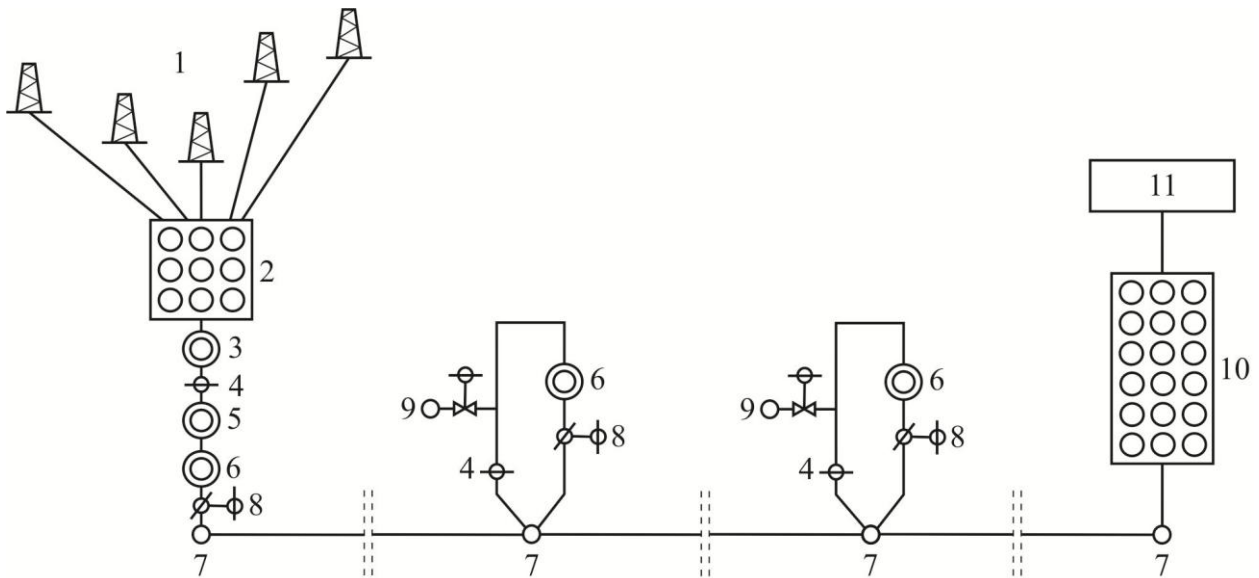


## 3. NAFTOVODI

### 3.1 Opis naftovoda

**Sirova nafta** je višefazno-višekomponentna mešavina različitih ugljovodonika, vode, gasa i čvrstih čestica. Svojstva sirove nafte zavise od masenog učešća pojedinih faza i komponenata u mešavini.

Na slici 3.1 šematski je prikazan naftovod. Iz više bušotina (1) sa naftnih polja sirova nafta se transportuje cevovodima do sabirnih stanica (2). U sabirnim stanicama se vrši prečišćavanje sirove nafte. Prečišćena sirova nafta se iz više sabirnih stanica transportuje magistralnim cevovodom do otpremne stanice koja se sastoji od: glavne pumpne stanice (3), filtera (4), mernih uređaja (5) i pomoćne pumpne stanice (6). Sirova nafta se dalje transportuje magistralnim naftovodom duž kojeg se nalaze uređaji za uvođenje i izvlačenje čistača cevovoda (7), kao i pomoćne stanice u kojima se vrši povišenje pritiska i zagrevanje nafte, a koje se sastoje od: pomoćne pumpne stanice (6), filtera (4), regulatora pritiska (8) i uređaja za ublažavanje hidrauličkih udara (9). Sirova nafta dolazi do prijemnih stanica sa rezervoarima (10), a zatim se cevovodima transportuje do rafinerija (11).



Slika 3.1. Šematski prikaz naftovoda

**Bušotine** mogu da budu:

- fontanske;
- gas-liftne i
- pumpne.

**Fontanske bušotine** su one kod kojih je pritisak nafte u bušotini dovoljan da izbacii naftu na površinu zemlje i obavi transport nafte do rezervoara koji se nalaze u okviru sabirnih stanica.

**Gas-liftna bušotina** su one kod kojih pritisak nafte u bušotini nije dovoljan da izbacila na površinu zemlje. Usled toga se na određenoj dubini ubrizgava gas pod pritiskom koji strujanjem vertikalno na gore potiskuje sirovu naftu tako da nafta izlazi na površinu zemlje.

**Pumpne bušotine** (slika 3.2) su one kod kojih pored nedovoljnog pritiska bušotina da izbacila naftu na površinu zemlje, bušotina ima i malu izdašnost. Tada se koriste polužno-klipne pumpe sa tegovima.

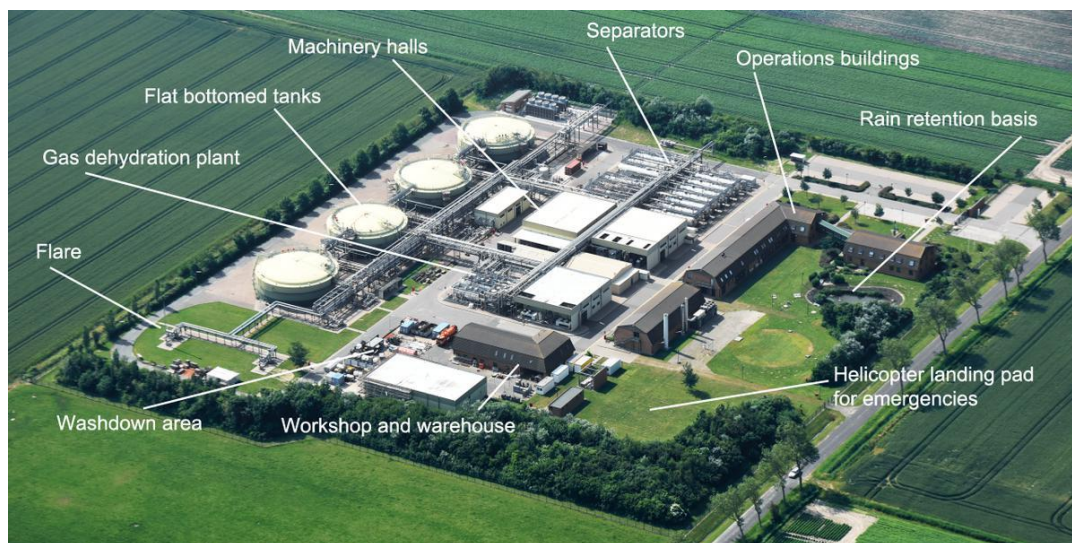
Fontanske bušotine vremenom postaju gas-liftna i pumpne jer vremenom se smanjuju pritisak i izdašnost bušotina.



Slika 3.2. Izgled pumpne bušotina

**Sabirni cevovodi** imaju zadatak da sirovu naftu iz bušotina transportuju do sabirne stanice. Sabirni cevovodi se izrađuju od čelika. Prečnik sabirnog cevovoda zavisi od izdašnosti bušotina i kreće se od 100 do 150 mm, mada može da bude i veći.

U **sabirnim stanicama** (slika 3.3) se obavlja prečišćavanje sirove nafte. Izdvajaju se gasovi, voda i čvrste čestice.



Slika 3.3. Izgled naftne sabirne stanice

Proces izdvajanja gasa iz sirove nafte može da počne i u samim sabirnim cevovodima na određenom pritisku i temperaturi mešavine. U sabirnim stanicama se uređajima za izdvajanje gasa izdvaja se gas iz sirove nafte. Zatim se iz dobijenog gasa izdvajaju butan i propan, ugljen-dioksid i sumpor.

Nakon izdvajanja gasa iz sirove nafte u rezervoarima se odstranjuju voda i čvrste čestice. Voda i čvrste čestice su teže od sirove nafte pa nakon nekoliko časova mirovanja voda i čvrste čestice padaju na dno rezervoara u vidu mulja. Ovaj proces izdvajanja mulja može da se intenzivira zagrevanjem sirove nafte i dodavanjem kalcijum-hlorida. Prečišćena nafta se prepumpava u čiste rezervoare, a zatim se voda i čvrste čestice odvodnim kanalima transportuju do mesta gde se vrši prerada vode.

Pre transporta do otpremne stanice iz sirove nafte se izdvaja sumpor.

Namena **otpreme pumpne stanice** je višestruka. U otpremnoj pumpnoj stanici (*slika 3.4*) se:

- rezervoarskim prostorom prihvata sirova nafta sa sabirnih stanica;
- podiže pritisak sirovoj nafti;
- prečišćava sirova nafta;
- reguliše pritisak sirove nafte u magistralnom naftovodu i
- vrši merenje fizičkih osobina sirove sirove nafte.



*Slika 3.4. Izgled pumpne stanice*

Usled pada pritiska za vreme transporta, postavljaju se duž naftovoda **pomoćne pumpne stanice** u kojima se povišenjem pritiska sirovoj nafti nadoknađuje izgubljena energija u predhodnoj deonici i obavlja zagrevanje ako je potrebno. Tada su i pomoćne pumpne stanice snabdevene većim rezervoarskim prostorom i uređajima za zagrevanja sirove nafte.

Pomoćne pumpne stanice se obično grade duž trase magistralnog naftovoda u blizini naseljenih mesta, priključaka za elektroenergiju, vodovod i kanalizaciju. Rastojanje između glavne pumpne stanice i prve pomoćne pumpne stanice iznosi od 100 do 150 km, a rastojanje između pomoćnih pumpnih stanica od 50 do 80 km. Ako naftovod mora da bude položen daleko od naseljenih mesta i ako bi zbog toga bilo otežano održavanje pumpnih stanica i uopšte eksploatacija naftovoda, tada se ta rastojanja povećavaju na 200 km između glavne i prve pomoćne pumpne stanice, odnosno do 100 km između sledećih pumpnih stanica.

**Magistralni naftovodi** su cevovodi kroz koje se transportuje (*slika 3.5*):

- prečišćena nafta od otpremnih stanica na naftonosnim poljima do rafinerija ili utovarnih stanica radi punjenja pokretnih prevoznih sredstava;
- prečišćena nafta od istovarnih stanica u rečnim i morskim pristaništima do rafinerija kada se sirova nafta doprema tankerima i
- derivati nafte sirove nafte od rafinerije do velikih potrošača ili do utovarnih stanica kada se njihov transport predviđa pokretnim prevoznim sredstvima.

Prečnik magistralnih naftovoda je iznad 500 mm, dužina preko 50 km, a pritisak transportovane nafte na početku cevovoda od 50 do 65 bar i više.



*Slika 3.5. Izgled nadzemnog naftovoda*

U sastavu rafinerija, kada se kroz naftovod transportuje sirova nafta, ili u krugu potrošačkih centara, ako se kroz naftovod transportuju produkti sirove nafte, nalaze se **prihvatne stanice** sa dovoljnim rezervoarskim prostorom (*slika 3.6*). Kada se jednim naftovodom predviđa snabdevanje više rafinerija, ili snabdevanje većeg broja potrošača produktima sirove nafte, onda je takav naftovod opremljen odvodnim cevovodima, uređajima za merenje isporučenih količina i uređajima za daljinsko upravljanje. Isto je i u slučaju kada se na nekom mestu naftovoda odvodi nafta za utovarnu stanicu radi punjenja vagon cisterni, auto-cisterni ili tankera.



*Slika 3.6. Izgleda rezervoarskog prostora*

Magistarni naftovodi se najčešće ukopavaju u zemlju na dubini od 0,8 do 1,1 m mereno od površine zemlje do gornje ivice cevovoda. Dubina ukopavanja zavisi od kategorije naftovoda i širine zaštitnih pojaseva naseljenih mesta, objekata u blizini cevovoda itd. Dubina ukopavanja se povećava na 1 do 1,35 m kada se pri polaganju naftovoda moraju da savladaju razne prepreke: vodeni tokovi, putevi, željezničke pruge itd. Dubina se tada meri od dna vodenog toka, odnosno od gornje ivice puta, pruge itd. Nekad se magistralni naftovodi polažu iznad zemlje na betonskim stubovima visine od 0,5 do 0,75 m. Postoje i drugi načini polaganja magistralnih naftovoda: ispod mora i jezera na raznim dubinama, iznad močvarnih terena itd.

