povezan s pogreškom u očitavanju termometra duž dužine uronjenosti:

$$\Delta T_m = (T_{amb} - T_{sys}) K \exp\left(\frac{-L}{D_{eff}}\right)$$



Slika 4. Tok topline prema termometru

4.2. Pogreške uslijed toplinskog kapaciteta termometra

Kada uronimo hladni termometar u hladni sustav koji želimo izmjeriti termometar mora pokazati temperaturu sustava. To zahtjeva prijenos određene količine topline do termometra. Jasno da sustav mora izgubiti jednaku količinu svoje topline. Ako ta toplina nije zamjenjena nekom drugom toplinom iz izvora topline temperatura će se sniziti za količinu proporcionalnu njenom vlastitom toplinskom kapacitetu.

Ako u sustavu nema drugih toplinskih tokova, termometar i sustav će naposljetku doći do toplinske ravnoteže i konačna temperatura koju će termometar pokazati će biti između početne temperature termometra i početne temperature mjerenog sustava:

$$T_{mjer} = T_s \frac{C_t}{C_s + C_t} (T_{term,l} - T_s)$$

C_s i C_t su toplinski kapaciteti sustava i termometra odnosno T_s i $T_{\text{term},1}$ su početne temperature sustava i termometra. Postoji nekoliko pristupa za smanjenje ili uklanjanje pogrešku uslijed toplinskog kapaciteta.

Najočigledniji pristup je upotrijebiti termometar s što manjim toplinskim kapacitetom. Sljedeća metoda, ujedno i najpraktičnija je ugrijati termometar blizu temperature koja će biti blizu temperature sustava.

U nekim situacijama biti će moguće izmjeriti eksperimentalno pad temperature uronom drugog termometra ili izvući postojeći termometar, pustiti ga da se ohladi potop ga ponovno uroniti. Procjena veličine pogreške toplinskog kapaciteta može također biti zasnovan na procjeni toplinskog kapaciteta termometra i mjerenog sustava.

4.3. Pogreške pri postavljanju odaziva sustava

U sustavima gdje postoji neki temperaturni kontrolni mehanizam ili je sustav ogroman, pogreška toplinskog kapaciteta je malena ili zanemariva. Doduše biti će potrebno određeno vrijeme za sustav da zamjeni izgubljenju toplinu koja se utrošila na grijanje termometra koji će postići jednaku temperaturu mjerenog sustava.

Ako nemamo dovoljno vremena na raspolaganju za proces grijanja termometra pojaviti će se pogreška u očitavanju termometra. Također predmet sa većim toplinskim kapacitetom biti će potrebno više topline za promjenu temperature isto tako biti će potrebno dulje vremena od predmeta s manjim toplinskim kapacitetom.

To je odnos toplinskog kapaciteta prema toplinskom provođenju što određuje stopu grijanja ili hlađenja. Taj odnos je poznat kao vremenska konstanta termometra. Vremenska konstanta ima jedinicu vremena i karakterizira vrijeme potrebno da predmet odgovori na promjenu temperature.

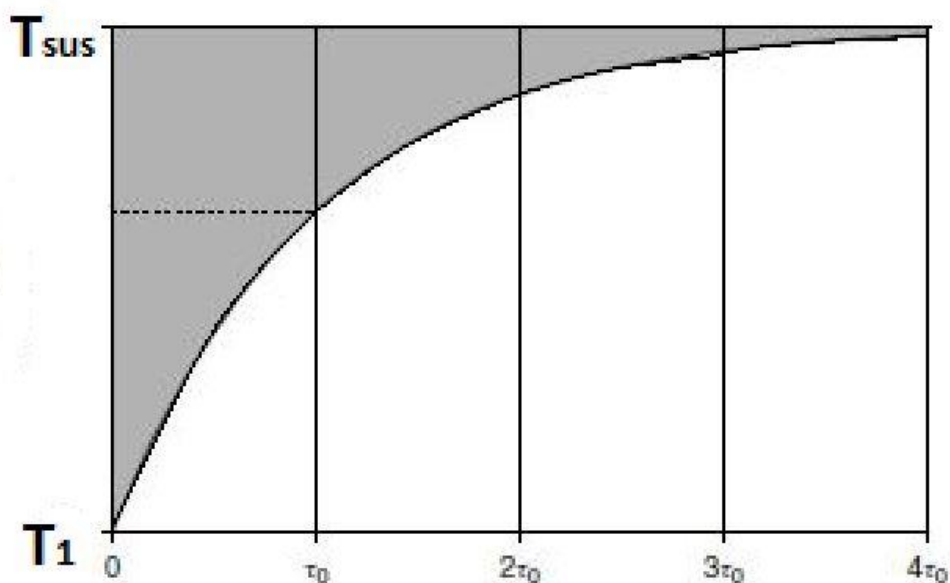
Za termometre sa zadatim oblikom, vremenska konstanta se povećava s povećanjem promjera termometra.

Za većinu sondi i sklopova vremenska konstanta se povećava povećanjem promjera na kvadrat.

Izuzetke čine živini termometri kod kojih je povećanje vremenske konstante direktno proporcionalno povećanju promjera. Sonde oko kojih imaju postavljen ekran, sa manjim promjerima (manje od 1 mm), kod njih je vremenska konstanta povećava približno kao $D^{1.5}$.

$$\Delta T_m = (T_1 - T_{sustav}) \exp\left(\frac{-\tau}{\tau_0}\right)$$

T_1 i T_{sustav} su početne temperature termometra i sustava odnosno, τ je vrijeme između urona i očitavanja termometra, i τ_0 je $1/e$ vremenska konstanta termometra. Jednadžba dopušta procjenu minimalno čekanje prije očitavanja s termometra s zanemarivom pogreškom.