Na svakih 10 do 15 km duž trase naftovoda postavljaju se ventili radi sprečavanja većih gubitaka nafte ako iz bilo kojih razloga dođe do pucanja cevovoda. Oštećeno mesto se blokira ventilima između kojih se ono nalazi. Na rastojanjima duž trase od 15 do 20 km gradi se i kuća pazitelja naftovoda, u kojoj se nalazi i priručna radionica sa najnužnijim alatom za otklanjanje manjih kvarova na cevovodu.

Sirove nafte koje su veoma viskozne (teške sirove nafte) moraju da se zagreju pre uvođenja u cevovod. To se obavlja u glavnim i pomoćnim pumpnim stanicama koje su tada opremljene i kotlarnicama. Kotlovi se obično lože samom naftom koja se transportuje, a kao grejni fluid koristi se vrela voda ili pregrejana para.

Naftovodi kao i ostali cevovodi kroz koje se transportuju energetske fluidi moraju da budu opremljeni protivpožarnim uređajima. Pogonski motori moraju da budu zaštićeni od eksplozije i smešteni su u posebnim odeljenjima, naročito kada su u pitanju benzinski i dizel motori, ili kad se za pogon koriste motori koji troše gas kao pogonsko gorivo.

Za čišćenje cevovoda koristi se čistač cevovoda (*slika 3.7*). Čistač cevovoda se preko čistačkih stanica uvlači u cevovod. Kretajući se kroz cevovod on skida naslage sa zida cevi.



*Slika 3.7. Izgled čistača cevovoda*

### 3.2 Hidraulički proračun naftovoda pri izotermnom strujanju

Kada je temperatura transportovane sirovine konstantna duž strujanja kaže se da je strujanje **izotermno**. Naravno, temperatura ne može da bude konstantna duž strujanja, ali onda kada je promena temperature neznatna, može da se pretpostavi izotermno strujanje transportovane sirovine.

Strujanje transportovane sirovine može da se posmatra kao izotermno samo u slučaju kratkih i dobro izolovanih cevovoda bez obzira da li je temperatura transportovane sirovine viša ili niža od temperature okoline.

Pad pritiska usled trenja za slučaj laminarnog režima strujanja ( $Re < 2320$ ) glasi:

$$\Delta p = \frac{128 \cdot \rho \cdot \nu \cdot Q}{\pi \cdot D^4}, \quad (3.1)$$

gde su:

$D$  – unutrašnji prečnik cevovoda [m];

$\rho$  – gustina transportovane sirovine [m];

$\nu$  – kinematska viskoznost transportovane sirovine [ $m^2/s$ ];

$Q$  – zapreminski protok transportovane sirovine [m<sup>3</sup>/s] i

$l$  – dužina cevovoda [m].

Kada se vrednosti Rejnoldsovog broja kreću  $2320 < Re < 4000$  javlja se prelazni nestabilni režim strujanja koji po pravilu treba izbegavati. Za hidraulički glatke cevi koristi se obrazac Blazijusa (Balsius) za oblast  $4000 < Re < 100000$ :

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (3.2)$$

tj. izraz za pad pritiska glasi:

$$\Delta p = 0,241 \frac{\rho \cdot \nu^{0,25} \cdot Q^{1,75} \cdot l}{D^{4,75}}, \quad (3.3)$$

koji se dobija iz Darsijevog (Darcy) obrasca korišćenjem izraza za koeficijent trenja za hidraulički glatke cevi. Predhodni izrazi se najviše koriste za određivanje pad pritiska usled trenja pri izotermnom strujanju.

**Primer 3.1:** Odrediti koeficijent prolaza toplote kroz neizoovani naftovod za slučaj da su poznati sledeći podaci: prečnik cevovoda  $D = 250$  mm, dužina deonice cevovoda  $L = 28,3$  km, maseni protok sirove nafte  $\dot{m} = 135$  t/h, temperatura na kraju deonice cevovoda  $t_2 = 20$  °C, srednja gustina nafte  $960$  kg/m<sup>3</sup>, srednja specifična toplota  $c_n = 1885$  J/(kgK), Reynoldsov broj na početku cevovoda  $Re = 2000$ , spoljna temperatura  $t_a = 0$  °C i promena kinematske viskoznosti sa temperaturom  $\nu = \frac{0,25}{t^2}$  m<sup>2</sup>/s .

Iz izraza za maseni protok sirove nafte:

$$\dot{m} = \rho Q = \rho v \frac{D^2 \pi}{4}$$

dolazi se do izraza za određivanje brzine strujanja nafte u cevovodu:

$$v = \frac{4 \dot{m}}{\rho D^2 \pi}$$

Izraz da određivanje Reynoldsovog broja glasi:

$$Re_1 = \frac{vD}{\nu_1}$$

Kombinovanjem izraza za određivanje brzine strujanja, Reynoldsovog broja i promene kinematske viskoznosti sa temperaturom dobija se srednja temperatura po poprečnom preseku na početku deonice cevovoda:

$$t_1 = \sqrt{\frac{0,25 \rho Re_1 D \pi}{4 \dot{m}}} = \sqrt{\frac{0,25 \cdot 960 \cdot 2000 \cdot 0,25 \cdot \pi}{4 \cdot 37,5}}$$

$$t_1 = 50,1 \text{ °C}$$

Iz izraza za određivanje temperature na kraju cevovoda:

$$t_2 = t_a + (t_1 - t_a) e^{-al}$$

određuje se eksponent  $al$ :

$$al = \ln \frac{t_1}{t_2} = \ln \frac{50,1}{20}$$

$$al = 0,918$$

Iz jednačine za određivanje eksponenta  $al$ :

$$al = \frac{kD\pi L}{\dot{m}c_n}$$

dobija se konačan izraz za određivanje koeficijenta prolaza toplote:

$$k = \frac{al \dot{m}c_n}{D\pi L} = \frac{0,918 \cdot 37,5 \cdot 1885}{0,25 \cdot \pi \cdot 28300}$$

$$k = 2,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

**Primer 3.2:** Kroz neizolovani cevovod prečnika  $D = 250$  mm i dužine  $L = 18,3$  km transportuje se 80 t/h sirove nafte čije su karakteristike: srednja gustina  $\rho = 1150$  kg/m<sup>3</sup>, specifična toplota  $c_n = 1885$  J/(kgK) i promena kinematske viskoznosti sa temperaturom  $\nu = \frac{0,2}{t^2}$  m<sup>2</sup>/s. Odrediti temperaturu zagrevanja  $t_1$  ove nafte s obzirom da njena temperatura na kraju cevovoda treba da bude  $t_2 = 25$  °C. Koeficijent prolaza toplote kroz naftovod je  $k = 2,9$  W/(m<sup>2</sup>K). Proveriti da li je strujanje sirove nafte na početku cevovoda laminarno. Smatrati da je temperatura okoline 0 °C.

Iz izraza za određivanje srednje temperature na kraju cevovoda i eksponenta  $al$ :

$$t_2 = t_a + (t_1 - t_a)e^{-al}$$

$$al = \frac{kD\pi L}{\dot{m}c_n}$$

dobija se izraz za određivanj srednje temperature na početku deonice cevovoda:

$$t_1 = t_2 e^{al} = 25e^1$$

$$t_1 = 68 \text{ °C}$$

Potrebno je i utvrditi da li je strujanje sirove nafte na početku deonice cevovoda laminarno. Da bi se odredio režim strujanja potrebno je odrediti Reynoldsov broj na osnovu izraza:

$$Re_1 = \frac{\nu D}{\nu_1}$$



Na osnovu dobijene vrednosti temperature na početku deonice cevovoda izračunava se kinematska vrednost sirove nafte na početku cevovoda:

$$\nu_1 = \frac{0,25}{t_1^2} = \frac{0,25}{68^2}$$

$$\nu = 43,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Iz jednačine kontinuiteta:

$$\dot{m} = \rho Q = \rho v A = \rho v \frac{D^2 \pi}{4}$$

dobija se brzina strujanja sirove nafte kroz cevovod:

$$v = \frac{4 \dot{m}}{\rho D^2 \pi} = \frac{4 \cdot 22,2}{1150 \cdot 0,25^2 \pi}$$

$$v = 0,39 \text{ m/s}$$

Konačno, dolazi se do vrednosti Reynoldsovog broja na početku cevovoda:

$$Re_1 = \frac{vD}{\nu_1} = \frac{0,39 \cdot 0,25}{43,25 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re_1 = 2254$$

Vrednost Reynoldsovog broj na početku cevovoda je manja od 2300, što znači da je strujanje sirove nafte laminarno.

**Primer 3.3:** Kroz horizontalni pravolinijski cevovod prečnika  $D = 80 \text{ mm}$  i dužine  $L = 900 \text{ m}$  pumpa transportuje  $\dot{m} = 20 \text{ t/h}$  bitumena razvijajući nadpritisak  $\Delta p = 24,5 \text{ bar}$ . Koju je temperaturu imao bitumen za vreme transporta, ako je zavisnost njegove viskoznosti i temperature data obrascem  $\nu = \frac{23 \cdot 10^{-6}}{t^6} \text{ m}^2/\text{s}$ ? Strujanje bitumena za vreme transporta bilo je laminarno i izotermno.

Darsijev obrazac glasi:

$$\Delta p = \rho \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2}$$

Jednačine za izračunavanje koeficijenta trenja, Reynoldsovog broja, brzine stujanja i masenog protoka glase :

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

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

$$v = \frac{4Q}{D^2\pi}$$

$$\dot{m} = \rho Q$$

Uvrštavanjem prethodnih izraza u Darsijevu jednačinu, dobije se jednačina za pad pritiska pri laminarnom strujanju:

$$\Delta p = \frac{128\nu \dot{m} L}{D^4\pi}$$

Određuje se kinematska viskoznost bitumena:

$$\nu = \frac{\Delta p \pi D^4}{128 \dot{m} L} = \frac{24,5 \cdot 10^5 \cdot \pi \cdot 0,08^4}{128 \cdot 5,55 \cdot 900}$$

$$\nu = 493 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Iz date zavisnost između viskoznosti i temperature bitumena:

$$\nu = \frac{23 \cdot 10^6}{t^6}$$

određuje se temperatura sirove nafte:

$$t = \sqrt[6]{\frac{23 \cdot 10^6}{\nu}} = \sqrt[6]{\frac{23 \cdot 10^6}{493 \cdot 10^{-6}}}$$

$$t = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 3.3 Zagrevanje sirove nafte

Sirova nafta i njene teže frakcije predstavljaju veoma viskoznan fluid, koji često ne može da se transportuje cevovodima bez predhodnog zagrevanja. Najteže frakcije sirove nafte se čak na temperaturi okoline nalaze u čvrstom stanju. Usled toga su potrebni visoki pritisci da bi se obavio transport sirove nafte cevovodom i na relativno malim rastojanjima.

Porastom temperature sirove nafte dolazi do smanjenja viskoznosti, a samim tim i smanjenja pada pritiska. Ilustracije radi u *tabeli 3.1* je prikazan pad pritiska katranskog ulja pri različitim temperaturama (gustina ulja  $\rho = 970 \text{ kg/m}^3$ , brzina strujanja ulja  $v = 0,9 \text{ m/s}$  i prečnik cevovoda  $D = 300 \text{ mm}$ ).

*Tabela 3.1 Pad pritiska usled trenja pri različitim temperaturama katranskog ulja*

$t$ (°C)	$v$ (m <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>6</sup>	$Re$ (-)	$\Delta p$ (bar/100 m)
30	6900	40	2,14
45	2200	123	0,68
50	1350	200	0,42
70	380	710	0,12

Zagrevanje sirove nafte i njenih težih frakcija može da bude:

- predhodno;
- usputno i
- kombinovano.

**Predhodno zagrevanje** se primenjuje za vreme transporta sirove nafte i njenih težih frakcija sa niskom temperaturom topljenja parafina i smolastih materija. Kod predhodnog zagrevanja uređaji za zagrevanje nalaze se u sastavu pumpnih stanica.

Kada se transport sirove nafte obavlja klipnim pumpama zagrevanje transportovane nafte obavlja se:

- na usisnoj strani pumpe ili
- na usisnoj i potisnoj strani pumpe.

Kada se transport sirove nafte obavlja centrifugalnim pumpama, zagrevanje se izvodi na usisnoj strani kako bi stepen efikasnosti pumpe bio što veći. Centrifugalne pumpe se ispituju vodom na temperaturi okoline. Kada rade sa viskoznom fluidom poput sirove nafte njihov stepen efikasnosti naglo opada. Upravo je to razlog što se zagrevanje sirove nafte kod centrifugalnih pumpi obavlja sa usisne strane, kako bi se viskoznost sirove nafte približila viskoznosti vode.

Temperatura zagrevanja određuje se iz uslova da transportni troškovi budu minimalni. Transportne troškove čine: investicioni, pogonski i režijski troškovi. Kada se radi o već izgrađenim naftovodima, npr cevovodi za istovar sirove nafte iz pokretnih transportnih sredstava, temperatura zagrevanja sirove nafte određuje se iz uslova da pogonski troškovi budu minimalni. U pogonske troškove spadaju: troškovi za pogonsku energiju pumpa i troškovi za uloženu toplotu zagrevanja sirove nafte od temperature okoline do temperature zagrevanja.

Zagrevanjem sirove nafte postiže se viskoznost nafte koja obezbeđuje rad pumpe u projektnoj tački. Temperatura sirove nafte na kraju cevovoda mora da bude viša za 6 do 10 °C od temperature topljenja parafina i smolastih materija koji su sadržani u sirovoj nafti.

**Usputno zagrevanje** obavlja se na ukupnoj dužini cevovoda ili samo na njegovim pojedinim delovima. Koristi se kad sirova nafta ima visoku temperaturu topljenja parafina i smolastih materija i kada se transport izvodi sa prekidima.

Usputno zagrevanje se izvodi kao unutrašnje i spoljašnje.

**Unutrašnje zagrevanje** se ređe primenjuje jer je povezano sa većim troškovima otklanjanja kvarova koji nastaju i na cevovodu za transport i na cevovodu za grejni fluid.

**Spoljašnje zagrevanje** realizuje se na dva načina: toplotom grejnog fluida ili elektroenergijom.

Kod zagrevanja cevovoda toplotom grejnog fluida cevovod za transport sirove nafte i grejnog fluida idu jedan pored drugog i zaštićeni su zajedničkom toplotnom izolacijom.

Sirova nafta zagreva se elektroenergijom na dva načina:

- a. cevovodom kao provodnikom i
- b. lokalnim grejačima

Magistralni cevovod je jedan od provodnika koji ujedno može da služi i kao grejač. Kod zagrevanja sirove nafte lokalnim grejačima žičani grejači se postavljaju na odgovarajućim rastojanjima duž cevovoda. Magistralni cevovodi se sa grejačima postavljaju u cev većeg prečnika, a zatim se polažu na odgovarajuću dubinu u zemlju.

### 3.4 Pad temperature duž naftovoda pri stalnom protoku

Kada je temperatura transportovane sirovine viša od temperature okoline, dolazi do razmene toplote sa okolinom i pada temperature transportovane sirovine u smeru njenog kretanja. Količina toplote koja sa transportovane sirovine pređe na cevovod iznosi:

$$Q = \dot{m}c_n(t_1 - t_x), \quad (3.4)$$

gde su:

$\dot{m}$  - maseni protok [kg/s];

$c_n$  - specifična toplota [J/kgK];

$t_1$  – srednja temperatura po preseku na početku cevovoda [°C] i

$t_x$  – srednja temperatura po preseku na rastojanju  $x$  od početka cevovoda [°C].

Količina toplote koja sa transportovane sirovine pređe na cevovod jednaka je količini toplote koja prođe kroz cevovod na istoj dužini:

$$Q = kD_m \pi x \Delta t_{mx}, \quad (3.5)$$

gde su:

$k$  – koeficijent prolaza toplote kroz cevovod [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ];

$D_m$  – srednji prečnik cevovoda koji je u opštem slučaju i izolovan [m] i

$\Delta t_{mx}$  – srednja logaritamska razlika temperatura u odnosu na dužinu  $x$  [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Srednja logaritamska razlika temperatura u odnosu na dužinu cevovoda  $x$  glasi:

$$\Delta t_{mx} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_x}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_x}} = \frac{t_1 - t_x}{\ln \frac{t_1 - t_a}{t_x - t_a}}, \quad (3.6)$$

gde je:

$t_a$  – temperatura okoline [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Kombinovanjem predhodne tri jednačine određuje se srednja temperatura po preseku na rastojanju  $x$  od početka cevovoda:

$$t_x = t_a + (t_1 - t_a) e^{-ax}, \quad (3.7)$$

gde je:

$$ax = \frac{kD_m \pi x}{\dot{m}c_n}. \quad (3.8)$$

**Primer 3.4:** Kroz horizontalni neizolovani cevovod prečnika  $D = 75$  mm i dužine  $L = 550$  m transportuje se sirova nafta iz vagon-cisterne do rezervoara u rafineriji. Za pražnjenje cisterne služi zupčasta pumpa protoka  $Q = 20$   $\text{m}^3/\text{h}$  i nadpritiska  $\Delta p = 24,5$  bar. Srednja gustina nafte iznosi  $1050$   $\text{kg}/\text{m}^3$ , a viskoznost joj se menja sa temperaturom po zakonu  $\nu = \frac{200}{t^3}$   $\text{m}^2/\text{s}$ . Treba izračunati:

- temperaturu  $t_1$  na koju se treba zagrejati ova nafta da bi se ostvario predviđeni kapacitet transporta. Pretpostaviti da je strujanje laminarno i izotermno. Lokalne otpore zanemariti.
- pad temperature u cevovodu pod pretpostavkom da je koeficijent prolaza toplote kroz cevovod  $k = 2,9$   $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  i da je srednja specifična toplota nafte  $c_n = 2094$   $\text{J}/(\text{kgK})$ .

a) Darsijev obrazac glasi:

$$\Delta p = \rho \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2}$$

Jednačine za izračunavanje koeficijenta trenja, Reynoldsovog broja, brzine stujanja i masenog protoka glase:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

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

$$v = \frac{4Q}{D^2\pi}$$

Uvrštavanjem prethodnih izraza u Darsijevu jednačinu, dobije se jednačina za pad pritiska pri laminarnom strujanju:

$$\Delta p = \frac{128\nu_1\rho QL}{D^4\pi}$$

Određuje se kinematska viskoznost sirove nafte:

$$\nu_1 = \frac{\Delta p \pi D^4}{128 \rho QL} = \frac{24,5 \cdot 10^5 \cdot \pi \cdot 0,075^4}{128 \cdot 1050 \cdot 0,0056 \cdot 550}$$

$$\nu_1 = 599 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Iz date zavisnost između viskoznosti i temperature bitumena određuje se temperatura:

$$\nu_1 = \frac{200}{t_1^3}$$

$$t_1 = \sqrt[3]{\frac{200}{\nu_1}} = \sqrt[3]{\frac{200}{599 \cdot 10^{-6}}}$$

$$t_1 = 69,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

b) Temperatura na kraju cevovoda iznosi:

$$t_2 = t_a + (t_1 - t_a)e^{-al}$$

Ako se usvoji da je temperatura okoline  $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura na kraju cevovoda iznosi:

$$t_2 = t_1 e^{-al}$$

Prema definiciji :

$$al = \frac{kD\pi L}{\dot{m} c_n} = \frac{2,9 \cdot 0,075 \cdot \pi \cdot 550}{5,83 \cdot 2094}$$

$$al = 0,0308$$

Kad se dobijena vrednost za eksponent  $al$  uvrsti u jednačinu za temperaturu, dobija se:

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 69,4 \cdot e^{-0,0308}$$

$$t_2 = 67,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pad temperature u cevovodu iznosi:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 69,4 - 67,3$$

$$\Delta t = 2,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**Primer 3.5.** Kroz neizolovani horizontalni naftovod prečnika  $D = 300$  mm i dužine  $L = 10$  km transportovana je sirova nafta pri konstantnoj temperaturi  $t = 15^\circ\text{C}$ . Strujanje je bilo laminarno i pad pritiska je iznosio  $\Delta p = 9,3$  bar. Da bi se smanjio pad pritiska nafta je zagrevana na temperaturu  $t_1$  koju je trebalo tako odrediti da temperatura nafte na kraju cevovoda bude  $t_2 = 30^\circ\text{C}$ . Ostali potrebni podaci su: koeficijent prolaza toplote  $k = 3,5$  W/(m<sup>2</sup>K), srednja gustina nafte  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>, srednja specifična toplota nafte  $c_n = 1885$  J/(kgK) i viskoznost  $\nu = \frac{0,12}{t^2}$  m<sup>2</sup>/s. Izračunati i vrednost Reynoldsovog broja na početku naftovoda.

Pri konstantnoj temperaturi od  $15^\circ\text{C}$ , viskoznost iznosi:

$$\nu = \frac{0,12}{t^2} = \frac{0,12}{15^2}$$

$$\nu = 533 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Iz Darsijeve jednačine za laminaran režim strujanja:

$$\Delta p = \frac{128 \nu \dot{m} L}{D^4 \pi}$$

određuje se maseni protok nafte:

$$\dot{m} = \frac{\Delta p D^4 \pi}{128 \nu L} = \frac{9,3 \cdot 10^5 \cdot 0,3^4 \cdot \pi}{128 \cdot 533 \cdot 10^{-6} \cdot 10000}$$

$$\dot{m} = 34,7 \text{ kg/s}$$

Temperatura na kraju cevovoda iznosi:

$$t_2 = t_a + (t_1 - t_a) e^{-al}$$

Ako se usvoji da je temperatura okoline  $t_a = 0^\circ\text{C}$ , temperatura na kraju cevovoda iznosi:

$$t_2 = t_1 e^{-al}$$

Odakle sledi da je temperatura na početku cevovoda jednaka:

$$t_1 = t_2 e^{al}$$

Prema definiciji :

$$al = \frac{kD\pi L}{\dot{m} c_n} = \frac{3,5 \cdot 0,3 \cdot \pi \cdot 10000}{34,7 \cdot 1885}$$

$$al = 0,5$$

Kad se dobijena vrednost za eksponent  $aL$  uvrsti u jednačinu za temperaturu, dobija se:

$$t_1 = t_2 e^{al} = 30 \cdot e^{0,5}$$

$$t_1 = 49,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Rejnoldsov broj na početku cevovoda se definiše kao:

$$Re_1 = \frac{\nu D}{\nu}$$

Viskoznost nafte na početku cevovoda iznosi:

$$\nu_1 = \frac{0,12}{t^2} = \frac{0,12}{49,5^2}$$

$$\nu_1 = 49 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$



Brzina strujanja nafte se definiše kao:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{4\dot{m}}{\rho D^2 \pi} = \frac{4 \cdot 34,7}{1000 \cdot 0,3^2 \pi}$$

$$v = 0,49 \text{ m/s}$$

Kada se dobijene vrednosti uvrste u jednačinu za Rejnoldsov broj, dobija se:

$$Re_1 = \frac{vD}{\nu} = \frac{0,49 \cdot 0,3}{49 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re_1 = 3000$$

Ova vrednost Rejnoldsovog broja pokazuje da se zagrevanjem nafte promenio režim strujanja. Na početku cevovoda strujanje je turbulentno i ono zbog pada temperature prelazi u laminarno. Prema veličini Rejnoldsovog broja može se oceniti da je strujanjeturbulentno na nezatnoj dužini naftovoda.

### 3.5 Pad temperature duž naftovoda pri promenjivom protoku

Pad temperature duž naftovoda sa promenljivim protokom javlja se kad se na određenim mestima magistralnog naftovoda odvajaju cevovodi za transport odgovarajućih količina  $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \dots, \dot{m}_{n-1}, \dot{m}_n$  sirove nafte pojedinim rafinerijama.