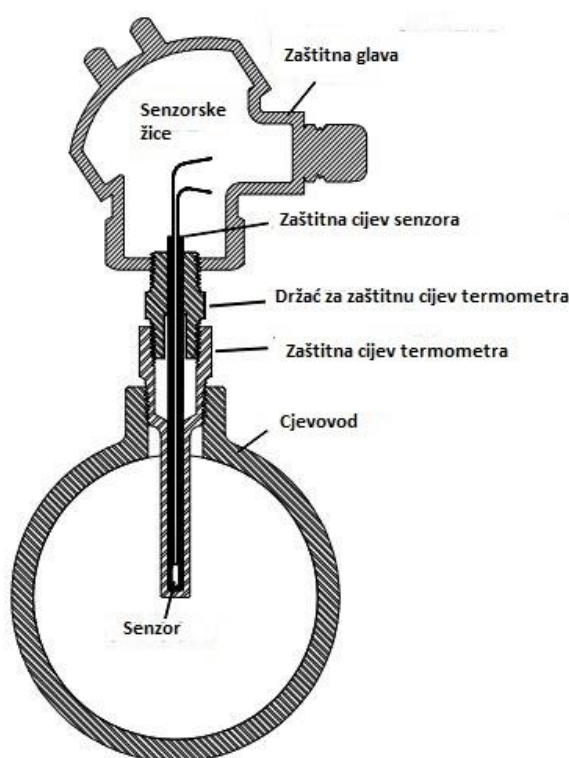
Slika 5. Prikaz odaziva sustava

U sustavima gdje se temperatura mijenja po konstantnoj stopi postavljanje odaziva izaziva puno veću pogrešku. Glavna pogreška je lag pogreška što je proporcionalna vremenskoj konstanti i stopi promjene temperature kupke.

$$\text{lag pogreška} = -\tau_0 \times \text{stopa promjene temperature}$$

5. POSTAVLJANJE TERMOMETRA U CIJEVI

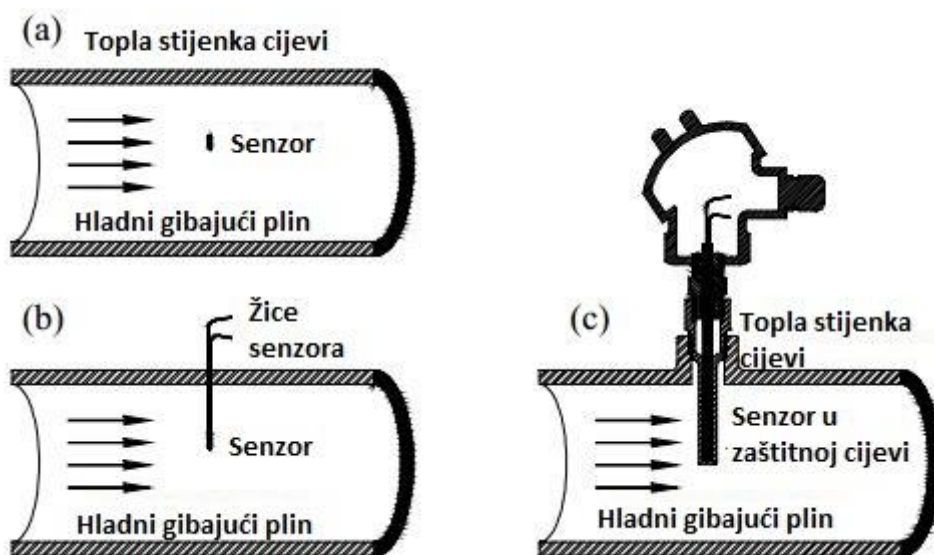
Za ispravno mjerenje temperature plina u gibanju, senzor mora biti u kontaktu s plinom ali ne smije poremetiti temperaturu plina. Senzor se postavlja tako da se zavari na cijevi. Na senzor temperature se postavlja zaštitna cijev koja mora omogućiti toplinski kontakt između mjerenog plina i termometra. Zaštitna cijev senzora termometra manjeg toplinskog otpora omogućiti će veću točnost termometra. Također postavljanje maziva između termometra i zaštitne cijevi za bolje provođenje topline i smanjiti pogrešku provođenja i vremena odaziva.



Slika 6. Tipično postavljanje senzora uključujući zaštitnu cijev i zaštitnu glavu

Da bi se senzor približio temperaturi plina u gibanju mora postojati toplinski spoj između plina i senzora. Da bi se ostvario prijenos topline mora postojati temperaturna razlika između senzora i plina. Gdje ne postoji prijenos topline, tada prevladava toplinska ravnoteža između senzora i plina i senzor će imati istu temperaturu kao i plin te neće postojati nikakva pogreška uslijed mjerenja temperature.

U stvarnosti temperature senzora neće biti ista kao i temperatura plina. Pogreške provođenjem se pojavljuju kada postoji temperaturna razlika između plina u gibanju i stijenke cijevi. Povećanjem temperaturne razlike pogreška zračenjem se također povećava.



Slika 7. Prikaz 3 vrste postavljanja senzora

- a) Senzor u gibajućem fluidu bez provođenja toplote
- b) Provođenje toplote kroz žice senzora
- c) Provođenje toplote kroz zaštitnu cijev, zaštitnu glavu i žice senzora

U slučaju (a) ne postoji pogreška provođenjem zato jer ne postoji držač senzora kroz koji bi se provodila toplina.

U slučaju (b) senzorske žice su dodane što stvara put provođenju između tople stijenke cijevi kroz žice do senzora što uzrokuje promjenu temperature senzora i rezultira pogreškom provođenja.