Nek se ta mesta nalaze na rastojanjima  $l_1, l_2, l_3, \dots, l_{n-1}, l_n$ , *slika 3.8*. Ako su prečnik naftovoda i njegov koeficijent prolaza toplote konstantni, onda se za pojedine deonice pad temperature može odrediti iz sledećih jednačina:

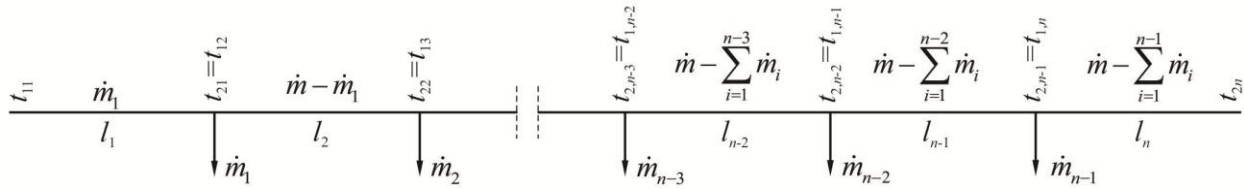
$$\ln \frac{t_{11} - t_a}{t_{21} - t_a} = \frac{kD_m \pi l_1}{c_n \dot{m}}, \quad (3.9)$$

$$\ln \frac{t_{12} - t_a}{t_{22} - t_a} = \frac{kD_m \pi l_2}{c_n (\dot{m} - \dot{m}_1)}, \quad (3.10)$$

$$\ln \frac{t_{13} - t_a}{t_{23} - t_a} = \frac{kD_m \pi l_3}{c_n (\dot{m} - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2))}, \quad (3.11)$$

$$\dots\dots\dots (3.12)$$

$$\ln \frac{t_{1n} - t_a}{t_{2n} - t_a} = \frac{kD_m \pi}{c_n} \frac{l_n}{\dot{m} - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dots + \dot{m}_{n-1})}. \quad (3.13)$$



Slika 3.8. Šematski prikaz naftovoda sa promenljivim protokom

Sabiranjem predhodnih jednačina dobija se pad temperature duž celog naftovoda pri promenljivom protoku:

$$\ln \frac{t_{11} - t_a}{t_{2n} - t_a} = \frac{kD_m \pi}{c_n} \left( \frac{l_1}{\dot{m}} + \frac{l_2}{\dot{m} - \dot{m}_1} + \dots + \frac{l_n}{\dot{m} - \sum_{i=1}^{n-1} \dot{m}_i} \right). \quad (3.14)$$

### 3.6 Određivanje koeficijenta prolaza toplote kroz naftovod

Koeficijent prolaza toplote kroz naftovod zavisi od režima strujanja, fizičkih svojstava transportovane sirovine, geološkog sastava terena kroz koji prolazi naftovod i od vrste i kvaliteta izolacije. Koeficijent prolaza toplote kroz naftovod određuje se iz jednačine (slika 3.9):

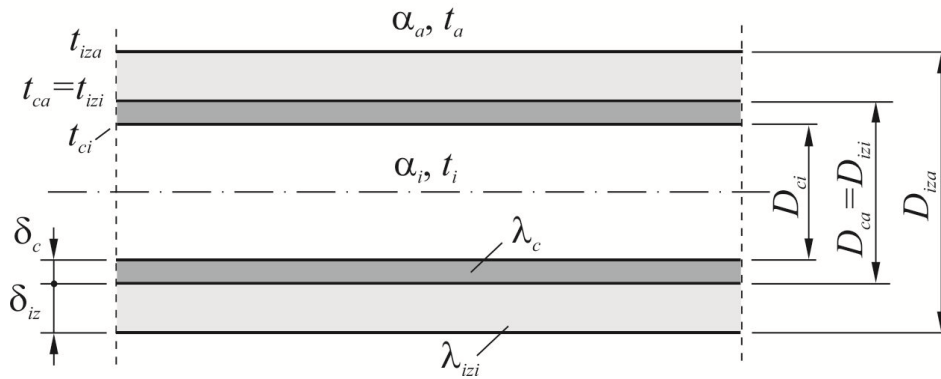
$$\frac{1}{kD_m} = \frac{1}{\alpha_i D_{ci}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{ca}}{D_{ci}} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{D_{iza}}{D_{izi}} + \frac{1}{\alpha_a D_{iza}}, \quad (3.15)$$

gde su:

- $D_m$  – srednji prečnik cevovoda sa izolacijom [m];
- $D_{ci}$  – unutrašnji prečnik cevovoda [m];
- $D_{ca}$  – spoljašnji prečnik cevovoda [m];
- $D_{izi}$  – unutrašnji prečnik izolacije [m];
- $D_{iza}$  – spoljašnji prečnik izolacije [m];
- $\alpha_i$  – koeficijent prelaza toplote sa transportovane sirovine na cevovod [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ];
- $\lambda_c$  – koeficijent provođenja toplote cevovoda [ $\text{W}/\text{mK}$ ];
- $\lambda_{iz}$  – koeficijent provođenja toplote izolacije [ $\text{W}/\text{mK}$ ] i
- $\alpha_a$  – koeficijent prelaza toplote sa cevovoda na okolinu [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ].

Za određivanje koeficijenta prolaza toplote kroz neizolovan cevovod može da se koristi sledeći obrazac:

$$\frac{1}{k} \approx \frac{\alpha_i + \alpha_a}{\alpha_i \alpha_a}. \quad (3.16)$$



Slika 3.9. Oznake izolovanog cevovoda

Koeficijent prelaza toplote sa transportovane sirovine na cevovod zavisi od režima strujanja i njenih fizičkih svojstava:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_n Nu}{D_{ci}}, \quad (3.17)$$

gde su:

- $\lambda_n$  – koeficijent provođenja toplote transportovane sirovine [W/mK] i
- $Nu$  – Nuseltov (Nusselt) broj [-].

Za laminaran režim strujanja može da se uzme približna vrednost za Nuseltov broj  $Nu \approx 3,65$ , dok se za turbulentan režim strujanja u glatkim cevima Nuseltov broj određuje iz jednačine:

$$Nu \approx 0,116 (Re^{0,67} - 125) Pr^{0,33} \left( \frac{v_s}{v_c} \right)^{0,14}, \quad (3.18)$$

gde su:

- $Re$  – Rejnoldsov (Reynolds) broj [-];
- $Pr$  – Prantlov (Prandtl) broj [-];
- $v_s$  – kinematska viskoznost transportovane sirovine u osi cevovoda [ $m^2/s$ ] i
- $v_c$  – kinematska viskoznost transportovane sirovine u blizini zida cevovoda [ $m^2/s$ ].

Rejnoldsov i Prantlov broj glase:

$$Re = \frac{v D_{ci}}{\nu}, \quad (3.19)$$

$$Pr = \frac{\rho v c_n}{\lambda_n}, \quad (3.20)$$

gde su:

$\rho$  – gustina transportovane sirovine [ $\text{kg/m}^3$ ] i  
 $c_n$  – specifična toplota [ $\text{J/kgK}$ ].

Veličine  $\rho$ ,  $v$ ,  $c_n$  i  $\lambda_n$  određuju se na srednjoj temperaturi definisanom jednačinom:

$$t_m = \frac{1}{3}(t_1 + 2 \cdot t_2). \quad (3.21)$$

U pogonskim uslovima se kod podzemnih magistralnih naftovoda pri turbulentnom strujanju koeficijent prelaza toplote sa zagrejane sirovine na cevovod nalazi u granicama  $\alpha_i=50 - 400 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Njegova vrednost je mnogo veća od koeficijenta prelaza toplote sa cevovoda na okolinu, npr kod podzemnih naftovoda je  $\alpha_a=1,5 - 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Usled toga se u jednačini (3.15) član  $1/\alpha_i D_{ci}$  može zanemariti u odnosu na član  $1/\alpha_a D_{ca}$  za neizolovane cevovode, tj u odnosu na član  $1/\alpha_a D_{iza}$  za izolovane cevovode.

Za transport sirove nafte i njenih frakcija koriste se čelične cevi za koje koeficijent provođenja toplote iznosi  $\lambda_c=45-60 \text{ W/mK}$ .

Koeficijent provođenja toplote izolacije zavisi od vrste i kvaliteta izolacije i nalazi se u granicama  $\lambda_{iz}=0,06-0,25 \text{ W/mK}$ .

Koeficijent prelaza toplote sa spoljnog dela cevovoda na okolinu zavisi od načina polaganja cevovoda, vlažnosti i sastava terena i brzine vetra koji duva u predelu gde je cevovod položen. Za cevovode ukopane u zemlju primenjuje se obrazac Vlasova (Vlasov):

$$\alpha_a = \frac{2\lambda_z}{D_a \ln \left[ \frac{2H_0}{D_a} + \sqrt{\left( \frac{2H_0}{D_a} \right)^2 - 1} \right]}, \quad (3.22)$$

gde su:

$\lambda_z$  – koeficijent provođenja toplote zemlje [ $\text{W/mK}$ ];  
 $D_a=D_{ca}$  – za neizolovane cevovode [m];  
 $D_a=D_{iza}$  – za izolovane cevovode [m] i  
 $H_0$  – dubina na kojoj se nalazi gornja ivica cevovoda ispod zemljine površine [m].

Za izračunavanje koeficijenta provođenja toplote zemlje koristi se obrazac:

$$\lambda_z = 0,25 + 85,7 \frac{0,97^{t_z} - 0,97^{t_c}}{t_c - t_z}, \quad (3.23)$$

gde su:

$t_z$  – temperatura zemlje [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t_c=t_{ca}$  – srednja temperatura neizolovanog cevovoda [ $^{\circ}\text{C}$ ] i

$t_c=t_{iza}$  – srednja temperatura izolovanog cevovoda [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Za cevovode položene u zaštitnom kanalu koeficijent prelaza toplote sa spoljnog dela cevovoda na okolinu određuje se iz obrasca:

$$\alpha_a = C(D) \sqrt[4]{t_c - t_a}, \quad (3.24)$$

gde su:

$t_a$  – temperatura vazduha u kanalu [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$C(D)$  – konstanta koja zavisi od prečnika cevovoda (tabela 3.2) [-];

Tabela 3.2 Konstanta koja zavisi od prečnika cevovoda

D (mm)	50	100	200	500
C(D)	2,25	2,1	2,01	2,01

Za prečnike veće od 500 mm konstanta ima vrednost  $C(D)=2,01$ . U toku proračuna srednja temperatura cevovoda  $t_c$  u obrascima (3.23) i (3.24) se pretpostavlja, pa se kasnije proverava pomoću jednačine dobijene iz toplotnog bilansa:

$$t_c = \frac{kD_m}{\alpha_a D_a} \Delta t_m + t_z(t_a). \quad (3.25)$$

Kad se određuje koeficijent provođenja toplote kroz zemlju  $\lambda_z$  tada se u jednačini (3.25) uzima temperatura zemlje  $t_z$ , a kad se izračunava koeficijent prelaza toplote sa spoljašnosti cevovoda na okolinu tad se u jednačini (3.25) uzima temperatura okoline  $t_a$ .

Koeficijent prolaza toplote kroz naftovode obično se nalazi u granicama  $k=0,6 - 3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Niže vrednosti odgovaraju dobro izolovanim cevovodima položenim u suvoj i peskovitoj zemlji, a više vrednosti slabije izolovanim cevovodima položenim u vlažnoj zemlji.

**Primer 3.6:** Odrediti koeficijent prolaza toplote kroz naftovod, ako su poznati sledeći podaci:

- unutrašnji prečnik cevovoda  $D_{ci}=203 \text{ mm}$ ,
- spoljašnji prečnik cevovoda  $D_{ca}=219 \text{ mm}$
- spoljašnji prečnik izlacije  $D_{iza}=360 \text{ mm}$
- koeficijent provođenja toplote cevovoda  $\lambda=46,5 \text{ W/(mK)}$
- koeficijent provođenja toplote izolacije  $\lambda=0,005 \text{ W/(mK)}$
- koeficijent provođenja toplote nafte  $\lambda=0,12 \text{ W/(mK)}$

Naftovod se nalazi iznad zemlje na stubićima. Strujanje nafte je laminarno, a prosečna brzina vetrova u predelu u gde se nalazi naftovod iznosi  $v_0=10 \text{ m/s}$ .

Za laminarno strujanje, koeficijent prelaza toplote sa nafte na unutrašnji zid cevi iznosi:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_n Nu}{D_{ci}}$$

Nuseltov broj za laminarno strujanje je :  $Nu = 3,65$

$$\alpha_i D_{ci} = Nu \lambda_n = 3,65 \cdot 0,12$$

$$\alpha_i D_{ci} = 0,44 \text{ W/(mK)}$$

Koeficijent prelaza toplote sa spoljašnjeg zida izolacije na okolinu se izračunava po empirijskoj jednačini i iznosi:

$$\alpha_a = 7,2 v_0^{0,78} = 7,2 \cdot 10^{0,78}$$

$$\alpha_a = 43,4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Prema definiciji :

$$\frac{1}{kD_m} = \frac{1}{\alpha_i D_{ci}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{ca}}{D_{ci}} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{D_{iza}}{D_{izi}} + \frac{1}{\alpha_a D_{izi}}$$

$$\frac{1}{kD_m} = \frac{1}{0,44} + \frac{1}{2 \cdot 46,5} \ln \frac{219}{203} + \frac{1}{2 \cdot 0,05} \ln \frac{360}{219} + \frac{1}{43,4 \cdot 0,36}$$

$$kD_m = 0,137 \text{ W/(mK)}$$

Srednji prečnik cevovoda sa izolacijom je:

$$D_m = \frac{D_{iza} + D_{ci}}{2} = \frac{360 + 203}{2}$$

$$D_m = 281,5 \text{ mm}$$

Koeficijent prolaza toplote naftovoda iznosi:

$$k = \frac{0,137}{D_m} = \frac{0,137}{0,2815}$$

$$k = 0,49 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

### 3.7 Određivanje toplote za zagrevanje sirove nafte i njenih težih frakcija

Teške sirove nafte i njihove frakcije moraju da se zagrevaju u toku transporta jer su veoma viskozne na temperaturama okoline. Zagrevanje se obavlja u rezervoarima koji se prave od čeličnog lima ili armiranog betona. Poprečni presek rezervoara je kružni ili pravougaoni. Rezervoari u naftnoj industriji se dele na: sabirne, tranzitne i prihvatne.

Sabirni se grade na naftonosnim poljima i služe za sabiranje sirove nafte iz bušotina i prihvatanje prečišćene i pripremljene za transport sirove nafte do otpremnih stanica.

Tranzitni rezervoari se grade u krugu otpremnih i pomoćnih pumpnih stanica duž trase naftovoda.

Prihvatni rezervoari se grade na pristaništima, u rafinerijama i na mestima predviđenim za čuvanje rezervi.

Zapremine pojedinih vrsta rezervoara dostižu i 30000 m<sup>3</sup>. Ako su cilindričnog oblika, visina im retko prelazi 10 m, a prečnik ide do 70 m, pa i više.

Rezervoari se grade kao: nadzemni, delimično ukopani i potpuno ukopani u zemlju. Rezervoari se ne pune do vrha zbog toplotnog širenja tečnosti koja se u njima čuva. To znači da se uvek iznad površine tečnosti nalazi mešavina vazduha i njene pare. Kad pritisak ove mešavine poraste iznad atmosferskog, tada se jedan deo te mešavine gubi kroz ventile i nezaptivene otvore na gornjoj osnovi rezervoara. Da bi se smanjilo isparavanje uskladištene tečnosti, na njenoj površini stavljaju se plovni predmeti (pontoni) čime se smanjuje površina isparavanja tečnosti.

Neki rezervoari snabdeveni su uređajima za zagrevanje uskladištene sirovine kako bi se i veoma viskozne tečnosti mogle transportovati cevima. Potrebna toplota može da se prikaže kao:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (3.26)$$

gde su:

$Q_1$  – količina toplote koja se troši na zagrevanje transportovane sirovine [W] i

$Q_2$  – izgubljena toplota kroz rezervoar za vreme zagrevanja transportovane sirovine [W].

Količina toplote koja se troši na zagrevanje transportovane sirovine glasi:

$$Q_1 = \dot{m} \left[ c_n (t_1 - t_2) + \frac{\beta_p r_p}{100} \right], \quad (3.27)$$

gde su:

$\dot{m}$  – maseni protok sirovine [kg/s];

$c_n$  – srednja specifična toplotna transportovane tečnosti [J/kgK];

$t_1$  – temperatura koju transportovana sirovina ima na izlazu rezervoara [°C];

$t_2$  – temperatura koju transportovana sirovina ima na ulazu rezervoara [°C];

$\beta_p$  – učešće parafina u sirovoj nafti [%] i  
 $r_p$  – latentna toplota topljenja parafina [J/kg].

Izgubljena toplota kroz rezervoar za vreme zagrevanja transportovane sirovine glasi:

$$Q_2 = k_R A_R (t_{sr} - t_a), \quad (3.28)$$

gde su:

$k_R$  – ponderisana vrednost koeficijenta prolaza toplote kroz rezervoar [W/m<sup>2</sup>K];  
 $A_R$  – površina rezervoara kroz koju se gubi toplota [W];  
 $t_{sr}$  – srednja temperatura zagrevanja transportovane sirovine [°C] i  
 $t_a$  – temperatura okoline [°C].

Srednja temperature zagrevanja transportovane sirovine glasi:

$$t_{sr} = \frac{1}{3}(2t_1 + t_2). \quad (3.29)$$

Izgubljena toplota kroz delimično ukopan rezervoar (*slika 3.10*) za vreme zagrevanja transportovane sirovine može da se definiše i kao:

$$Q_2 = Q_v + Q_z + Q_m = k_v A_v (t_{sr} - t_a) + k_z A_z (t_{sr} - t_a) + k_m A_m (t_{sr} - t_a), \quad (3.30)$$

Iz jednakosti (3.28) i (3.30) dobija se koeficijent prolaza toplote kroz rezervoar:

$$k_R A_R = k_v A_v + k_z A_z + k_m A_m. \quad (3.31)$$

gde su:

$k_v$  – koeficijent prolaza toplote kroz površinu  $A_v$  [W/m<sup>2</sup>K];  
 $k_z$  – koeficijent prolaza toplote kroz površinu  $A_z$  [W/m<sup>2</sup>K];  
 $k_m$  – koeficijent prolaza toplote kroz površinu  $A_m$  [W/m<sup>2</sup>K];  
 $A_v$  – površina rezervoara koja je iznutra okvašena tečnošću a spolja vazduhom [m<sup>2</sup>];  
 $A_z$  – površina koja je iznutra okvašena tečnošću a spolja u dodiru sa zemljom [m<sup>2</sup>] i  
 $A_m$  – površina rezervoara koja je iznutra u dodiru sa mešavinom vazduha i pare, a spolja sa vazduhom [m<sup>2</sup>].

Koeficijent prolaza toplote  $k_v$  kroz površinu  $A_v$  izračunava se iz jednačine:

$$\frac{1}{k_v} = \frac{1}{\alpha_{iv}} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{av}}, \quad (3.32)$$

gde su:

$\alpha_{iv}$  – koeficijent prelaza toplote sa zagrejane sirovine na površinu  $A_v$  [W/m<sup>2</sup>K];  
 $\lambda_i$  – koeficijent toplotne provodljivosti  $i$  – tog sloja rezervoara [W/mK];  
 $\delta_i$  – debljina  $i$  – tog sloja zida rezervoara [W/mK] i  
 $\alpha_{av}$  – koeficijent prelaza toplote sa površine  $A_v$  na okolni vazduh [W/m<sup>2</sup>K].

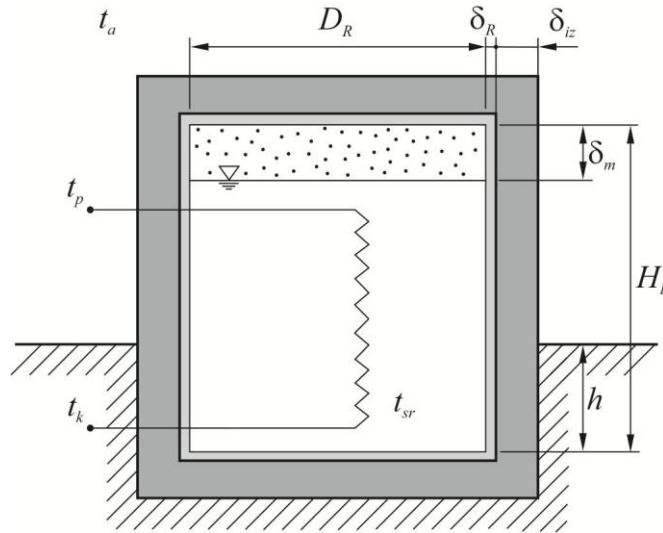


Koeficijent prelaza toplote sa zagrejene sirovine na površinu  $A_v$  glasi:

$$\alpha_{iv} = 0,873 \sqrt[3]{\frac{t_{sr} - t_R}{v_{sr}}}, \quad (3.33)$$

gde su:

$v_{sr}$  – koeficijent kinematske viskoznosti sirovine na temperaturi [ $^{\circ}\text{C}$ ] i  
 $t_R$  – srednja temperatura zida rezervoara [ $^{\circ}\text{C}$ ].



Slika 3.10. Šematski prikaz ukopanog rezervoara u kome se zagreva sirova nafta

Srednja temperatura zida rezervoara usvaja se u toku proračuna ( $t_R < t_{sr}$ ). Posle izračunatog koeficijenta prolaza toplote  $k_v$  iz jednakosti toplote koja sa zagrejene sirovine pređe na zid rezervoara i toplote koja prođe kroz zid rezervoara:

$$\alpha_{iv} (t_{sr} - t_R) = k_v (t_{sr} - t_a), \quad (3.34)$$

proverava se temperatura zida rezervoara:

$$t_R = t_{sr} - \frac{k_v}{\alpha_{iv}} (t_{sr} - t_a). \quad (3.35)$$

Drugi član u izrazu za koeficijent prolaza toplote  $k_v$  označava ukupni termički otpor zida i izolacije koji se odnosi na površinu  $A_v$ :

$$\sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_R}{\lambda_R} + \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz}}, \quad (3.36)$$

gde su:

$\delta_R$  – debljina zida rezervoara [m];  
 $\delta_{iz}$  – debljina izolacije [m];  
 $\lambda_R = 40 - 60 \text{ W/mK}$  – koeficijent provođenja toplote kroz čelični rezervoar;

$\lambda_R = 1,55 \text{ W/mK}$  – koeficijent provođenja toplote kroz armirano-betonski rezervoar i  
 $\lambda_{iz} = 0,05 - 0,25 \text{ W/mK}$  – koeficijent provođenja toplote izolacije.

Koeficijent prelaza toplote sa površine  $A_v$  na okolni vazduh zavisi od brzine vetrova koji duvaju u predelu gde se nalazi rezervoar:

$$\alpha_{av} = 6,2 + 4,2 \cdot v_0 \quad \text{za} \quad v_0 \leq 5 \text{ m/s}, \quad (3.37)$$

$$\alpha_{av} = 7,2 \cdot v_0^{0,78} \quad \text{za} \quad v_0 > 5 \text{ m/s}, \quad (3.38)$$

gde je  $v_0$  prosečna brzina vetrova koji duvaju u predelu na kome se nalazi rezervoar.

Koeficijent prolaza toplote  $k_z$  kroz površinu  $A_z$  izračunava se iz jednačine:

$$\frac{1}{k_z} = \frac{1}{\alpha_{iz}} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{az}}, \quad (3.39)$$

gde su:

$\alpha_{iz}$  – koeficijent prelaza toplote sa zagrejana sirovine na površinu  $A_z$  [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ];  
 $\lambda_i$  – koeficijent toplotne provodljivosti  $i$  – tog sloja rezervoara [ $\text{W/mK}$ ];  
 $\delta_i$  – debljina  $i$  – tog sloja zida rezervoara [ $\text{W/mK}$ ] i  
 $\alpha_{az}$  – koeficijent prelaza toplote sa zemlje na okolni vazduh [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ].