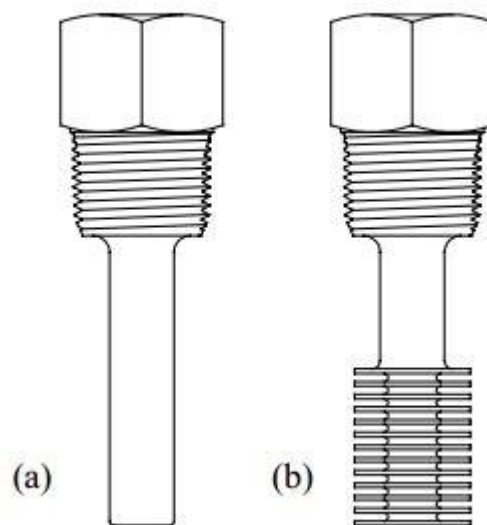
U slučaju (c) zaštitna cijev, zaštitna glava i senzorske žice su dodane senzoru. To značajno povećava poprečni presjek što uzrokuje povećanim provođenjem toplote. Povećana površina senzora sa svim dodacima uzrokuje veću izmjenu toplote nego u prethodnom slučaju. To uzrokuje veću pogrešku provođenjem nego u prethodnom slučaju.

Metoda koja se često koristi kako bi se smanjilo pogreška provođenjem je da se poveća duljina urona senzora. Minimalno duljina urona mora biti 10 puta veći nego promjer zaštitne cijevi.

Smanjenje promjera zaštitne cijevi da bi se smanjila pogreška provođenjem nije praktično kod visokih tlakova, visokih brzina strujanja zato što čvrstoća cijevi će biti ugrožena jer brzine strujanja dolaze do 30 m/s a tlakovi do 7000 kPa. Smanjenje koeficijenta provođenja će također smanjiti količinu izmjenjene topline između stjenke cijevi i senzora što će doprinjeti smanjenju pogreške.

Negativno je to što će također smanjiti provođenje topline od zaštitne cijevi do senzora smanjujući utjecaj koeficijenta prijenosa topline te također smanjiti vrijeme odaziva.

Moguće je povećati površinu zaštitne cijevi bez da povećamo poprečni presjek. To može biti postignuto umetanjem mreže lamela oko zaštitne cijevi.

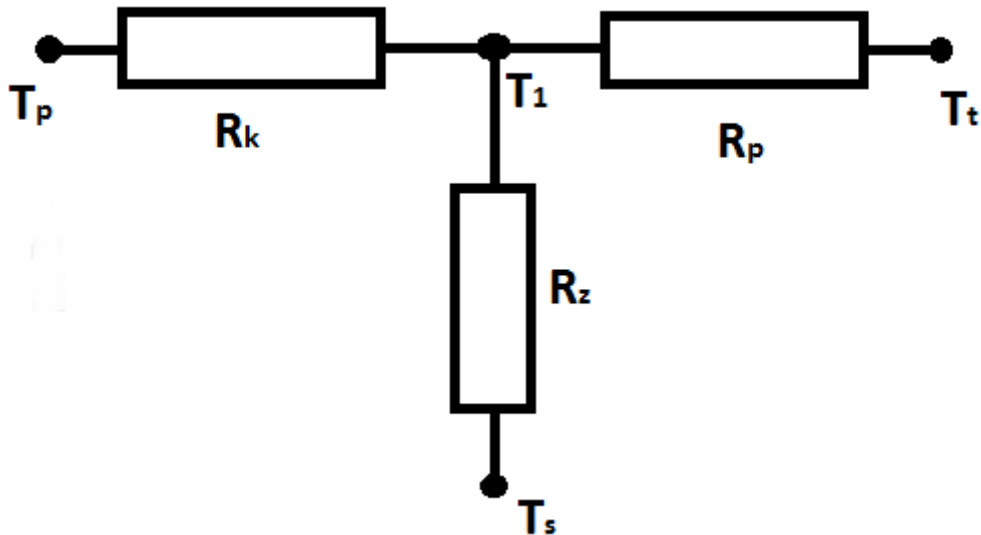


Slika 8. Postavljanje zaštitne cijevi

- a) Zaštitna cijev bez lamela**
- b) Zaštitna cijev s lamelama**

6. PRIJELAZ TOPLINE NA TERMOMETAR

6.1. Shema prijelaza topline



Slika 9. Shema prijelaza topline sa plina i stijenke na termometar

6.2. Otpori provođenja

Furierov stavak

$$q = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n}$$

U cilindričnom koordinatnom sustavu r, ϕ, z diferencijalna jednačba nestacionarnog provođenja topline poprima oblik.

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right)$$

Pretpostavljamo dominantno širenje topline u radialnom smjeru tada se ista transformira u oblik

$$\frac{d^2 \mathcal{G}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathcal{G}}{dr} = 0$$

Dvostrukom integracijom te separacijom varijabli dobivamo

$$\mathcal{G}(r) = C_1 \ln r + C_2$$

Korištenjem gornje jednadžbe i Fourierovog stavka dobivamo

$$q(r) = -\lambda \frac{C_1}{r}$$

Toplinski tok kroz cilindar duljine L uz zapis $dA=2\pi r dL$ dobivamo

$$\phi = \int_A q(A) dA = - \int_{L=0}^L \lambda \frac{C_1}{r} 2r\pi dL = -\lambda 2\pi L C_1$$

U uvrstimo rubne uvijete $r=R_1$, $r=R_2$, $\mathcal{G}=\mathcal{G}_p$, $\mathcal{G}=\mathcal{G}_t$

$$\mathcal{G}_p(r) = C_1 \ln R_1 + C_2$$

$$\mathcal{G}_t(r) = C_1 \ln R_2 + C_2$$

Iz koje se dobije

$$C_1 = \frac{\mathcal{G}_p - \mathcal{G}_t}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

Uvrštavanjem konstante C_1 u jednadžbu dobivamo

$$\phi = \frac{(\mathcal{G}_p - \mathcal{G}_t)}{\frac{1}{2\pi L \lambda} \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad 4$$

Mozemo napisati i u obliku

$$\phi = \frac{(\mathcal{G}_p - \mathcal{G}_t)}{\frac{1}{2\pi L\lambda} \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

Nazivnik predstavlja toplinski otpor

$$R_t = \frac{1}{2\pi L\lambda} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

6.3. Otpori konvekcije

Gibanje tekućine može biti uzrokovano na dva načina

- a) Prisilnom konvekcijom
- b) Prirodnom konvekcijom

Tu ćemo se baviti prisilnom konvekcijom.