Koeficijent prelaza toplote sa zagrejana sirovine na površinu  $A_z$  određuje se iz jednačine:

$$\alpha_{iz} = 0,794 \sqrt{\frac{t_{sr} - t_R}{v_{sr}}}. \quad (3.40)$$

Drugi član u izrazu za koeficijent prolaza toplote  $k_z$  označava ukupni termički otpor površine  $A_z$ :

$$\sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_R}{\lambda_R} + \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz}} + \frac{\delta_z}{\lambda_z}, \quad (3.41)$$

gde su:

$\delta_z$  – debljina zemlje kroz koju se gubi onaj deo toplote koji je prošao kroz površinu  $A_z$  [m] i  
 $\lambda_z$  – koeficijent provođenja toplote zemlje [ $\text{W/mK}$ ].

Debljina zemlje kroz koju se gubi onaj deo toplote koji je prošao kroz površinu  $A_z$  dobija se iz jednačine:

$$\delta_z = 0,25 \cdot D_R + h, \quad (3.42)$$

gde su:

$D_R$  – unutrašnji prečnik rezervoara [m] i  
 $h$  – dubina ukopavanja rezervoara u zemlju [m].

Koeficijent provođenja toplote zemlje određuje se iz jednačine:

$$\lambda_z = 0,3 + \frac{99,5}{t_R - t_a} (0,97^{t_a} - 0,97^{t_R}). \quad (3.43)$$

Koeficijent prelaza toplote sa zemlje na okolni vazduh određuje se iz jednačine:

$$\alpha_{az} = 6,2 + 4,2 \cdot v_0. \quad (3.44)$$

Koeficijent prolaza toplote  $k_m$  kroz površinu  $A_m$  određuje se iz jednačine:

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{\alpha_{im}} + \frac{1}{\alpha'_{im}} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{am}}, \quad (3.45)$$

gde su:

$\alpha_{im}$  – koeficijent prelaza toplote sa zagrejene sirovine na mešavinu vazduha i pare [W/m<sup>2</sup>K];

$\alpha'_{im} = 8,7$  W/m<sup>2</sup>K – koeficijent prelaza toplote sa mešavine vazduha i pare na površinu  $A_m$ ;

$\lambda_i$  – koeficijent toplotne provodljivosti  $i$  – tog sloja rezervoara [W/mK];

$\delta_i$  – debljina  $i$  – tog sloja zida rezervoara [W/mK] i

$\alpha_{am}$  – koeficijent prelaza toplote sa površine  $A_m$  na okolni vazduh [W/m<sup>2</sup>K].

Koeficijent prelaza toplote sa zagrejene sirovine na mešavinu vazduha i pare određuje se iz jednačine:

$$\alpha_{im} = 3,25 \cdot \sqrt[4]{t_{sr} - t_m}, \quad (3.46)$$

gde je:

$t_m$  – temperatura mešavine vazduh-para transportovane sirovine [°C].

Drugi član u izrazu za koeficijent prolaza toplote  $k_m$  označava ukupni termički otpor zida i izolacije koji se odnosi na površinu  $A_m$ :

$$\sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{\delta_R}{\lambda_R} + \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz}}, \quad (3.47)$$

gde su:

$\delta_m$  – visinu dela rezervoara ispunjenog mešavinom vazduh-para [m] i

$\lambda_m = 2,9$  W/mK – koeficijent provođenja toplote mešavine vazduh-para.

Koeficijent prelaza toplote sa površine  $A_m$  na okolni vazduh je:

$$\alpha_{am} = \alpha_{av}. \quad (3.48)$$

Temperatura  $t_m$  mešavine vazduh-para u izrazu za određivanje koeficijenta prelaza toplote  $\alpha_{im}$  sa zagrejene sirovine na mešavinu vazduha i pare se pretpostavlja ( $t_m < t_{sr}$ ).

Posle izračunatog koeficijenta prolaza toplote  $k_m$  iz jednakosti toplote koja sa zagrejane sirovine pređe na mešavinu vazduh-para i toplote koja prođe kroz zid rezervoara:

$$\alpha_{im}(t_{sr} - t_m) = k_m(t_{sr} - t_a), \quad (3.49)$$

proverava se temperatura mešavine:

$$t_m = t_{sr} - \frac{k_m}{\alpha_{im}}(t_{sr} - t_a). \quad (3.50)$$

Ako se u rezervoarima kao izmenjivači toplote koriste zmijaste cevi i vodena para kao grejni fluid, tada se ukupna količina toplote može izraziti kao:

$$Q = k_{zc} A_{zc} (T_{zc} - T_{sr}), \quad (3.51)$$

gde su:

$k_{zc}$  – koeficijent prolaza toplote kroz površinu  $A_{zc}$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ];

$A_{zc}$  – površina zmijaste cevi [ $\text{m}^2$ ];

$T_{zc}$  – srednja temperatura zmijaste cevi [K];

$T_p$  – temperatura pare na ulazu u zmijastu cev [K] i

$T_k$  – temperatura povratne pare ili kondenzata na izlazu iz zmijaste cevi [K].

Zbog male debljine zmijaste cevi može da se uzme da je koeficijent prolaza toplote kroz površinu  $A_{zc}$ :

$$\frac{1}{k_{zc}} \approx \frac{1}{\alpha_{ic}} + \frac{1}{\alpha_{ac}}, \quad (3.52)$$

gde su:

$\alpha_{ic}$  – koeficijent prelaza toplote sa pare na unutrašnjost zmijaste cevi [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ];

$\alpha_{ac}$  – koeficijent prelaza toplote sa spoljašnje strane zmijaste cevi na grejanu tečnost [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ].

Iz jednačine za ukupnu količinu toplote određuje se površina zmijaste cevi  $A_{zc}$ . Prečnik  $d$  zmijaste cevi se pretpostavlja. Iz jednačine za površinu zmijaste cevi određuje se dužina zmijaste cevi  $l_{zc}$ :

$$l_{zc} = \frac{A_{zc}}{\pi \cdot d}. \quad (3.53)$$

Količina vodene pare kao grejnog fluida određuje se iz jednačine:

$$\dot{m}_p = \frac{Q}{i_p - i_k}, \quad (3.54)$$

gde su:

$i_p$  – entalpija vodene pare na ulazu u zmijastu cev [ $\text{J}/\text{kg}$ ] i

$i_k$  – entalpija vodene pare/kondenzata na izlazu iz zmijaste cevi [ $\text{J}/\text{kg}$ ].

**Primer 3.7:** Odrediti gubitak toplote kroz rezervoar u kome se zagreva sirova nafta za vreme transporta od temperature  $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  do temperature  $t_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Viskoznost nafte menja se sa temperaturom po zakonu  $\nu = \frac{5,4}{t^3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Ostali podaci su: unutrašnji prečnik rezervoara  $D_R = 15 \text{ m}$ , unutrašnja visina rezervoara  $H_R = 10 \text{ m}$ , debljina čeličnog lima  $\delta_R = 10 \text{ mm}$ , koeficijent provođenja toplote zida rezervoara  $\lambda_R = 46,5 \text{ W/mK}$ , debljina izolacije materijala iznosi  $\delta_{iz} = 100 \text{ mm}$ , koeficijent provođenja toplote izolacije rezervoara  $\lambda_{iz} = 0,116 \text{ W/mK}$ , visina dela rezervoara ispunjenog mešavinom vazduh-para  $\delta_m = 0,5 \text{ m}$ , dubina ukopavanja rezervoara u zemlju  $h = 2 \text{ m}$ , prosečna brzina vetrova u predelu gde je rezervoar podignut  $v_0 = 50 \text{ km/h}$ , temperatura okoline  $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Srednja temperatura nafte u rezervoaru i odgovarajuća viskoznost iznose:

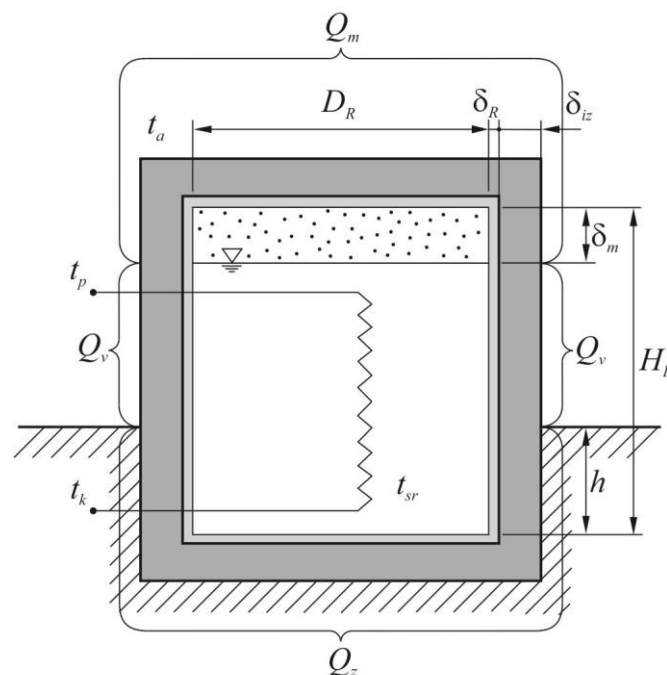
$$t_{sr} = \frac{1}{3}(2t_1 + t_2) = \frac{1}{3}(2 \cdot 70 + 20)$$

$$t_{sr} = 53,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\nu_{sr} = \frac{5,4}{t_{sr}^3} = \frac{5,4}{53,3^3}$$

$$\nu_{sr} = 36,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Prvo se određuju vrednosti površina kroz koje se gubi toplota a zatim i odgovarajući koeficijenti prolaza toplote, *slika 3.11*.



*Slika 3.11. Gubici toplote ukopanog rezervoara u kome se zagreva sirova nafta*

Površina rezervoara koja je iznutra okvašena tečnošću a spolja okružena vazduhom iznosi:

$$A_v = D_R \pi (H_R - h - \delta_m) = 15 \cdot 3,14 \cdot (10 - 2 - 0,5)$$

$$A_v = 354 \text{ m}^2$$

Površina koja je iznutra okvašena tečnošću a spolja u dodiru sa zemljom iznosi:

$$A_z = \frac{D_R^2 \pi}{4} + D_R \pi h = \frac{15^2 \cdot 3,14}{4} + 15 \cdot 3,14 \cdot 2$$

$$A_z = 271 \text{ m}^2$$

Površina rezervoara koja je iznutra u dodiru sa mešavinom vazduha i pare, a spolja sa vazduhom iznosi:

$$A_m = \frac{D_R^2 \pi}{4} + D_R \pi \delta_m = \frac{15^2 \cdot 3,14}{4} + 15 \cdot 3,14 \cdot 0,5$$

$$A_m = 200 \text{ m}^2$$

Koeficijent prolaza toplote  $k_v$  kroz površinu rezervoara koja je iznutra okvašena tečnošću a spolja vazduhom  $A_v$ .

$$\alpha_{iv} = 0,87 \cdot \sqrt[3]{\frac{t_{sr} - t_R}{\nu_{sr}}} = 0,87 \cdot \sqrt[3]{\frac{53,3 - 52}{36,8 \cdot 10^{-6}}}$$

$$\alpha_{iv} = 28,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_R}{\lambda_R} + \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz}} = \frac{0,01}{46,5} + \frac{0,1}{0,116}$$

$$\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} = 0,86 \left( \text{W/(m}^2\text{K)} \right)^{-1}$$

$$\alpha_{av} = 7,2 \cdot \nu_0^{0,78} = 7,2 \cdot \left( \frac{50 \cdot 10^3}{3600} \right)^{0,78}$$

$$\alpha_{av} = 56 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$k_v = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{iv}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{av}}} = \frac{1}{\frac{1}{28,5} + 0,86 + \frac{1}{56}}$$

$$k_v = 1,095 \text{ W/m}^2\text{K}$$

gde je pretpostavljena vrednost temperature zida rezervoara  $t_R=52 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $t_R < t_{sr}$ ). Pretpostavljena temperatura rezervoara proverava se posredstvom jednačine:

$$t_R = t_{sr} - \frac{k_v}{\alpha_{iv}}(t_{sr} - t_a) = 53,3 - \frac{1,095}{28,5}(53,3 - 0)$$

$$t_R = 51,25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Nema velike razlike između izračunate i ranije pretpostavljene vrednosti temperature zida rezervoara pa se nađena vrednost koeficijenta prolaza toplote  $k_v$  može prihvatiti za dalji račun.