Reynoldsov broj - je bezdimenzionalna veličina koji daje mjeru omjera inercijskih sila prema viskoznim silama

$$Re = \frac{wd}{\nu}$$

Za laminarno strujanje zraka kroz cijev $Re < 3000$

Pecletova značajka

$$Pe = \frac{wd}{a}$$

Nusseltov broj je

$$Nu = 1,86 \left(Pe \frac{d}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_o}{\mu_s} \right)^{0,14}$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$$

Međusobnim izjednačavanjem jednačbi dobivamo koeficijent prelaza topline u laminarnom strujanju

$$\alpha_{kL} = \frac{\lambda}{d} 1,86 \left(Pe \frac{d}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_o}{\mu_s} \right)^{0,14} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Za turbulentno strujanje zraka kroz cijev $Re > 3000$

Prandtlova značajka

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$$

Nusseltov broj je

$$Nu = \frac{0,0398 \cdot Pr \cdot Re^{0,75}}{1 + 1,74 \cdot Re^{-0,125} (Pr - 1)}$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$$

Međusobnom izjednačavanjem jednačbi dolazimo do koeficijenta prijelaza topline konvekcijom u turbulentnom strujanju.

$$\alpha_{kT} = \frac{\lambda}{d} \frac{0,0398 \cdot Pr \cdot Re^{0,75}}{1 + 1,74 \cdot Re^{-0,125} (Pr - 1)} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Prijenos topline konvekcijom između plina i termometra

$$\phi = \alpha_k A (\mathcal{G}_0 - \mathcal{G}_t) [W]$$

Tako da otpor konvekcije možemo izraziti

$$R_k = \frac{1}{\alpha_k A} \left[\frac{W}{K} \right]$$

6.4. Otpori zračenja

Prikazan je model zračenja između dvije paralelne plohe. Izraz za toplinski tok ima oblik:

$$\phi_{12} = K_1 A_1 e_{12} - K_2 A_2 e_{21}$$

K_1 i K_2 označuju svjetloće površina, dok veličine e_{12} i e_{21} označuju pripadajuće vidne faktore. Sređivanjem jednačbe dolazimo do:

$$\phi_{12} = A_1 e_{12} (K_1 - K_2)$$

Predhodnu jednačbu možemo napisati kao:

$$\phi_{12} = \frac{K_1 - K_2}{R_z}$$

$$R_z = \frac{1}{A_1 e_{12}} \left[\frac{1}{m^2} \right]$$

R_z predstavlja otpor zračenja između potencijala K_1 i K_2 i praktički uzima u obzir međusobni položaj stijenki u prostoru.

7. ISPITIVANJE UTJECAJA ZRAČENJA NA TERMOMETAR U CIJEVI

7.1. Uvod

Zračenje je jedna od najskrivnijih izvora pogreške u mjerenju. Često se griješi u prepoznavanju fizičke veze između zračećeg izvora i termometra i predviđi se da je to izvor pogreške. Pogreške zračenjem su posebni problem u zraku i na površini termometra gdje je toplinski kontakt između promatranog predmeta već veoma slab.

Primjeri problematičnih izvora zračenja uključuju svjetiljke, kotlove, peći, plamen, električne grijače i Sunce. Osobiti česti problem procjeniti gdje je usmjerena užarena svjetiljka kada očitajemo s termometra. Ako moramo upotrebiti svjetiljku tada upotrebljavamo štedljivu flurescetnu svjetiljku koja zrači veoma malo u infracrvenom području spektra.

Zračenje je veoma važno za plin i mjerenje površinske temperature stijenke. Na primjer živin termometar koji je izložen na suncu će pokazati višu temperaturu nego što je stvarna temperatura zraka.

Da bi smanjili pogrešku zračenjem, termometar mora imati nizak emisijski faktor, malen promjer i brzina plina mora biti velika. Daljnje smanjenje pogreške zračenjem može biti postignuto upotrebom ekrana.

Ekran su obično ispolirani metali cilindričnog oblika koji okružuju termometar. Zbog toga što je ekran bliži temperaturi plina termometar vidi ekran kao stjenku i pogreška zračenjem će biti znatno smanjena.

Ekran mora biti napravljen tako da plin dođe u doticaj s termometrom. U nekim primjenama posebno koristeći mnogo ekrana poželjno je imati pumpu ili ventilator koji će usmjeravati plin na termometar s time će poboljšati toplinski kontakt između termometra i plina.

7.2. Utjecaj temperature stjenke na temperaturu termometra

Polazimo od sljedećih pretpostavki.

Pretpostavke:

1. Plin ne sudjeluje u izmjeni topline
2. Nema provođenja topline duž termometra
3. Stacionarno stanje
4. Provođenje kroz stijenu termometra zanemarujemo

Model koji se koristi za prikaz utjecaja zračenja na termometar je strujanje plina kroz cijev. Zrak je uzet kao plin koji struji kroz cijev. Pri tome promjeniti će se temperatura stjenke od -40°C do 160°C te će se pratiti veličinu pogreške izraženu u stupnjevima Celzijusa u odnosu na referentno stanje.

Za referentno stanje uzeto je temperatura termometra $T_p=19,95^{\circ}\text{C}$. Pri izmjeni topline dominantan način izmjene topline je konvekcija. Pri tome bit će prikazano na način da će izmjena topline konvekcijom biti konstantna a izmjena topline zračenjem će se mijenjati u odnosu na temperaturu stjenke cijevi.

Za temperaturu plina pretpostavljena je temperatura $T_p=20^{\circ}\text{C}$.

Temperaturu termometra $T_t=19,95^{\circ}\text{C}$ je pretpostavljena niža za $0,05^{\circ}\text{C}$ od temperature zraka da bit postojala izmjena topline između zraka i plina.

Kako se bude mijenjala temperatura stjenke mijenjati će se i prijelaz topline zračenjem (α_z) shodno tome povećavati će se i ukupni prijelaz topline prema formuli $\alpha_{uk}=\alpha_z+\alpha_k$. Prijelaz topline konvekcijom (α_k) ostati će konstantan.

Pretpostavljam model obuhvaćenog tijela

Površina stijenke cijevi \gg Površine termometra $A_s \gg A_t$

Toplinski tok predan zračenjem:

$$\phi_z = A_t \varepsilon C_c \left(\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_t}{100} \right)^4 \right)$$

Toplinski tok predan konvekcijom:

$$\phi_k = \alpha_k A_t (T_{zraka} - T_t)$$

Ukupni toplinski tok:

$$\phi_{uk} = \phi_k + \phi_z$$

Pretpostavljeno je turbulento strujanje tekućine kroz cijev.

$$Nu = \frac{0,0398 * Pr * Re^{0,75}}{1 + 1,74 * Re^{-0,125} * (Pr - 1)}$$

$$\alpha_k = \frac{Nu * \lambda}{d}$$

Prijelaz topline zračenjem:

$$\alpha_z = \frac{C_c \left(\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_t}{100} \right)^4 \right)}{T_s - T_{zraka}}$$

Ukupni prijelaz topline:

$$\alpha_{uk} = \alpha_k + \alpha_z$$

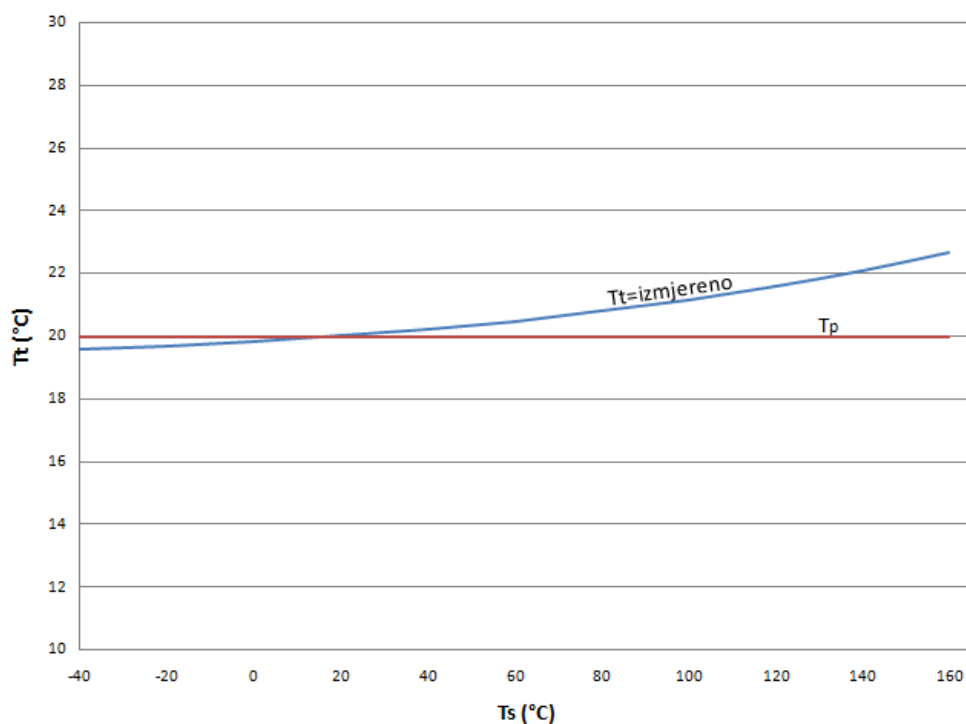
Ukupni izmjenjeni toplinski tok:

$$\phi_{uk} = \alpha_{uk} A_t (T_{t1} - T_{zraka})$$

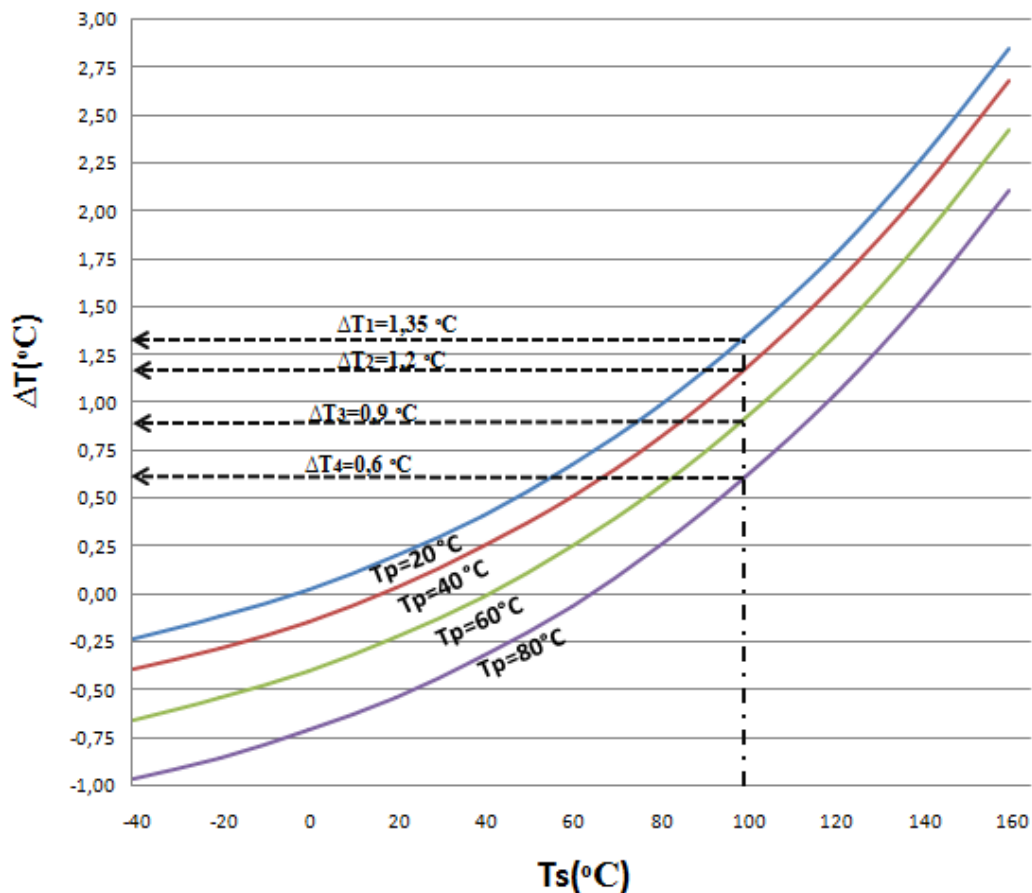
$$T_{t1} = T_{zraka} + \frac{\phi_{uk}}{\alpha_{uk} A_t}$$