Koeficijenta prolaza toplote  $k_z$  kroz površinu koja je iznutra okvašena tečnošću a spolja u dodiru sa zemljom iznosi:

$$\alpha_{iz} = 0,79 \cdot \sqrt[4]{\frac{t_{sr} - t_R}{v_{sr}}} = 0,79 \cdot \sqrt[4]{\frac{53,3 - 52}{36,8 \cdot 10^{-6}}}$$

$$\alpha_{iz} = 10,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\delta_z = 0,25 \cdot D_R + h = 0,25 \cdot 15 + 2$$

$$\delta_z = 5,75 \text{ m}$$

$$\lambda_z = 0,3 + 99,5 \frac{0,97^{t_a} - 0,97^{t_R}}{t_R - t_a}$$

$$\lambda_z = 1,81 \text{ W/(mK)}$$

$$\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} = 0,86 + \frac{\delta_z}{\lambda_z} = 0,86 + \frac{5,75}{1,81}$$

$$\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} = 4,04 \text{ (W/(m}^2\text{K))}^{-1}$$

$$\alpha_{az} = 6,2 + 4,2 \cdot v_0 = 6,2 + 4,2 \cdot 13,9$$

$$\alpha_{az} = 64,6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$k_z = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{iz}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{az}}} = \frac{1}{\frac{1}{10,8} + 4,04 + \frac{1}{64,6}}$$

$$k_z = 0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Koeficijent prolaza toplote  $k_m$  kroz površinu rezervoara koja je iznutra u dodiru sa mešavinom vazduha i pare, a spolja sa vazduhom iznosi:

$$\alpha_{im} = 3,25 \cdot \sqrt[4]{t_{sr} - t_m} = 3,25 \cdot \sqrt[4]{53,3 - 46}$$

$$\alpha_{im} = 5,34 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} = 0,86 + \frac{\delta_m}{\lambda_m} = 0,86 + \frac{0,5}{2,9}$$

$$\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} = 1,03 \text{ (W/(m}^2\text{K))}^{-1}$$

$$\alpha'_{im} = 8,7 \text{ W/m}^2\text{K},$$

$$\alpha_{av} = \alpha_{am} = 56 \text{ W/m}^2\text{K},$$

$$\lambda_v = 2,9 \text{ W/m}^2\text{K},$$

$$k_m = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{im}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha'_{im}} + \frac{1}{\alpha_{am}}} = \frac{1}{\frac{1}{5,34} + 1,03 + \frac{1}{8,7} + \frac{1}{56}}$$

$$k_m = 0,74 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

gde je pretpostavljena vrednost temperature mešavine vazduha i pare  $t_m = 46 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $t_m < t_{sr}$ ).

Pretpostavljena temperatura mešavine vazduha i pare proverava se posredstvom jednačine:

$$t_m = t_{sr} - \frac{k_m}{\alpha_{im}} (t_{sr} - t_a) = 53,3 - \frac{0,74}{5,34} (53,3 - 0)$$



$$t_m = 45,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nema velike razlike između izračunate i ranije pretpostavljene vrednosti temperature zida rezervoara pa se nađena vrednost koeficijenta prolaza toplote  $k_v$  može prihvatiti za dalji račun.

Proizvod koeficijenta prolaza toplote rezervoara i površine rezervoara kroz koju se gubi toplota je:

$$k_R A_R = k_v A_v + k_z A_z + k_p A_p = 1,095 \cdot 354 + 0,24 \cdot 271 + 0,74 \cdot 200$$

$$k_R A_R = 600,6 \text{ W/K}$$

Gubitak toplote kroz rezervoar iznosi:

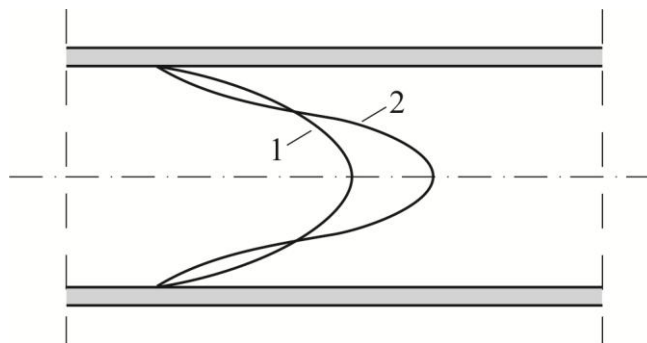
$$Q = k_R A_R (t_{sr} - t_a) = 600,6 \cdot (53,3 - 0)$$

$$Q = 32012 \text{ W} = 32 \text{ kW}$$

### 3.8 Određivanje pada pritiska pri neizotermnom strujanju

Zagrejana tečnost odaje toplotu okolini i zbog toga joj temperatura opada nizvodno. Usled pada temperature povećava se viskoznost u smeru strujanja, a koeficijent trenja više nije konstantan duž cevovoda. Gubici usled trenja rastu u odnosu na gubitke koji bi se javili da je zagrejana sirovina transportovana pri konstantnoj temperaturi.

Na slici 3.12 prikazani su profili brzine u proizvoljnom poprečnom preseku cevovoda pri laminarnom izotermnom (1) i pri laminarnom neizotermnom (2) strujanju. Profil brzine se deformiše pri neizotermnom strujanju u odnosu na izotermno strujanje. Određivanje pada pritiska usled trenja pri neizotermnom strujanju daleko je složenije u odnosu na izotermno strujanje. Naročito se problem komplikuje kada ne može da se pretpostavi da je proračunska temperatura okoline jednaka nuli.



Profil 3.12 Brzine pri laminarnom izotermnom i neizotermnom strujanju

U nastavku će se prikazati određivanje pada pritiska pri neizotermnom strujanju za specijalni slučaj kada je temperatura okoline jednaka nuli  $t_a=0$ . Prikazaće se izraz za pad pritiska koji može da se koristi za laminaran režim strujanja i turbulentan režim strujanja u hidraulički glatkim cevima.

Uopšteno pri izotermnom strujanju nafte koristi se izraz sledeći izraz za pad pritiska:

$$\Delta p = M \frac{\rho v^n Q^{2-n} l}{D^{5-n}}, \quad (3.55)$$

gde laminarnom strujanju odgovaraju vrednosti:

$$M = \frac{128}{\pi}, \quad n = 1,$$

dok turbulentnom strujanju u hidraulički glatkim cevima odgovaraju vrednosti:

$$M = 0,241, \quad n = 0,25.$$

Izraz za pad pritiska pri neizotermnom strujanju nafte definiše se kao:

$$\Delta p = M \frac{\rho v_1^n Q^{2-n} l}{D_{ci}^{5-n}} \left( \frac{\alpha_i D_{ci}}{\alpha_i D_{ci} - k D_m} \right)^{mb} \frac{e^{mna} - 1}{mna}. \quad (3.56)$$

Predhodni izraz se koristi za slučaj kada je poznata viskoznost nafte na ulazu u cevovod  $v_1$ . Korišćenjem veze između viskoznosti nafte na ulazu  $v_1$  i izlazu  $v_2$  cevovoda:

$$v_2 = v_1 e^{ma}, \quad (3.57)$$

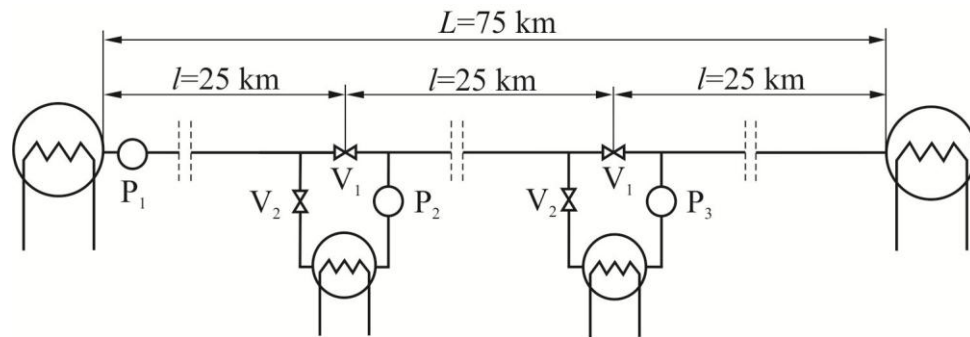
i uvrštavanjem u predhodnu jednačinu, dolazi se do izraza za pad pritiska pri neizotermnom strujanju nafte koji se koristi kada je poznata viskoznost nafte  $v_2$  na izlazu iz cevovoda:

$$\Delta p = M \frac{\rho v_2^n Q^{2-n} l}{D_{ci}^{5-n}} \left( \frac{\alpha_i D_{ci}}{\alpha_i D_{ci} - k D_m} \right)^{mb} \frac{e^{mna} - 1}{mna \cdot e^{mna}}. \quad (3.58)$$

Može da se uoči da izraz za određivanje pada pritiska pri neizotermnom strujanju nafte ima tri dela. Prvi deo predstavlja pad pritiska kada bi strujanje bilo izotermno, drugi deo uzima u obzir promenu temperature u pravcu radijusa cevi, a treći deo pad temperature duž cevovoda.

Za laminaran režim strujanja  $b=0,25$ , dok je za turbulentno strujanje u hidraulički glatkim cevima  $b=0,14$ .

**Primer 3.8:** Naftovod dužine  $L = 75$  km i prečnika  $D = 250$  mm projektovan je tako da kroz njega može da se transportuje i laka i teška sirova nafta. Zbog toga je naftovod podeljen na tri sekcije dužine  $l=25$  km ispred kojih se nalaze pumpne stanice i rezervoari za zagrevanja. Kada se transportuje laka nafta ventili  $v_1$  su otvoreni, a  $v_2$  zatvoreni jer se laka nafta ne zagreva. Međutim, kada se transportuje teška nafta ventili  $v_1$  su zatvoreni, a  $v_2$  otvoreni jer teška nafta mora da se zagreva. Teška nafta tada prolazi kroz rezervoare ispred svake sekcije, u kojim se zagreva i pumpama potiskuje u prihvatne rezervoare na kraju naftovoda. Izračunati temperaturu  $t$  na koju treba zagrevati tešku sirovu naftu ispred svake sekcije iz uslova da pumpe rade sa istim protokom ( $Q = 210$  m<sup>3</sup>/h) i naporom bez obzira da li se kroz naftovod transportuje laka sirova nafta bez zagrevanja ili teška sirova nafta sa zagrevanjem. Viskoznost i gustina lake nafte su  $\nu = 25,8 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s i  $\rho = 890$  kg/m<sup>3</sup>. Teška sirova nafta ima sledeća svojstva: gustinu 950 kg/m<sup>3</sup>, specifičnu toplotu  $c_n = 2010$  J/kgK, koeficijent provođenja toplote  $\lambda_n = 0,12$  W/mK, koeficijent prelaza toplote  $\alpha_a = 6,47$  W/m<sup>2</sup>K i viskoznost  $\nu = \frac{0,3}{t^2}$  m<sup>2</sup>/s. Pretpostaviti da je strujanje teške sirove nafte laminarno.



Kada se kroz naftovod transportuje laka nafta bez zagrevanja, strujanje je izotermno pa je:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{210}{0,049 \cdot 3600}$$

$$v = 1,19 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{vD}{\nu} = \frac{1,19 \cdot 0,25}{25,8 \cdot 10^{-6}}$$

$$\text{Re} = 11500$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\text{Re}}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{11500}}$$

$$\lambda = 0,0306$$

$$\Delta p = \rho \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} = 890 \cdot 0,0306 \cdot \frac{75000}{0,250} \cdot \frac{1,19^2}{2}$$

$$\Delta p = 58 \text{ bar}$$

Kada se kroz naftovod transportuje teška nafta, zbog uslova postavljenih zadatkom, biće:

$$\alpha_i = \frac{Nu \cdot \lambda_n}{D} = \frac{3,65 \cdot 0,12}{0,250}$$

$$\alpha_i = 1,75 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$k = \frac{\alpha_i \alpha_a}{\alpha_i + \alpha_a} = \frac{1,75 \cdot 6,47}{1,75 + 6,47}$$

$$k = 1,38 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\left( \frac{\alpha_i + \alpha_a}{\alpha_i} \right)^{\frac{m}{4}} = \left( \frac{1,75 + 6,47}{1,75} \right)^{\frac{2}{4}} = 2,17$$

$$a \cdot l = \frac{kD\pi l}{\dot{m}c_n} = \frac{1,38 \cdot 0,25 \cdot 3,14 \cdot 25000}{55,4 \cdot 2010}$$

$$a \cdot l = 0,243$$

$$\frac{e^{mal} - 1}{mal} = \frac{2,72^{0,486} - 1}{0,486} = 1,29$$

$$\Delta p = \rho \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2} \left( \frac{\alpha_i + \alpha_a}{\alpha_i} \right)^{\frac{m}{4}} \cdot \frac{e^{mal} - 1}{mal} = 950 \cdot \lambda \cdot \frac{25000}{0,25} \cdot 1,42 \cdot 2,17 \cdot 1,29 = 1888,2 \cdot \lambda$$

Pošto i napor pumpe mora da bude isti u oba slučaja, to je pri transportu teške sirove nafte:

$$\lambda = \frac{58 \cdot 10^5}{1888,2 \cdot 10^5} = 0,0307$$

Sad se može naći odgovarajući Rejnoldsov broj i viskoznost teške nafte:

$$\text{Re} = \frac{64}{\lambda} = \frac{64}{0,0307} = 2084$$

$$v = \frac{\nu D}{\text{Re}} = \frac{1,19 \cdot 0,25}{2084}$$

$$\nu = 143 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

pa zatim temperatura zagrevanja iznosi:

$$t = \sqrt{\frac{0,3}{\nu}} = \sqrt{\frac{0,3}{143 \cdot 10^{-6}}}$$

$$t = 45,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Najzad, može se naći i temperatura teške nafte na kraju svake sekcije:

$$t_l = t \cdot e^{-al} = 45,9 \cdot e^{-0,243}$$

$$t_l = 36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**Primer 3.9:** Zagrejana sirova nafta temperature  $t_1 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$  transportuje se iz tankera do prihvatnog rezervoara kroz cevovod prečnika  $D = 100 \text{ mm}$  i dužine  $l = 1500 \text{ m}$ . Cevovod je neizolovan i nalazi se u zaštitnom kanalu, a izlazni presek mu je na  $H_g = 20 \text{ m}$  iznad ulaznog preseka. Izračunati snagu pumpe za vreme istovara tankera, ako su: maseni protok nafte  $\dot{m} = 40 \text{ t/h}$ , gustina nafte  $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$ , srednja specifična toplota tečnosti  $c_n = 2094 \text{ J/kgK}$ , temperatura vazduha u kanalu  $t_a = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ , koeficijent provođenja toplote zemlje  $\lambda_z = 0,12 \text{ W/mK}$ , zakonitost promene kinematske viskoznosti nafte  $\nu = \frac{9,3}{t^3} \text{ m}^2/\text{s}$  i stepen korisnosti pumpe  $\eta_p = 0,6$ .

Na osnovu vrednosti Rejnoldsovog broja:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{40000}{950 \cdot 3600}$$

$$Q = 0,0117 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot Q}{D^2 \pi} = \frac{4 \cdot 0,0117}{0,1^2 \cdot 3,14}$$

$$v = 1,49 \text{ m/s}$$

$$v_1 = \frac{9,3}{t_1^3} = \frac{9,3}{50^3}$$

$$v_1 = 74 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re_1 = \frac{vD}{v_1} = \frac{1,49 \cdot 0,1}{74 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re_1 = 2020$$

ustanovljeno je da je režim strujanja sirove nafte laminaran.

Koeficijenti prelaza toplote sa transportovane sirovine na cevovod i sa spoljnjeg dela cevovoda na okolinu iznose:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_n Nu}{D_{ci}} = \frac{0,12 \cdot 3,65}{0,1}$$

$$\alpha_i = 4,38 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\alpha_a = C(D) \sqrt[4]{t_c - t_a} = 2,1 \cdot \sqrt[4]{24 - 0}$$

$$\alpha_a = 4,65 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

pri čemu je konstanta  $C(D)=2,1$  očitana iz *tabele* za usvojenu srednju temperaturu cevovoda  $t_c=24$  °C koja će kasnije biti proverena.

Koeficijent prolaza toplote iznosi:

$$k \approx \frac{\alpha_i \alpha_a}{\alpha_i + \alpha_a} = \frac{4,38 \cdot 4,65}{4,38 + 4,65}$$

$$k = 2,25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Temperatura na kraju cevovoda iznosi:

$$al = \frac{kD\pi l}{\dot{m}c_n} = \frac{2,25 \cdot 0,1 \cdot 3,14 \cdot 1500}{11,1 \cdot 2094}$$

$$al = 0,0457$$

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 50 \cdot e^{-0,0457}$$

$$t_2 = 47,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Srednja logaritamska razlika temperatura u odnosu na dužinu cevovoda  $l$  iznosi:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{t_1 - t_2}{al} = \frac{50 - 47,7}{0,0457}$$

$$\Delta t_m = 49,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Srednja temperatura cevovoda je:

$$t_c = \frac{k}{\alpha_a} \Delta t_m + t_a = \frac{2,25}{4,65} \cdot 49,2 + 0$$

$$t_c = 23,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

pa se zaključuje da je srednja temperatura cevovoda od  $t_c=24 \text{ } ^\circ\text{C}$  predhodno dobro usvojena.

Pad pritiska kroz cevovod iznosi:

$$\Delta p = \frac{128 \cdot v_1 \dot{m} l}{\pi D^4} \left( \frac{\alpha_i + \alpha_a}{\alpha_i} \right)^{\frac{m}{4}} \cdot \frac{e^{mal} - 1}{mal} + \rho g H_g$$

$$\Delta p = \frac{128 \cdot 74 \cdot 10^{-6} \cdot 4000 \cdot 1500}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,1^4} \cdot \left( \frac{4,38 + 4,65}{4,38} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{2,72^{3 \cdot 0,0457} - 1}{3 \cdot 0,0457} + 950 \cdot 9,81 \cdot 20$$

$$\Delta p = 11,1 \text{ bar}$$

Snaga pumpe za vreme istovara sirove nafte iznosi:

$$P = \frac{\rho Q Y}{\eta_p} = \frac{Q \Delta p}{\eta_p} = \frac{0,0117 \cdot 11,1 \cdot 10^5}{0,6}$$

$$P = 21645 \text{ W} = 21,6 \text{ kW}$$

**Primer 3.10:** Kroz horizontalni izolovani naftovod dužine  $l = 20$  km transportuje se sirova nafta iz tankera do rafinerije. Naftovod se nalazi iznad zemlje na stubićima i unutrašnji prečnik mu je  $D_{ci} = 203$  mm, a spoljašnji  $D_{ca} = 219$  mm. Odrediti temperature  $t_1$  na početku i  $t_2$  na kraju naftovoda tako da pumpa, koja crpi naftu iz tankera i potiskuje je u rafineriju, radi sa optimalnim protokom  $Q = 0,029$  m<sup>3</sup>/s, naporom  $\Delta p = 26,7$  bar i stepenom korisnosti  $\eta_p = 0,7$ . Ostali podaci su: gustina nafte 960 kg/m<sup>3</sup>, temperatura vazduha  $t_a = 0$  °C, srednja specifična toplota nafte  $c_n = 2010$  J/kgK, koeficijent provođenja toplote nafte  $\lambda_n = 0,12$  W/mK, koeficijent provođenja toplote cevovoda  $\lambda_c = 46,5$  W/mK, koeficijent provođenja toplote izolacije  $\lambda_{iz} = 0,05$  W/mK, spoljašnji prečnik izolacije  $D_{iza} = 360$  mm i zavisnost promene kinematske viskoznosti nafte sa temperaturom  $\nu = \frac{25,9}{t^3}$  m<sup>2</sup>/s. Strujanje nafte je laminarno a prosečna brzina vetrova u predelu gde se nalazi naftovod iznosi  $v_0 = 10$  m/s. Lokalni otpori mogu da se zanemare.

Koeficijent prelaza toplote sa transportovane sirovine na cevovod i sa cevovoda na okolni vazduh iznose:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_n Nu}{D_{ci}} = \frac{0,12 \cdot 3,65}{0,203}$$

$$\alpha_i = 2,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\alpha_a = 7,2 \cdot v_0^{7,8} = 7,2 \cdot 10^{7,8}$$

$$\alpha_a = 43,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Proizvod koeficijenta prolaza toplote i srednjeg prečnika cevovoda sa izolacijom iznosi:

$$kD_m = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i D_{ci}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{ca}}{D_{ci}} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{D_{iza}}{D_{izi}} + \frac{1}{\alpha_a D_{iza}}}$$

$$kD_m = \frac{1}{\frac{1}{2,15 \cdot 0,203} + \frac{1}{2 \cdot 46,5} \ln \frac{0,219}{0,203} + \frac{1}{2 \cdot 0,05} \ln \frac{0,36}{0,219} + \frac{1}{43,3 \cdot 0,36}}$$

$$kD_m = 0,137 \text{ W/(mK)}$$



Pad pritiska pri strujanju nafte kroz cevovod iznosi:

$$\Delta p = \frac{128\rho v_1 Q l}{\pi D_{ci}^4} \left( \frac{\alpha_i D_{ci}}{\alpha_i D_{ci} - k D_m} \right)^{\frac{m}{4}} \frac{e^{mal} - 1}{mal}$$
$$\Delta p = \frac{128 \cdot 960 \cdot v_1 \cdot 0,029 \cdot 20000}{\pi \cdot 0,203^4} \cdot \left( \frac{2,16 \cdot 0,203}{2,16 \cdot 0,203 - 0,137} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{e^{3 \cdot 0,154} - 1}{3 \cdot 0,154}$$
$$\Delta p = 2,25 \cdot 10^{10} \cdot v_1$$

gde je:

$$al = \frac{k D_m \pi l}{\dot{m} c_n} = \frac{k D_m \pi l}{\rho Q c_n} = \frac{0,137 \cdot \pi \cdot 20000}{960 \cdot 0,029 \cdot 2010}$$
$$al = 0,154$$

Na osnovu poznate vrednosti pada pritiska određuje se viskoznost koju nafta mora da ima na početku cevovoda da bi pumpa radila u optimalnoj tački:

$$v_1 = \frac{\Delta p}{2,25 \cdot 10^{10}} = \frac{26,7 \cdot 10^5}{2,25 \cdot 10^{10}}$$
$$v_1 = 11,87 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Temperature nafte na početku i na kraju cevovoda iznose:

$$t_1 = \sqrt[3]{\frac{25,9}{v_1}} = \sqrt[3]{\frac{25,9}{11,87 \cdot 10^{-5}}}$$
$$t_1 = 60,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$
$$t_2 = t_1 e^{-al} = 60,2 \cdot e^{-0,154}$$
$$t_2 = 51,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pad temperature duž naftovoda iznosi:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 60,2 - 51,6$$
$$\Delta t = 8,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## Literatura:

1. Šašić M., (1990), *Transport fluida i čvrstih materijala cevima*, Naučna knjiga, Beograd
2. Mane Šašić, (1976). *Proračun transporta fluida i čvrstih materijala cevima*, Naučna knjiga, Beograd