$T_p(^{\circ}\text{C})$	$T_s(^{\circ}\text{C})$	$T_s(\text{K})$	$\phi_z(\text{W})$	$\phi_{uk}(\text{W})$	$\alpha_z(\text{W}/\text{m}^2\text{K})$	$\alpha_{uk}(\text{W}/\text{m}^2\text{K})$	$T_{t1}(\text{K})$	$T_{t1}(^{\circ}\text{C})$
19,95	-40	233,15	-0,17	-0,15	1,67	235,35	292,72	19,57
19,95	-20	253,15	-0,12	-0,10	1,86	235,53	292,83	19,68
19,95	0	273,15	-0,07	-0,05	2,06	235,73	292,98	19,83
19,95	20	293,15	0,00	0,02	0,00	233,67	293,15	20,00
19,95	40	313,15	0,08	0,10	2,54	236,21	293,36	20,21
19,95	60	333,15	0,18	0,20	2,80	236,47	293,62	20,47
19,95	80	353,15	0,31	0,32	3,09	236,76	293,93	20,78
19,95	100	373,15	0,45	0,47	3,40	237,08	294,30	21,15
19,95	120	393,15	0,62	0,64	3,74	237,42	294,73	21,58
19,95	140	413,15	0,81	0,83	4,11	237,79	295,23	22,08
19,95	160	433,15	1,04	1,06	4,51	238,18	295,80	22,65

Tablica 1. Prikaz pogreške mjerenja temperature



Slika 10. Prikaz promjene temperature stijenke na temperaturu termometra

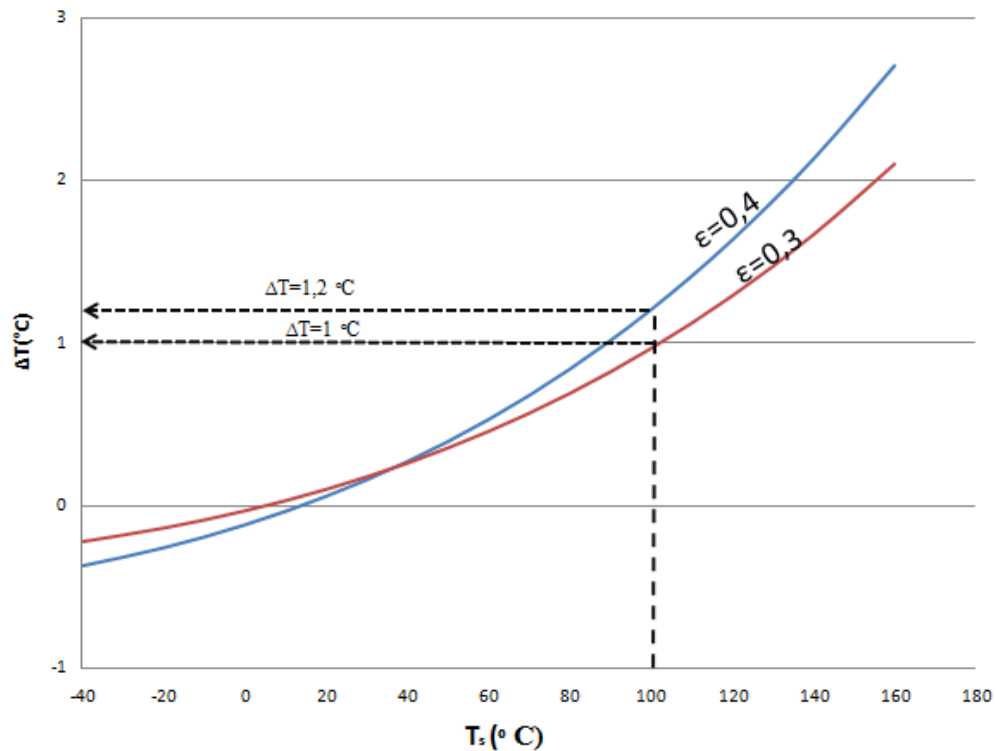


Slika 11. Za različite temperature plina prikaz pogreške mjerenja u funkciji promjene temperature stijenke

Pri temperaturi stijenke od 100°C ako je temperatura plina $T_p = 80^\circ\text{C}$ prikazati će pogrešku mjerenja $\Delta T_4 = 0,6^\circ\text{C}$, pri temperaturi plina od $T_p = 60^\circ\text{C}$ pogreška će biti $\Delta T_3 = 0,9^\circ\text{C}$, pri temperaturi plina $T_p = 40^\circ\text{C}$ pogreška je $\Delta T_2 = 1,2^\circ\text{C}$, pri temperaturi plina $T_p = 20^\circ\text{C}$ pogreška je $\Delta T_1 = 1,35^\circ\text{C}$.

Pri temperaturi plina od $T_p = 80^\circ\text{C}$ pogreška će biti najmanja iz razloga što je tada temperatura plina najbliža temperaturi stijenke. Daljnjim povećanjem temperature stijenke povećavati će se i pogreška mjerenja. Jedan od načina za smanjenje pogreške je postavljanje ekrana oko termometra.

7.3. Utjecaj emisijskog faktora



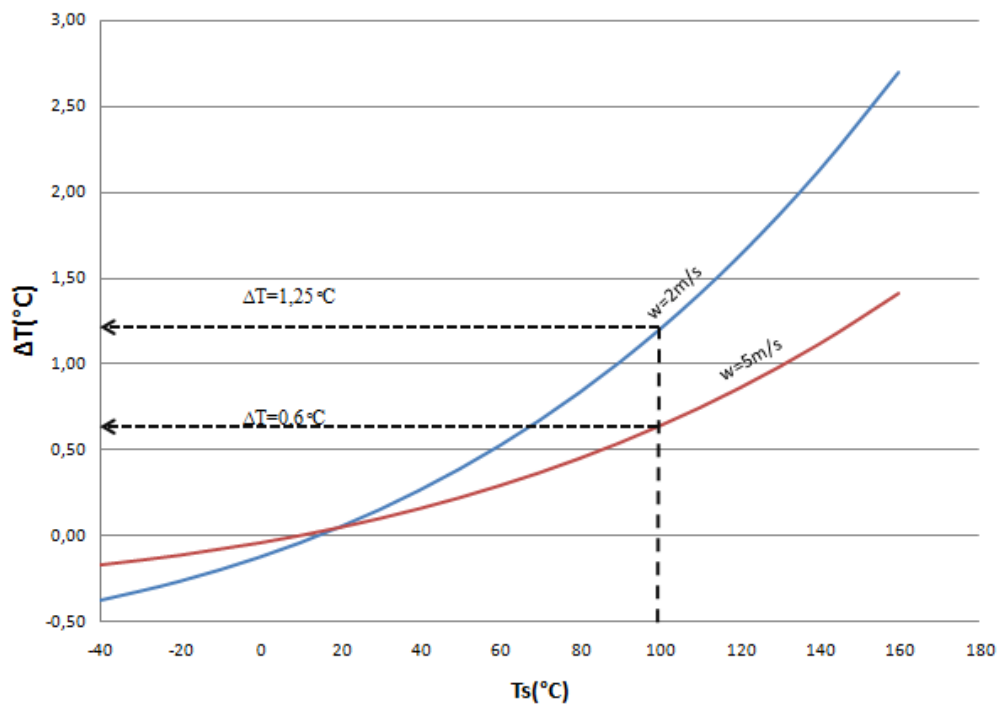
Slika 12. Prikaz utjecaja emisijskog faktora termometra

Proračun proveden prema gornjim jednadžbama gdje su uzeta su dva slučaja

- $\epsilon = 0,4$
- $\epsilon = 0,3$

Iz dijagrama se jasno vidi da pri temperaturi stjenke od $T_s = 100$ °C termometar s manjim emisijskim faktorom će prikazati manju pogrešku. U ovom slučaju smanjenjem emisijskog faktora s 0,4 na vrijednost 0,3 pogreška će biti smanjena za 0,2 °C.

7.4. Utjecaj brzine strujanja plina



Slika 13. Prikaz utjecaja brzine strujanja plina

U gornjem dijagramu prikazano je utjecaj brzine strujanja plina na pogrešku mjerenja. Iz dijagrama se jasno vidi da povećanjem brzine strujanja s $w=2\text{ m/s}$ na brzinu od $w=5\text{ m/s}$ pri temperaturi stjenke od $T_s=100\text{ °C}$ smanjuje se pogreška mjerenja za $0,65\text{ °C}$. Razlog tome je što će pri brzini strujanja plina od 5 m/s biti veći utjecaj prijelaza topline konvekcijom od prijelaza topline zračenjem i temperatura termometra će biti bliža temperaturi plina.

7.5. Prikaz utjecaja postavljanja ekrana oko termometra

Temperature plina:

- $19,95\text{ °C}$
- $39,95\text{ °C}$
- $59,95\text{ °C}$
- $79,95\text{ °C}$

Svaki proračun referentne temperature termometra će prikazati različitu pogrešku te biti prikazane u zajedničkom dijagramu.

Također ispitan je utjecaj postavljanja ekrana koji će smanjiti utjecaj zračenja stjenke cilindra na termometar te će i ujedno termometar prikazati manju pogrešku. Provođenje kroz međustjenku možemo zanemariti $\delta \ll$.

Model obuhvaćenog tijela s umetnutom međustjenkom

$$\phi_{1m} = \phi_{2m} = \phi'$$

A'-površina međustjenke

A_t-površina termometra

$$A' > A_t$$

ϕ_{1m} - prijelaz topline zračenjem od međustjenke do termometra

ϕ_{2m} - prijelaz topline zračenjem od međustjenke do stjenke cijevi

$$\phi_{1m} = \frac{A_t C_c}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \omega \left(\frac{1}{\varepsilon'} - 1 \right)} \left(\left(\frac{T'}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_t}{100} \right)^4 \right)$$

$$\omega = \frac{A_t}{A'}$$

Za zračenje od stjenke cijevi do međustjenke pretpostavljeno je kao i u prvom slučaju zračenje tijela u teorijski beskonačni prostor

$A_s \gg A'$

$$\phi' = A' \varepsilon C_c \left(\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T'}{100} \right)^4 \right)$$

Za izračunavanje temperature stjenke izjednačeno je $\phi_{1m} = \phi'$

pa se dobiva:

$$\left(\frac{T'}{100}\right)^4 = \frac{\frac{A_t C_c}{\frac{1}{\varepsilon_t} + \omega \left(\frac{1}{\varepsilon'} - 1\right)} \left(\frac{T_t}{100}\right)^4 + A' \varepsilon' \left(\frac{T_s}{100}\right)^4}{\frac{A_t C_c}{\frac{1}{\varepsilon_t} + \omega \left(\frac{1}{\varepsilon'} - 1\right)} + A' C_c \varepsilon'}$$

Ostatak proračuna je jednak prethodnom samo što je umjesto temperature stjenke uzeta temperatura međustjenke. Temperatura međustjenke se mijenja ovisno o promjeni temperature stjenke. Izmjena topline konvekcijom u ovom slučaju ostaje ista kao i u prethodnom slučaju bez ekrana.

Toplinski tok od međustjenke do termometra:

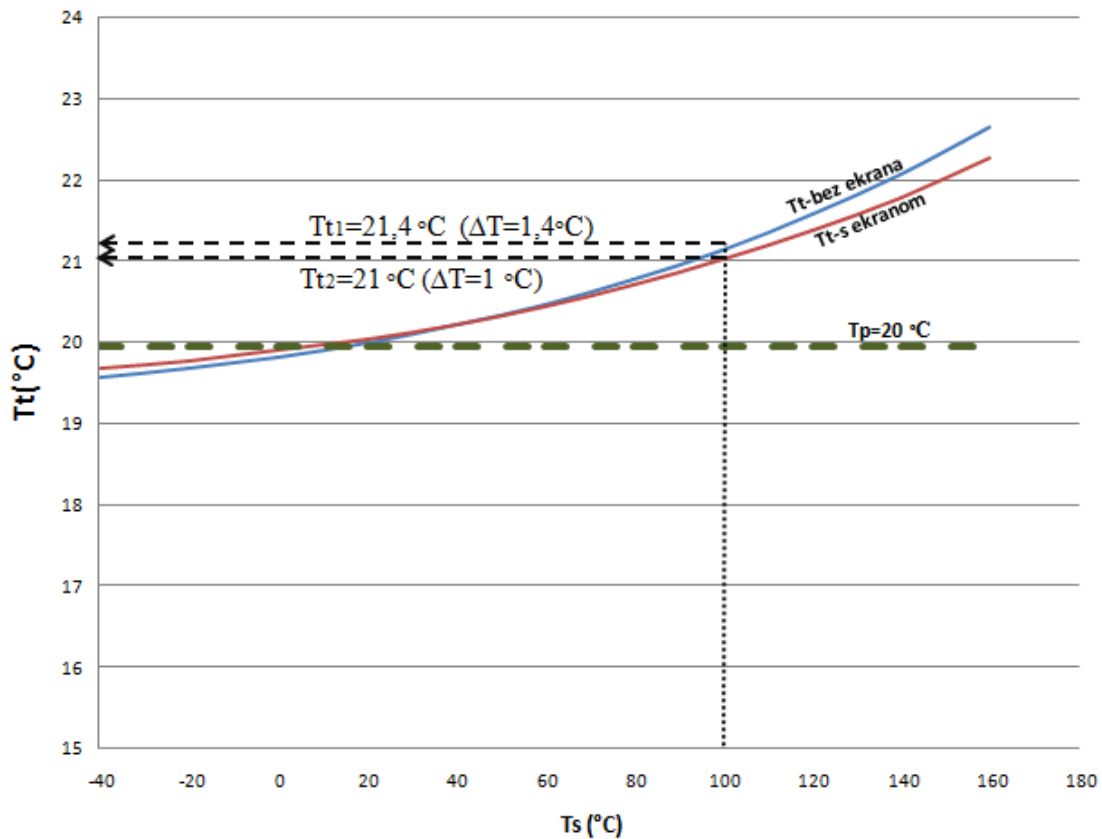
$$\phi_z = A_t \varepsilon C_c \left(\left(\frac{T'}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_t}{100}\right)^4 \right)$$

Koeficijent zračenja:

$$\alpha_z = \frac{C_c \left(\left(\frac{T'}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_t}{100}\right)^4 \right)}{T' - T_{zraka}}$$

Temperatura termometra okruženog ekranom:

$$T_{t1} = T_{zraka} + \frac{\phi_{uk}}{\alpha_{uk} A_t}$$



Slika 14. Prikaz utjecaja postavljanja ekrana

Proračun je proveden prema gornjim jednadžbama i dobiven je dijagram utjecaja postavljanja ekrana.

Za emisijski faktor termometra ϵ_t i međustjenke ϵ_m uzeta je vrijednost 0,4. Na dijagramu se jasno vidi da postavljanjem ekrana oko termometra pri temperaturi stjenke $T_s = 100$ °C smanjuje se pogreška mjerenja za 0,4 °C. Pri većim temperaturama stjenke povećavati će se i razlika pogreške između termometra s ekranom i bez ekrana.

8. ZAKLJUČAK

Na početku istraživanja bilo je teško utvrditi koje sve veličine utječu na pogrešku mjerenja. Potrebno je bilo dosta proučavanja knjiga te zapisivanja. Potrebno je bilo odabrati odgovarajući dijagram koji će jasno pokazati promjenu pogreške termometra mjerenja u ovisnosti o temperaturi stjenke. Pogreška termometara u cijevi ovisi o više parametara primjerice: brzini strujanja, emisijskom faktoru, termometar s ekranom ili bez njega. Ako je temperatura stjenke slična temperaturi plina utjecaj zračenja će biti zanemariv.

9. LITERATURA

- [1] J.V. Nicholas, D.R. White: *Traceable Temperature. An Introduction to Temperature Measurement and Calibration*, Second Edition, 2001.
- [2] Antun Galović: *Termodinamika 1*, Zagreb 2002.
- [3] DKD: *Calibration of Climatic Chambers*, Edition 07/2004; English translation 02/2009.
- [4] Kevin J. Cessac: *reducing Thermowell Conduction Errors in Gas Pipeline Temperature Measurement*.
- [5] Robert P. Benedict P.E; *Fundamentals of temperature, Pressure, and Flow Measurement*.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija