

Dr MANE ŠAŠIĆ, dipl. inž.
vanredni profesor Mašinskog fakulteta

PRORAČUN TRANSPORTA FLUIDA I ČVRSTIH MATERIJALA CEVIMA

Naučna knjiga

BEOGRAD 1976.

Recenzent

Dr IVO VUŠKOVIĆ, dipl. inž.
redovni profesor Mašinskog fakulteta

zdavača *Dragoslav Joković*, urednik *Gordana Nikolić*, tehnički urednik *Mihailo Jozić*
Tiraž 3.000 primeraka

Štampa: NIGP „Privredni pregled“ — Beograd, Maršala Birjuzova 3—5

SADRŽAJ

	Strana
OZNAKE	XI
IZOTERMNO I NEIZOTERMNO STRUJANJE ZAGREJANIH TEČNOSTI — NAFTOVODI	1
IZOTERMNO I ADIJABATSKO STRUJANJE GASOVA — GASOVODI	51
NEIZOTERMNO I ADIJABATSKO STRUJANJE VODENE PARE — PAROVODI	113
HIDRAULIČNI TRANSPORT	131
FLUIDIZACIJA I PNEUMATSKI TRANSPORT	195
TABELE I DIJAGRAMI	247
LITERATURA	271

PREDGOVOR

Na Mašinskom fakultetu u Beogradu studenti hidroenergijskog, mehanizacijskog i smera za procesnu tehniku slušaju u VII i VIII semestru predmet Transport cevima u kome se uči o naftovodima, gasovodima, parovodima, hidrauličnom transportu, fluidizaciji i pneumatskom transportu. Zato je ova zbirka zadataka i sastavljena tako da, prvenstveno, slušaocima navedenih smerova olakša savladivanje gradiva predviđenog sadašnjim nastavnim programom. Međutim, nju mogu da koriste i studenti termoenergijskog i termotehničkog smera koji slušaju predmet Cevni vodovi, takođe, u VII i VIII semestru, zatim, diplomirani mašinski inženjeri kao i svi oni koji se na bilo koji način bave transportom fluida i čvrstih materijala cevima. Iako su zadaci nastali za potrebe studija na Mašinskom fakultetu u Beogradu, većina njih predstavlja konkretne slučajeve iz prakse. Manji broj zadataka uzet je iz ranije objavljene zbirke [1], koja je imala ograničenu cirkulaciju, a samo par zadataka preuzet je iz navedene literature [2] i [3].

Na kraju zbirke dat je poseban prilog o najvažnijim fizičkim svojstvima fluida i čvrstih materijala koji se transportuju cevima, kao i drugi podaci bez kojih se ne može pristupiti rešavanju praktičnih problema iz ove oblasti.

Sve dobronamerne primedbe i sugestije rado ću prihvatiti i uzeti u obzir prilikom pisanja sledećeg izdanja ako do njega bude došlo.

Zahvaljujem se profesoru Dr I. Vuškoviću na savetima koje mi je dao posle pregleda rukopisa.

Beograd, 1975.

Pisac

O Z N A K E

- A — površina poprečnog preeka cevi
 A_0 — površina poprečnog preseka pneumohidrauličnog lifta
 Ar — Arhimedov broj
 a — brzina zvuka, konstanta
 B — konstanta
 b — konstanta
 C — konstanta
 c — brzina materijala u mešavini fluid-materijal
 c_z — srednja zapreminska koncentracija materijala u horizontalnom cevovodu
 c_k — srednja težinska koncentracija materijala u horizontalnom cevovodu
 c_{zv} — srednja zapreminska koncentracija materijala u vertikalnom cevovodu
 c_{zu} — srednja zapreminska koncentracija materijala usisane mešavine pri transportu ejektorom
 c_{ku} — srednja težinska koncentracija materijala usisane mešavine pri transportu ejektorom
 c_n — srednja specifična toplota tečnosti
 D — unutrašnji prečnik neizolovanog cevovoda
 D_{ct} — unutrašnji prečnik izolovanog cevovoda
 D_{ca} — spoljašnji prečnik cevovoda
 D_{tzt} — unutrašnji prečnik izolacije na cevovodu
 D_{tza} — spoljašnji prečnik izolacije na cevovodu
 D_0 — unutrašnji prečnik pneumohidrauličnog lifta
 d — srednji ekvivalentni prečnik čestica materijala nejednolike krupnoće
 $°E$ — stepen Englera
 e — osnova prirodnog logaritma
 Fr — Froude-ov broj
 f — faktor oblika čestica materijala
 G — protok mase fluida
 G_f — protok mase fluida u mešavini
 G_s — protok mase materijala u mešavini
 G_m — protok mase mešavine
 g — ubrzanje Zemljine teže

H_p	— napor pumpe
H_d	— donja toplotna moć goriva
h_f	— gubitak energije usled trenja pri strujanju fluida
h_m	— gubitak energije usled trenja pri strujanju mešavine
i	— entalpija
i_f	— hidraulični nagib cevovoda pri strujanju fluida
i_m	— hidraulični nagib cevovoda pri strujanju mešavine
K	— konstanta
k	— koeficijent prolaza toplote kroz cevovod
k_R	— koeficijent prolaza toplote kroz rezervoar
k_0	— koeficijent uronjavanja pneumohidrauličnog lifta
L	— dužina cevovoda
l	— dužina deonice cevovoda
M	— Mach-ov broj
m	— konstanta
m_e	— odnos površina preseka komore za mešanje i mlaznika ejektora
Nu	— Nusselt-ov broj
n	— konstanta
n_e	— odnos površina preseka komore za mešanje usisnika ejektora
P	— snaga pumpe ili kompresora
Pr	— Prandtl-ov broj
p	— apsolutni pritisak
p_a	— atmosferski pritisak
p_m	— nadpritisak
p_e	— podpritisak
p_c	— kritični pritisak pri kome gas prelazi u tečno stanje
p_t	— totalni pritisak
p_r	— protivpritisak na kraju cevi fluid-lifta
p_{vp}	— parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu
p_{sv}	— parcijalni pritisak suvog vazduha u vlažnom vazduhu
Δp_f	— pad pritiska pri strujanju fluida
Δp_s	— pad pritiska zbog prisustva materijala u struji fluida
Δp_m	— pad pritiska pri strujanju mešavine
Δp_e	— napor ejektora
Q	— količina toplote
q	— zapreminski protok fluida
q_f	— zapreminski protok fluida u mešavini
q_s	— zapreminski protok materijala u mešavini
q_m	— zapreminski protok mešavine
q_e	— zapreminski protok materijala u nasutom stanju
q_0	— zapreminski protok gasa pri normalnim uslovima
q_0^*	— specifična potrošnja vazduha u pneumohidrauličnom liftu

R	— gasna konstanta
Re	— Reynolds-ov broj
r	— latentna toplota isparavanja (kondenzovanja)
s	— relativna specifična težina, relativna gustina
T	— apsolutna temperatura
T_c	— kritična temperatura pri kojoj gas prelazi u tečno stanje
T_i	— totalna temperatura
T_m	— srednja vrednost apsolutne temperature
T_p	— funkcija pogonskih troškova
T_Q	— funkcija troškova zagrevanja fluida
T_e	— funkcija ukupnih troškova transporta
t	— temperatura
t_e	— srednja temperatura zida cevovoda
t_f	— srednja temperatura fluida duž cevovoda
t_a	— temperatura okoline
t_m	— srednja temperatura
Δt_m	— srednja logaritamska razlika temperature
v	— brzina fluida
v_f	— brzina fluida u mešavini
v_m	— brzina mešavine
v_0	— srednja brzina trokomponentne mešavine u pneumohidrauličnom liftu
v_s	— teorijska brzina slobodnog pada čestice oblika lopte u fluidnoj sredini koja miruje
v_{st}	— stvarna brzina slobodnog pada čestice materijala
w	— relativna brzina fluida u odnosu na čestice materijala u mešavini
w_1^*	— prva kritična brzina fluidizacije
w_2^*	— druga kritična brzina fluidizacije
Z	— funkcija (faktor) superstišljivosti
α	— ugao nagiba strujnog toka prema horizontu
α_i	— koeficijent prelaza toplote sa fluida na cevovod
α_a	— koeficijent prelaza toplote sa cevovoda na okolinu
β	— Barth-ov parametar
δ	— apsolutna hrapavost unutrašnjosti cevovoda
δ_c	— debljina zida cevi
δ_{iz}	— debljina izolacije
ϵ	— koeficijent poroznosti materijala
ζ	— koeficijent lokalnog otpora
ϕ	— odnos zapreminskih protoka vode i materijala u nasutom stanju za vreme hidrauličnog transporta
\times	— odnos specifičnih toplota pri stalnom pritisku i zapremini
μ	— koeficijent dinamičke viskoznosti
μ_e	— koeficijent protoka ejektora
μ_r	— koeficijent trenja materijala o zid cevovoda

- ν — koeficijent kinematske viskoznosti
- ρ — gustina fluida
- ρ_{vp} — gustina vodene pare u vlažnom vazduhu
- ρ_{sv} — gustina suvog vazduha u vlažnom vazduhu
- ρ_f — gustina fluida u mešavini za vreme transporta
- ρ_s — gustina materijala u mešavini
- ρ_m — gustina mešavine
- φ — koeficijent punjenja pneumatskog žljeba
- φ_1 — koeficijent brzine mlaznika ejektora
- φ_p — koeficijent protoka vodene pare pri strujanju sa kondenzacijom
- φ_D — dopunski koeficijent otpora pri strujanju mešavina
- ψ_k — stepen kompresije — rekompresije
- ψ_s — odnos pada pritiska pri pneumatskom transportu stvarnog materijala prema padu pritiska pri transportu ekvivalentnih kuglica
- ψ_e — koeficijent pritiska ejektora
- ω — specifična vlažnost vazduha
- λ — koeficijent trenja fluida za vreme strujanja
- λ_f — koeficijent trenja fluida pri strujanju mešavine
- λ_s — dopunski koeficijent otpora zbog prisustva materijala u struji fluida
- λ_m — koeficijent trenja mešavine za vreme strujanja
- λ_r — koeficijent proporcionalnosti između radijalnog i aksijalnog pritiska pri pneumatskom transportu fluidizacijom
- λ_{vk} — koeficijent trenja vazduha pri prostrujavanju materijala svedenog na ekvivalentne kuglice
- λ_v^* — specifični koeficijent otpora materijala za vreme letećeg pneumatskog transporta
- λ_H — koeficijent provođenja toplote pri neizotermnom strujanju
- η — koeficijent korisnosti (indeks p-pumpe, k-kompresora, e-ejektora, m-motora)

**IZOTERMNO I NEIZOTERMNO STRUJANJE TEČNOSTI
NAFTOVODI**

1. Kroz horizontalni pravolinijski cevovod prečnika $D = 80$ mm i dužine $l = 900$ m pumpa transportuje $G = 20$ t/h bitumena razvijajući nadpritisak $\Delta p = 24,5$ bar. Koju je temperaturu imao bitumen za vreme transporta, ako je zavisnost između njegove viskoznosti i temperature data obrascem $\nu = 23 \cdot 10^6 / t^6$ m²/s? Strujanje bitumena za vreme transporta bilo je laminarno i izotermno.

Rešenje:

Iz obrasca za pad pritiska pri laminarnom izotermnom strujanju,

$$\Delta p = \frac{128 \nu G l}{\pi D^4},$$

sledeje vrednost kinematske viskoznosti

$$\nu = \frac{\Delta p \pi D^4}{128 G l} = \frac{24,5 \cdot 10^5 \cdot 3,14 \cdot 0,080^4}{128 \cdot 5,55 \cdot 900} = 493 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

koja se mora postići zagrevanjem bitumena da bi se obezbedio predviđeni kapacitet transporta. Iz obrasca za promenu viskoznosti sa temperaturom, dobija se da je ona iznosila

$$t = 10 \sqrt[6]{\frac{23}{\nu}} = 10 \sqrt[6]{\frac{23}{493} \cdot 10^6} = 60 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2. Za loženje parnih kotlova u jednoj termocentrali troši se $G = 91,6$ t/h mazuta koji se do kotlarnice transportuje horizontalnim cevovodom prečnika $D = 200$ mm i dužine $l = 11$ km. Srednja gustina mazuta iznosi $\rho = 925$ kg/m³ i viskoznost 20 °E. Izračunati pritisak koji pumpa mora da ostvari na početku cevovoda, ako apsolutni pritisak na njegovom kraju treba da bude $p_2 = 1,5$ bar. Pretpostaviti da je strujanje mazuta izotermno i lokalne otpore zanemariti.

Rešenje:

Pritisak mazuta na početku cevovoda treba da iznosi

$$p_1 = p_2 + \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho v^2.$$

Kad se prethodno izračunaju sledeće veličine:

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{91600}{925 \cdot 3600} = 0,0275 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,0275}{0,0314} = 0,875 \text{ m/s},$$

$$\nu \approx 7,60 \cdot 10^{-6} = 7,60 \cdot 20 = 152 \text{ cSt} = 152 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{0,875 \cdot 0,200}{152 \cdot 10^{-6}} = 1150,$$

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1150} = 0,0556,$$

i, zatim, ubace u izraz za pad pritiska dobija se pritisak na početku cevovoda

$$p_1 = 1,5 \cdot 10^5 + 0,0556 \frac{11000}{0,200} \frac{925}{2} \cdot 0,765 = 12,3 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

3. Na koju temperaturu treba da se greje sirova nafta u tankeru pa da pumpa, koja potiskuje naftu iz tankera u rezervoar na obali, ostvari protok $G = 44 \text{ kg/s}$ pri naporu $H_p = 70 \text{ m}^2$. Srednji nivo nafte u tankeru nalazi se na $H_g = 25 \text{ m}$ ispod srednjeg nivoa nafte u rezervoaru. Ostali podaci su: $D = 150 \text{ mm}$, $l = 400 \text{ m}$, $\delta = 0,15 \text{ mm}$, $\rho = 880 \text{ kg/m}^3$, $\Sigma \zeta = 14$. Strujanje je izotermno a promena viskoznosti sa temperaturom data je kao $\nu = 1,72/t^{2,5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Rešenje:

Ako se prvo odredi brzina sirove nafte u cevovodu,

$$v = \frac{G}{\rho A} = \frac{44}{880 \cdot 0,0177} = 2,83 \text{ m/s},$$

može se tada iz izraza za napor pumpe pri izotermnom strujanju,

$$H_p = H_g + \left(\lambda \frac{l}{D} + \Sigma \zeta \right) \frac{v^2}{2g},$$

izračunati vrednost člana

$$\lambda \frac{l}{D} = \frac{2g(H_p - H_g)}{v^2} - \Sigma \zeta = \frac{19,62 \cdot 45}{8} - 14 = 96,$$

i, zatim, koeficijent trenja

$$\lambda = \frac{96 D}{l} = \frac{96 \cdot 0,150}{400} = 0,036.$$

Ovoj vrednosti koeficijenta trenja i relativnoj hrapavosti 0,001 odgovara $Re = 6500$ iz dijagrama 1. Kako je vrednost kinematske viskoznosti

$$\nu = \frac{v D}{Re} = \frac{2,83 \cdot 0,150}{6500} = 65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

to temperatura na koju treba da se zagreje ova sirova nafta iznosi

$$t = \left(\frac{1,72}{\nu} \right)^{0,4} = \left(\frac{1,72}{65 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,4} = 60 \text{ }^\circ\text{C}.$$

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

a) temperaturu t_1 na koju se mora zagreјati ova nafta da bi se ostvario predviđeni kapacitet transporta. Pretpostaviti da je strujanje laminarno i izotermno i lokalne otpore zanemariti.

b) pad temperature u cevovodu pod pretpostavkom da koeficijent prolaza toplote kroz cevovod iznosi $k = 2,9 \text{ J/m}^2\text{sK}$ i da je srednja specifična toplota nafte $c_n = 2094 \text{ J/kg K}$.

c) snagu za pogon pumpe ako je njen stepen korisnosti $\eta_p = 0,65$.

Rešenje:

a) Iz izraza za pad pritiska pri laminarnom izotermnom strujanju nalazi se odgovarajuća viskoznost

$$\nu = \frac{\Delta p \pi D^4}{128 \rho q l} = \frac{25 \cdot 98100 \cdot 3,14 \cdot 0,075^4}{128 \cdot 1050 \cdot 0,0055 \cdot 550} = 595 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

i, zatim, temperatura (t_1) zagrevanja nafte kao

$$t_1 = \sqrt[3]{\frac{200}{\nu}} = \sqrt[3]{\frac{200}{595 \cdot 10^{-6}}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}.$$

b) Temperatura t_2 na kraju cevovoda dobija se iz obrasca

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

gde je

$$al = \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{2,9 \cdot 0,075 \cdot 3,14 \cdot 550}{5,83 \cdot 2094} = 0,0308.$$

Prema tome, temperatura nafte na kraju cevovoda iznosi

$$t_2 = 70 \cdot 2,72^{-0,0308} = 68 \text{ }^\circ\text{C},$$

pa je pad temperature duž cevovoda

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 70 - 68 = 2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

c) Snaga za pogon pumpe je

$$P = \frac{q \Delta p}{1000 \eta_p} = \frac{0,0055 \cdot 24,5 \cdot 10^5}{1000 \cdot 0,65} = 20,7 \text{ kW.}$$

5. Kroz neizolovani horizontalni naftovod prečnika $D = 300 \text{ mm}$ i dužine $l = 10 \text{ km}$ transportovana je sirova nafta pri konstantnoj temperaturi $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Strujanje je bilo laminarno i pad pritiska iznosio je $\Delta p = 9,3 \text{ bar}$. 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 $t_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Ostali potrebni podaci su: $k = 3,5 \text{ J/m}^2\text{s K}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$ i viskoznost $\nu = 0,12/t^2 \text{ m}^2/\text{s}$. Izračunati i vrednost Re broja na početku naftovoda.

Rešenje:

Kad se izračuna viskoznost nafte na temperaturi $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$\nu = \frac{0,12}{225} = 535 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

može se iz izraza za pad pritiska pri laminarnom izotermnom strujanju,

$$\Delta p = \frac{128 \nu G l}{\pi D^4},$$

izračunati kapacitet transporta

$$G = \frac{\Delta p \pi D^4}{128 \nu l} = \frac{9,3 \cdot 10^5 \cdot 3,14 \cdot 0,300^4}{128 \cdot 535 \cdot 10^{-6} \cdot 10000} = 35 \text{ kg/s.}$$

Posle određivanja proizvoda

$$a l = \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{3,5 \cdot 0,300 \cdot 3,14 \cdot 10000}{35 \cdot 1885} = 0,50,$$

nalazi se temperatura zagrevanja sirove nafte

$$t_1 = t_2 e^{a l} = 30 \cdot 2,72^{0,50} = 49,5 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Na temperaturi t_1 brzina i viskoznost iznose:

$$v = \frac{G}{\rho A} = \frac{35}{1000 \cdot 0,0707} = 0,5 \text{ m/s,}$$

$$\nu_1 = \frac{0,12}{t_1^2} = \frac{0,12}{49,5^2} = 48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s.}$$

pa je vrednost Re broja na početku naftovoda

$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{0,5 \cdot 0,300}{48 \cdot 10^{-6}} = 3012.$$

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

6. Otpremni rezervoar za mazut nalazi se na jednoj uzvišici iznad železničke pruge. Za punjenje vagon-cisterna koristi se geodezijska visina od 30 m i neizolovani cevovod prečnika 100 mm, dužine 500 m. Na koju temperaturu t_1 treba zagrevati mazut ako se želi postići punjenje cisterna kapacitetom $G = 30 \text{ t/h}$? Pri proračunu pretpostaviti da je strujanje laminarno i izotermno sa srednjom temperaturom mazuta $t = (t_1 + 2t_2)/3$. Pošto strujanje nije izotermno, izračunati pad temperature duž cevovoda ako koeficijent prolaza toplote kroz cevovod iznosi $k = 3,5 \text{ J/m}^2\text{sK}$. Ostali podaci su: $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, $\nu = 43/t^2 \text{ m}^2/\text{s}$, $t_n = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rešenje:

Posle određivanja brzine mazuta u cevovodu,

$$v = \frac{G}{\rho A} = \frac{30000}{950 \cdot 0,00785 \cdot 3600} = 1,12 \text{ m/s,}$$

nalazi se koeficijent trenja λ i Re broj,

$$\lambda = \frac{2g D H_g}{l v^2} = \frac{19,62 \cdot 0,100 \cdot 30}{500 \cdot 1,25} = 0,094,$$

$$Re = \frac{64}{\lambda} = \frac{64}{0,094} = 680.$$

Sad se može izračunati viskoznost

$$\nu = \frac{v D}{Re} = \frac{1,12 \cdot 0,100}{680} = 165 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

i, zatim, srednja temperatura mazuta

$$t = \sqrt[3]{\frac{43}{\nu}} = \sqrt[3]{\frac{43}{165 \cdot 10^{-6}}} = 64 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Kako je proizvod

$$a l = \frac{k \dot{D} \pi l}{G c_n} = \frac{3,5 \cdot 0,100 \cdot 3,14 \cdot 500}{8,33 \cdot 1885} = 0,035,$$

to je temperatura mazuta na početku cevovoda

$$t_1 = t_2 e^{a l} = t_2 2,72^{0,035} = 1,04 t_2.$$

Iz ove jednačine i jednačine za srednju temperaturu, koja je malopre izračunata, nalaze se temperature:

$$t_1 = 66 \text{ }^\circ\text{C}, \quad t_2 = 63,3 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Dakle, pad temperature duž cevovoda iznosi

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 66 - 63,3 = 2,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

7. Unutar jedne rafinerije transportuje se bitumen kroz neizolovani horizontalni cevovod prečnika $D = 50 \text{ mm}$ i dužine $l = 600 \text{ m}$. Kapacitet transporta iznosi $G = 6 \text{ t/h}$ pri temperaturi $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Pojavila se potreba za trostrukim povećanjem kapaciteta. Pošto je cevovod u pogledu dozvoljenog pritiska maksimalno opterećen to se za povećanje kapaciteta mora povisiti i temperatura zagrevanja bitumena da bi se u cevovodu postigao isti pad pritiska kao i pri prvobitnom kapacitetu. Podaci o bitumenu su: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 1885 \text{ J/kgK}$, $\log \log \nu = 0,82 - 0,007 \cdot t$ (cSt), t je temperatura u $^\circ\text{C}$. Treba odrediti:

a) pad pritiska u cevovodu i snagu pumpe ($\eta_p = 0,75$) pri kapacitetu G , pretpostavljajući da je strujanje izotermno,

b) temperaturu zagrevanja bitumena radi ostvarivanja trostrukog kapaciteta pri istom padu pritiska, pretpostavljajući i ovde da je strujanje izotermno, i

c) pad temperature duž cevovoda pri povećanom kapacitetu, ako je $k D_m = 0,145 \text{ J/msK}$.

Rešenje:

a) Pre izračunavanja pada pritiska potrebno je videti da li je strujanje bitumena laminarno ili turbulentno. Naime, treba odrediti redom sledeće veličine:

$$q' = \frac{G'}{\rho} = \frac{6000}{1000 \cdot 3600} = 0,00167 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v' = \frac{q'}{A} = \frac{0,00167}{0,00196} = 0,86 \text{ m/s},$$

$$\log \log \nu' = 0,82 - 0,007 \cdot 60 = 0,4,$$

$$\nu' = 332 cSt = 332 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re' = \frac{v' D}{\nu'} = \frac{0,86 \cdot 0,050}{332 \cdot 10^{-6}} = 130.$$

Pošto je strujanje laminarno a pad temperature u cevovodu zanemaruje se, to kapacitetu G' odgovara sledeći pad pritiska:

$$\begin{aligned} \Delta p' &= \frac{128 \rho q' \nu' l}{\pi D^4} = \frac{128 \cdot 1000 \cdot 0,00167 \cdot 332 \cdot 10^{-6} \cdot 600}{3,14 \cdot 0,050^4} = \\ &= 2\,140\,000 \text{ N/m}^2 = 21,4 \text{ bar}. \end{aligned}$$

Snaga za pogon pumpe je

$$P = \frac{q' \Delta p'}{1000 \eta_{ip}} = \frac{0,00167 \cdot 2140000}{1000 \cdot 0,75} = 4,8 \text{ kW.}$$

b) Iz uslova $\Delta p'' = \Delta p'$ pri $G'' = 3G'$, i zbog pretpostavke da je strujanje izotermno, sleduje $v' q' = v'' q'' = v'' \cdot 3q'$, odnosno

$$v'' = \frac{1}{3} v' = \frac{332}{3} = 110,6 \text{ cSt.}$$

Sad se iz jednačine

$$\log \log v'' = 0,82 - 0,007 t_1''$$

dobija temperatura t_1'' do koje se mora zagrevati bitumen pri povećanom kapacitetu:

$$t_1'' = \frac{0,82 - \log \log v''}{0,007} = \frac{0,82 - 0,31}{0,007} = 72,8 \text{ }^\circ\text{C.}$$

c) Kako je u ovom slučaju

$$a l = \frac{k D_m \pi l}{G'' c_n} = \frac{0,145 \cdot 3,14 \cdot 600}{5 \cdot 1885} = 0,029,$$

to je odnos temperatura na početku i na kraju cevovoda, pri povećanom kapacitetu,

$$\frac{t_1''}{t_2''} = e^{a l} = 2,72^{0,029} = 1,03.$$

Kad se odavde izračuna $t_2'' = 70,7 \text{ }^\circ\text{C}$ nalazi se pad temperature

$$\Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 72,8 - 70,7 = 2,1 \text{ }^\circ\text{C.}$$

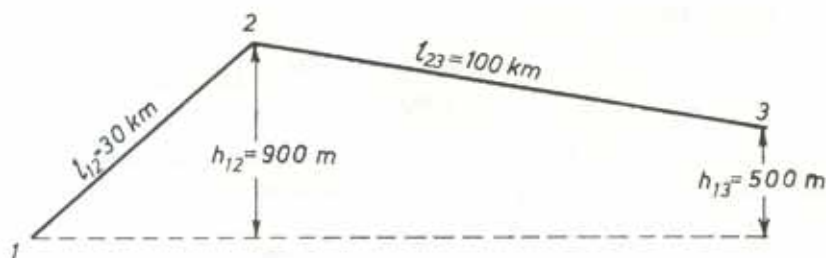
8. Kroz naftovod prečnika $D = 500$ mm i dužine $l = 130$ km, koji prelazi preko planine kao što je na skici prikazano, protiče $q_0 = 850 \text{ m}^3/\text{h}$ sirove nafte srednje temperature $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, kinematske viskoznosti $\nu_0 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ i odgovarajuće srednje gustine $\rho_0 = 900 \text{ kg/m}^3$. Treba odrediti:

a) napor pumpe koja potiskuje sirovu naftu od mesta 1 ka mestu 3, ako je $p_3 = 1$ bar. Lokalne otpore zanemariti,

b) protok i napor pumpe za slučaj da se srednja temperatura nafte povisi na $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\nu = 40 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho = 890 \text{ kg/m}^3$), ako je karakteristika pumpe

$$\frac{H}{H_0} = 1,765 - 0,765 \left(\frac{q}{q_0} \right)^{0,875},$$

gde su q_0 (m^3/s) i H_0 (m) protok i napor pumpe pri temperaturi t_0 , a q (m^3/s) i H (m) protok i napor pumpe pri temperaturi t .



Rešenje:

a) Pre određivanja napora pumpe,

$$H_0 = \lambda_0 \frac{l}{D} \frac{v_0^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho_0 g} + h_{13},$$

potrebno je sračunati sledeće veličine:

$$q_0 = \frac{850}{3600} = 0,236 \text{ m}^3/\text{s}, \quad v_0 = \frac{q_0}{A} = \frac{0,236}{0,196} = 1,2 \text{ m/s},$$

$$Re_0 = \frac{v_0 D}{\nu_0} = \frac{1,2 \cdot 0,500}{1,2 \cdot 10^{-4}} = 5000,$$

$$\lambda_0 = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_0}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{5000}} = 0,0376.$$

Prema uslovu zadatka je $p_3 = 1$ bar pa je napor pumpe

$$H_0 = 0,0376 \frac{130000}{0,500} \frac{1,44}{19,62} + \frac{100000}{900 \cdot 9,81} + 500 = 1231,1 \text{ m}.$$

b) Za slučaj da se srednja temperatura nafte povisi na 15°C napor pumpe će iznositi

$$H = \Delta h_{13} + \frac{p_3}{\rho g} + h_{13} = \Delta h_{13} + \frac{100000}{890 \cdot 9,81} + 500 = \Delta h_{13} + 511,2,$$

gde je *za reverzno turbulentno strujanje*

$$\Delta h_{13} = \frac{0,0246 \nu^{0,25} q^{1,75} l}{D^{4,75}} = \frac{0,0246 (40 \cdot 10^{-6})^{0,25} 130000}{0,500^{4,75}} q^{1,75} = 6850 q^{1,75}$$

gubitak energije usled trenja na ovoj temperaturi. Zamenom vrednosti Δh_{13} u izraz za napor pumpe i deljenjem sa H_0 dobija se jednačina

$$\frac{H}{H_0} = 0,415 + 5,55 q^{1,75}.$$

Izjednačenjem ovoga odnosa sa odnosom H/H_0 iz karakteristike pumpe, sleduje jednačina

$$0,415 + 5,55 q^{1,75} = 1,765 - 0,765 \left(\frac{q}{q_0} \right)^{0,875},$$

odakle je, posle zamene $q_0 = 0,236 \text{ m}^3/\text{s}$,

$$5,55 q^{1,75} + 2,7 q^{0,875} - 1,35 = 0.$$

Ako se stavi $q^{1,75} = x^2$ onda je $q^{0,875} = x$ pa prethodna jednačina dobija oblik

$$5,55 x^2 + 2,7 x - 1,35 = 0$$

čije je rešenje $x = 0,306$. Prema tome, protok pumpe iznosi

$$q = x^{1,14} = 0,306^{1,14} = 0,26 \text{ m}^3/\text{s},$$

dok napor H ima vrednost

$$H = 511,2 + 6850 \cdot 0,306^2 = 1151,2 \text{ m}.$$

9. Odrediti koeficijent prolaza toplote kroz naftovod za slučaj da su poznati sledeći podaci: prečnik naftovoda $D = 250 \text{ mm}$, njegova dužina $l = 28,3 \text{ km}$, kapacitet transporta $G = 135 \text{ t/h}$, temperatura nafte na kraju cevovoda $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, srednja gustina nafte $\rho = 960 \text{ kg/m}^3$, srednja specifična toplota $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, Reynoldsov broj na početku naftovoda $Re_1 = 2000$, spoljna temperatura $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ i promena viskoznosti sa temperaturom $\nu = 0,25/t^2 \text{ m}^2/\text{s}$.

Rešenje:

Iz izraza za Reynoldsov broj na početku cevovoda, :

$$Re_1 = \frac{vD}{\nu_1} = \frac{4G t_1^2}{0,25 \rho D \pi},$$

sleduje temperatura t_1 kao

$$t_1 = \sqrt{\frac{0,25 Re_1 \rho D \pi}{4G}} = \sqrt{\frac{0,25 \cdot 2000 \cdot 960 \cdot 0,25 \cdot 3,14}{4 \cdot 37,5}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Kako je

$$a l = \ln \frac{t_1}{t_2} = \ln \frac{50}{20} = 0,915,$$

za $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, to je vrednost koeficijenta prolaza toplote kroz naftovod

$$k = \frac{G c_n a l}{D l \pi} = \frac{37,5 \cdot 1885 \cdot 0,915}{0,25 \cdot 28300 \cdot 3,14} = 2,9 \text{ J/m}^2\text{sK}.$$

10. Kroz neizolovani naftovod prečnika $D = 250$ mm i dužine $l = 18,3$ km transportuje se $G = 80$ t/h sirove nafte čije su karakteristike: $\rho = 1150$ kg/m³, $c_n = 1885$ J/kgK, $\nu = 0,2/t^2$ m²/s. Odrediti temperaturu t_1 zagrevanja ove nafte s obzirom da njena temperatura na kraju cevovoda treba da bude 25 °C. Koeficijent prolaza toplote kroz naftovod je $k = 2,9$ J/m²sK. Na kraju, proveriti da li je strujanje ove sirove nafte laminarno.

Rešenje:

Kako je

$$a l = \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{2,9 \cdot 0,250 \cdot 3,14 \cdot 18300}{22,2 \cdot 1885} = 1,$$

to je temperatura na početku cevovoda

$$t_1 = t_2 e^{a l} = 25 \cdot 2,72 = 68 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Na ovoj temperaturi su viskoznost i brzina,

$$\nu_1 = \frac{0,2}{t_1^2} = \frac{0,2}{4620} = 43,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$v = \frac{G}{\rho A} = \frac{22,2}{1150 \cdot 0,049} = 0,38 \text{ m/s.}$$

pa je vrednost Re broja na početku naftovoda

$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{0,38 \cdot 0,250}{43,2 \cdot 10^{-6}} = 2260 < Re^* ,$$

što znači da je strujanje laminarno na celoj dužini naftovoda.

11. Kroz neizolovani naftovod transportuje se G (t/h) sirove nafte čija se kinematska viskoznost menja obrnuto proporcionalno sa kvadratom temperature. Strujanje je laminarno i odnos temperatura na početku i na kraju naftovoda iznosi $t_1/t_2 = 3$. Ako se kapacitet naftovoda poveća za 20% kolika mora da bude tada temperatura t_1 na početku cevovoda za slučaj da temperatura t_2 na kraju naftovoda mora da ostane ista? Za koliko će se promeniti pad pritiska u naftovodu pod pretpostavkom da su svi koeficijenti prelaza i provođenja toplote, kao i podaci o nafti i cevovodu, ostali isti kao i pri prvobitnom kapacitetu?

Rešenje:

Pre povećanja kapaciteta važila je jednačina

$$\ln \frac{t_1}{t_2} = \frac{k D \pi l}{G c_n} ,$$

dok je posle povećanja kapaciteta za 20%

$$\ln \frac{t_1'}{t_2} = \frac{k D \pi l}{1,2 G c_n}$$

Iz ovih dveju jednačina dobija se

$$\ln \frac{t_1'}{t_2} = \frac{1}{1,2} \ln \frac{t_1}{t_2},$$

odakle je, posle zamene brojnih vrednosti,

$$\frac{t_1'}{t_2} = 3^{0,835} = 2,5$$

Prema tome, temperatura t_1' iznosi:

$$t_1' = 2,5 t_2 = 2,5 \frac{t_1}{3} = 0,835 t_1.$$

Kapacitetu G odgovara pad pritiska

$$\Delta p = \frac{128 \nu_2 \rho q l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_l + \alpha_a}{\alpha_l} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal e^{mal}} = C q \frac{e^{mal} - 1}{mal e^{mal}},$$

gde su

$$mal = 2 \ln \frac{t_1}{t_2} = 2 \ln 3 = 2,18,$$

$$e^{mal} = 2,72^{2,18} = 8,7.$$

Kapacitetu $G' = 1,2 G$ odgovara pad pritiska

$$\Delta p' = \frac{128 \nu_2 \rho q' l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_l + \alpha_a}{\alpha_l} \right)^{m/4} \frac{e^{(mal)'} - 1}{(mal)' e^{(mal)'}} = C q' \frac{e^{(mal)'} - 1}{(mal)' e^{(mal)'}}$$

gde su

$$(mal)' = 2 \ln \frac{t_1'}{t_2} = 2 \ln 2,5 = 1,83,$$

$$e^{(mal)'} = 2,72^{1,83} = 6,15.$$

Prema tome, zamenom izračunatih vrednosti u odgovarajuće izraze dobijaju se:

$$\Delta p = C q \frac{8,7 - 1}{2,18 \cdot 8,7} = 0,405 C q,$$

$$\Delta p' = C q' \frac{6,15 - 1}{1,83 \cdot 6,15} = 0,455 C q',$$

odakle je, zbog $q' = 1,2 q$,

$$\frac{\Delta p'}{\Delta p} = \frac{0,455 C q'}{0,405 C q} = \frac{0,455 \cdot 1,2}{0,405} = 1,35.$$

Dakle, povećanje pada pritiska iznosi 35% .

12. Kroz naftovod prečnika $D = 100$ mm i dužine $l = 4,5$ km transportuje se sirova nafta iz tankera u rezervoare rafinerije. Srednja geodezijska visina između nivoa nafte u tankeru i u rezervoaru iznosi $H_g = 30$ m. Naftovod je položen po površini zemlje bez toplotne izolacije, a kapacitet transporta iznosi $q = 27,5$ m³/h. Ostali podaci o nafti i cevovodu su: $\rho = 910$ kg/m³, $c_n = 1885$ J/kgK, $\nu = 6/t^3$ m²/s, $\alpha_f = 4,25$ J/m²sK, $\alpha_a = 11,6$ J/m²sK, $t_a = 0$ °C. Zanemarujući lokalne otpore, odrediti:

a) temperaturu t_2 nafte na kraju cevovoda, ako se ona zagreva na temperaturu $t_1 = 50$ °C,

b) napor i snagu pumpe čiji je stepen korisnosti 0,70.

Rešenje:

a) Temperatura nafte na kraju cevovoda nalazi se iz odnosa

$$\frac{t_1}{t_2} = e^{al}, \quad al = \frac{k D \pi l}{G c_n}.$$

Posle izračunavanja koeficijenta prolaza toplote kroz naftovod

$$k \approx \frac{\alpha_f \alpha_a}{\alpha_f + \alpha_a} = \frac{4,25 \cdot 11,6}{4,25 + 11,6} = 3,10 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

nalazi se vrednost člana

$$al = \frac{3,10 \cdot 0,100 \cdot 3,14 \cdot 4500}{6,95 \cdot 1885} = 0,335,$$

pa je temperatura

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 50 \cdot 2,72^{-0,335} = 35,7 \text{ °C}.$$

b) Pre određivanja napora i snage pumpe mora se ustanoviti režim strujanja. Dakle, potrebno je sračunati ove veličine:

$$v = \frac{q}{A} = \frac{27,5}{0,00785 \cdot 3600} = 0,97 \text{ m/s},$$

$$\nu_1 = \frac{6}{t_1^3} = \frac{6}{50^3} = 48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{0,97 \cdot 0,100}{48 \cdot 10^{-6}} = 2000.$$

odakle je, zbog $q' = 1,2 q$,

$$\frac{\Delta p'}{\Delta p} = \frac{0,455 C q'}{0,405 C q} = \frac{0,455 \cdot 1,2}{0,405} = 1,35.$$

Dakle, povećanje pada pritiska iznosi 35%.

12. Kroz naftovod prečnika $D = 100$ mm i dužine $l = 4,5$ km transportuje se sirova nafta iz tankera u rezervoare rafinerije. Srednja geodezijska visina između nivoa nafte u tankeru i u rezervoaru iznosi $H_g = 30$ m. Naftovod je položen po površini zemlje bez toplotne izolacije, a kapacitet transporta iznosi $q = 27,5$ m³/h. Ostali podaci o nafti i cevovodu su: $\rho = 910$ kg/m³, $c_n = 1885$ J/kgK, $\nu = 6 \cdot 10^{-6}$ m²/s, $\alpha_l = 4,25$ J/m²sK, $\alpha_a = 11,6$ J/m²sK, $t_a = 0$ °C. Zanemarujući lokalne otpore, odrediti:

a) temperaturu t_2 nafte na kraju cevovoda, ako se ona zagreva na temperaturu $t_1 = 50$ °C,

b) napor i snagu pumpe čiji je stepen korisnosti 0,70.

Rešenje:

a) Temperatura nafte na kraju cevovoda nalazi se iz odnosa

$$\frac{t_1}{t_2} = e^{al}, \quad al = \frac{k D \pi l}{G c_n}.$$

Posle izračunavanja koeficijenta prolaza toplote kroz naftovod

$$k \approx \frac{\alpha_l \alpha_a}{\alpha_l + \alpha_a} = \frac{4,25 \cdot 11,6}{4,25 + 11,6} = 3,10 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

nalazi se vrednost člana

$$al = \frac{3,10 \cdot 0,100 \cdot 3,14 \cdot 4500}{6,95 \cdot 1885} = 0,335,$$

pa je temperatura

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 50 \cdot 2,72^{-0,335} = 35,7 \text{ °C}.$$

b) Pre određivanja napora i snage pumpe mora se ustanoviti režim strujanja. Dakle, potrebno je sračunati ove veličine:

$$v = \frac{q}{A} = \frac{27,5}{0,00785 \cdot 3600} = 0,97 \text{ m/s},$$

$$\nu_1 = \frac{6}{t_1^3} = \frac{6}{50^3} = 48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{0,97 \cdot 0,100}{48 \cdot 10^{-6}} = 2000.$$

Pošto je $Re_1 < Re^*$ pad pritiska određen je jednačinom

$$\Delta p = \frac{128 \nu_1 \rho q l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_l + \alpha_a}{\alpha_l} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal} + \rho g H_g,$$

u kojoj je $m = 3$, što se vidi iz zakona promene viskoznosti sa temperaturom. Prema tome, pad pritiska iznosi

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{128 \cdot 48 \cdot 10^{-6} \cdot 910 \cdot 0,00765 \cdot 4500}{\pi \cdot 0,0001^4} \left(\frac{4,25 + 11,6}{4,25} \right)^{3/4} \frac{2,72 - 1}{1,00} + \\ &+ 30 \cdot 910 \cdot 9,81 = 612654 \cdot 2,69 \cdot 1,72 + 267813 = \\ &= 3.102.440 \text{ N/m}^2 = 31 \text{ bar}, \end{aligned}$$

a snaga za pogon pumpe je

$$P = \frac{q \Delta p}{1000 \eta_p} = \frac{0,00765 \cdot 3102440}{1000 \cdot 0,7} = 33,9 \text{ kW}.$$

13. U jednoj fabrici bitumen se transportuje kroz horizontalni cevovod prečnika $D = 100 \text{ mm}$ i dužine $l = 800 \text{ m}$. Cevovod je neizolovan i nalazi se u zaštitnom kanalu. Bitumen se greje na temperaturu $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ a kapacitet transporta iznosi $G = 30 \text{ t/h}$. Ostali podaci su: srednja gustina bitumena $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, koeficijent provođenja toplote bitumena $\lambda_n = 0,116 \text{ J/msK}$, srednja specifična toplota $c_n = 2011 \text{ J/kgK}$, promena viskoznosti sa temperaturom bitumena je $\nu = 4,42 \cdot 10^9 / t^{6,75} \text{ m}^2/\text{s}$. Zanemarujući lokalne otpore, odrediti:

- temperaturu t_2 bitumena na kraju cevovoda,
- snagu za pogon pumpe ako je $\eta_p = 0,75$ i $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rešenje:

a) Viskoznost bitumena na temperaturi t_1 je

$$\nu_1 = \frac{4,42 \cdot 10^9}{100^{6,75}} = 140 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Pošto se izračuna protok i brzina bitumena u cevovodu,

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{30000}{1000 \cdot 3600} = 0,0083 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,00830}{0,00785} = 1,06 \text{ m/s},$$

može se naći vrednost Re broja na početku cevovoda,

$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{1,06 \cdot 0,100}{140 \cdot 10^{-6}} = 758,$$

odakle se vidi da je strujanje bitumena laminarno na celoj dužini cevovoda. Prema tome, za laminarno strujanje je po približnom obrascu

$$\alpha_i \approx \frac{3,65 \lambda_n}{D} = \frac{3,65 \cdot 0,116}{0,100} = 4,25 \text{ J/m}^2\text{sK}.$$

Koeficijent prelaza toplote sa cevovoda na okolinu nalazi se iz jednačina

$$\alpha_a = C(D) \sqrt[4]{t_e}, \quad t_i = t_e \frac{\alpha_i + \alpha_a}{\alpha_i},$$

gde je $C(D) = 2,1$ prema tabeli 1. Kad se iz ovih jednačina eliminiše srednja temperatura zida cevovoda dobija se

$$\alpha_a = 2,1 \sqrt[4]{\frac{\alpha_i t_i}{\alpha_i + \alpha_a}}.$$

Usvaja se srednja temperatura bitumena $t_i = 98 \text{ }^\circ\text{C}$ pa je

$$\alpha_a^5 + 4,25 \alpha_a^4 - 8100 = 0.$$

Rešenje ove jednačine je $\alpha_a = 5,4 \text{ J/m}^2\text{sK}$. Sad se mogu izračunati sledeće veličine:

$$k \approx \frac{\alpha_i \alpha_a}{\alpha_i + \alpha_a} = \frac{4,25 \cdot 5,4}{4,25 + 5,4} = 2,38 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$al = \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{2,38 \cdot 0,100 \cdot 3,14 \cdot 800}{8,33 \cdot 2011} = 0,0357,$$

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 100 \cdot 2,72^{-0,0357} = 96,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

b) Pošto se izračunava pad pritiska

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{128 \nu_1 \rho q l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_i + \alpha_a}{\alpha_i} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal} = \\ &= \frac{128 \cdot 140 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 0,0083 \cdot 800}{3,14 \cdot 0,0001} \left(\frac{4,25 + 5,40}{4,25} \right)^{1,69} \frac{2,72^{0,24} - 1}{0,24} = \\ &= 380118 \cdot 3,98 \cdot 1,125 = 1\,701\,978 \text{ N/m}^2 = 17,02 \text{ bar}, \end{aligned}$$

može se odrediti snaga za pogon pumpe

$$P = \frac{q \Delta p}{1000 \nu_p} = \frac{0,0083 \cdot 1\,701\,978}{1000 \cdot 0,75} = 18,8 \text{ kW}.$$

14. Mazut se transportuje kroz horizontalni neizolovani cevovod prečnika $D = 250 \text{ mm}$ i dužine $l = 20 \text{ km}$, zagrejan na temperaturu $t_1 = 33 \text{ }^\circ\text{C}$. Na kraju cevovoda temperatura mazuta treba da iznosi $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. S obzirom da se radi o

laminarnom strujanju i da je cevovod neizolovan, za koeficijente prelaza toplote mogu da se uzmu vrednosti: $\alpha_t = 1,75 \text{ J/m}^2\text{sK}$, $\alpha_a = 4,65 \text{ J/m}^2\text{sK}$. Ostali podaci su: $\rho = 830 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, $\nu = 2/t^3 \text{ m}^2/\text{s}$, $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Treba odrediti:

a) pad pritiska u cevovodu ako njegova vrednost iznosi 11 bar pri konstantnoj temperaturi $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$,

b) kapacitet transporta, snagu pumpe ($\eta_p = 0,70$) i Re broj na kraju cevovoda.

Rešenje:

a) Kako je poznat pad pritiska pri temperaturi $20 \text{ }^\circ\text{C}$, koja se u ovom slučaju poklapa sa temperaturom mazuta na kraju cevovoda pri neizotermnom strujanju, to se pad pritiska pri laminarnom neizotermnom strujanju može najlakše izračunati po obrascu

$$\Delta p = \frac{128 \nu_2 \rho q l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_t + \alpha_a}{\alpha_t} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal e^{mal}},$$

u kome prvi član predstavlja pad pritiska pri laminarnom izotermnom strujanju i on je poznat. Najpre se nalazi vrednost

$$al = \ln \frac{t_1}{t_2} = \ln \frac{33}{20} = 0,5$$

pa, zatim, članovi

$$\left(\frac{\alpha_t + \alpha_a}{\alpha_t} \right)^{m/4} = \left(\frac{1,75 + 4,65}{1,75} \right)^{3/4} = 2,64$$

$$\frac{e^{mal} - 1}{mal e^{mal}} = \frac{2,72^{1,5} - 1}{1,5 \cdot 2,72^{1,5}} = 0,518.$$

Dakle, pad pritiska pri laminarnom neizotermnom strujanju iznosi

$$\Delta p = 11 \cdot 2,64 \cdot 0,518 = 15 \text{ bar.}$$

b) Posle određivanja koeficijenta prolaza toplote

$$k \approx \frac{\alpha_t \alpha_a}{\alpha_t + \alpha_a} = \frac{1,75 \cdot 4,65}{1,75 + 4,65} = 1,27 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

nalazi se kapacitet transporta

$$G = \frac{k D \pi l}{a l c_n} = \frac{1,27 \cdot 0,250 \cdot 3,14 \cdot 20000}{0,5 \cdot 1885} = 21,2 \text{ kg/s},$$

dok je snaga za pogon pumpe

$$P = \frac{G \Delta p}{\rho 1000 \eta_p} = \frac{21,2 \cdot 1500000}{830 \cdot 1000 \cdot 0,70} = 54,7 \text{ kW.}$$

Kako je

$$v = \frac{G}{\rho A} = \frac{21,2}{830 \cdot 0,0490} = 0,52 \text{ m/s,}$$

$$\nu_2 = \frac{2}{t_2^2} = \frac{2}{8000} = 250 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

to je vrednost Re broja na kraju cevovoda

$$Re_2 = \frac{vD}{\nu_2} = \frac{0,52 \cdot 0,250}{250 \cdot 10^{-6}} = 520.$$

15. Kroz neizolovani naftovod prečnika $D = 250$ mm i dužine $l = 15$ km transportuje se $G = 80$ t/h sirove nafte sledećih svojstava: $\rho = 800$ kg/m³, $c_n = 1885$ J/kgK, $\nu = 0,2/t^2$ m²/s. Za slučaj da koeficijent prolaza toplote kroz naftovod iznosi $k = 3,54$ J/m²s K, odrediti temperaturu t_1 na koju treba da se zagreva ova nafta pa da njena temperatura na kraju cevovoda bude $t_2 = 25$ °C. Zatim, izračunati pad pritiska u naftovodu ako koeficijent prelaza toplote sa cevovoda na okolinu iznosi $\alpha_a = 11,6$ J/m²s K.

Rešenje:

U ovom slučaju je proizvod

$$al = \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{3,54 \cdot 0,250 \cdot 3,14 \cdot 15000}{22,2 \cdot 1885} = 1,$$

pa je temperatura na koju treba zagrevati naftu

$$t_1 = t_2 e^{al} = 25 \cdot 2,72 = 68 \text{ °C.}$$

Pre nego što se prede na određivanje pada pritiska mora se videti da li je strujanje pod ovim uslovima laminarno ili turbulentno. U ovom slučaju je:

$$v = \frac{G}{\rho A} = \frac{22,2}{800 \cdot 0,049} = 0,565 \text{ m/s,}$$

$$\nu_1 = \frac{0,2}{t_1^2} = \frac{0,2}{68^2} = 43,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{0,565 \cdot 0,250}{43,2 \cdot 10^{-6}} = 3260,$$

što pokazuje da je strujanje turbulentno bar na jednom delu naftovoda. Za dalji rad neophodno je odrediti Re broj na kraju cevovoda. U ovom slučaju je

$$\nu_2 = \frac{0,2}{t_2^2} = \frac{0,2}{25^2} = 320 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

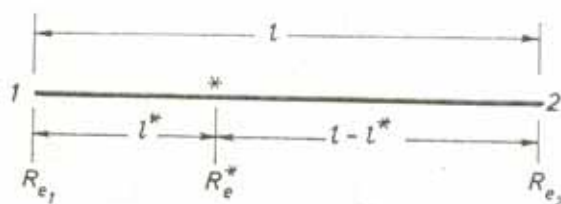
$$Re_2 = \frac{v D}{\nu_2} = \frac{0,565 \cdot 0,250}{320 \cdot 10^{-6}} = 442,$$

i to pokazuje da je na nekom mestu od početka naftovoda došlo do promene režima strujanja. Dakle, potrebno je naći na kojoj je dužini strujanje turbulentno, a na kojoj dužini laminarno. Iz izraza

$$Re^* = \frac{v D}{\nu^*} = 2320,$$

nalazi se odgovarajuća viskoznost

$$\begin{aligned} \nu^* &= \frac{0,565 \cdot 0,250}{2320} = \\ &= 61 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \end{aligned}$$



pa, zatim, i temperatura na tom mestu

$$t^* = \sqrt{\frac{0,2}{\nu^*}} = \sqrt{\frac{0,2}{61}} 10^6 = 57^\circ\text{C}.$$

Prema tome je

$$al^* = \ln \frac{t_1}{t^*} = \ln \frac{68}{57} = 0,172,$$

odnosno

$$l^* = \frac{0,172}{a} = \frac{0,172 l}{a l} = \frac{0,172 \cdot 15}{1} = 2,58 \text{ km}.$$

Dakle, na dužini od 2,58 km strujanje je turbulentno, a na dužini 15 — 2,58 = 12,42 km strujanje je laminarno. Ukupan pad pritiska je

$$\Delta p = \Delta p_{turb.} + \Delta p_{lam.}$$

gde su

$$\begin{aligned} \Delta p_{turb} &= 0,241 \frac{\rho \nu_1^{0,25} q^{1,75} l^*}{D^{4,75}} \left(\frac{\alpha_i + \alpha_a}{\alpha_i} \right)^{m/7} \frac{e^{0,25ma l^*} - 1}{0,25ma l^*}, \\ \Delta p_{lam} &= \frac{128 \rho \nu^* q (l - l^*)}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_i + \alpha_a}{\alpha_i} \right)^{m/4} \frac{e^{ma(l - l^*)} - 1}{ma(l - l^*)}. \end{aligned}$$

S obzirom da je maksimalna vrednost Re broja 3260 može se uzeti da je koeficijent prelaza toplote sa nafte na cevovod isti i da njegova vrednost iznosi

$$\alpha_i = \frac{k \alpha_a}{\alpha_a - k} = \frac{3,54 \cdot 11,6}{11,6 - 3,54} = 5,09 \text{ J/m}^2 \text{ s K}.$$

Pošto je protok

$$q = v A = 0,565 \cdot 0,049 = 0,0276 \text{ m}^3/\text{s},$$

to se zamenom brojnih podataka u izraze za pad pritiska dobija

$$\Delta p_{turb} = 0,241 \frac{800 (43,2 \cdot 10^{-6})^{0,25} \cdot 0,0276^{1,75} \cdot 2580}{0,250^{4,75}} \cdot \left(\frac{5,09 + 11,6}{5,09} \right)^{0,286} \frac{2,72^{0,086} - 1}{0,086} = 44145 \text{ N/m}^2,$$

$$\Delta p_{lam} = \frac{128 \cdot 800 \cdot 61 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0276 \cdot 12420}{3,14 \cdot 0,250^4} \cdot \left(\frac{5,09 + 11,6}{5,09} \right)^{0,5} \frac{2,72^{1,656} - 1}{1,656} = 824040 \text{ N/m}^2.$$

Prema tome, ukupan pad pritiska je

$$\Delta p = 44145 + 824040 = 868185 \text{ N/m}^2 = 8,68 \text{ bar.}$$

16. U rezervoaru pumpne stanice nafta se zagreva na temperaturu $t_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ radi daljeg transporta kroz horizontalni neizolovani cevovod prečnika $D = 250 \text{ mm}$. Cevovod je ukopan u zemlju na propisnoj dubini tako da se za koeficijent prelaza toplote sa cevovoda na zemlju može uzeti $\alpha_a = 3,5 \text{ J/m}^2\text{s K}$. Kapacitet transporta nafte treba da bude $G = 180 \text{ t/h}$, čija se viskoznost menja po zakonu $\nu = 5,4/t^3 \text{ m}^2/\text{s}$. Zbog hemijskog sastava sirove nafte, njena temperatura na kraju cevovoda ne sme da bude niža od $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Ostali podaci se odnose, kao i uvek, na srednju temperaturu i iznose: $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, $\lambda_n = 0,13 \text{ J/msK}$. Izračunati dužinu ove deonice naftovoda ako je spoljna temperatura $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rešenje:

Čim se izračunaju

$$v = \frac{G}{\rho A} = \frac{180000}{850 \cdot 0,049 \cdot 3600} = 1,2 \text{ m/s,}$$

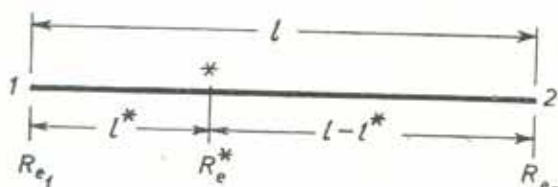
$$v_1 = \frac{5,4}{t_1^3} = \frac{5,4}{70^3} = 15,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

$$v_2 = \frac{5,4}{t_2^3} = \frac{5,4}{20^3} = 675 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

$$Re_1 = \frac{v D}{v_1} = \frac{1,2 \cdot 0,250}{15,8 \cdot 10^{-6}} = 19000,$$

$$Re_2 = \frac{v D}{v_2} = \frac{1,2 \cdot 0,250}{675 \cdot 10^{-6}} = 445,$$

može se konstatovati da je u jednom delu naftovoda strujanje turbulentno a u drugom delu laminarno. Ako se sa l^* označi dužina naftovoda koja odgovara turbulentnom strujanju, onda se prema skici datoj uz zadatak, može naći viskoznost nafte na mestu promene režima strujanja,



$$v^* = \frac{v D}{Re^*} = \frac{1,2 \cdot 0,250}{2320} = 130 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

odnosno, temperatura nafte u tom preseku,

$$t^* = \sqrt[3]{\frac{5,4}{v^*}} = \sqrt[3]{\frac{5,4}{130 \cdot 10^{-6}}} = 34,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Sada se mogu postaviti jednačine

$$t_1 = t^* \exp(a_t t^*), \quad t^* = t_2 \exp(a_l (l - l^*))$$

iz kojih sleduje dužina naftovoda

$$l = \frac{0,715}{a_t} + \frac{0,528}{a_l}$$

gde su:

$$a_t = \frac{k_t D \pi}{G c_n}, \quad k_t \approx \frac{\alpha_{lt} \alpha_a}{\alpha_{lt} + \alpha_a},$$

$$a_l = \frac{k_l D \pi}{G c_n}, \quad k_l \approx \frac{\alpha_{ll} \alpha_a}{\alpha_{ll} + \alpha_a}.$$

Srednja temperatura u delu naftovoda sa turbulentnim strujanjem iznosi

$$t = \frac{1}{3} (t_1 + 2t^*) = \frac{1}{3} (70 + 2 \cdot 34,2) = 46,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

pa su na ovoj temperaturi

$$v = \frac{5,4}{t^3} = \frac{5,4}{46,2^3} = 54,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re^{2/3} = \left(\frac{v D}{v} \right)^{2/3} = \left(\frac{1,2 \cdot 0,250}{54,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{2/3} = 312,$$

$$Pr^{1/3} = \left(\frac{\rho v c_n}{\lambda_n} \right)^{1/3} = \left(\frac{850 \cdot 54,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1885}{0,13} \right)^{1/3} = 8,8$$

Ako se usvoji odnos viskoznosti nafte u osi cevi i na njenom zidu, $\nu_g/\nu_z = 0,9$ tada je Nuseltov broj za $D \ll l^*$,

$$Nu = 0,116 (Re - 125) Pr^{1/3} \left(\frac{\nu_g}{\nu_z}\right)^{0,14} = 0,116 (312 - 125) 8,8 \cdot 0,9^{0,14} = 189,$$

odnosno koeficijent prelaza toplote za deonicu sa turbulentnim strujanjem

$$\alpha_{tt} = \frac{Nu \lambda_n}{D} = \frac{189 \cdot 0,13}{0,250} = 98,3 \text{ J/m}^2\text{sK}.$$

Kako je

$$\frac{\nu_g}{\nu_z} = \left(\frac{\alpha_{tt}}{\alpha_{tt} + \alpha_a}\right)^m = \left(\frac{98,3}{98,3 + 3,5}\right)^3 = 0,90,$$

to se pretpostavljena vrednost za odnos viskoznosti u osi i na zidu cevi ne mora korigovati. U ovom slucaju je

$$k_t \approx \frac{98,3 \cdot 3,5}{98,3 + 3,5} = 3,38 \text{ J/m}^2\text{sK}.$$

Za deonicu sa laminarnim strujanjem α_{tt} može da se uzme prema približnom obrascu

$$\alpha_{tt} \approx \frac{3,65 \lambda_n}{D} = \frac{3,65 \cdot 0,13}{0,250} = 1,9 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

odnosno

$$k_l \approx \frac{1,9 \cdot 3,5}{1,9 + 3,5} = 1,23 \text{ J/m}^2\text{sK}.$$

Prema tome, koeficijenti a_t i a_l iznose:

$$a_t = \frac{3,38 \cdot 0,250 \cdot 3,14}{50 \cdot 1885} = 28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1},$$

$$a_l = \frac{1,23 \cdot 0,250 \cdot 3,14}{50 \cdot 1885} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1},$$

te je tražena dužina deonice naftovoda

$$l = \frac{0,715}{28} 10^6 + \frac{0,528}{10} 10^6 = 78300 = \text{m} = 78,3 \text{ km}$$

17. Kroz horizontalni izolovani cevovod prečnika $D = 100 \text{ mm}$ i dužine $l = 5000 \text{ m}$ ($k D_m = 0,175 \text{ J/msK}$) transportuje se za potrebe jedne kotlarnice $G = 25 \text{ t/h}$ lož-ulja sledećih svojstava: $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 2050 \text{ J/kgK}$, $\lambda_n =$

$= 0,12 \text{ J/msK}$, $\nu = 0,2/t^2 \text{ m}^2/\text{s}$. Izračunati količinu toplote koja se gubi kroz cevovod, i pad pritiska usled trenja za vreme transporta ako je temperatura lož-ulja na početku cevovoda $t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ a spoljna temperatura $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rešenje:

Odmah posle određivanja proizvoda

$$a l = \frac{k D_m \pi l}{G c_n} = \frac{0,175 \cdot 3,14 \cdot 5000}{6,95 \cdot 2050} = 0,193,$$

nalazi se temperatura lož-ulja na kraju cevovoda

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 60 \cdot 2,72^{-0,193} = 49,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Prema tome, gubitak toplote kroz cevovod za vreme transporta je

$$\underline{Q} = G c_n (t_1 - t_2) = 6,95 \cdot 2050 (60 - 49,6) = 148175 \text{ J/s}.$$

Sledeće veličine

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{25000}{950 \cdot 3600} = 0,0073 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,0073}{0,00785} = 0,93 \text{ m/s},$$

$$\nu_1 = \frac{0,2}{t_1^2} = \frac{0,2}{3600} = 55,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{0,93 \cdot 0,100}{55,5 \cdot 10^{-6}} = 1675,$$

pokazuju da je strujanje lož-ulja laminarno i da pad pritiska usled trenja treba da se računa po obrascu

$$\Delta p = \frac{128 \rho \nu_1 q l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_l D_{cl}}{\alpha_l D_{cl} - k D_m} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal}.$$

Koeficijent α_l (J/m²sK) prelaza toplote sa lož-ulja na cevovod može da se odredi po približnom obrascu koji važi za laminarno strujanje:

$$\alpha_l D_{cl} = 3,65 \lambda_n = 3,65 \cdot 0,12 = 0,44 \text{ J/msK}.$$

Dakle, pad pritiska usled trenja iznosi

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{128 \cdot 950 \cdot 55,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0073 \cdot 5000}{3,14 \cdot 0,0001} \left(\frac{0,440}{0,440 - 0,175} \right)^{2/4} \frac{2,72^{0,384} - 1}{0,384} = \\ &= 776952 \cdot 1,29 \cdot 1,22 = 1\,222\,767 \text{ N/m}^2 = 12,2 \text{ bar}. \end{aligned}$$

18. Kroz postojeći horizontalni izolovani cevovod ($k D_m = 0,28 \text{ J/msK}$) unutrašnjeg prečnika $D_{ci} = 200 \text{ mm}$ treba da se transportuje $G = 122 \text{ t/h}$ sirove nafte sledećih svojstava: $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, $\lambda_n = 0,13 \text{ J/msK}$, $\nu = 6,3/t^{3,2} \text{ m}^2/\text{s}$. Ako se želi da strujanje ove sirove nafte za vreme transporta bude laminarno kolika može da bude maksimalna temperatura t_1 na početku cevovoda? Izračunati i pad pritiska usled trenja za slučaj da je $t_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rešenje:

Posle izračunavanja pomoćnih veličina,

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{122000}{900 \cdot 3600} = 0,0378 \text{ m/s,}$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,0378}{0,0314} = 1,2 \text{ m/s,}$$

$$\nu_1 = \frac{v D}{Re_1} = \frac{1,2 \cdot 0,200}{2320} = 103,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

nalazi se temperatura nafte na početku cevovoda

$$t_1 = \left(\frac{6,3}{103,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,312} = 31,3 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Kako je ovom prilikom

$$a l = \ln \frac{t_1}{t_2} = \ln \frac{31,2}{25} = 0,227,$$

to je odgovarajuća dužina naftovoda

$$l = \frac{G c_n a l}{k D_m \pi} = \frac{33,8 \cdot 1885 \cdot 0,227}{0,28 \cdot 3,14} = 16440 \text{ m.}$$

Kad se izračunaju još

$$\alpha_t D_{ci} = 3,65 \lambda_n = 3,65 \cdot 0,13 = 0,47 \text{ J/msK,}$$

$$\frac{128 \rho \nu_1 q l}{\pi D_{ci}^4} = \frac{128 \cdot 900 \cdot 103,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0378 \cdot 16440}{3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-4}} = 1474000,$$

$$\left(\frac{\alpha_t D_{ci}}{\alpha_t D_{ci} - k D_m} \right)^{m/4'} = \left(\frac{0,47}{0,47 - 0,28} \right)^{3,2/4} = 2,08,$$

$$\frac{e^{mal} - 1}{mal} = \frac{2,72^{3,2 \cdot 0,227} - 1}{3,2 \cdot 0,227} = 1,475,$$

može se naći pad pritiska usled trenja

$$\Delta p = \frac{128 \rho v_1 q l}{\pi D_{ci}^4} \left(\frac{\alpha_t D_{ci}}{\alpha_t D_{ci} - k D_m} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal} =$$

$$= 1474000 \cdot 2,08 \cdot 1,475 = 4\,522\,232 \text{ N/m}^2 = 45,2 \text{ bar.}$$

19. Iz jedne rafinerije transportuje se lož-ulje do otpremne stanice kroz horizontalni neizolovani cevovod prečnika $D = 200 \text{ mm}$ i dužine $l = 2000 \text{ m}$. Temperatura lož-ulja na ulazu u cevovod iznosi $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Izračunati njegovu temperaturu na kraju cevovoda i pad pritiska usled trenja ako su: kapacitet transporta $G = 60 \text{ t/h}$, koeficijenti prelaza toplote sa lož-ulja na cevovod i sa cevovoda na okolinu $\alpha_t = 1,86 \text{ J/m}^2\text{sK}$ i $\alpha_a = 4,65 \text{ J/m}^2\text{sK}$, srednja gustina $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$, srednja specifična toplota $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, temperatura okoline $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ i promena viskoznosti sa temperaturom $\nu = 2,5/t^3 \text{ m}^2/\text{s}$.

Rešenje:

Čim se izračuna koeficijent prolaza toplote

$$k \approx \frac{\alpha_t \alpha_a}{\alpha_t + \alpha_a} = \frac{1,86 \cdot 4,65}{1,86 + 4,65} = 1,33 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

i proizvod

$$al = \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{1,33 \cdot 0,200 \cdot 3,14 \cdot 2000}{16,6 \cdot 1885} = 0,0534,$$

može se naći temperatura lož-ulja na kraju cevovoda

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 30 \cdot 2,72^{-0,0534} = 28,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Dalje su:

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{60000}{850 \cdot 3600} = 0,0196 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,0196}{0,0314} = 0,624 \text{ m/s},$$

$$v_1 = \frac{2,5}{t_1^3} = \frac{2,5}{30^3} = 92,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_1 = \frac{v D}{v_1} = \frac{0,624 \cdot 0,200}{92,5 \cdot 10^{-6}} = 1350 < Re^*,$$

pa je pad pritiska usled trenja

$$\Delta p = \frac{128 \rho v_1 q l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_t + \alpha_a}{\alpha_t} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{128 \cdot 850 \cdot 92,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0196 \cdot 2000}{3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-4}} \left(\frac{1,86 + 4,65}{1,86} \right)^{3/4} \frac{2,72^{0,16} - 1}{0,16} = \\
 &= 78\,480 \cdot 2,56 \cdot 1,095 = 219\,995 \text{ N/m}^2 = 2,2 \text{ bar.}
 \end{aligned}$$

20. Kroz horizontalni neizolovani cevovod prečnika $D = 150 \text{ mm}$ i dužine $l = 1800 \text{ m}$ ($k = 2,9 \text{ J/m}^2\text{sK}$) pumpa puni vagon cisterne lož-uljem sledećih svojstava: $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, $\lambda_n = 0,13 \text{ J/msK}$, $\nu = 0,115/t^{1,94} \text{ m}^2/\text{s}$. Uzimajući u obzir samo gubitke usled trenja, odrediti temperaturu na koju se mora zagrevati lož-ulje u rezervoaru rafinerije pa da strujanje u cevovodu bude laminarno i da pumpa radi u optimalnoj tački koja je određena naporom $H_p = 121 \text{ mVS}$ i protokom $q = 76,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Uzeti da je $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ i odrediti pad temperature u cevovodu.

Rešenje:

Najpre se moraju naći sledeće veličine:

$$\begin{aligned}
 q &= 76,5 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0212 \text{ m}^3/\text{s}, \\
 G &= \rho q = 930 \cdot 0,0212 = 19,72 \text{ kg/s}, \\
 \alpha_t &\approx \frac{3,65 \lambda_n}{D} = \frac{3,65 \cdot 0,13}{0,150} = 3,16 \text{ J/m}^2\text{sK}, \\
 \alpha_n &= \frac{k \alpha_t}{\alpha_t - k} = \frac{2,9 \cdot 3,16}{3,16 - 2,9} = 57,3 \text{ J/m}^2\text{sK}, \\
 a l &= \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{2,9 \cdot 0,150 \cdot 3,14 \cdot 1800}{19,72 \cdot 1885} = 0,0663, \\
 \left(\frac{\alpha_t + \alpha_n}{\alpha_t} \right)^{m/4} &= \left(\frac{3,16 + 57,3}{3,16} \right)^{1,94/4} = 4,18, \\
 \frac{e^{mal} - 1}{mal} &= \frac{2,72^{1,94 \cdot 0,0663} - 1}{1,94 \cdot 0,0663} = 1,09,
 \end{aligned}$$

pa zatim

$$\begin{aligned}
 \Delta p &= \frac{128 \rho \nu_1 q l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_t + \alpha_n}{\alpha_t} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal} = \\
 &= \frac{128 \cdot 930 \cdot \nu_1 \cdot 0,0212 \cdot 1800}{3,14 \cdot 506 \cdot 10^{-6}} \cdot 4,18 \cdot 1,09 = 13020 \cdot 10^6 \nu_1.
 \end{aligned}$$

Znajući napor pumpe, odavde se dobija kinematska viskoznost kao

$$\nu_1 = \frac{\Delta p}{13020 \cdot 10^6} = \frac{121 \cdot 9810}{13020 \cdot 10^6} = 91 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

i temperatura na koju treba da se zagreva lož-ulje:

$$t_1 = \left(\frac{0,115}{\nu_1} \right)^{0,515} = \left(\frac{0,115}{91 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,515} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Temperatura lož-ulja na kraju cevovoda iznosi

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 40 \cdot 2,72^{-0,0663} = 37,4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

pa je pad temperature u cevovodu $\Delta t = t_1 - t_2 = 2,6 \text{ } ^\circ\text{C}$. Posle izračunavanja brzine strujanja,

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,0212}{0,0177} = 1,2 \text{ m/s},$$

nalazi se Re broj na početku cevovoda,

$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{1,2 \cdot 0,150}{91 \cdot 10^{-6}} = 1980 < Re^*$$

prema kome se zaključuje da je strujanje laminarno.

21. Kroz horizontalni neizolovani cevovod prečnika $D = 200 \text{ mm}$ i dužine $l = 2500 \text{ m}$ transportuje se mazut čija temperatura na kraju cevovoda treba da bude $t_2 = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$. Ostali podaci su: $G = 70 \text{ t/h}$, $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, $\alpha_t = 29,8 \text{ J/m}^2\text{sK}$, $\alpha_a = 4,65 \text{ J/m}^2\text{sK}$, $\nu = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $t_a = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$. Izračunati pad temperature i pad pritiska za vreme transporta.

Rešenje:

Za pad temperature potrebno je izračunati sledeće veličine:

$$k \approx \frac{\alpha_t \alpha_a}{\alpha_t + \alpha_a} = \frac{29,8 \cdot 4,65}{29,8 + 4,65} = 4,02 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$al = \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{4,02 \cdot 0,200 \cdot 3,14 \cdot 2500}{19,4 \cdot 1885} = 0,172,$$

$$t_1 = t_2 e^{al} = 35 \cdot 2,72^{0,172} = 41,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Sa ovim vrednostima dobija se da je pad temperature

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 41,6 - 35 = 6,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Kako su

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{70000}{800 \cdot 3600} = 0,0243 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,0243}{0,0314} = 0,775 \text{ m/s},$$

$$v_1 = \frac{2,2}{t_1^3} = \frac{2,2}{72500} = 30,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_1 = \frac{vD}{\nu_1} = \frac{0,775 \cdot 0,200}{30,3 \cdot 10^{-6}} = 5100 > Re^*,$$

$$v_2 = \frac{2,2}{t_2^3} = \frac{2,2}{43000} = 51,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_2 = \frac{vD}{\nu_2} = \frac{0,775 \cdot 0,200}{51 \cdot 10^{-6}} = 3040 > Re^*,$$

to se zaključuje da je strujanje mazuta turbulentno od početka do kraja cevovoda, pa se pad pritiska usled trenja računa prema:

$$\Delta p = 0,241 \frac{\rho v_1^{0,25} q^{1,75} l}{D^{4,75}} \left(\frac{\alpha_4 + \alpha_a}{\alpha_4} \right)^{m/7} \frac{e^{0,25mal} - 1}{0,25 mal}.$$

Praktično je prvo sračunati članove

$$0,241 \frac{800 (30,3 \cdot 10^{-6})^{0,25} \cdot 0,0243^{1,75} \cdot 2500}{0,200^{4,75}} = 140093,$$

$$\left(\frac{29,8 + 4,65}{29,8} \right)^{3/7} = 1,06, \quad \frac{2,72^{0,129} - 1}{0,129} = 1,085,$$

pa, zatim, pad pritiska kao

$$\Delta p = 140093 \cdot 1,06 \cdot 1,085 = 161733 \text{ N/m}^2 = 1,62 \text{ bar}.$$

22. 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 $D_{ct} = 203$ mm, a spoljašnji $D_{ca} = 219$ mm. Odrediti temperaturu 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 $q = 0,029$ m³/s, naporom $\Delta p = 26,7$ bar i stepenom korisnosti $\eta_p = 0,70$. Ostali podaci su: $\rho = 960$ kg/m³, $t_a = 0$ °C, $c_n = 2010$ J/kgK, $\lambda_n = 0,12$ J/msK, $\lambda_c = 46,5$ J/msK, $\lambda_{t_2} = 0,05$ J/msK, $D_{t_2a} = 360$ mm, $\nu = 25,9/t^3$ m²/s. Strujanje ove 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.

Rešenje:

S obzirom na podatke koji su poznati, račun treba da se obavi ovim redom:

$$\alpha_4 D_{ct} = 3,65 \lambda_n = 3,65 \cdot 0,12 = 0,44 \text{ J/msK},$$

$$\alpha_a = 7,2 v_0^{0,78} = 7,2 \cdot 10^{0,78} = 43,3 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$\frac{1}{k D_m} = \frac{1}{\alpha_l D_{ct}} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{D_{ca}}{D_{ct}} + \frac{1}{2\lambda_{tz}} \ln \frac{D_{tza}}{D_{tzt}} + \frac{1}{\alpha_a D_{tza}} =$$

$$= \frac{1}{0,44} + \frac{1}{93} \ln \frac{219}{203} + \frac{1}{0,1} \ln \frac{360}{219} + \frac{1}{15,6} = 7,30,$$

$$k D_m = \frac{1}{7,30} = 0,137 \text{ J/msK},$$

$$a l = \frac{k D_m \pi l}{G c_n} = \frac{0,137 \cdot 3,14 \cdot 20000}{27,8 \cdot 2010} = 0,154,$$

$$\left(\frac{\alpha_l D_{ct}}{\alpha_l D_{ct} - k D_m} \right)^{m/4} = \left(\frac{0,440}{0,440 - 0,137} \right)^{3/4} = 1,3,$$

$$\frac{e^{mat} - 1}{mal} = \frac{2,72^{0,456} - 1}{0,456} = 1,26,$$

$$\Delta p = \frac{128 \rho v_1 q l}{\pi D_{ct}^4} \left(\frac{\alpha_l D_{ct}}{\alpha_l D_{ct} - k D_m} \right)^{m/4} \frac{e^{mat} - 1}{mal} =$$

$$= \frac{128 \cdot 960 v_1 \cdot 0,029 \cdot 20000}{3,14 \cdot 0,00172} = 1,3 \cdot 1,26 = 21600 \cdot 10^6 v_1.$$

Sad se iz poslednje jednačine nalazi viskoznost koju nafta mora da ima na početku cevovoda da bi pumpa radila u optimalnoj radnoj tački. Dakle, biće

$$v_1 = \frac{\Delta p}{21600 \cdot 10^6} = \frac{26,7 \cdot 10^5}{21600 \cdot 10^6} = 123 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Temperature nafte na početku i na kraju cevovoda iznose:

$$t_1 = \sqrt[3]{\frac{25,9}{v_1}} = \sqrt[3]{\frac{25,9}{123 \cdot 10^{-6}}} = 59,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 59,5 \cdot 2,72^{-0,154} = 51,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Pad temperature je

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

23. Iz magistralnog horizontalnog izolovanog cevovoda unutrašnjeg prečnika $D = 250 \text{ mm}$ i dužine $l = 25 \text{ km}$, kroz koji se transportuje 190 t/h zagrejanog mazuta, odvaja se posle dvadesetog kilometra 90 t/h mazuta jednom potrošaču. Izračunati temperaturu t_2 mazuta na kraju cevovoda i pad pritiska usled trenja, ako je njegova temperatura na ulazu u cevovod $t_1 = 46 \text{ } ^\circ\text{C}$. Ostali podaci su: $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 2010 \text{ J/kgK}$, $\lambda_n = 0,12 \text{ J/msK}$, $t_a = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\nu = 0,3/t^2 \text{ m}^2/\text{s}$, $k D_m = 0,32 \text{ J/msK}$.

Rešenje:

Ako „0“ označava mesto na magistralnom cevovodu gde se deo mazuta odvodi potrošaču, onda će za deonicu 1 — 0 biti

$$(al)_{10} = \frac{k D_m \pi l_{10}}{G_{10} c_n} = \frac{0,32 \cdot 3,14 \cdot 20000}{52,7 \cdot 2010} = 0,19,$$

pa je temperatura mazuta na tom mestu

$$t_0 = t_1 e^{-(al)_{10}} = 46 \cdot 2,72^{-0,19} = 38 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Za deonicu 0 — 2 cevovoda je

$$(al)_{02} = \frac{k D_m \pi l_{02}}{G_{02} c_n} = \frac{0,32 \cdot 3,14 \cdot 5000}{27,7 \cdot 2010} = 0,09,$$

te je temperatura mazuta na kraju cevovoda

$$t_2 = t_0 e^{-(al)_{02}} = 38 \cdot 2,72^{-0,09} = 34,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Kako je

$$v_1 = \frac{0,3}{t_1^2} = \frac{0,3}{2116} = 142 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$v_{10} = \frac{G_{10}}{\rho A} = \frac{190000}{950 \cdot 0,049 \cdot 3600} = 1,135 \text{ m/s},$$

$$Re_1 = \frac{v_{10} D}{v_1} = \frac{1,135 \cdot 0,250}{142 \cdot 10^{-6}} = 2000,$$

to se zaključuje da je strujanje mazuta laminarno u oba dela cevovoda jer je ono takvo na početku, a nizvodno opada i temperatura i kapacitet transporta. Dakle, biće pad pritiska:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{128 v_1 G_{10} l_{10}}{\pi D_{ct}^4} \left(\frac{\alpha_t D_{ct}}{\alpha_t D_{ct} - k D_m} \right)^{m/4} \frac{e^{m(al)_{10}} - 1}{m(al)_{10}} + \\ &+ \frac{128 v_0 G_{02} l_{02}}{\pi D_{ct}^4} \left(\frac{\alpha_t D_{ct}}{\alpha_t D_{ct} - k D_m} \right)^{m/4} \frac{e^{m(al)_{02}} - 1}{m(al)_{02}} = \\ &= \frac{128}{\pi D_{ct}^4} \left(\frac{\alpha_t D_{ct}}{\alpha_t D_{ct} - k D_m} \right)^{m/4} \left(v_1 G_{10} l_{10} \frac{e^{m(al)_{10}} - 1}{m(al)_{10}} + v_0 G_{02} l_{02} \frac{e^{m(al)_{02}} - 1}{m(al)_{02}} \right). \end{aligned}$$

Posle izračunavanja sledećih veličina:

$$\alpha_i D_{ct} = 3,65 \lambda_n = 3,65 \cdot 0,12 = 0,44 \text{ J/msK,}$$

$$\nu_0 = \frac{0,3}{t_0^2} = \frac{0,3}{1444} = 208 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

$$\frac{128}{\pi D_{ct}^4} \left(\frac{\alpha_i D_{ct}}{\alpha_i D_{ct} - k D_m} \right)^{m/4} = \frac{128}{3,14 \cdot 0,0039} \left(\frac{0,44}{0,44 - 0,32} \right)^{2,4} = 20105,$$

$$\begin{aligned} \nu_1 G_{10} l_{10} \frac{e^{m(al)_{10}} - 1}{m(al)_{10}} &= \frac{142 \cdot 10^{-6} \cdot 190000 \cdot 20000}{3600} \frac{2,72^{0,386} - 1}{0,386} = \\ &= 150 \cdot 1,22 = 182,5, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nu_0 G_{02} l_{02} \frac{e^{m(al)_{02}} - 1}{m(al)_{02}} &= \frac{208 \cdot 10^{-6} \cdot 100000 \cdot 5000}{3600} \frac{2,72^{0,184} - 1}{0,184} = \\ &= 28,9 \cdot 1,086 = 31,5, \end{aligned}$$

nalazi se pad pritiska usled trenja

$$\Delta p = 20105 (182,5 + 31,5) = 4\,302\,470 \text{ N/m}^2 = 43 \text{ bar.}$$

24. 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 $l = 1000 \text{ m}$. 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: $G = 40 \text{ t/h}$, $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 2094 \text{ J/kgK}$, $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda_n = 0,12 \text{ J/msK}$, $\nu = 9,3/t^3 \text{ m}^2/\text{s}$, $\gamma_{ip} = 0,60$.

Rešenje:

Kad se izračunaju sledeće veličine:

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{40000}{950 \cdot 3600} = 0,0117 \text{ m}^3/\text{s,}$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,0117}{0,00785} = 1,49 \text{ m/s,}$$

$$\nu_1 = \frac{9,3}{t_1^3} = \frac{9,3}{125000} = 74 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

$$Re_1 = \frac{vD}{\nu_1} = \frac{1,49 \cdot 0,100}{74 \cdot 10^{-6}} = 2020,$$

može se zaključiti da je strujanje ove nafte laminarno, pa su:

$$\alpha_t \approx \frac{3,65 \lambda_n}{D} = \frac{3,65 \cdot 0,12}{0,100} = 4,38 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$\alpha_a = C(D) \sqrt[4]{t_c - t_a} = 2,1 \sqrt[4]{24} = 4,65 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

pri čemu je $C(D) = 2,1$ iz tabele 1, a $t_c = 24$ °C usvojena srednja temperatura cevovoda koja će biti docnije proverena,

$$k \approx \frac{\alpha_t \alpha_a}{\alpha_t + \alpha_a} = \frac{4,38 \cdot 4,65}{4,38 + 4,65} = 2,25 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$a l = \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{2,25 \cdot 0,100 \cdot 3,14 \cdot 1500}{11,1 \cdot 2094} = 0,0457,$$

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 50 \cdot 2,72^{0,0457} = 47,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Kako srednja logaritamska razlika temperatura za $t_a = 0$ °C iznosi

$$\Delta t_m = \frac{t_1 - t_2}{al} = \frac{50 - 47,7}{0,0457} = 49,2 \text{ }^\circ\text{C},$$

to je srednja temperatura cevovoda

$$t_c = \frac{k}{\alpha_a} \Delta t_m + t_a = \frac{2,25}{4,65} 49,2 + 0 = 23,8 \text{ }^\circ\text{C},$$

na osnovu koje se može zaključiti da je vrednost $t_c = 24$ °C ranije dobro usvojena. Prema tome, pad pritiska iznosi

$$\Delta p = \frac{128 \nu G l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_t + \alpha_a}{\alpha_t} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal} + \rho g H_g =$$

$$= \frac{128 \cdot 74 \cdot 10^{-6} \cdot 40000 \cdot 1500}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,0001} \left(\frac{4,38 + 4,65}{4,38} \right)^{3/4} \frac{2,72^{0,137} - 1}{0,137} +$$

$$+ 950 \cdot 9,81 \cdot 20 = 502505 \cdot 1,72 \cdot 1,07 + 186390 = 1\ 111\ 200 \text{ N/m}^2 = 11,1 \text{ bar}.$$

25. Bitumen se transportuje u toplom stanju kroz horizontalni neizolovani cevovod prečnika $D = 100$ mm i dužine $l = 3500$ m, koji se nalazi u zaštitnom kanalu. Radi mogućnosti pumpanja bitumena, njegova viskoznost mora da bude $\nu_1 \leq 30$ °E na početku i $\nu_2 \leq 140$ °E na kraju cevovoda. Izračunati kapacitet transporta i pad pritiska usled trenja za granične vrednosti viskoznosti. Ostali podaci su: $\rho = 1000$ kg/m³, $c_n = 2094$ J/kgK, $\lambda_n = 0,12$ J/msK, $\nu = 28,5/t^3$ m²/s, $t_a = 0$ °C, $Nu = 3,65$.

Rešenje:

U ovom zadatku račun treba da se obavi ovim redom:

$$v_1 \approx 7,60 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ E = 7,60 \cdot 10^{-6} \cdot 30 = 228 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$v_2 \approx 7,60 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ E = 7,60 \cdot 10^{-6} \cdot 140 = 1064 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$t_1 = \sqrt[3]{\frac{28,5}{v_1}} = \sqrt[3]{\frac{28,5}{228 \cdot 10^{-6}}} = 50 \text{ } ^\circ C,$$

$$t_2 = \sqrt[3]{\frac{28,5}{v_2}} = \sqrt[3]{\frac{28,5}{1064 \cdot 10^{-6}}} = 30 \text{ } ^\circ C,$$

$$a l = \ln \frac{t_1}{t_2} = \ln \frac{50}{30} = 0,51,$$

$$\Delta t_m = \frac{t_1 - t_2}{a l} = \frac{50 - 30}{0,51} = 39,2 \text{ } ^\circ C,$$

$$\alpha_i = \frac{Nu \lambda_n}{D} = \frac{3,65 \cdot 0,12}{0,100} = 4,38 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$t_c = t_c \frac{\alpha_i + \alpha_a}{\alpha_i} = t_c \frac{4,38 + \alpha_a}{4,38} \approx \Delta t_m,$$

$$\alpha_a = C(D) \sqrt[4]{t_c - t_a} = C(D) \sqrt[4]{\frac{4,38 \Delta t_m}{4,38 + \alpha_a}},$$

odakle je, posle zamene $C(D) = 2,1$ prema tabeli 1, kao i vrednosti za srednju logaritamsku razliku temperatura,

$$\alpha_a^5 + 4,38 \alpha_a^4 - 3345 = 0.$$

Približno rešenje ove jednačine je $\alpha_a = 4,22 \text{ J/m}^2\text{sK}$, pa je koeficijent pro-
laza toplote

$$k \approx \frac{\alpha_i \alpha_a}{\alpha_i + \alpha_a} = \frac{4,38 \cdot 4,22}{4,38 + 4,22} = 2,15 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

odnosno kapacitet transporta

$$G = \frac{k D \pi l}{a l c_n} = \frac{2,15 \cdot 0,100 \cdot 3,14 \cdot 3500}{0,51 \cdot 2094} = 2,21 \text{ kg/s}.$$

Pošto su brzina i Re broj na početku cevovoda,

$$v = \frac{G}{\rho A} = \frac{2,21}{1000 \cdot 0,00785} = 0,282 \text{ m/s},$$

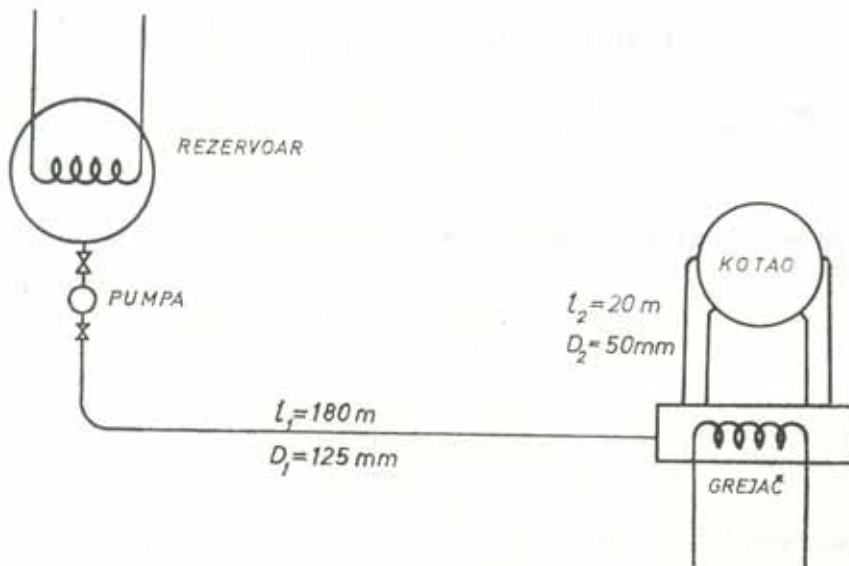
$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{0,282 \cdot 0,1000}{228 \cdot 10^{-6}} = 1240 < Re^*,$$

* Proračun transporta fluida i čvrstih materijala cevima

to je pad pritiska

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{128 \nu_1 G l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_t + \alpha_a}{\alpha_t} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal} = \\ &= \frac{128 \cdot 228 \cdot 10^{-6} \cdot 2,21 \cdot 3500}{3,14 \cdot 0,0001} \left(\frac{4,38 + 4,22}{4,38} \right)^{3/4} \frac{2,72^{1,53} - 1}{1,53} = \\ &= 718547 \cdot 1,66 \cdot 2,35 = 2\,803\,052 \text{ N/m}^2 = 28 \text{ bar.} \end{aligned}$$

26. Za loženje parnih kotlova koristi se mazut srednje gustine $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$ i viskoznosti $\nu = 21,4 \cdot 10^4 / t^{4,75} \text{ m}^2/\text{s}$. U kotlu su montirana 4 gorionika na čijim izlazima treba da se ostvari natpritisak od 19,63 bar i viskoznost od 2°E . Svaki gorionik sagori $8,3 \text{ m}^3/\text{h}$ mazuta koji se pumpom doprema iz rezervoara do grejača montiranog ispred kotla, a odavde kroz 4 istovetna cevovoda do gorionika. Podaci o cevovodima dati su na skici. Cevovodi su dobro izolovani i nalaze se u zaštitnom kanalu tako da se u njima pad temperature pri strujanju mazuta može zanemariti. Za savlađivanje lokalnih otpora od rezervoara do gorionika (krivine, grejač, filteri, ventili, regulatori protoka i pritiska itd.) potrebno je 1,67 bar. Mazut se u rezervoaru prethodno greje na 70°C i pri ovoj temperaturi struji do grejača u kome se dogreva do temperature t koja obezbeđuje potrebnu viskoznost i količinu mazuta na izlazu gorionika. Izračunati ovu temperaturu t i pad pritiska u cevovodu usled trenja i usled nabrojanih „lokalnih“ otpora. Gorionici su u visini nivoa mazuta u rezervoaru.



Rešenje:

Viskoznosti 2°E odgovara $11,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, prema tabeli 2, pa mazut treba da se greje na temperaturu

$$t = \left(\frac{21,4 \cdot 10^4}{\nu} \right)^{1/4,76} = \left(\frac{21,4 \cdot 10^4}{11,8 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,21} = 144 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Pošto se još izračunaju redom

$$v_2 = \frac{q_2}{A_2} = \frac{8,3}{0,00196 \cdot 3600} = 1,175 \text{ m/s,}$$

$$Re_2 = \frac{v_2 D_2}{\nu_2} = \frac{1,175 \cdot 0,050}{11,8 \cdot 10^{-6}} = 4980,$$

$$\lambda_2 = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_2}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{4980}} = 0,0377,$$

$$v_1 = \frac{q_1}{A_1} = \frac{4 \cdot 8,3}{0,0123 \cdot 3600} = 0,75 \text{ m/s,}$$

$$\nu_1 = \frac{21,4 \cdot 10^4}{t_1^{4,76}} = \frac{21,4 \cdot 10^4}{70^{4,76}} = 380 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

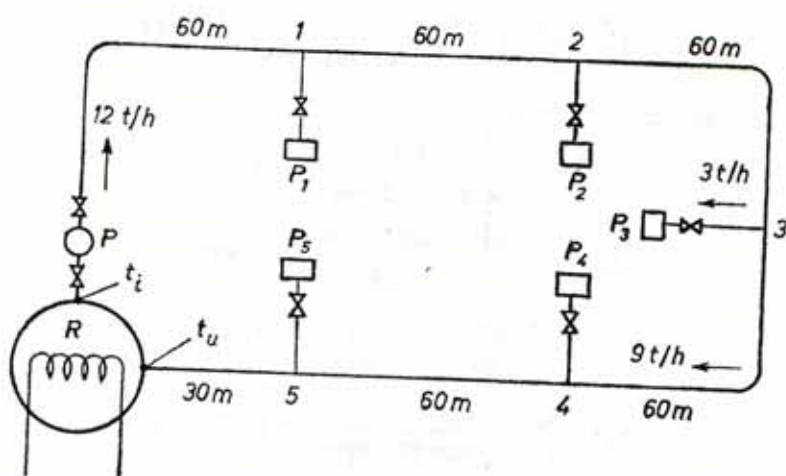
$$Re_1 = \frac{v_1 D_1}{\nu_1} = \frac{0,75 \cdot 0,125}{380 \cdot 10^{-6}} = 247,$$

$$\lambda_1 = \frac{64}{Re_1} = \frac{64}{247} = 0,259,$$

nalazi se ukupni pad pritiska u instalaciji

$$\begin{aligned} \Delta p &= \lambda_1 \frac{l_1}{D_1} \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \lambda_2 \frac{l_2}{D_2} \frac{1}{2} \rho v_2^2 + (1,67 + 19,63) 10^5 = \\ &= 0,259 \frac{180}{0,125} \frac{950}{2} 0,562 + 0,0377 \frac{20}{0,05} \frac{950}{2} 1,38 + \\ &+ 21,3 \cdot 10^5 = 94322 + 9365 + 2\,130\,000 = \\ &= 2\,233\,686 \text{ N/m}^2 = 22,3 \text{ bar.} \end{aligned}$$

27. Na skici je prikazan zatvoren neizolovan cevovod u horizontalnoj ravni, prečnika $D = 100 \text{ mm}$ i koeficijenta prolaza toplote $k = 2,9 \text{ J/m}^2\text{sK}$, koji služi za snabdevanje nekoliko potrošača teškim lož-uljem. Izračunati pad temperature i pad pritiska u cevovodu za slučaj da samo potrošač P_3 uzima iz mreže 3 t/h lož-ulja od ukupno 12 t/h koliko pumpa crpi iz rezervoara i potiskuje u mrežu (ventili ispred ostalih potrošača su zatvoreni). Cevovod se nalazi u zaštitnom kanalu i dužina mu je po deonicama data na skici. Lož-ulje se zagreva na $120 \text{ } ^\circ\text{C}$ i ima sledeća svojstva: $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ na $110 \text{ } ^\circ\text{C}$ i $\nu = 67 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ na $90 \text{ } ^\circ\text{C}$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, $\lambda_n = 0,12 \text{ J/msK}$. Lokalne otpore zanemariti i uzeti da je temperatura vazduha u zaštitnom kanalu $t_a = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$.



Rešenje:

Iz obrasca, $\nu = C/t^m$, koji daje vezu između viskoznosti i temperature dobija se da su

$$m = \frac{\log 67/30}{\log 110/90} = \frac{0,347}{0,086} = 4,$$

$$C = \nu \cdot t^m = 30 \cdot 10^{-6} \cdot 110^4 = 4380,$$

pa je za ovo lož-ulje ta veza

$$\nu = \frac{4380}{t^4} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Za deo cevovoda od rezervoara do čvora 3 je

$$(al)_{R3} = \frac{k D \pi l_{R3}}{G_R c_n} = \frac{2,9 \cdot 0,100 \cdot 3,14 \cdot 180}{3,33 \cdot 1885} = 0,0262,$$

$$t_3 = t_i e^{-(al)_{R3}} = 120 \cdot 2,72^{-0,0262} = 116,5 \text{ }^\circ\text{C},$$

odnosno, od čvora 3 do rezervoara,

$$(al)_{3R} = \frac{k D \pi l_{3R}}{G_{3R} c_n} = \frac{2,9 \cdot 0,100 \cdot 3,14 \cdot 150}{2,5 \cdot 1885} = 0,029,$$

$$t_u = t_3 e^{-(al)_{3R}} = 116,5 \cdot 2,72^{-0,029} = 112,8 \text{ }^\circ\text{C},$$

pa je pad temperature od izlaza do ponovnog ulaza dela lož-ulja u rezervoar

$$\Delta t = t_i - t_u = 120 - 112,8 = 7,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Za određivanje pada pritiska usled trenja u cevovodu potrebno je prethodno izračunati sledeće veličine:

$$v_{R3} = \frac{G_{R3}}{\rho A} = \frac{3,33}{930 \cdot 0,00785} = 0,458 \text{ m/s,}$$

$$\nu_4 = \frac{4380}{t_4^4} = \frac{4380}{120^4} = 21,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

$$Re_4 = \frac{v_{R3} D}{\nu_4} = \frac{0,458 \cdot 0,100}{21,1 \cdot 10^{-6}} = 2170 < Re^*,$$

$$\alpha_4 = \frac{3,65 \lambda_n}{L} = \frac{3,65 \cdot 0,12}{0,100} = 4,38 \text{ J/m}^2\text{sK,}$$

$$\alpha_a = \frac{\alpha_4 k}{\alpha_4 - k} = \frac{4,38 \cdot 2,9}{4,38 - 2,9} = 8,58 \text{ J/m}^2\text{sK,}$$

$$\nu_3 = \frac{4380}{t_3^4} = \frac{4380}{116,5^4} = 23,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

pa je

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{128 \nu_4 G_{R3} l_{R3}}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_4 + \alpha_a}{\alpha_4} \right)^{m/4} \frac{e^{m(\alpha l)_{R3}} - 1}{m(\alpha l)_{R3}} + \\ &+ \frac{128 \nu_3 G_{3R} l_{3R}}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_4 + \alpha_a}{\alpha_4} \right)^{m/4} \frac{e^{m(\alpha l)_{3R}} - 1}{m(\alpha l)_{3R}} = \\ &= \frac{128 \cdot 21,1 \cdot 10^{-6} \cdot 3,34 \cdot 180}{3,14 \cdot 0,0001} \left(\frac{4,38 + 8,58}{4,38} \right)^{4/4} \frac{2,720^{0,105} - 1}{0,105} + \\ &+ \frac{128 \cdot 23,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2,50 \cdot 150}{3,14 \cdot 0,0001} \left(\frac{4,38 + 8,58}{4,38} \right)^{4/4} \frac{2,720^{0,116} - 1}{0,116} = \\ &= 5168,5 \cdot 2,96 \cdot 1,085 + 3651,6 \cdot 2,96 \cdot 1,075 = \\ &= 28218 \text{ N/m}^2 = 0,28 \text{ bar.} \end{aligned}$$

28. Kroz horizontalni neizolovani cevovod ($D = 50 \text{ mm}$, $l = 300 \text{ m}$, $k = 2,9 \text{ J/m}^2\text{sK}$) u jednoj rafineriji transportuje se $G = 9 \text{ t/h}$ specijalnog lož-ulja ($\nu = 0,115/t^{1,04} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, $\lambda_n = 0,13 \text{ J/msK}$) čija temperatura na početku cevovoda iznosi $t_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Izračunati pad pritiska usled trenja u cevovodu za vreme transporta.

Ako se kroz ovaj cevovod umesto specijalnog lož-ulja transportuje lako lož-ulje ($\nu = 0,63/t^{2,26} \text{ m}^2/\text{s}$, ρ , c_n , λ_n je isto kao i kod specijalnog lož-ulja), na koju temperaturu ono mora da se zagreva pa da u cevovodu ostane isti pad pritiska i kapacitet transporta?

Rešenje:

Kad se transportuje specijalno lož-ulje biće:

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{9000}{930 \cdot 3600} = 0,00269 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,00269}{0,00196} = 1,37 \text{ m/s,}$$

$$\nu_1 = \frac{0,115}{40^{1,94}} = \frac{0,115}{1260} = 91 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

$$Re_1 = \frac{vD}{\nu_1} = \frac{1,37 \cdot 0,050}{91 \cdot 10^{-6}} = 750 < Re^*$$

$$\alpha_t = \frac{3,65 \lambda_n}{D} = \frac{3,65 \cdot 0,13}{0,050} = 9,5 \text{ J/m}^2\text{sK,}$$

$$\alpha_a = \frac{\alpha_t k}{\alpha_t - k} = \frac{9,5 \cdot 2,9}{9,5 - 2,9} = 4,2 \text{ J/m}^2\text{sK.}$$

Sada se mogu izračunati pomoćne veličine:

$$\left(\frac{\alpha_t + \alpha_a}{\alpha_t} \right)^{m/4} = \left(\frac{9,5 + 4,2}{9,5} \right)^{1,94/4} = 1,20,$$

$$al = \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{2,9 \cdot 0,050 \cdot 3,14 \cdot 300}{2,5 \cdot 1885} = 0,029,$$

$$mal = 1,94 \cdot 0,029 = 0,0562,$$

$$\frac{e^{mal} - 1}{mal} = \frac{2,72^{0,0562} - 1}{0,0562} = 1,06,$$

$$\frac{128 \rho \nu_1 q l}{\pi D^4} = \frac{128 \cdot 930 \cdot 91 \cdot 10^{-6} \cdot 0,00269 \cdot 300}{3,14 \cdot 0,050^4} = 445374,$$

i, zatim, pad pritiska usled trenja za vreme transporta specijalnog lož-ulja

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{128 \rho \nu_1 q l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_t + \alpha_a}{\alpha_t} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal} = \\ &= 445374 \cdot 1,20 \cdot 1,06 = 566515,7 \text{ N/m}^2 = 5,66 \text{ bar.} \end{aligned}$$

Pošto se za vreme transporta lakog lož-ulja zahteva da u cevovodu ostane isti pad pritiska i kapacitet transporta, to njegova viskoznost mora da bude ista kao i viskoznost specijalnog lož-ulja. Prema tome, iz jednačine

$$\nu = \frac{0,63}{t^{2,26}} = 91 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

sleduje temperatura zagrevanja lakog lož-ulja

$$t = \left(\frac{0,63}{91 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,443} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

29. Kroz horizontalni neizolovani cevovod prečnika $D = 150 \text{ mm}$ i dužine $l = 2500 \text{ m}$ ($\alpha_{st} = 11,6 \text{ J/m}^2\text{sK}$) transportuje se sirova nafta čija su svojstva data u tabeli:

$t \text{ (}^\circ\text{C)}$	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$10^6 \nu \text{ (m}^2/\text{s)}$	$\lambda_{st} \left(\frac{\text{J}}{\text{msK}} \right)$	$c_n \left(\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right)$
50	910	100	—	—
35	920	—	0,13	1885
20	930	1000	—	—

Treba izračunati:

a) viskoznost i pad pritiska na temperaturi $t = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$,

b) temperaturu t_2 na kraju cevovoda i odgovarajući pad pritiska usled trenja, ako se nafta greje na temperaturu $t_1 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$. Računska temperatura okoline je $t_a = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Rešenje:

a) Ako se uzme zavisnost $\nu = C/t^m$ onda će se za viskoznosti na temperaturama $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ i $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ dobiti jednačine

$$100 \cdot 10^{-6} = C/50^m, \quad 1000 \cdot 10^{-6} = C/20^m$$

iz kojih sleduje $m = 2,5$ i $C = 1,78$. Prema tome, viskoznost ove sirove nafte menja se sa temperaturom kao

$$\nu = \frac{1,78}{t^{2,5}} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Oдавde je na temperaturi $t = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$,

$$\nu = \frac{1,78}{35^{2,5}} = \frac{1,78}{7250} = 246 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Dalje su:

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{80000}{920 \cdot 3600} = 0,0241 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,0241}{0,0177} = 1,36 \text{ m/s},$$

$$Re = \frac{v D}{\nu} = \frac{1,36 \cdot 0,150}{246 \cdot 10^{-6}} = 830 < Re^*$$

$$\Delta p = \frac{128 \rho \nu q l}{\pi D^4} = \frac{128 \cdot 920 \cdot 246 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0241 \cdot 2500}{3,14 \cdot 0,000505} =$$

$$= 1\,100\,142 \text{ N/m}^2 = 11 \text{ bar.}$$

b) Na temperaturi $t_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ vrednost Re broja je

$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{1,36 \cdot 0,150}{100 \cdot 10^{-6}} = 2040 < Re^*,$$

pa se koeficijent prelaza toplote sa nafte na cevovod može računati kao

$$\alpha_t = \frac{3,65 \lambda_n}{D} = \frac{3,65 \cdot 0,13}{0,150} = 3,16 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

odnosno, pošto je cevovod neizolovan,

$$k \approx \frac{\alpha_t \alpha_a}{\alpha_t + \alpha_a} = \frac{3,16 \cdot 11,6}{3,16 + 11,6} = 2,48 \text{ J/m}^2\text{sK}.$$

Sad se može naći proizvod

$$a l = \frac{k D \pi l}{G c_n} = \frac{2,48 \cdot 0,150 \cdot 3,14 \cdot 2500}{22,2 \cdot 1885} = 0,07,$$

i, zatim, temperatura na kraju cevovoda

$$t_2 = t_1 e^{-al} = 50 \cdot 2,72^{-0,07} = 46,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Najzad, pad pritiska u ovom slučaju iznosi:

$$\Delta p = \frac{128 \rho \nu_1 q l}{\pi D^4} \left(\frac{\alpha_t + \alpha_a}{\alpha_t} \right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal} =$$

$$= \frac{128 \cdot 920 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0241 \cdot 2500}{3,14 \cdot 0,000505} \left(\frac{3,16 + 11,6}{3,16} \right)^{2,5/4} \frac{2,72^{0,173} - 1}{0,173} =$$

$$= 447212 \cdot 2,62 \cdot 1,1 = 1\,288\,865 \text{ N/m}^2 = 12,9 \text{ bar.}$$

30. Kroz horizontalni dobro izolovan i zaštićen cevovod unutrašnjeg prečnika $D = 300 \text{ mm}$ i dužine $l = 15 \text{ km}$ pumpa transportuje $G = 400 \text{ t/h}$ sirove nafte sledećih svojstava: $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, $H_d = 42000 \text{ kJ/kg}$, $\nu = 6/1^3 \text{ m}^2/\text{s}$. Osim toga, zbog parafina i smolastih materija temperatura nafte u cevovodu ne sme da bude niža od $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Uzimajući da je strujanje ove nafte u cevovodu izotermno, odrediti njenu temperaturu zagrevanja tako da transportni

troškovi budu minimalni. Ostali potrebni podaci su: koeficijenti korisnosti pumpe, motora i kotla su $\eta_p = 0,75$, $\eta_m = 0,85$, $\eta_k = 0,75$, cena goriva za loženje kotla $c_{bn} = 25$ din/kg i cena pogonske energije $c_{kWh} = 50$ din/kWh.

Rešenje:

Kad se prethodno izračunaju

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{400000}{850 \cdot 3600} = 0,1305 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,1305}{0,0707} = 1,85 \text{ m/s},$$

$$v_2 = \frac{6}{t_2^3} = \frac{6}{30^3} = \frac{6}{27000} = 222 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_2 = \frac{v D}{\nu_2} = \frac{1,85 \cdot 0,300}{222 \cdot 10^{-6}} = 2500 > Re^*,$$

može se zaključiti da je strujanje ove nafte turbulentno, jer je ono takvo i pri najnižoj temperaturi ispod koje se ne sme ići jer bi došlo do stvrdnjavanja parafina i smolastih materija u nafti. Prema tome, pad pritiska usled trenja računa se po obrascu:

$$\begin{aligned} \Delta p &= 0,241 \frac{\rho \nu^{0,25} q^{1,75} l}{D^{4,75}} = \\ &= 0,241 \frac{850 \cdot 0,1305^{1,75} \cdot 15000}{0,300^{4,75}} \left(\frac{6}{t^3}\right)^{0,25} = \\ &= 0,241 \frac{850 \cdot 0,0285 \cdot 15000 \cdot 1,565}{0,00324 \cdot t^{0,75}} = \frac{42\,300\,102}{t^{0,75}}. \end{aligned}$$

Kako snaga za pogon pumpe iznosi

$$P = \frac{q \Delta p}{1000 \eta_p \eta_m} = \frac{0,1305 \cdot 42300102}{1000 \cdot 0,75 \cdot 0,85 \cdot t^{0,75}} = \frac{8659,1}{t^{0,75}},$$

to se pogonski troškovi mogu napisati kao

$$T_P = P c_{kWh} = \frac{8659,1}{t^{0,75}} 50 = \frac{432954}{t^{0,75}}.$$

Troškovi zagrevanja sirove nafte od temperature t_a okoline do temperature t iznose

$$\begin{aligned} T_Q &= \frac{Q c_{bn}}{H_d \eta_k} = \frac{G c_n (t - t_a) c_{bn}}{H_d \eta_k} = \\ &= \frac{400000 \cdot 1885 (t - t_a) 25}{42000 \cdot 10^3 \cdot 0,75} = 598,5 (t - t_a). \end{aligned}$$

Dakle, troškovi transporta imaju oblik:

$$T_g = T_P + T_Q = \frac{432954}{t^{0,75}} + 598,5(t - t_a),$$

odakle je

$$\frac{dT_g}{dt} = -0,75 \cdot 432954 t^{-1,75} + 598,5 = 0.$$

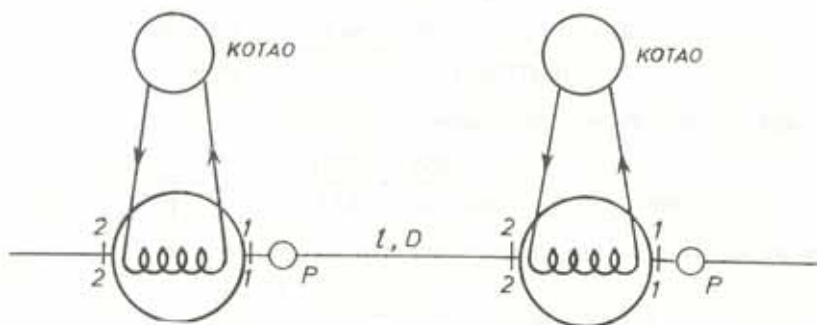
Rešenje ove jednačine je $t = 36,5 \text{ }^\circ\text{C}$ i to je temperatura na koju treba da se zagreva sirova nafta ako se žele najniži troškovi transporta.

31. Kroz horizontalni izolovani cevovod prečnika $D = 400 \text{ mm}$ i dužine $l = 90 \text{ km}$ ($k D_m = 0,52 \text{ J/msK}$) transportuje se $G = 330 \text{ t/h}$ sirove nafte sledećih svojstava: $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$, $c_n = 1885 \text{ J/kgK}$, $\lambda_n = 0,13 \text{ J/msK}$, $\nu = 5,4/t^3 \text{ m}^2/\text{s}$. Odrediti:

a) pad temperature, pad pritiska i snagu pumpe ($\gamma_{ip} = 0,75$) ako nafta na kraju cevovoda treba da ima temperaturu $t_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Računska temperatura okoline je $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

b) količinu vrele vode kojom se greje sirova nafta u rezervoaru, ako su njena temperatura i entalpija $170 \text{ }^\circ\text{C}$ i 720 kJ/kg na ulazu u grejač, i $90 \text{ }^\circ\text{C}$ i 377 kJ/kg na izlazu iz grejača (voda se posle grejača koristi za centralno grejanje pomoćnih prostorija pumpne stanice).

Napomena: Gubitak toplote kroz rezervoar za vreme zagrevanja nafte iznosi 10% od količine toplote koja je potrebna da se nafta zagreva od temperature t_2 do temperature t_1 .



Rešenje:

a) Čim se izračuna proizvod

$$a l = \frac{k D_m \pi l}{G c_n} = \frac{0,52 \cdot 3,14 \cdot 90000}{91,6 \cdot 1885} = 0,852,$$

može se naći temperatura zagrevanja nafte

$$t_1 = t_2 e^{at} = 35 \cdot 2,72^{0,852} = 82,1 \text{ } ^\circ\text{C},$$

pa je pad temperature $\Delta t = t_1 - t_2 = 47,1 \text{ } ^\circ\text{C}$. Radi određivanja pada pritiska usled trenja moraju se prethodno izračunati sledeće veličine:

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{330000}{950 \cdot 3600} = 0,0966 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,0966}{0,1256} = 0,77 \text{ m/s},$$

$$\nu_1 = \frac{5,4}{t_1^3} = \frac{5,4}{562000} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_1 = \frac{v D}{\nu_1} = \frac{0,77 \cdot 0,400}{9,6 \cdot 10^{-6}} = 32000 > Re^*,$$

$$\nu_2 = \frac{5,4}{t_2^3} = \frac{5,4}{42800} = 126 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_2 = \frac{v D}{\nu_2} = \frac{0,77 \cdot 0,400}{126 \cdot 10^{-6}} = 2450 > Re^*.$$

Ove dve vrednosti Re broja pokazuju da je strujanje nafte turbulentno na celoj dužini naftovoda. Zato se sada mora naći srednja temperatura nafte

$$t = \frac{1}{3} (t_1 + 2t_2) = \frac{1}{3} (82,1 + 70) = 50,8 \text{ } ^\circ\text{C},$$

i veličine koje njoj odgovaraju:

$$\nu = \frac{5,4}{t^3} = \frac{5,4}{131500} = 41,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re = \frac{v D}{\nu} = \frac{0,77 \cdot 0,400}{41,2 \cdot 10^{-6}} = 7500,$$

$$Pr = \frac{\rho \nu c_n}{\lambda_n} = \frac{950 \cdot 41,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1885}{0,13} = 567,5.$$

Pošto se još usvoji odnos viskoznosti nafte u osi cevovoda i u blizini zida, $\nu_g/\nu_z = 0,95$, može se izračunati odgovarajuća vrednost Nusselt-ovog broja,

$$\begin{aligned} Nu &= 0,116 (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \left(\frac{\nu_g}{\nu_z} \right)^{0,14} = \\ &= 0,116 (380 - 125) 8,3 \cdot 0,996 = 245, \end{aligned}$$

i proizvod

$$\alpha_l D_{cl} = \lambda_n Nu = 0,13 \cdot 245 = 31,8 \text{ J/msK}.$$

Pre nego što se pređe na dalji račun mora se proveriti usvojeni odnos viskoznosti ν_8/ν_z . Iz toplotnog bilansa sleduje

$$\frac{\nu_z}{\nu_8} = \left(\frac{\alpha_t D_{ct}}{\alpha_t D_{ct} - k D_m} \right)^m = \left(\frac{31,8}{3,18 - 0,52} \right)^3 = 1,05,$$

odnosno,

$$\frac{\nu_8}{\nu_z} = \frac{1}{1,05} = 0,952.$$

Ova vrednost pokazuje da se ranije pretpostavljeni odnos može prihvatiti kao dovoljno tačan. Prema tome, pad pritiska usled trenja iznosi

$$\begin{aligned} \Delta p &= 0,241 \frac{\rho \nu_1^{0,25} q^{1,75}}{D_{ci}^{4,75}} \left(\frac{\alpha_t D_{ct}}{\alpha_t D_{ct} - k D_m} \right)^{m/7} \frac{e^{0,25mal} - 1}{0,25 mal} = \\ &= 0,241 \frac{950 (9,6 \cdot 10^{-6})^{0,25} 0,0966^{1,75} 90000}{0,400^{4,75}} 1,05^{1/7} \frac{2,72^{0,642} - 1}{0,642} = \\ &= 1\,486\,215 \cdot 1,007 \cdot 1,4 = 2\,095\,266 \text{ N/m}^2 = 21 \text{ bar}. \end{aligned}$$

Snaga pumpne stanice je

$$P = \frac{q \Delta p}{1000 \eta_p} = \frac{0,0966 \cdot 2095266}{1000 \cdot 0,75} = 270 \text{ kW}.$$

b) Količine toplote koja se troši na zagrevanje sirove nafte od temperature t_2 do temperature t_1 i koja se za ovo vreme gubi kroz rezervoar iznosi:

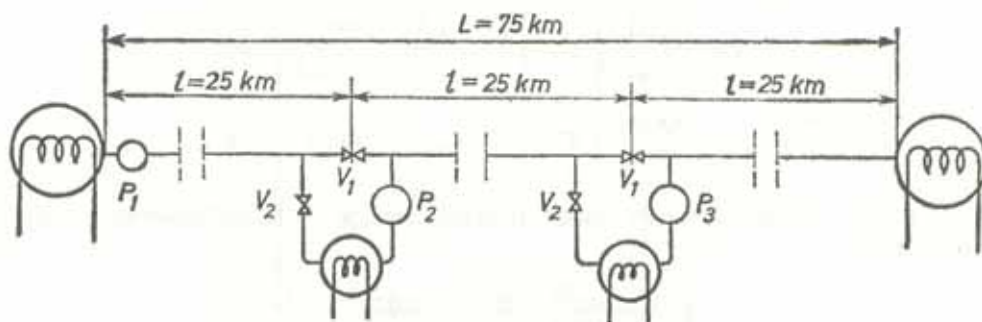
$$\begin{aligned} Q &= G c_n (t_1 - t_2) + 0,10 G c_n (t_1 - t_2) = \\ &= 1,1 G c_n (t_1 - t_2) = 1,1 \cdot 91,6 \cdot 1885 \cdot 47,1 = 8\,945\,825 \text{ J/s}. \end{aligned}$$

Potrebna količina vrele vode za zagrevanje nafte i gubitke kroz rezervoar za vreme zagrevanja je

$$G_v = \frac{Q}{i_1 - i_2} = \frac{8945825}{(720 - 377)10^3} = 26,1 \text{ kg/s} = 93892 \text{ kg/h}.$$

32. Naftovod dužine $L = 75 \text{ km}$ i prečnika $D = 250 \text{ mm}$ projektovan je tako da se kroz njega može transportovati i laka i teška sirova nafta. Zbog toga je naftovod podeljen na tri sekcije dužine $l = 25 \text{ km}$ ispred kojih se nalaze pumpne stanice i rezervoari za zagrevanje. 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 se teška nafta mora zagrevati. Teška nafta tada prolazi kroz rezervoare ispred svake sekcije, u kojima 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 ($q = 210 \text{ m}^3/\text{h}$) 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 je $\nu = 25,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho = 890 \text{ kg}/\text{m}^3$. Svojstva teške sirove nafte određena su veličinama: $\rho = 950 \text{ kg}/\text{m}^3$, $c_n = 2010 \text{ J}/\text{kgK}$, $\lambda_n = 0,12 \text{ J}/\text{msK}$, $\alpha_a = 6,47 \text{ J}/\text{m}^2\text{sK}$, $\nu = 0,3/t^2 \text{ m}^2/\text{s}$. Pretpostaviti da je strujanje teške sirove nafte laminarno.



Rešenje:

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

$$v = \frac{q}{A} = \frac{210}{0,049 \cdot 3600} = 1,19 \text{ m/s},$$

$$Re = \frac{v D}{\nu} = \frac{1,19 \cdot 0,250}{25,8 \cdot 10^{-6}} = 11500,$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{11500}} = 0,0306,$$

$$\begin{aligned} \Delta p &= \lambda \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 = 0,0306 \frac{75000}{0,250} \frac{890}{2} 1,42 = \\ &= 5\,800\,842 \text{ N}/\text{m}^2 = 58 \text{ bar}. \end{aligned}$$

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

$$\alpha_t = \frac{Nu \lambda_n}{D} = \frac{3,65 \cdot 0,12}{0,250} = 1,75 \text{ J}/\text{m}^2\text{sK},$$

$$k \approx \frac{\alpha_t \alpha_a}{\alpha_t + \alpha_a} = \frac{1,75 \cdot 6,47}{1,75 + 6,47} = 1,38 \text{ J}/\text{m}^2\text{sK},$$

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

$$al = \frac{kD \pi l}{G c_n} = \frac{1,38 \cdot 0,250 \cdot 3,14 \cdot 25000}{55,4 \cdot 2010} = 0,243,$$

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

$$\begin{aligned} \Delta p &= \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 \left(\frac{\alpha_i + \alpha_a}{\alpha_i}\right)^{m/4} \frac{e^{mal} - 1}{mal} = \\ &= \lambda \frac{25000}{0,250} \frac{950}{2} 1,42 \cdot 2,17 \cdot 1,29 = 1888,2 \cdot 10^5 \lambda. \end{aligned}$$

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 Re broj i viskoznost teške nafte,

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

$$v = \frac{v D}{Re} = \frac{1,19 \cdot 0,250}{2084} = 143 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

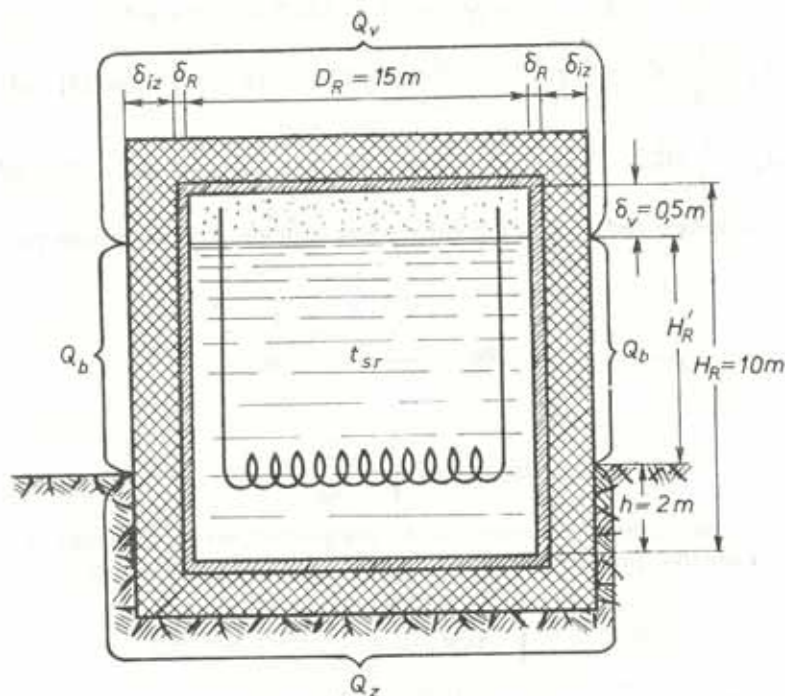
pa, zatim, temperatura zagrevanja

$$t = \sqrt{\frac{0,3}{v}} = \sqrt{\frac{0,3}{143 \cdot 10^{-6}}} = 45,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Najzad, može se naći i temperatura teške nafte na kraju svake sekcije. Ona će iznositi:

$$t_l = t e^{-al} = 45,9 \cdot 2,72^{-0,243} = 36,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

33. 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 $\nu = 5,4/t^3 \text{ m}^2/\text{s}$. Ostali podaci, su: debljina čeličnog lima $\delta_R = 10 \text{ mm}$, koeficijent provodenja toplote zida rezervoara $\lambda_R = 46,5 \text{ J/msK}$, debljina izolacije rezervoara iznosi $\delta_{iz} = 100 \text{ mm}$ koeficijent provodenja toplote izolacije rezervoara $\lambda_{iz} = 0,116 \text{ J/msK}$, 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 $t_a = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$.



Rešenje:

Srednja temperatura nafte u rezervoaru i odgovarajuća viskoznost iznose:

$$t_{sr} = \frac{1}{3} (2t_1 + t_2) = \frac{1}{3} (2 \cdot 70 + 20) = 53,3 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\nu_{sr} = \frac{5,4}{t_{sr}^3} = \frac{5,4}{53,3^3} = 36,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Gubitak toplote kroz rezervoar određen je jednačinom

$$Q = k_R A_R (t_{sr} - t_a) \text{ J/s},$$

gde je

$$k_R A_R = k_b A_b + k_z A_z + k_v A_v.$$

Ovde su k_b , k_z , k_v koeficijenti prolaza toplote kroz bočni zid rezervoara, kroz deo koji je ukopan u zemlju i kroz deo koji je u vezi sa parama sirove nafte, koja se zagreva.

Isto tako A_b , A_z , A_v označavaju odgovarajuće površine kroz koje se gubi toplota i njihove vrednosti su:

$$A_b = D_R \pi H'_R = 15 \cdot 3,14 \cdot 7,5 = 354 \text{ m}^2,$$

$$A_z = \frac{1}{4} D_R^2 \pi + D_R \pi h = \frac{1}{4} 225 \cdot 3,14 + 15 \cdot 3,14 \cdot 2 = 271 \text{ m}^2,$$

$$A_v = \frac{1}{4} D_R^2 \pi + D_R \pi \delta_v = \frac{1}{4} 225 \cdot 3,14 + 15 \cdot 3,14 \cdot 0,5 = 200 \text{ m}^2.$$

Sad se nalaze redom koeficijenti prolaza toplote. Prvi se računa po obrascu:

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{tb}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{ab}}},$$

gde je

$$\alpha_{tb} = 0,87 \sqrt[3]{\frac{t_{sr} - t_R}{\nu_{sr}}}.$$

Temperatura zida rezervoara mora da se pretpostavi, ovom prilikom $t_R = 52 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t_R < t_{sr}$), i docnije proveriti kad se izračuna k_b . U ovom slučaju su

$$\alpha_{tb} = 0,87 \sqrt[3]{\frac{53,3 - 52}{36,8 \cdot 10^{-6}}} = 28,5 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_R}{\lambda_R} + \frac{\delta_{tz}}{\lambda_{tz}} = \frac{0,010}{46,5} + \frac{0,100}{0,116} = 0,86 \text{ (J/m}^2\text{sK)}^{-1},$$

$$\alpha_{ab} = 7,2 \nu_0^{0,78} = 7,2 \left(\frac{50 \cdot 10^3}{3600} \right)^{0,78} = 56 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{28,5} + 0,86 + \frac{1}{56}} = 1,095 \text{ J/m}^2\text{sK}.$$

Pretpostavljena temperatura rezervoara proverava se posredstvom jednačine

$$\alpha_{tb} (t_{sr} - t_R) = k_b (t_{sr} - t_a)$$

iz koje sleduje

$$t_R = \frac{\alpha_{tb} - k_b}{\alpha_{tb}} t_{sr} = \frac{28,5 - 1,095}{28,5} 53,3 = 51,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Nema velike razlike između ove izračunate i ranije pretpostavljene vrednosti pa se nađena vrednost za k_b može prihvatiti za dalji račun. Vrednost drugog koeficijenta nalazi se iz obrasca

$$k_z = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{tz}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{az}}},$$

u kome su:

$$\alpha_{iz} = 0,79 \sqrt[4]{\frac{t_{er} - t_R}{\nu_{er}}} = 0,79 \sqrt[4]{\frac{53,3 - 52}{36,8 \cdot 10^{-6}}} = 10,8 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$\delta_z = 0,25 D_R + h = 0,25 \cdot 15 + 2 = 5,75 \text{ m},$$

$$\lambda_z = 0,30 + 99,5 \frac{0,97^{t_a} - 0,97^{t_R}}{t_R - t_a} = 1,81 \text{ J/msK},$$

$$\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} = 0,86 + \frac{\delta_z}{\lambda_z} = 0,86 + \frac{5,75}{1,81} = 4,04 \text{ (J/m}^2\text{sK)}^{-1},$$

$$\alpha_{az} = 6,2 + 4,2 v_0 = 6,2 + 4,2 \cdot 13,9 = 64,6 \text{ J/m}^2\text{sK}.$$

Prema tome je

$$k_z = \frac{1}{\frac{1}{10,8} + 4,04 + \frac{1}{64,6}} = 0,24 \text{ J/m}^2\text{sK}.$$

Poslednji koeficijent računa se kao

$$k_v = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{iv}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha'_{iv}} + \frac{1}{\alpha_{av}}},$$

gde su

$$\alpha_{iv} = 3,25 \sqrt[4]{t_{er} - t_v} = 3,25 \sqrt[4]{53,3 - 52} = 3,5 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$t_v \approx t_R = 52 \text{ }^\circ\text{C (usvojena vrednost)},$$

$$\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} = 0,86 + \frac{0,5}{2,9} = 1,03 \text{ (J/m}^2\text{sK)}^{-1},$$

$$\alpha'_{iv} = 8,7 \text{ J/m}^2\text{sK, (obično ovoliko iznosi)},$$

$$\alpha_{av} = \alpha_{ab} = 56 \text{ J/m}^2\text{sK}.$$

U prethodnim izrazima usvojene su vrednosti u preporučljivim granicama za $\lambda_v = 2,9 \text{ J/msK}$, $\alpha'_{iv} = 8,7 \text{ J/m}^2\text{sK}$ i $\alpha_{av} = \alpha_{ab}$. Posle ovoga dobija se

$$k_v = \frac{1}{\frac{1}{3,5} + 1,03 + \frac{1}{8,7} + \frac{1}{56}} = 0,69 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

pa je

$$k_R A_R = 1,095 \cdot 354 + 0,24 \cdot 271 + 0,69 \cdot 200 = 590,7 \text{ J/sK}.$$

Dakle, gubitak toplote kroz rezervoar iznosi

$$Q = 590,7 \cdot 53,3 = 31485 \text{ J/s}.$$

IZOTERMNO I ADIJABATSKO STRUJANJE GASOVA
G A S O V O D I

34. Na početku cevovoda za pneumatski transport treba da se obezbedi $15 \text{ m}^3/\text{min}$ vazduha pritiska $2,45 \text{ bar}$. Cevovod za dovod vazduha je horizontalan prečnika $D = 50 \text{ mm}$, dužine $l = 150 \text{ m}$ i apsolutne hrapavosti $\delta = 0,1 \text{ mm}$. Odrediti pritisak na početku cevovoda za dovod vazduha, koji struji pri konstantnoj temperaturi od $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rešenje:

Kako su gustine vazduha

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R T_0} = \frac{101325}{286,8 \cdot 288} = 1,225 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{245000}{286,8 \cdot 293} = 2,9 \text{ kg/m}^3,$$

to je na kraju dovodnog cevovoda

$$q_2 = \frac{G}{\rho_2} = \frac{\rho_0 q_0}{\rho_2} = \frac{1,225 \cdot 15}{2,9 \cdot 60} = 0,106 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_2 = \frac{q_2}{A} = \frac{0,106}{0,00196} = 54 \text{ m/s},$$

$$\nu_2 = \frac{\mu}{\rho_2} = \frac{18,15 \cdot 10^{-6}}{2,9} = 6,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_2 = \frac{v_2 D}{\nu_2} = \frac{54 \cdot 0,050}{6,25 \cdot 10^{-6}} = 430000.$$

Relativnoj hrapavosti $\delta/D = 0,1/50 = 0,002$ i ovoj vrednosti Re broja odgovara prema dijagramu 1 koeficijent trenja $\lambda = 0,024$. Prema tome je

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = 0,024 \frac{150}{0,050} \frac{2,9}{2} 2920 = 304848,$$

pa je pritisak na početku dovodnog cevovoda

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 3,05 \cdot 10^5} = \sqrt{20,95 \cdot 10^{10}} = 4,58 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Ako se sad izračunaju redom

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{458000}{286,8 \cdot 293} = 5,4 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_1 = \frac{G}{\rho_1} = \frac{\rho_0 q_0}{\rho_1} = \frac{1,225 \cdot 15}{5,4 \cdot 60} = 0,0565 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_1 = \frac{q_1}{A} = \frac{0,0565}{0,00196} = 28,7 \text{ m/s},$$

$$\nu_1 = \frac{\mu}{\rho_1} = \frac{18,15 \cdot 10^{-8}}{5,4} = 3,36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

može se pokazati da je

$$Re_1 = \frac{v_1 \cdot D}{\nu_1} = \frac{28,7 \cdot 0,050}{3,36 \cdot 10^{-6}} = 430000 = Re_2,$$

što je svojstvo izotermnog strujanja. Dakle, sasvim je svejedno da li za iznalaženje koeficijenta trenja poznavali Re broj na početku ili na kraju cevovoda.

35. Kroz cevovod prečnika $D = 250$ mm transportuje se industrijski gas pri konstantnoj temperaturi $t = 20$ °C. Težinski sastav gasa je: 85% metana (CH_4), 13% azota (N_2) i 2% ugljen dioksida (CO_2). Na rastojanju od 20 km izmereni su pritisci u cevovodu: $p_1 = 19,6$ bar i $p_2 = 11,8$ bar. Koeficijent trenja je $\lambda = 0,015$. Izračunati kapacitet gasovoda u m^3/h .

Rešenje:

Kapacitet gasovoda iznosi

$$q_0 = \frac{G}{\rho_0} = \frac{\rho_1 q_1}{\rho_0} = \frac{\rho_1 v_1 A}{\rho_0},$$

gde su ρ_1 i ρ_0 gustine industrijskog gasa na odgovarajućim pritiscima i temperaturama, a v_1 brzina strujanja na početku gasovoda. Kako su gasne konstante pojedinih komponenata

$$R(\text{CH}_4) = 518 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}, \quad R(\text{N}_2) = 296,5 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}, \quad R(\text{CO}_2) = 188,8 \frac{\text{J}}{\text{kgK}},$$

to je vrednost gasne konstante mešavine

$$R = 0,85 R(\text{CH}_4) + 0,13 R(\text{N}_2) + 0,02 R(\text{CO}_2) =$$

$$= 0,85 \cdot 518 + 0,13 \cdot 296,5 + 0,02 \cdot 188,8 = 482,6 \text{ J/kgK}.$$

Prema tome, gustine ρ_1 i ρ_0 industrijskog gasa iznose:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{1960000}{482,6 \cdot 293} = 14 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R T_0} = \frac{101\,325}{482,6 \cdot 288} = 0,729 \text{ kg/m}^3.$$

Ostaje još da se izračuna brzina v_1 iz jednačine:

$$\lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = \frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \frac{(384,2 - 139,2) \cdot 10^{10}}{2 \cdot 19,6 \cdot 10^5} = 6,25 \cdot 10^5,$$

i ona ovom prilikom iznosi

$$v_1 = \sqrt{6,25 \cdot 10^5 \frac{2D}{\lambda l \rho_1}} = \sqrt{6,25 \cdot 10^5 \frac{2 \cdot 0,250}{0,015 \cdot 20000 \cdot 0,729}} = \sqrt{74,48} = 8,63 \text{ m/s},$$

pa je kapacitet gasovoda

$$q_0 = \frac{14 \cdot 8,63 \cdot 0,049}{0,729} = 8,12 \text{ m}^3/\text{s} = 29230 \text{ m}^3/\text{h}.$$

36. Metan se transportuje kroz gasovod prečnika $D = 300$ mm pri konstantnoj temperaturi ($t = 20$ °C.) Dužina deonice gasovoda iznosi $l = 85$ km, a odnos pritiska na početku i na kraju cevovoda je $p_1/p_2 = 1,7$. Ostali podaci su: kapacitet gasovoda $q_0 = 65000$ m³/h, koeficijent trenja $\lambda = 0,012$ i gasna konstanta $R = 518$ J/kgK. Odrediti pritisak p_1 na početku deonice gasovoda.

Rešenje:

Ako se izraz koji povezuje pritiske p_1 i p_2 ,

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \frac{p_1}{R T_1} v_1^2,$$

napiše u obliku

$$1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2 = \lambda \frac{l}{D} \frac{v_1^2}{R T_1},$$

onda se može izračunati brzina v_1 na početku cevovoda:

$$v_1 = \sqrt{\frac{D R T_1}{\lambda l} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2\right]} = \sqrt{\frac{0,300 \cdot 518 \cdot 293}{0,012 \cdot 85000} \left[1 - \left(\frac{1}{1,7}\right)^2\right]} = 5,38 \text{ m/s}.$$

Pošto je gustina metana na 760 mm Hg i 15 °C,

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R T_0} = \frac{101\,325}{518 \cdot 288} = 0,679 \text{ kg/m}^3,$$

to je protok kroz gasovod

$$G = \rho_0 q_0 = 0,679 \frac{65000}{3600} = 12,25 \text{ kg/s.}$$

Sad se može naći gustina metana na početku gasovoda,

$$\rho_1 = \frac{G}{v_1 A} = \frac{12,25}{5,38 \cdot 0,0707} = 32 \text{ kg/m}^3,$$

pa, zatim, odgovarajući pritisak

$$p_1 = \rho_1 R T_1 = 32 \cdot 518 \cdot 293 = 4\,856\,768 \text{ N/m}^2 = 48,6 \text{ bar.}$$

Mogu se sad izračunati faktori superstišljivosti, na primer prema obrascu Adamova, u kome se pritisak zamenjuje u atmosferama a temperatura u °C. Dakle, biće:

$$Z_1 = \frac{1}{1 + (24 - 0,27 \cdot t_1) 10^{-4} p_1} = \frac{1}{1 + (24 - 0,27 \cdot 20) 10^{-4} \cdot 49,5} = 0,918$$

$$Z_2 = \frac{1}{1 + (24 - 0,27 \cdot t_2) 10^{-4} p_2} = \frac{1}{1 + (24 - 0,27 \cdot 20) 10^{-4} \cdot 29,1} = 0,953$$

$$Z_m = \frac{1}{2} (Z_1 + Z_2) = \frac{1}{2} (0,918 + 0,953) = 0,935.$$

Tačnije vrednosti za brzinu, gustinu i pritisak na početku cevovoda su:

$$v_1 = 5,38 \sqrt{\frac{Z_1}{Z_m}} = \sqrt{5,38 \frac{0,918}{0,935}} = 5,33 \text{ m/s,}$$

$$\rho_1 = \frac{G}{v_1 A} = \frac{12,25}{5,33 \cdot 0,0707} = 32,4 \text{ kg/m}^3,$$

$$p_1 = \rho_1 R T_1 = 32,4 \cdot 518 \cdot 293 = 49,2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

37. Od kompresorske stanice do mesta potrošnje vazduh se doprema kroz horizontalni cevovod prečnika $D = 50 \text{ mm}$ i dužine $l = 800 \text{ m}$, pri konstantnoj temperaturi $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Protok vazduha iznosi $q_0 = 6,25 \text{ m}^3/\text{min}$, a pritisak na početku cevovoda je $p_1 = 7,85 \text{ bar}$. Apsolutna hrapavost cevovoda je $\delta = 0,1 \text{ mm}$. Ako se zanemare lokalni otpori, koliki je pritisak na kraju cevovoda?

Rešenje:

Gustina vazduha, zapreminski protok i brzina strujanja na početku cevovoda iznose:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{785\,000}{286,8 \cdot 293} = 9,35 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_1 = \frac{\rho_0 q_0}{\rho_1} = \frac{1,225 \cdot 6,25}{9,35 \cdot 60} = 0,0133 \text{ m}^3/\text{s,}$$

$$v_1 = \frac{q_1}{A} = \frac{0,0133}{0,00196} = 6,78 \text{ m/s.}$$

Kako je koeficijent kinematske viskoznosti vazduha na 20 °C i na pritisku od 7,85 bar,

$$\nu_1 = \frac{\mu}{\rho_1} = \frac{18,15 \cdot 10^{-6}}{9,35} = 1,95 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

to je Re broj na početku cevovoda

$$Re_1 = \frac{v_1 D}{\nu_1} = \frac{6,78 \cdot 0,050}{1,95 \cdot 10^{-6}} = 180\,000.$$

Ovoj vrednosti Re broja i relativnoj hrapavosti $\delta/D = 0,002$ odgovara $\lambda = 0,0246$ iz dijagrama 1. Sad se može izračunati vrednost člana

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = 0,0246 \frac{800}{0,050} \frac{9,35}{2} \cdot 46 = 84\,644,$$

i, zatim, pritisak na kraju cevovoda

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - 2p_1 \cdot 86464} = \sqrt{48,3 \cdot 10^{10}} = 6,95 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Dakle, pad pritiska u cevovodu je $\Delta p = 0,9$ bar.

38. Za pogon jednog pneumatskog uređaja potrebno je 30 m³ vazduha na minut, pritiska 7,85 bar. Vazduh se dovodi iz kompresorske stanice kroz cevovod dužine $l = 1500$ m i prečnika $D = 100$ mm. Apsolutna hrapavost cevi je $\delta = 0,1$ mm, temperatura vazduha $t = 20$ °C i atmosferski pritisak $p_a = 1$ bar. Izračunati pritisak vazduha na početku cevovoda i snagu kompresora pretpostavljajući da je njegov izentropski koeficijent korisnosti 0,73. Superstišljivost vazduha i lokalne otpore zanemariti.

Rešenje:

Kad se prethodno izračunaju ove veličine na kraju cevovoda,

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{785\,000}{286,8 \cdot 293} = 9,35 \text{ kg/m}^3,$$

$$G = \rho_0 q_0 = 1,225 \frac{30}{60} = 0,6 \text{ kg/s},$$

$$v_2 = \frac{G}{\rho_2 A} = \frac{0,6}{9,35 \cdot 0,00785} = 8,3 \text{ m/s},$$

$$\nu_2 = \frac{\mu}{\rho_2} = \frac{18,15 \cdot 10^{-6}}{9,35} = 1,95 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_2 = \frac{v_2 D}{\nu_2} = \frac{8,3 \cdot 0,100}{1,95 \cdot 10^{-6}} = 430\,000,$$

$$\frac{\delta}{D} = \frac{0,1}{100} = 0,001, \lambda = 0,02 \text{ iz dijagrama 1, } 2,56 \cdot 10^{-2}$$

može se naći vrednost člana

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = 0,02 \frac{1500}{0,100} \frac{9,35}{2} 69 = 96\,772,$$

odnosno, pritisak na početku cevovoda

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 96772} = \sqrt{(61,6 + 15,2) 10^{10}} = 8,76 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 8,76 \text{ bar.}$$

U ovom slučaju je

$$Y = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1 \right] = \frac{1,4}{1,4 - 1} 286,8 \cdot 293 \left[\left(\frac{8,76}{1} \right)^{0,286} - 1 \right] = 252990,$$

pa je snaga kompresora

$$P = \frac{G Y}{1000 \eta} = \frac{0,6 \cdot 252990}{1000 \cdot 0,73} = 208 \text{ kW.}$$

39. Izračunati prečnik D (mm) cevovoda dužine $l = 1000$ m, kroz koji struji $2,22 \text{ m}^3/\text{s}$ vazduha stalne temperature $t = 20$ °C. Na početku cevovoda kompresor ostvaruje pritisak $p_1 = 10,8$ bar, dok se na njegovom kraju nalazi pneumatska mašina koja radi na pritisku od $7,85$ bar. Uzeti da je koeficijent trenja $\lambda = 0,014$, lokalne otpore i superstišljivost vazduha zanemariti.

Rešenje:

Zamenom ovih veličina,

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R T_0} = \frac{101\,325}{286,8 \cdot 288} = 1,225 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{1\,080\,000}{286,8 \cdot 293} = 12,8 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_1 = \frac{\rho_0 q_0}{\rho_1} = \frac{1,225 \cdot 2,22}{12,8} = 0,212 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_1 = \frac{q_1}{A} = \frac{0,212 \cdot 4}{D^2 \pi} = \frac{0,268}{D^2},$$

u izraz

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2,$$

dobija se jednačina $D^5 = 2,88 \cdot 10^{-5}$ čije je rešenje $D = 0,125 \text{ m} = 125 \text{ mm}$.

40. Strujna mašina koja daje vazduh pod pritiskom za pneumatski transport odvojena je od bunkera horizontalnim cevovodom dužine $l = 250 \text{ m}$ i prečnika $D = 100 \text{ mm}$. Treba odrediti pritisak koji mora da ostvari strujna mašina na početku cevovoda ako na njegovom kraju, zbog prirode transporta, pritisak treba da iznosi $p_2 = 1,47 \text{ bar}$. Temperatura vazduha je stalna i iznosi 50°C , kapacitet transporta je $q_0 = 20 \text{ m}^3/\text{min}$ vazduha i koeficijent trenja $\lambda = 0,02$. Superstičijivost vazduha zanemariti, a lokalne otpore uzeti u obzir zbirnim koeficijentom ovih otpora $\Sigma \zeta = 10$.

20

Rešenje:

Kad se prethodno izračunaju

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{147\,000}{286,8 \cdot 293} = 1,75 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_2 = \frac{\rho_0 q_0}{\rho_2} = \frac{1,225 \cdot 20}{1,75 \cdot 60} = 0,233 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_2 = \frac{q_2}{A} = \frac{0,233}{0,00785} = 29,7 \text{ m/s},$$

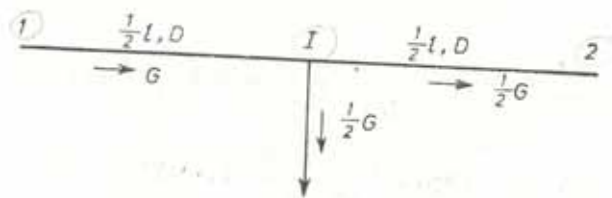
nalazi se iz jednačine

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2\rho_2} = \left(\lambda \frac{l}{D} + \Sigma \zeta \right) \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = \left(0,02 \frac{250}{0,100} + 10 \right) \frac{1,75}{2} 883,5 = 46386,$$

vrednost pritiska p_1 na početku cevovoda:

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2\rho_2 \cdot 46386} = \sqrt{(2,16 + 1,36) 10^{10}} = 1,88 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 1,88 \text{ bar}.$$

41. U horizontalni cevovod prečnika $D = 50 \text{ mm}$ ulazi $G = 410 \text{ kg/h}$ vazduha pritiska $p_1 = 4,9 \text{ bar}$. Na polovini dužine cevovoda oduzima se polovina vazduha tako da se na kraju cevovoda ostvaruje pritisak $p_2 = 3,9 \text{ bar}$. Izračunati dužinu cevovoda, ako je njegova hrapavost $\delta = 0,1 \text{ mm}$, temperatura vazduha $t = 20^\circ\text{C}$, i lokalni otpori se zanemaruju.



Rešenje:

Kad se izračunaju veličine na početku cevovoda,

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_2} = \frac{490\,000}{286,8 \cdot 293} = 5,85 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_1 = \frac{G}{\rho_1 A} = \frac{0,1138}{5,85 \cdot 0,00196} = 10 \text{ m/s},$$

$$\nu_1 = \frac{\mu}{\rho_1} = \frac{18,15 \cdot 10^{-6}}{5,85} = 3,10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_1 = \frac{v_1 D}{\nu_1} = \frac{10 \cdot 0,050}{3,10 \cdot 10^{-6}} = 160\,000,$$

$$\frac{\delta}{D} = \frac{0,1}{50} = 0,002, \quad \lambda_1 = 0,025,$$

može se naći vrednost izraza

$$\begin{aligned} p_1^2 - p_2^2 &= 2p_1 \lambda_1 \frac{l}{2D} \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = p_1 \lambda_1 \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = \\ &= 4,9 \cdot 10^5 \cdot 0,025 \frac{l}{0,050} \frac{5,85}{2} 100 = 716,6 \cdot 10^5 l. \end{aligned}$$

Na isti način određuju se veličine na kraju cevovoda:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{390\,000}{286,8 \cdot 293} = 4,65 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G}{2 \rho_2 A} = \frac{0,1138}{2 \cdot 4,65 \cdot 0,00196} = 6,25 \text{ m/s},$$

$$\nu_2 = \frac{\mu}{\rho_2} = \frac{18,15 \cdot 10^{-6}}{4,65} = 3,98 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_2 = \frac{v_2 D}{\nu_2} = \frac{6,25 \cdot 0,050}{3,98 \cdot 10^{-6}} = 78\,500,$$

$$\frac{\delta}{D} = \frac{0,1}{50} = 0,002, \quad \lambda_2 = 0,026,$$

pa je

$$\begin{aligned} p_1^2 - p_2^2 &= 2p_2 \lambda_2 \frac{l}{2D} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = p_2 \lambda_2 \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = \\ &= 3,9 \cdot 10^5 \cdot 0,026 \frac{l}{0,050} \frac{4,65}{2} 39 = 183,9 \cdot 10^5 l. \end{aligned}$$

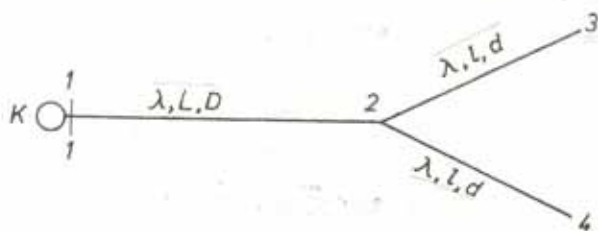
Sabiranjem dobijena dva izraza nalazi se

$$p_1^2 - p_2^2 = (716,6 + 183,9) 10^5 l = 900 \cdot 10^5 l,$$

odakle je

$$l = \frac{p_1^2 - p_2^2}{900 \cdot 10^5} = \frac{(24 - 15,2) 10^{10}}{900 \cdot 10^5} = 978 \text{ m.}$$

42. Horizontalnim cevovodom prikazanim na skici kompresor K snabdeva pneumatske mašine M_3 i M_4 komprimovanim vazduhom. Mašina M_3 troši $300 \text{ m}_n^3/\text{h}$ vazduha pritiska 2 bar , a Mašina M_4 za svoj ispravan rad zahteva pritisak vazduha $1,5 \text{ bar}$ i količinu koju treba odrediti za slučaj da su: $L = 100 \text{ m}$, $D = 100 \text{ mm}$, $l = 50 \text{ m}$, $d = 50 \text{ mm}$, $\lambda = 0,02$ i $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Izračunati pritisak p_1 na početku cevovoda. Stišljivost vazduha po deonicama i lokalne otpore zanemariti.



Rešenje:

Kad se najpre izračunaju

$$\rho_3 = \frac{p_3}{R T_3} = \frac{200\,000}{286,8 \cdot 293} = 2,38 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_4 = \frac{p_4}{R T_4} = \frac{150\,000}{286,8 \cdot 293} = 1,78 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_3 = \frac{p_0 q_{03}}{\rho_3} = \frac{1,225 \cdot 300}{2,38 \cdot 3600} = 0,0429 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_3 = \frac{q_3}{A_{23}} = \frac{0,0429}{0,00196} = 21,9 \text{ m/s},$$

tada se iz jednačine

$$p_3 + \lambda \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho_3 v_3^2 = p_4 + \lambda \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho_4 v_4^2$$

posle zamene izračunatih i datih veličina nalazi brzina $v_4 = 58,7 \text{ m/s}$. Potrošnja vazduha mašine M_4 tada iznosi

$$q_{04} = \frac{\rho_4 q_4}{\rho_0} = \frac{\rho_4 v_4 A_{24}}{\rho_0} = \frac{1,78 \cdot 58,7 \cdot 0,00196}{1,225} = 0,167 \text{ m}_n^3/\text{s}.$$

Kako je dalje:

$$p_2 = p_3 + \lambda \frac{L}{d} \frac{1}{2} \rho_3 v_3^2 = 2 \cdot 10^5 + 0,02 \frac{50}{0,050} \frac{2,38}{2} 479,6 = 2,11 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2,$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{211\,000}{286,8 \cdot 293} = 2,52 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_{02} = q_{03} + q_{04} = 300 + 0,167 \cdot 3600 = 902 \text{ m}^3/\text{h},$$

$$q_2 = \frac{\rho_0 q_{02}}{\rho_2} = \frac{1,225 \cdot 902}{2,52 \cdot 3600} = 0,124 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_2 = \frac{q_2}{A_{12}} = \frac{0,124}{0,00785} = 15,8 \text{ m/s},$$

to je pritisak na početku cevovoda

$$\begin{aligned} p_1 &= p_2 + \lambda \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = \\ &= 2,11 \cdot 10^5 + 0,02 \frac{100}{0,100} \frac{2,52}{2} 249,6 = \\ &= 2,18 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 2,18 \text{ bar}. \end{aligned}$$

43. Kroz horizontalni magistralni gasovod prečnika $D = 273 \text{ mm}$, dužine $l = 18 \text{ km}$ i relativne hrapavosti $\delta/D = 0,001$ transportuje se $q_0 = 50\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ zemnog gasa — metana ($\mu = 11 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$, $R = 518 \text{ J/kgK}$) pri konstantnoj temperaturi $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Koliki je pritisak p_2 gasa na kraju cevovoda, ako je pritisak na početku cevovoda $p_1 = 45 \text{ bar}$? Pokazati da se u ovom slučaju superstišljivost mogla zanemariti.

Rešenje:

Čim se izračunaju

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R T_0} = \frac{101\,325}{518 \cdot 288} = 0,679 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{4\,500\,000}{518 \cdot 293} = 29,6 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_1 = \frac{\rho_0 q_0}{\rho_1} = \frac{0,679 \cdot 50\,000}{29,6 \cdot 3600} = 0,318 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_1 = \frac{q_1}{A} = \frac{0,318}{0,0586} = 5,44 \text{ m/s},$$

$$Re_1 = \frac{v_1 D \rho_1}{\mu} = \frac{5,44 \cdot 0,273 \cdot 29,6}{11 \cdot 10^{-6}} = 3\,990\,000,$$

može se naći koeficijent trenja $\lambda = 0,0195$ iz dijagrama 1, pa, zatim, vrednost člana

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = 0,0195 \frac{18\,000}{0,273} \frac{29,6}{2} = 563\,000,$$

odakle se nalazi pritisak na kraju cevovoda

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - 2p_1 \cdot 563\,000} = \sqrt{(2025 - 507) 10^{10}} = 39 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Kritični pritisak i temperatura metana su $p_c = 46$ bar i $T_c = 190,5$ K. Mogu se sad prema obrascu Berthelot-a, na primer, izračunati faktori superstišljivosti:

$$Z_1 = 1 + \frac{9}{128} \frac{p_1}{p_c} \frac{T_c}{T_1} \left(1 - 6 \frac{T_c^2}{T_1^2} \right) =$$

$$= 1 - \frac{9}{128} 0,918 \cdot 0,65 \cdot 0,47 = 0,980,$$

$$Z_2 = 1 + \frac{9}{128} \frac{p_2}{p_c} \frac{T_c}{T_2} \left(1 - 6 \frac{T_c^2}{T_2^2} \right) =$$

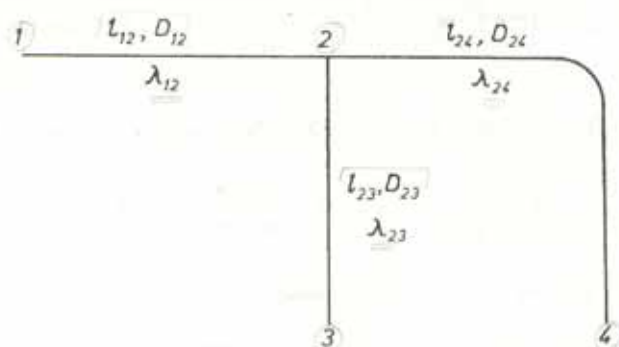
$$= 1 - \frac{9}{128} 0,848 \cdot 0,65 \cdot 0,47 = 0,982,$$

$$Z_m = \frac{1}{2} (Z_1 + Z_2) = 0,981.$$

Pošto je $(Z_m/Z_1) = 1,001$ to se superstišljivost mogla zanemariti.

44. Horizontalnim cevovodom u jednoj hali snabdevaju se dva mesta komprimovanim vazduhom. Prema oznakama na skici poznati su sledeći podaci: $l_{12} = 200$ m, $D_{12} = 100$ mm, $l_{23} = 20$ m, $D_{23} = 50$ mm, $l_{24} = 80$ m, $\lambda_{12} = \lambda_{23} = \lambda_{24} = 0,02$, $t = 20$ °C, $p_3 = 2$ bar, $q_{03} = 250$ m³/h. Zanemarujući lokalne otpore i uzimajući u obzir stišljivost vazduha pri strujanju, odrediti prečnik D_{24} tako da mesto 4 dobija $q_{04} = 220$ m³/h vazduha pritiska $p_4 = 1,5$ bar. Zatim izračunati pritisak p_1 vazduha na početku cevovoda.

D₂₄ = ? p₁ = ?



Rešenje:

U ovom zadatku redosled izračunavanja pomoćnih veličina je sledeći:

$$\rho_3 = \frac{p_3}{R T_3} = \frac{200\,000}{286,8 \cdot 293} = 2,38 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_4 = \frac{p_4}{R T_4} = \frac{150\,000}{286,8 \cdot 293} = 1,78 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_3 = \frac{\rho_0 q_{03}}{\rho_3} = \frac{1,225 \cdot 250}{2,38 \cdot 3600} = 0,0357 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_3 = \frac{q_3}{A_{23}} = \frac{0,0357}{0,00196} = 18,2 \text{ m/s},$$

$$\begin{aligned} p_2^2 &= p_3^2 + 2p_3 \lambda_{23} \frac{l_{23}}{D_{23}} \frac{1}{2} \rho_3 v_3^2 = \\ &= 4 \cdot 10^{10} + 2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,02 \frac{20}{0,050} \frac{2,38}{2} 332 = 4,13 \cdot 10^{10}. \end{aligned}$$

Sada se iz jednačine

$$p_4^2 + 2p_4 \lambda_{24} \frac{l_{24}}{D_{24}} \frac{1}{2} \rho_4 v_4^2 = 4,13 \cdot 10^{10},$$

nalazi vrednost količnika

$$\frac{v_4^2}{D_{24}} = \frac{2(4,13 \cdot 10^{10} - p_4^2)}{2p_4 \lambda_{24} l_{24} \rho_4} = \frac{2 \cdot 1,88 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^5 \cdot 0,02 \cdot 80 \cdot 1,78} = 0,44 \cdot 10^5.$$

Dalje, iz izraza za protok

$$q_4 = \frac{\rho_0 q_{04}}{\rho_4} = \frac{1,225 \cdot 220}{1,78 \cdot 3600} = 0,042 \text{ m}^3/\text{s},$$

sledeće vrednost

$$v_4 = \frac{4q_4}{D_{24}^2} = \frac{4 \cdot 0,042}{D_{24}^2 \cdot 3,14} = \frac{0,0535}{D_{24}^2},$$

pa je

$$0,44 \cdot 10^9 \cdot D_{24}^5 = 0,00287$$

odnosno, $D_{24} = 36,5$ mm. Pošto je $p_2 = \sqrt{4,13} = 2,03$ bar, to su:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{203\,000}{286,8 \cdot 293} = 2,42 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_2 = \frac{\rho_0 (q_{02} + q_{04})}{\rho_2} = \frac{1,225 \cdot 470}{2,42 \cdot 3600} = 0,066 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_2 = \frac{q_2}{A_{12}} = \frac{0,066}{0,00785} = 8,42 \text{ m/s},$$

i najzad pritisak na početku cevovoda

$$p_1^2 = p_2^2 + 2\rho_2 \lambda_{12} \frac{l_{12}}{D_{12}} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 =$$

$$= 4,13 \cdot 10^{10} + 4,06 \cdot 10^5 \cdot 0,02 \frac{200}{0,100} \frac{2,42}{2} 71 = 4,27 \cdot 10^{10},$$

odnosno $p_1 = 2,07 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 2,07$ bar.

45. Horizontalnim cevovodom prečnika $D = 100$ mm i dužine $l = 750$ m transportuje se $2400 \text{ m}^3/\text{h}$ vazduha pritiska 2,5 bar i temperature 20°C radi pneumatskog transporta granula polivinilhlorida od vagon-cisterna do skladišta u jednoj fabrici. Zbog vrlo nepovoljne trase cevovoda, koji se pruža od kompresorske stanice u krugu fabrike do mesta za istovar vagon-cisterna na industrijskom kolesku, lokalni otpori su znatni i određeni zbirom $\Sigma \zeta = 20$. Koliki mora da bude pritisak vazduha na početku cevovoda, čija se relativna hrupavost može uzeti kao $\delta/D = 0,002$, i koliki je pad pritiska za vreme strujanja vazduha?

Rešenje:

Radi određivanja koeficijenta trenja vazduha pri strujanju, potrebno je predhodno izračunati sledeće veličine:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{250\,000}{286,8 \cdot 293} = 2,97 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_2 = \frac{G}{\rho_2} = \frac{\rho_0 q_0}{\rho_2} = \frac{1,225 \cdot 2400}{2,97 \cdot 3600} = 0,275 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_2 = \frac{q_2}{A} = \frac{0,275}{0,00785} = 35 \text{ m/s,}$$

$$\mu = 18,15 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2 \text{ (iz tabele 3),}$$

$$Re_2 = \frac{v_2 D \rho_2}{\mu} = \frac{35 \cdot 0,100 \cdot 2,97}{18,15 \cdot 10^{-6}} = 573 \text{ 000.}$$

Ovoj vrednosti Re broja i relativnoj hrapavosti 0,002 odgovara $\lambda = 0,024$ iz dijagrama 1. Prema tome, iz jednačine

$$\begin{aligned} \frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} &= \left(\lambda \frac{l}{D} + \Sigma \zeta \right) \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = \\ &= \left(0,024 \frac{750}{0,100} + 20 \right) \frac{2,97}{2} 1225 = 363 \text{ 825,} \end{aligned}$$

nalazi se pritisak vazduha na početku cevovoda:

$$\begin{aligned} p_1 &= \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 3,64 \cdot 10^5} = \sqrt{(6,25 + 18,2) 10^{10}} = \\ &= 4,94 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 4,94 \text{ bar.} \end{aligned}$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 4,94 - 4,05 = 0,89$$

46. Iz kompresorske stanice na površini zemlje treba da se transportuje $G = 822 \text{ kg/h}$ komprimovanog vazduha u šaht jednog rudnika na dubinu $H = 600 \text{ m}$. Prečnik cevovoda je $D = 50 \text{ mm}$, dužina $l = H = 600 \text{ m}$ i relativna hrapavost 0,002. Temperatura vazduha je stalna i iznosi $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Lokalni otpori u cevovodu određeni su zbirom $\Sigma \zeta = 12$. Izračunati pritisak vazduha na početku cevovoda ako na njegovom kraju mora da bude $p_2 = 4 \text{ bar}$.

Rešenje:

Stanje vazduha na kraju cevovoda odredno je veličinama:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{400 \text{ 000}}{286,8 \cdot 293} = 4,76 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G}{\rho_2 A} = \frac{822}{4,76 \cdot 0,00196 \cdot 3600} = 24,5 \text{ m/s,}$$

$$Re_2 = \frac{v_2 D \rho_2}{\mu} = \frac{24,5 \cdot 0,050 \cdot 4,76}{18,15 \cdot 10^{-6}} = 320 \text{ 000.}$$

Ovoj vrednosti Re broja i relativnoj hrapavosti 0,002 odgovara koeficijent trenja $\lambda = 0,024$ iz dijagrama 1. Sada se iz jednačine

$$\begin{aligned} \frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} &= \left[\left(\lambda \frac{l}{D} + \Sigma \zeta \right) \frac{v_2^2}{2g} - H \right] \rho_2 g = \\ &= \left[\left(0,024 \frac{600}{0,050} + 12 \right) \frac{599}{19,62} - 600 \right] \cdot 4,76 \cdot 9,81 = 16 \text{ 264,} \end{aligned}$$

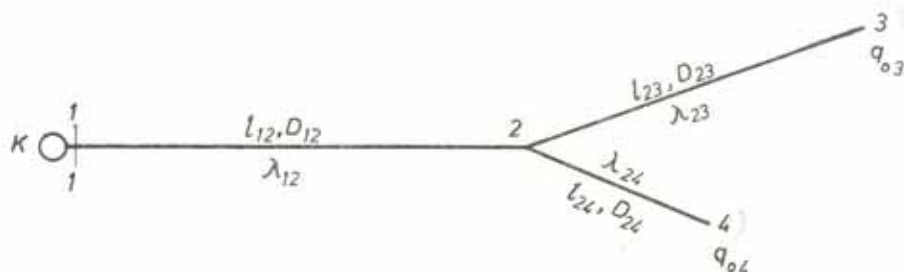
dobija potreban pritisak vazduha na početku cevovoda

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 16264} = \sqrt{(16 + 2 \cdot 4 \cdot 0,16264) 10^{10}} = \\ = \sqrt{17,3 \cdot 10^{10}} = 4,16 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 4,16 \text{ bar.}$$

47. Od kompresora K razvodi se sabijeni vazduh do mesta 3 i 4 kao što je prikazano na skici. Cevovod je pravolinijski i horizontalan a lokalni otpori mogu da se zanemare. Pritisci u preseccima 3 i 4 jednaki su, a strujanje vazduha u celoj mreži je izotermno pri temperaturi $t = 20^\circ\text{C}$. Treba izračunati:

a) prečnik D_{24} deonice 2—4 ako su: $D_{23} = 100 \text{ mm}$, $l_{23} = 800 \text{ m}$, $l_{24} = 600 \text{ m}$, $\lambda_{23} = \lambda_{24}$, $q_{03} = 0,22 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_{04} = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}$,

b) pad pritiska Δp koji kompresor mora da ostvari za vreme rada, za slučaj da su: $\lambda_{12} = \lambda_{23} = 0,02$, $D_{12} = 125 \text{ mm}$, $l_{12} = 400 \text{ m}$, $p_3 = p_4 = 2 \text{ bar}$.



Rešenje:

a) Jednačine koje odgovaraju deonicama 2—3 i 2—4,

$$\frac{p_2^2 - p_3^2}{2\rho_3} = \lambda_{23} \frac{l_{23}}{D_{23}} \frac{1}{2} \rho_3 v_3^2, \quad \frac{p_2^2 - p_4^2}{2\rho_4} = \lambda_{24} \frac{l_{24}}{D_{24}} \frac{1}{2} \rho_4 v_4^2,$$

zbog $p_3 = p_4$, $\rho_3 = \rho_4$ i $\lambda_{23} = \lambda_{24}$, svode se na izraz

$$\frac{l_{23}}{D_{23}} v_3^2 = \frac{l_{24}}{D_{24}} v_4^2$$

odakle je

$$D_{24}^5 = D_{23}^5 \frac{l_{24}}{l_{23}} \left(\frac{q_{04}}{q_{03}} \right)^2,$$

jer je

$$v_3 = \frac{4\rho_0 q_{03}}{\rho_3 D_{23}^2 \pi}, \quad v_4 = \frac{4\rho_0 q_{04}}{\rho_4 D_{24}^2 \pi},$$

Zamenom poznatih vrednosti u jednačinu za D_{24} dobija se

$$D_{24} = 100 \sqrt[5]{\frac{600 (0,275)^2}{800 (0,220)}} = 103,5 \text{ mm.}$$

b) Najpre se mora izračunati pritisak p_2 na mestu grananja cevovoda. Njegovo određivanje ide ovim redom:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R \cdot T_0} = \frac{101\,325}{286,8 \cdot 288} = \underline{\underline{1,225 \text{ kg/m}^3}},$$

$$\rho_3 = \frac{p_3}{R \cdot T_3} = \frac{200\,000}{286,8 \cdot 293} = 2,38 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_3 = \frac{\rho_0 \cdot q_{03}}{\rho_3} = \frac{1,225 \cdot 0,220}{2,38} = 0,113 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_3 = \frac{q_3}{A_{23}} = \frac{0,113}{0,00785} = 14,4 \text{ m/s},$$

$$\frac{p_2^2 - p_3^2}{2p_3} = \lambda_{23} \frac{l_{23}}{D_{23}} \frac{1}{2} \rho_3 v_3^2 = 0,02 \frac{800}{0,100} \frac{2,38}{2} 208 = 39\,618,$$

$$p_2 = \sqrt{p_3^2 + 2p_3 \cdot 39\,618} = \sqrt{5,58 \cdot 10^{10}} = 2,36 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2,$$

Kako je dalje

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R \cdot T_2} = \frac{236\,000}{286,8 \cdot 293} = 2,81 \text{ kg/m}^3,$$

$$q_4 = \frac{\rho_0 \cdot q_{04}}{\rho_4} = \frac{1,225 \cdot 0,275}{2,38} = 0,141 \text{ m}^3/\text{s}$$

(jer je $\rho_3 = \rho_4$ zbog $p_3 = p_4$ i jednake temperature),

$$G_{12} = G_{23} + G_{24} = \rho_3 q_3 + \rho_4 q_4 =$$

$$= (0,115 + 0,144) 2,38 = 0,616 \text{ kg/s},$$

$$q_2 = \frac{G_{12}}{\rho_2} = \frac{0,616}{2,81} = 0,219 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_2 = \frac{q_2}{A_{12}} = \frac{0,219}{0,0123} = 17,8 \text{ m/s},$$

to je

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} = \lambda_{12} \frac{l_{12}}{D_{12}} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = 0,02 \frac{400}{0,125} \frac{2,81}{2} 318 = 28\,600,$$

odnosno

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 28600} = \sqrt{6,93 \cdot 10^{10}} = 2,63 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Dakle, pad pritiska u mreži iznosi:

$$\begin{aligned} \Delta p &= (p_1 - p_2) + (p_2 - p_3) = (p_1 - p_2) + (p_2 - p_4) = \\ &= (p_1 - p_3) = (p_1 - p_4) = 2,63 - 2 = 0,63 \text{ bar.} \end{aligned}$$

$\uparrow = 100000$

48. Na jednom gradilištu raspolaže se dovoljnom količinom vazduha pritiska 10 bar. Pneumatski uređaj za vreme rada zahteva $G = 0,6 \text{ kg/s}$ vazduha pritiska 8 bar. Od rezervoara za vazduh do ovog uređaja rastojanje u pravoj liniji iznosi $l = 1500 \text{ m}$. Temperatura vazduha je stalna i jednaka $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ako se još uzme prečnik cevi $D = 100 \text{ mm}$, apsolutne hrapavosti $0,1 \text{ mm}$, postavlja se pitanje da li će ovi podaci obezbediti ispravan rad pneumatskog uređaja koji se nalazi na kraju cevovoda? Ako neće, obaviti proračun tako da se obezbedi njegov ispravan rad.

Rešenje:

Stanje vazduha na kraju cevovoda, tj. na ulazu u pneumatski uređaj, određeno je veličinama:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{800\,000}{286,8 \cdot 293} = 9,52 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G}{\rho_2 A} = \frac{0,6}{9,52 \cdot 0,00785} = 8,03 \text{ m/s},$$

$$\nu_2 = \frac{\mu}{\rho_2} = \frac{18,15 \cdot 10^{-6}}{9,52} = 1,90 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_2 = \frac{v_2 D}{\nu_2} = \frac{8,03 \cdot 0,100}{1,90 \cdot 10^{-6}} = 422\,000.$$

Ovoj vrednosti Re broja i relativnoj hrapavosti $\delta/D = 0,1/100 = 0,001$ odgovara koeficijent trenja $\lambda = 0,02$ iz dijagrama 1. Prema tome, iz jednačine

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = 0,02 \frac{1500}{0,100} \frac{9,52}{2} 64,5 = 92\,080,$$

sledeće potreban pritisak na početku cevovoda

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 92080} = \sqrt{(64 + 14,7) 10^{10}} = 8,87 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Kako je ovaj pritisak manji od 10 bar tj. manji od raspoloživog pritiska, zaključuje se da pneumatski uređaj na kraju cevovoda neće ispravno raditi ako se prethodno ne obavi reduciranje pritiska sa 10 bar na 8,87 bar. To reduciranje može da se obavi

na razne načine. Ako je cevovod već izveden, onda je najlakše ugraditi prigušnicu i njen otpor tako odrediti da se tom prilikom obavi naznačeno smanjivanje pritiska. Ako se usvoji ovaj način, onda se iz jednačine

$$\lambda \frac{l}{D} + \zeta = \frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} \frac{2}{\rho_2 v_2^2} = \frac{(100 - 64) 10^{10}}{2 \cdot 8 \cdot 10^5} \cdot \frac{2}{9,52 \cdot 64,5} = 730,$$

nalazi koeficijent otpora

$$\zeta = 730 - \lambda \frac{l}{D} = 730 - 0,02 \frac{1500}{0,100} = 430,$$

koji se podešavanjem prigušnice mora ostvariti.

49. Kroz horizontalni cevovod prečnika $D = 100$ mm i dužine $l = 50$ m dovodi se iz kompresorske stanice $G = 600$ kg/h vazduha specifične vlažnosti $\omega = 0,011$, radi pneumatskog transporta cementa. Uzimajući u obzir vlažnost vazduha, izračunati pad pritiska Δp (mm VS) ako su: zbir koeficijenata lokalnih otpora $\Sigma \zeta = 10$, koeficijent trenja $\lambda = 0,02$, gasna konstanta suvog vazduha $R_{sv} = 286,8$ J/kgK, specifična konstanta vodene pare $R_{vp} = 461$ J/kgK, temperatura i pritisak vlažnog vazduha $t = 20$ °C i $p = 1$ bar. Strujanje vazduha je izotermno i nestišljivo.

Rešenje:

Parcijalni pritisci vodene pare i suvog vazduha u vlažnom vazduhu iznose

$$p_{vp} = \frac{p \omega}{\omega + 1} = \frac{100\,000}{0,011 + 1} = 1738 \text{ N/m}^2,$$

$$p_{sv} = p - p_{vp} = 100\,000 - 1738 = 98\,262 \text{ N/m}^2,$$

pa su odgovarajuće gustine

$$\rho_{vp} = \frac{p_{vp}}{R_{vp} T} = \frac{1738}{461 \cdot 293} = 0,013 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_{sv} = \frac{p_{sv}}{R_{sv} T} = \frac{98\,262}{286,8 \cdot 293} = 1,17 \text{ kg/m}^3.$$

Sada se može naći gustina i brzina vlažnog vazduha

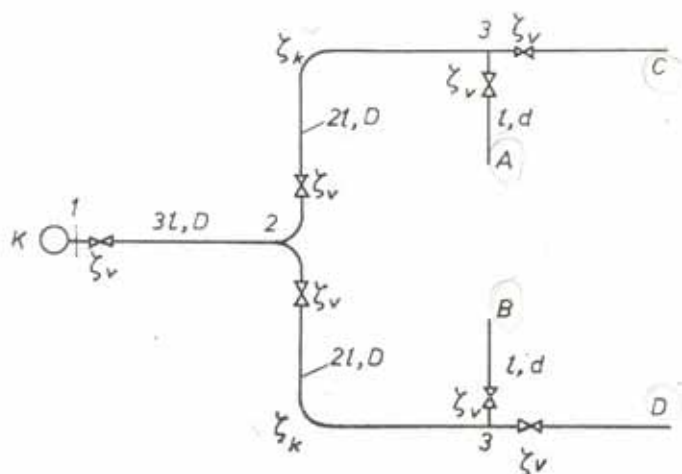
$$\rho = \rho_{vp} + \rho_{sv} = 0,013 + 1,17 = 1,18 \text{ kg/m}^3,$$

$$v = \frac{G}{\rho A} = \frac{0,167}{1,18 \cdot 0,00785} = 18 \text{ m/s},$$

i posle toga pad pritiska

$$\begin{aligned} \Delta p &= \left(\lambda \frac{l}{D} + \Sigma \zeta \right) \frac{1}{2} \rho v^2 = \left(0,02 \frac{50}{0,100} + 10 \right) \frac{1,18}{2} 324 = \\ &= 3823 \text{ N/m}^2 = 390 \text{ mm VS}. \end{aligned}$$

50. Na skici je prikazan horizontalni cevovod za snabdevanje pneumatskih uređaja A , B , C , D sabijenim vazduha. Prema oznakama na skici poznate su sledeće veličine: $p_C = p_D = 2,5$ bar, $q_{0C} = q_{0D} = 1350$ m³/h, $l = 25$ m, $\zeta_k = 0,25$, $\zeta_v = 4$, $D = 100$ mm, $d = 50$ mm, $t = 20$ °C, $q_{0A} = q_{0B} = 800$ m³/h, $\lambda = 0,02$ za sve cevi. Izračunati pritisak p_1 vazduha na početku mreže i pritiske p_A i p_B na mestima gde se nalaze uređaji A i B . Lokalne otpore, osim u krivinama i ventilima zanemariti.



Rešenje:

Zbog jednakosti pritiska i protoka na mestima C i D i simetričnosti mreže dovoljno je, do čvora 2, posmatrati ili gornju ili donju granu. Na primer, za deonicu 3- C biće:

$$\rho_C = \frac{p_C}{RT_C} = \frac{250\,000}{286,8 \cdot 293} = 2,97 \text{ kg/m}^3, \quad \checkmark$$

$$G_{3C} = \rho_0 q_{0C} = \frac{1,225 \cdot 1350}{3600} = 0,458 \text{ kg/s}, \quad \checkmark$$

$$v_{3C} = \frac{G_{3C}}{\rho_C A} = \frac{0,458}{2,97 \cdot 0,00785} = 19,6 \text{ m/s}, \quad \checkmark$$

(v_{3C} je brzina vazduha na kraju te deonice; drugi indeks to pokazuje)

$$\begin{aligned} \frac{p_3^2 - p_C^2}{2p_C} &= \left(\lambda \frac{l}{D} + \zeta_v \right) \frac{1}{2} \rho_C v_{3C}^2 = \\ &= \left(0,02 \frac{25}{0,100} + 4 \right) \frac{2,97}{2} \cdot 386 = 5158, \end{aligned}$$

$$p_3 = \sqrt{p_C^2 + 2p_C \cdot 5158} = \sqrt{6,25 \cdot 10^{10} + 2,5 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 5158} = \\ = \sqrt{6,5 \cdot 10^{10}} = 2,55 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 2,55 \text{ bar},$$

$$\rho_3 = \frac{p_3}{R T_3} = \frac{255\,000}{286,8 \cdot 293} = 3,03 \text{ kg/m}^3.$$

Za deonicu 2—3 je:

$$G_{23} = \rho_0 (q_{0A} + q_{0C}) = 1,225 \frac{2150}{3600} = 0,73 \text{ kg/s},$$

$$v_{23} = \frac{G_{23}}{\rho_3 A} = \frac{0,73}{3,03 \cdot 0,00785} = 30,7 \text{ m/s},$$

(v_{23} je brzina vazduha na kraju deonice 2—3; drugi indeks to pokazuje)

$$\frac{p_2^2 - p_3^2}{2p_3} = \left(\lambda \frac{2l}{D} + \zeta v \right) \frac{1}{2} \rho_3 v_{23}^2 = \\ = \left(0,02 \frac{50}{0,100} + 4 \right) \frac{3,03}{2} 942 = 19980,$$

$$p_2 = \sqrt{p_3^2 + 2p_3 \cdot 19980} = \sqrt{6,5 \cdot 10^{10} + 2 \cdot 2,55 \cdot 10^5 \cdot 19980} = \\ = \sqrt{7,52 \cdot 10^{10}} = 2,74 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 2,74 \text{ bar},$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{274000}{286,8 \cdot 293} = 3,26 \text{ kg/m}^3.$$

Najzad, deonici 1—2 odgovaraju:

$$G_{12} = 2\rho_0 (q_{0A} + q_{0C}) = 2\rho_0 (q_{0A} + q_{0D}) = \\ = 2 \cdot 0,73 = 1,46 \text{ kg/s} = 5256 \text{ kg/h},$$

$$v_{12} = \frac{G_{12}}{\rho_2 A} = \frac{1,46}{3,26 \cdot 0,00785} = 57 \text{ m/s},$$

(v_{12} je brzina na kraju deonice 1—2; to pokazuje drugi indeks)

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} = \left(\lambda \frac{3l}{D} + \zeta v \right) \frac{1}{2} \rho_2 v_{12}^2 = \\ = \left(0,02 \frac{75}{0,100} + 4 \right) \frac{3,26}{2} 3255 = 100800,$$

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 100800} = \sqrt{7,5 \cdot 10^{10} + 2 \cdot 2,74 \cdot 10^5 \cdot 100800} = \\ = \sqrt{13,02 \cdot 10^{10}} = 3,61 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 3,61 \text{ bar}.$$

Zbog istovetnosti deonica 3-A i 3-B i strujnih veličina u njima, je $p_A = p_B$. Zato će, na primer, za deonicu 3-A biti:

$$\begin{aligned} \frac{p_3^2 - p_A^2}{2p_3} &= \left(\lambda \frac{l}{D} + \zeta_v \right) \frac{1}{2} \rho_3 v_{A3}^2 = \\ &= \left(0,02 \frac{25}{0,050} + 4 \right) \frac{3,03}{2} 2098 = 44499, \\ p_A &= \sqrt{p_3^2 - 2p_3 \cdot 44499} = \sqrt{(6,50 - 2,27) 10^{10}} = \\ &= \sqrt{4,23 \cdot 10^{10}} = 2,06 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 2,06 \text{ bar} = p_B \end{aligned}$$

51. U jednoj ciglani radi sušenja opeke toplim vazduhom proizvodi se $3,5 \cdot 10^6$ J/s toplote. Kao gorivo koristi se mešavina propana ($R = 188,4$ J/kgK) i butana ($R = 142,9$ J/kgK) u težinskom odnosu 50/50, koja u tečnom stanju dolazi u isparivač i odavde kao gas ulazi u cevovod pod pritiskom p_1 koji treba tako odrediti da pritisak na kraju cevovoda bude $p_2 = 2,5$ bar. Mešavina propana i butana, posle isparivača, struji u cevovodu pri stalnoj temperaturi od 20 °C. Kinematska viskoznost mešavine na ovoj temperaturi i na pritisku od 1 bar iznosi $\nu = 3,6 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Cevovod je horizontalan, dužine $l = 800$ m, prečnika $D = 38$ mm, apsolutne hrapavosti $0,15$ mm i bez lokalnih otpora. Donja toplotna moć mešavine je $H_d = 46100$ kJ/kg. Izračunati i količinu toplote koja se troši u isparivaču, ako su latentne toplote isparavanja $426,5$ kJ/kg propana i $385,8$ kJ/kg butana.

Rešenje:

Posle izračunavanja potrošnje mešavine propana i butana,

$$G = \frac{Q}{H_d} = \frac{3500000}{46,1 \cdot 10^6} = 0,076 \text{ kg/s},$$

i njene gasne konstante

$$\begin{aligned} R &= 0,50 R(\text{C}_3\text{H}_8) + 0,50 R(\text{C}_4\text{H}_{10}) = \\ &= 0,50 \cdot 188,4 + 0,50 \cdot 142,9 = 165,6 \text{ J/kgK}, \end{aligned}$$

može se odrediti gustina i brzina strujanja na kraju cevovoda:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{250\,000}{165,6 \cdot 293} = 5,15 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G}{\rho_2 A} = \frac{0,076}{5,15 \cdot 0,001134} = 13 \text{ m/s}.$$

Kako je gustina i dinamička viskoznost mešavine na 20 °C i 1 bar,

$$\rho = \frac{p}{R T} = \frac{100\,000}{165,6 \cdot 293} = 2,06 \text{ kg/m}^3,$$

$$\mu = \rho \nu = 2,06 \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} = 7,42 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2,$$

to je njena kinematska viskoznost na 20 °C i 2,5 bar,

$$\nu_2 = \frac{\mu}{\rho_2} = \frac{7,42 \cdot 10^{-6}}{5,15} = 1,44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

pa je Re broj na kraju cevovoda

$$Re_2 = \frac{v_2 \cdot D}{\nu_2} = \frac{13 \cdot 0,038}{1,44 \cdot 10^{-6}} = 343\,000.$$

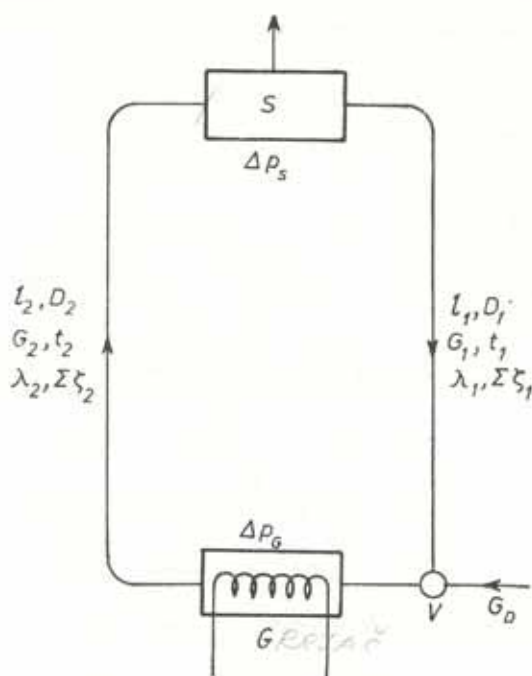
Ovoj vrednosti Re broja i relativnoj hrapavosti cevovoda $\delta/D = 0,15/38 = 0,004$ odgovara koeficijent trenja $\lambda = 0,0285$ iz dijagrama 1. Sad se može naći vrednost člana

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = 0,0285 \frac{800}{0,038} \frac{5,15}{2} 169 = 261\,105,$$

odnosno, pritisak na početku cevovoda

$$\begin{aligned} p_1 &= \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 261\,105} = \sqrt{6,25 + 5 \cdot 2,61} \cdot 10^{10} = \\ &= \sqrt{19,3} \cdot 10^{10} = 4,39 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = \underline{4,39 \text{ bar.}} \end{aligned}$$

52. Na skici je prikazana sušara koja radi na principu recirkulacije jednog dela vazduha. Vazduh se zagreva na $t_2 = 120$ °C u grejaču GR i odavde kroz horizontalni limeni cevovod odvodi u sušaru S . Jedan deo vazduha ispušta se iz sušare u atmosferu zbog povišene vlage koju je on primio za vreme sušenja, dok ostatak ohlađen u sušari na $t_1 = 50$ °C specifične vlažnosti $\omega_1 = 0,076$ struji do ventilatora V kroz cevovod koji je isti kao i cevovod za topli vazduh. Neposredno ispred ventilatora V uvodi se $\dot{G}_D = 5906$ kg/h suvog vazduha odgovarajuće temperature da bi se nadoknadila ona količina koja se ispušta iz sušare za vreme rada. Zanemarujući stišljivost vazduha i toplotne gubitke u sušari i cevovodu, izračunati ukupan pad pritiska u mreži za vreme rada postrojenja za sušenje. Zbog malog pada pritiska vazduha u postrojenju, gustinu vazduha u cevovodu računati na pritisku $p = 1$ bar i odgovarajućim temperaturama t_1 i t_2 . Ostali potrebni podaci su: $D_1 = D_2 = 500$ mm, $l_1 = l_2 = 50$ m, $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,02$, $\Sigma \zeta_1 = 2,1$, $\Sigma \zeta_2 = 1,2$, $G_1 = 10000$ kg/h, $\Delta p_S = 60$ mmVS, $\Delta p_{GR} = 30$ mmVS, $R_{gp} = 286,8$ J/kgK, $R_{vp} = 461$ J/kgK.



Rešenje:

Pad pritiska u postrojenju iznosi:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_S + \Delta p_{GR}$$

gde su Δp_1 i Δp_2 padovi pritiska u cevovodima za hladan i topli vazduh, a Δp_S i Δp_{GR} padovi pritiska u sušari i grejaču koji su poznati. S obzirom na date podatke prva dva pada pritiska svode se na:

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= \left(\lambda_1 \frac{l_1}{D_1} + \Sigma \zeta_1 \right) \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = \\ &= \left(0,02 \frac{50}{0,5} + 2,1 \right) \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = 2,05 \rho_1 v_1^2, \\ \Delta p_2 &= \left(\lambda_2 \frac{l_2}{D_2} + \Sigma \zeta_2 \right) \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = \\ &= \left(0,02 \frac{50}{0,5} + 1,2 \right) \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = 1,60 \rho_2 v_2^2. \end{aligned}$$

Ovde su ρ_1 , v_1 i ρ_2 , v_2 gustine i srednje brzine vazduha u cevovodima od sušar do grejača i od grejača do sušare. Za njihovo određivanje potrebno je izračunati parcijalne pritiske vodene pare i suvog vazduha u vlažnom vazduhu u odgova-

rajućim deonicama, kako bi se mogle naći i odgovarajuće gustine vodene pare i suvog vazduha. Za cevovod od sušare do grejača biće:

$$p_{vp} = \frac{p}{\frac{\omega_1}{0,622} + 1} = \frac{100\,000}{\frac{0,622}{0,076} + 1} = 10\,869 \text{ N/m}^2,$$

$$p_{sv} = p - p_{vp} = 100\,000 - 10\,869 = 89\,130 \text{ N/m}^2,$$

$$\rho_{vp} = \frac{p_{vp}}{R_{vp} T_1} = \frac{10\,869}{461 \cdot 323} = 0,073 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_{sv} = \frac{p_{sv}}{R_{sv} T_1} = \frac{89\,130}{286,8 \cdot 323} = 0,962 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_1 = \rho_{vp} + \rho_{sv} = 0,073 + 0,962 = 1,03 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_1 = \frac{G_1}{\rho_1 A_1} = \frac{10\,000}{1,03 \cdot 0,196 \cdot 3600} = 13,8 \text{ m/s},$$

$$\Delta p_1 = 2,05 \cdot 1,03 \cdot 189 = 400 \text{ N/m}^2.$$

Količina vodene pare u ovom delu cevovoda iznosi

$$(G_{vp})_1 = \frac{\omega_1}{1 + \omega_1} G_1 = \frac{0,076}{1 + 0,076} 10\,000 = 706 \text{ kg/h},$$

i prema uslovu zadatka je $(G_{vp})_2 = (G_{vp})_1$ pa je specifična vlažnost u cevovodu od grejača do sušare

$$\begin{aligned} \omega_2 &= \frac{(G_{vp})_2}{(G_{sv})_2} = \frac{(G_{vp})_2}{G_2 - (G_{vp})_2} = \\ &= \frac{(G_{vp})_1}{G_1 + G_D - (G_{vp})_1} = \frac{706}{15\,906 - 706} = 0,0464. \end{aligned}$$

Prema tome, u ovom delu cevovoda je

$$p_{vp} = \frac{p}{\frac{\omega_2}{0,622} + 1} = \frac{100\,000}{\frac{0,622}{0,0464} + 1} = 6944 \text{ N/m}^2$$

$$p_{sv} = p - p_{vp} = 100\,000 - 6\,944 = 93\,056 \text{ N/m}^2,$$

$$\rho_{vp} = \frac{p_{vp}}{R_{vp} T_2} = \frac{6944}{461 \cdot 393} = 0,038 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_{sv} = \frac{p_{sv}}{R_{sv} T_2} = \frac{93\,056}{286,8 \cdot 393} = 0,826 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_2 = \rho_{vp} + \rho_{sv} = 0,038 + 0,826 = 0,864 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G_2}{\rho_2 A_2} = \frac{15\,906}{0,864 \cdot 0,196 \cdot 3600} = 26 \text{ m/s,}$$

$$\Delta p_2 = 1,60 \cdot 0,864 \cdot 680 = 940 \text{ N/m}^2.$$

Dakle, ukupan pad pritiska u postrojenju za sušenje iznosi:

$$\Delta p = 400 + 940 + (60 + 30) 9,81 = 2223 \text{ N/m}^2 = 226,6 \text{ mmVS.}$$

53. Iz jedne čelične boce pod visokim pritiskom ističe vazduh u atmosferu kroz kratku cev u kojoj je ugrađen ventil koeficijenta otpora $\zeta = 2$. Izračunati pad pritiska i pad temperature usled prigušenja u ventilu, za slučaj da vazduh neposredno iza ventila struji brzinom zvuka. Otpore usled trenja zanemariti.

Rešenje:

Ako se indeksom 1 obeleži stanje ispred ventila, a indeksom 2 stanje iza ventila, onda se može postaviti sledeća jednakost:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{M_2 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2}}{M_1 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}} = \frac{1 + \kappa M_2^2}{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_1^2}$$

Zamenom vrednosti $\zeta = 2$, $\kappa = 1,4$ i $M_2 = 1$ dobija se iz desne proporcije jednačina

$$M_1^4 + 5 M_1^2 - 1,035 = 0$$

čije je rešenje $M_1 = 0,446$. Iz leve proporcije sleduje odnos pritisaka $p_1/p_2 = 2,4$ pa je pad pritiska u ventilu u procentima

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1} \cdot 100 = \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right) 100 = 58,3\%.$$

Kako je

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2} = \frac{1 + 0,2 \cdot 0,446^2}{1 + 0,2 \cdot 1^2} = 0,87,$$

to pad temperature iznosi

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} 100 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) 100 = 13\%.$$

54. Kroz kratku cev prečnika $D = 100$ mm ističe vazduh iz rezervoara u kome vlada stalan pritisak od 10 bar i temperatura od 20 °C. U cevi je ugrađen ventil koeficijenta otpora $\zeta = 4$. Izračunati protok G (kg/s) vazduha kroz cev ako iza ventila vazduh postiže brzinu zvuka. Gubitke usled trenja zanemariti.

Rešenje:

Protok vazduha kroz cev iznosi

$$G = \rho_1 v_1 A$$

gde je indeksom 1 označeno stanje vazduha ispred ventila. Ako se indeksom 2 označi stanje vazduha iza ventila, onda se iz jednačine

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{M_1 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}}{M_2 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2}} = \frac{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_1^2}{1 + \kappa M_2^2},$$

za $M_2 = 1$, $\kappa = 1,4$ i $\zeta = 4$ dobija $M_1 = 0,370$. Pošto se izračuna temperatura

$$T_1 = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2} = \frac{293}{1 + 0,2 \cdot 0,370^2} = 284 \text{ K},$$

može se naći brzina vazduha ispred ventila

$$v_1 = M_1 a_1 = M_1 \sqrt{\kappa R T_1} = 0,37 \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 284} = 125 \text{ m/s},$$

pa, zatim, pritisak na ovom mestu

$$p_1 = \frac{p_t}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2\right)^{\kappa/\kappa - 1}} = \frac{10}{(1 + 0,2 \cdot 0,370^2)^{3,5}} = 9 \text{ bar},$$

i gustina

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{900\,000}{286,8 \cdot 284} = 11 \text{ kg/m}^3.$$

Dakle, protok vazduha kroz cev iznosi

$$G = 11 \cdot 125 \cdot 0,00785 = 10,8 \text{ kg/s} = 39 \text{ t/h}.$$

55. Odrediti pad pritiska u ventilu koeficijenta otpora $\zeta = 0,5$ koji je ugrađen u cevi prečnika $D = 100$ mm i kroz koji protiče $G = 13,2$ kg/s vazduha. Merenjem je ustanovljeno da pritisak i temperatura vazduha ispred ventila iznose $p_1 = 8,2$ bar i $t_1 = 15$ °C.

Rešenje:

Radi određivanja pada pritiska $\Delta p = p_1 - p_2$ u ventilu potrebno je naći pritisak p_2 iza ventila. Kako su gustina vazduha, brzina strujanja i brzina zvuka ispred ventila,

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{820000}{286,8 \cdot 288} = 9,9 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_1 = \frac{G}{\rho_1 A} = \frac{13,2}{9,9 \cdot 0,00785} = 170 \text{ m/s},$$

$$a_1 = \sqrt{\kappa R T_1} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 288} = 340 \text{ m/s},$$

to je Mach-ov broj u ovom preseku

$$M_1 = \frac{v_1}{a_1} = \frac{170}{340} = 0,5.$$

Sad se iz jednačine

$$\frac{M_1 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}}{M_2 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2}} = \frac{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_1^2}{1 + \kappa M_2^2},$$

posle zamene $\zeta = 0,5$ i $M_1 = 0,5$ nalazi Mach-ov broj iza ventila $M_2 = 0,574$.
Dalje je

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_1^2}{1 + \kappa M_2^2} = \frac{1 + 1,4 \left(1 - \frac{1}{4}\right) 0,25}{1 + 1,4 \cdot 0,33} = 0,865,$$

pa je vrednost pritiska iza ventila

$$p_2 = 0,865 p_1 = 0,865 \cdot 8,2 = 7,1 \text{ bar}.$$

Prema tome, pad pritiska u ventilu iznosi

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 8,2 - 7,1 = 1,1 \text{ bar}.$$

56. Odrediti prečnik D ventila sigurnosti koji je ugrađen na rezervoaru za komprimovani vazduh. Koeficijent otpora ventila je $\zeta = 6$. Ventil se otvara kada u rezervoaru pritisak poraste na $p_R = 10$ bar. Temperatura vazduha u rezervoaru iznosi $t_R = 20$ °C, a količina vazduha koju ispušta ventil za vreme preopterećenja je $G = 0,7$ kg/s. Neposredno iza ventila vazduh struji brzinom zvuka.

Rešenje:

Ako 1 i 2 označavaju stanje vazduha ispred i iza ventila, tada se iz jednačine

$$\frac{M_1 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}}{M_2 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2}} = \frac{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_1^2}{1 + \kappa M_2^2},$$

posle zamene $M_2 = 1$ i $\zeta = 6$, dobija vrednost Mach-ovog broja ispred ventila $M_1 = 0,32$. Posle toga nalaze se i ostale veličine ispred ventila:

$$p_1 = \frac{p_R}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2\right)^{\kappa/\kappa - 1}} = \frac{10}{(1 + 0,2 \cdot 0,32^2)^{3,5}} = 9,31 \text{ bar},$$

$$T_1 = \frac{T_R}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2} = \frac{293}{1 + 0,2 \cdot 0,32^2} = 285 \text{ K},$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{931\,000}{286,8 \cdot 285} = 11,4 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_1 = M_1 a_1 = 0,32 \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 285} = 108,7 \text{ m/s}.$$

Najzad, posle izračunavanja površine preseka cevi u kojoj je ugrađen ventil,

$$A = \frac{G}{\rho_1 v_1} = \frac{0,7}{11,4 \cdot 108,7} = 0,00056 \text{ m}^2,$$

nalazi se njegov prečnik

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 0,027 \text{ m} = 27 \text{ mm}.$$

57. Jedan ventil u cevi prečnika $D = 50 \text{ mm}$ podešen je tako da mu je koeficijent otpora $\zeta = 3$. Ako pritisak i temperatura vazduha iza ventila treba da iznose $p_2 = 3,5 \text{ bar}$ i $t_2 = 20^\circ\text{C}$, koliki mora da bude totalni pritisak ispred ventila za slučaj da kroz njega protiče $G = 2,8 \text{ kg/s}$ vazduha.

Rešenje:

Kako je indeks 2 rezervisan za stanje vazduha iza ventila, to su na ovom mestu i sledeće veličine:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{350\,000}{286,8 \cdot 293} = 4,16 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G}{\rho_2 A} = \frac{2,8}{4,16 \cdot 0,00196} = 343 \text{ m/s},$$

$$a_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 293} = 343 \text{ m/s},$$

$$M_2 = \frac{v_2}{a_2} = \frac{343}{343} = 1.$$

Za $M_2 = 1$ i $\zeta = 3$ iz jednačine

$$\frac{M_1 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}}{M_2 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2}} = \frac{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_1^2}{1 + \kappa M_2^2}$$

dobija se

$$M_1^4 + 8,16 M_1^2 - 1,4 = 0.$$

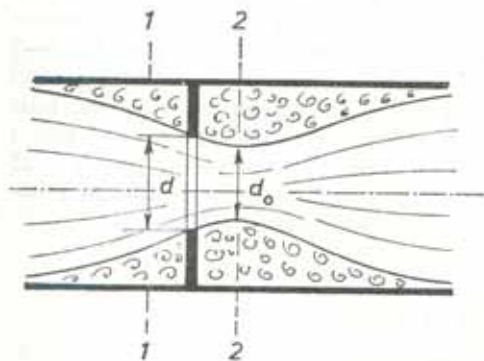
Samo rešenje $M_1 = 0,412$ fizički postoji i tada je

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{1 + \kappa M_2^2}{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_1^2} = 2,62,$$

odakle je $p_1 = 2,62 \cdot p_2 = 2,62 \cdot 3,5 = 9,15$ bar. Totalni pritisak vazduha ispred ventila iznosi

$$p_t = p_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = 9,15 (1 + 0,2 \cdot 0,17)^{3,5} \approx 10,35 \text{ bar.}$$

58. Pritisak butana reducira se pre upotrebe na kritični pritisak ($p_2 = p_0$) posredstvom blende prečnika $d = 6$ mm. Izračunati potrošnju butana ako su totalni pritisak i totalna temperatura iza blende 8 bar i 20 °C. Kontrakcija mlaza određena je veličinom $(d_0/d)^2 = 0,6$, gde je d_0 najmanji presek mlaza posle blende. Osim toga, za butan je $c_p = 1660$ J/kgK, $R = 142,9$ J/kgK.



Rešenje:

Kako je ovom prilikom

$$\frac{\kappa}{\kappa - 1} = \frac{c_p}{R} = \frac{1660}{142,9} = 11,6,$$

to je za butan gas $\kappa = 11,6 : (11,6 - 1) = 1,095$.

Kritičnom pritisku u preseku 2—2 (ovde reč „kritičan“ označava pritisak pri kome gas postiže brzinu zvuka a ne pritisak na kome gas, uz odgovarajuću temperaturu, prelazi u tečno stanje; i sve ostale veličine koje se odnose na ovaj presek nose isti naziv i oznaku „zvezdicu“) odgovaraju sledeće veličine:

$$T_* = T_2 = \frac{T_{t*}}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_*^2} = \frac{293}{1,0475} = 279 \text{ K,}$$

$$v = v_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,095 \cdot 142,9 \cdot 279} = 207 \text{ m/s,}$$

$$\frac{p_{t*}}{p_*} = \left(\frac{T_{t*}}{T_*} \right)^{\kappa/\kappa-1} = \left(\frac{293}{279} \right)^{1,16} = 1,7,$$

$$p_* = p_2 = \frac{p_{t*}}{1,7} = \frac{8}{1,7} = 4,7 \text{ bar,}$$

$$\rho_* = \rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} = \frac{470.000}{142,9 \cdot 279} = 11,5 \text{ kg/m}^3.$$

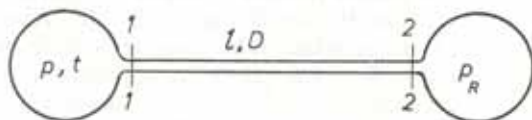
Kako je prečnik mlaza

$$d_0 = d \sqrt{0,6} = 0,77 \cdot 6 = 4,62 \text{ mm,}$$

to je potrošnja butana

$$G = \rho_2 v_2 A_2 = 11,5 \cdot 207 \cdot 16,8 \cdot 10^{-6} = 0,04 \text{ kg/s} = 144 \text{ kg/h.}$$

59. Iz rezervoara pod pritiskom ističe komprimovani vazduh u drugi rezervoar u kome vlada stalni pritisak $p_R = 1$ bar. Izračunati protok G (kg/s) vazduha kroz cev koja spaja rezervoare, za slučaj da se u preseku 2—2 postiže brzina zvuka. Ostali podaci su: pritisak i temperatura vazduha u levom rezervoaru $p = 8$ bar i $t = 30^\circ\text{C}$, prečnik cevi $D = 25$ mm, dužina cevi $l = 1,34$ m i koeficijent trenja $0,02 = \lambda$



Rešenje:

Kako je prema uslovu zadatka $M_2 = 1$ i

$$\lambda \frac{l_*}{D} = 0,02 \frac{1,34}{0,025} = 1,07,$$

to se iz tabele 4 prema ovoj vrednosti nalazi Mach-ov broj na početku cevi $M_1 = 0,50$, i zatim ostale veličine u ovom preseku:

$$p_{t1} = \frac{p}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\kappa/\kappa-1}} = \frac{8}{(1 + 0,2 \cdot 0,25)^{3,5}} = 6,72 \text{ bar,}$$

$$T_1 = \frac{T}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2} = \frac{303}{1 + 0,2 \cdot 0,25} = 288 \text{ K},$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{672\,000}{286,8 \cdot 288} = 7,9 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_1 = M_1 a_1 = M_1 \sqrt{\kappa R T_1} = 0,50 \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 288} = 170 \text{ m/s}.$$

Prema tome, protok vazduha kroz cev iznosi

$$G = \rho_1 v_1 A = 7,9 \cdot 170 \cdot 0,00049 = 0,66 \text{ kg/s}.$$

60. Iz rezervoara u kome vlada pritisak $p_0 = 15 \text{ bar}$ i temperatura $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ istiche vazduh u atmosferu kroz cev precnika $D = 55 \text{ mm}$, duzine $l = 15 \text{ m}$ i relativne hrapavosti $\delta/D = 0,001$. Na izlazu iz cevi izmerena je temperatura vazduha $t_2 = -33 \text{ }^\circ\text{C}$. Treba izracunati protok vazduha smatrajući da se u rezervoaru pritisak p_0 i temperatura t_0 ne menjaju.

Rešenje:

Prvo se iz jednačine

$$T_0 = T_2 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2 \right),$$

izračuna Mach-ov broj na izlazu cevi,

$$M_2 = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \left(\frac{T_0}{T_2} - 1 \right)} = \sqrt{\frac{2}{1,4 - 1} \left(\frac{288}{240} - 1 \right)} = 1,$$

pa, zatim, član

$$\text{PRETPOSTAVKA: } \lambda \frac{l_*}{D} = 0,02 \frac{15}{0,055} = 5,45,$$

u kome je $\lambda = 0,02$ pretpostavljena vrednost koeficijenta trenja koja će se kasnije proveriti. Vrednosti $\lambda l_*/D = 5,45$ iz tabele 4 odgovaraju:

$$M_1 = 0,30, \quad \frac{p_1}{p_*} = 3,62, \quad \frac{T_1}{T_*} = 1,179,$$

gde indeks 1 označava stanje vazduha na ulazu u cev. Posle izračunavanja pritiska i temperature vazduha u ovom preseku,

$$p_1 = \frac{p_0}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\kappa/(\kappa - 1)}} = \frac{15}{(1 + 0,2 \cdot 0,09)^{3,5}} = 13,9 \text{ bar},$$

$$T_1 = 1,179 T_* = 1,179 (273 - 33) = 282 \text{ K},$$

nalaze se potrebne veličine koje određuju stanje vazduha na izlazu iz cevi:

$$p_* = \frac{p_1}{3,62} = \frac{13,9}{3,62} = 3,84 \text{ bar}$$

$$\rho_* = \frac{p_*}{R T_*} = \frac{384\,000}{286,8 \cdot 240} = 5,58 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_* = \sqrt{\kappa R T_*} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 240} = 310 \text{ m/s.}$$

Protok vazduha sada iznosi

$$G = \rho_* v_* A = 5,58 \cdot 310 \cdot 0,00236 = 4,08 \text{ kg/s.}$$

Ostaje da se još proveri pretpostavljena vrednost za λ . Prethodno treba naći srednju vrednost Re broja po obrascu

$$Re = \frac{v D}{\nu} = \frac{v D \rho}{\mu}.$$

Pošto je brzina zvuka na ulazu u cev

$$a_1 = \sqrt{\kappa R T_1} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 282} = 338 \text{ m/s,}$$

to je brzina strujanja u ovom preseku

$$v_1 = M_1 a_1 = 0,30 \cdot 338 = 102 \text{ m/s,}$$

odnosno, srednja vrednost brzine

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_*) = \frac{1}{2} (102 + 310) = 206 \text{ m/s.}$$

Dalje je

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{1\,390\,000}{286,8 \cdot 282} = 17,2 \text{ kg/m}^3,$$

odnosno, srednja gustina

$$\rho = \frac{1}{2} (\rho_1 + \rho_*) = \frac{1}{2} (17,2 + 5,58) = 11,4 \text{ kg/m}^3.$$

Kako je dinamička viskoznost vazduha $\mu_1 = 17,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ na temperaturi $t_1 = T_1 - 273 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ i $\mu_2 = 15,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ na temperaturi $t_2 = T_2 - 273 = -33 \text{ }^\circ\text{C}$ to je srednja vrednost dinamičke viskoznosti

$$\mu = \frac{1}{2} (\mu_1 + \mu_2) = \frac{1}{2} (17,7 + 15,2) 10^{-6} = 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2.$$

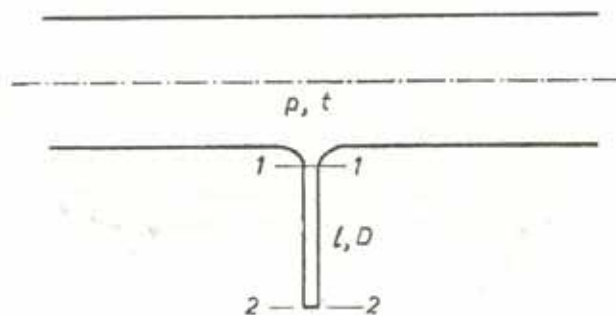
Konačno, srednja vrednost Re broja je

$$Re = \frac{206 \cdot 0,055 \cdot 11,4}{16,5 \cdot 10^{-6}} = 7600000,$$

pa se iz dijagrama 1, prema ovoj vrednosti Re broja i relativnoj hrapavosti 0,001, dobija koeficijent trenja $\lambda = 0,0196$ što se može prihvatiti kao bliska vrednost ranije pretpostavljenoj.

61. U cevovodu za vazduh, ispred cilindričnog mlaznika prečnika D i dužine l , vlada pritisak p koji treba tako odrediti da vazduh iz mlaznika ističe brzinom zvuka. Poznat je odnos $l/D = 15$ mlaznika, pritisak na izlazu $p_2 = 2,6$ bar iz mlaznika i temperatura vazduha u cevovodu $t = 20$ °C. Koliki je prečnik D mlaznika za slučaj da kroz njega ističe $G = 1$ kg/s vazduha?

Napomena: prečnik magistralnog cevovoda je mnogo veći od prečnika mlaznika, pa se brzina u cevovodu može zanemariti u odnosu na brzinu vazduha u mlazniku. Koeficijent trenja vazduha u mlazniku iznosi $\lambda = 0,023$.



Rešenje:

Kako je prema uslovu zadatka $M_2 = 1$ to se, za vrednost

$$\lambda \frac{l_0}{D} = 0,023 \cdot 15 = 0,35$$

iz tabele 4 dobijaju sledeće vrednosti:

$$M_1 = 0,64, \quad \frac{p_1}{p_2} = 1,65, \quad \frac{T_1}{T_2} = 1,109.$$

Sad se mogu naći redom i sve ostale veličine u ovom preseku:

$$p_1 = 1,65 p_2 = 1,65 \cdot 2,6 = 4,29 \text{ bar.}$$

$$p = p_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\kappa / \kappa - 1} = 4,29 (1 + 0,2 \cdot 0,64^2)^{3,5} = 5,65 \text{ bar,}$$

$$T_1 = \frac{T}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2} = \frac{293}{1 + 0,2 \cdot 0,64^2} = 271 \text{ K,}$$

Posle izračunavanja odgovarajućih veličina za presek 2—2,

$$T_2 = \frac{T_1}{1,109} = \frac{271}{1,109} = 245 \text{ K},$$

$$v_2 = a_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 245} = 314 \text{ m/s},$$

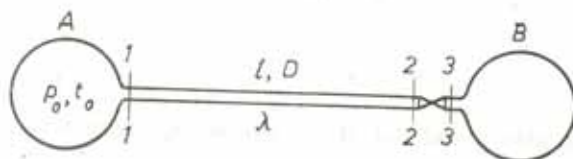
$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{260\,000}{286,8 \cdot 245} = 3,70 \text{ kg/m}^3,$$

$$A = \frac{G}{\rho_2 v_2} = \frac{1}{3,70 \cdot 314} = 0,00088 \text{ m}^2,$$

nalazi se prečnik mlaznika

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00088}{3,14}} = 0,0335 \text{ m} = 33,5 \text{ mm}.$$

62. Iz rezervoara A , u kome vlada visoki pritisak p_0 i temperatura $t_0 = 20^\circ\text{C}$, ističe vazduh u rezervoar B kroz cev prečnika $D = 100 \text{ mm}$ i dužine $l = 25 \text{ m}$. Sasvim na kraju cevi nalazi se reducir-ventil istog prečnika, čiji je koeficijent otpora $\zeta = 2$. Iza ventila u preseku 3—3 izmeren je pritisak $p_3 = 6 \text{ bar}$. Koliki mora da bude pritisak p_2 ispred ventila ako se želi da vazduh u preseku 3—3 dostiže brzinu zvuka? Naći i pritisak p_0 kao i protok G (kg/s) vazduha kroz cev, uzimajući da je koeficijent trenja $\lambda = 0,015$.



Rešenje:

Kad se u jednačinu

$$\frac{M_2 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2}}{M_3 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_3^2}} = \frac{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_2^2}{1 + \kappa M_3^2},$$

stavi $M_3 = 1$ i $\zeta = 2$ dobiće se vrednost $M_2 = 0,447$ i odnos pritisa $p_2/p_3 = 2,4$ odakle je

$$p_2 = 2,4 \quad p_3 = 2,4 \cdot 6 = 14,4 \text{ bar}.$$

Vrednosti Mach-ovog broja $M_2 = 0,447$ iz tabele 4 odgovara najbliža vrednost

$$\lambda \frac{l_{2-0}}{D} = 1,56.$$

Kako je

$$\lambda \frac{l_{1-0}}{D} = \lambda \frac{l_{1-2}}{D} + \lambda \frac{l_{2-0}}{D} = 0,015 \frac{25}{0,1} + 1,56 = 5,3,$$

to se iz iste tabele, za najbližu vrednost ovog odnosa, nalazi

$$M_1 = 0,30, \quad \frac{p_1}{p_0} = 3,62, \quad \frac{T_1}{T_0} = 1,179.$$

S obzirom da je

$$p_1 = \frac{p_1}{\frac{p_2}{p_0}} p_2 = \frac{3,62}{2,40} 14,4 = 21,83 \text{ bar},$$

to je pritisak vazduha u rezervoaru

$$p_0 = p_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = 21,83 (1 + 0,2 \cdot 0,09)^{3,5} = 23,2 \text{ bar}.$$

Na kraju, posle izračunavanja vrednosti

$$T_3 = \frac{T_0}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_3^2} = \frac{293}{1 + 0,2 \cdot 1^2} = 243 \text{ K},$$

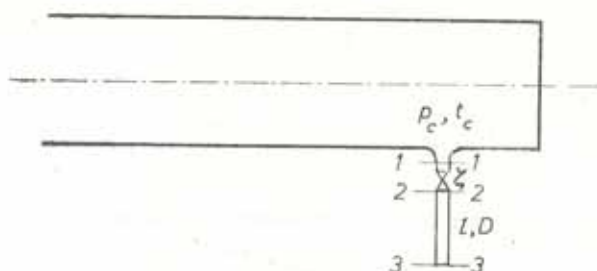
$$\rho_3 = \frac{p_3}{R T_3} = \frac{600\,000}{286,8 \cdot 243} = 8,6 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_3 = a_3 = \sqrt{\kappa R T_3} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 243} = 313 \text{ m/s},$$

nalazi se protok vazduha

$$G = \rho_3 v_3 A = 8,6 \cdot 313 \cdot 0,00785 = 21,2 \text{ kg/s}.$$

63. Na kraju dugog cevovoda, kojim se dovodi komprimovani vazduh u rudnik, nalazi se ventil sigurnosti radi zaštite cevovoda od kompresionih udara. Ventil automatski ispušta vazduh kroz kratku cev čim se naglo obustavi njegova potrošnja iz cevovoda. Izračunati protok vazduha kroz ventil ako se on otvara kad u dovodnoj cevi pritisak poraste na $p_c = 8$ bar. Ostali podaci su: $t_c = 20$ °C, $D = 25$ mm, $l = 1,34$ m (dužina cevi računa se od ventila pa do kraja cevi), $\zeta = 8$ i $\lambda = 0,02$. Napomena: na izlazu iz cevi vazduh struji brzinom zvuka, a brzina u cevovodu može da se zanemari u odnosu na brzinu vazduha u cevi ventila, jer je prečnik cevovoda mnogo veći od prečnika cevi ventila.



Rešenje:

Za $M_2 = 1$ i vrednosti člana

$$\lambda \frac{l_*}{D} = 0,02 \frac{1,34}{0,025} = 1,07,$$

nalazi se iz tabele 4 Mach-ov broj $M_2 = 0,50$. Kad se posle toga ubace poznate vrednosti u izraz

$$\frac{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_1^2}{M_1 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}} = \frac{1 + \kappa M_2^2}{M_2 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2}}$$

dobiće se jednačina

$$M_1^4 - 0,94 M_1^2 + 0,0615 = 0$$

čije je rešenje $M_1 = 0,267$. Kako je dalje

$$p_1 = \frac{p_c}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2\right)^{\kappa/(\kappa - 1)}} = \frac{8}{(1 + 0,2 \cdot 0,267^2)^{2,5}} = 7,7 \text{ bar},$$

$$T_1 = \frac{T_c}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2} = \frac{293}{1 + 0,2 \cdot 0,267^2} = 288 \text{ K},$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{770\,000}{286,8 \cdot 288} = 9,32 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_1 = M_1 a_1 = M_1 \sqrt{\kappa R T_1} = 0,267 \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 288} = 91 \text{ m/s},$$

to protok vazduha kroz ventil iznesi

$$G = \rho_1 v_1 A = 9,32 \cdot 91 \cdot 0,00049 = 0,41 \text{ kg/s}.$$

64. U jednom tehnološkom procesu potrebno je obezbediti 1,62 m³/s vazduha temperature 20 °C i pritiska 2 bar. Prečnik dovodnog cevovoda je 100 mm a dužina 50 m. Koeficijent trenja iznosi $\lambda = 0,015$. Izračunati pritisak na početku cevovoda i protok vazduha u m³/s pretpostavljajući da je strujanje adijabatsko.

Rešenje:

Kad se izračuna brzina strujanja i brzina zvuka na kraju cevovoda,

$$v_2 = \frac{q_2}{A} = \frac{1,62}{0,00785} = 206,4 \text{ m/s,}$$

$$a_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 293} = 348 \text{ m/s,}$$

može se naći vrednost Mach-ovog broja

$$M_2 = \frac{v_2}{a_2} = \frac{206,4}{344} = 0,60.$$

Prema tabeli 4 ovoj vrednosti Mach-ovog broja odgovaraju

$$\frac{p_2}{p_*} = 1,76, \quad \lambda \frac{l_{2-*}}{D} = 0,49.$$

Kako je

$$\lambda \frac{l_{1-*}}{D} = \lambda \frac{l_{1-2}}{D} + \lambda \frac{l_{2-*}}{D} = 0,015 \frac{50}{0,1} + 0,49 = 7,99,$$

to je prema istoj tabeli

$$M_1 = 0,25, \quad \frac{p_1}{p_*} = 4,35.$$

Pritisak na početku cevi iznosi

$$p_1 = \frac{p_1}{p_*} \frac{p_*}{p_2} p_2 = \frac{4,35}{1,76} 2 = 4,95 \text{ bar.}$$

Pošto se sad izračunaju specifične gustine

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R T_0} = \frac{101\,325}{286,8 \cdot 288} = 1,225 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{200\,000}{286,8 \cdot 293} = 2,38 \text{ kg/m}^3,$$

može se naći protok vazduha kao

$$q_0 = \frac{G}{\rho_0} = \frac{\rho_2 q_2}{\rho_0} = \frac{2,38 \cdot 1,62}{1,225} = 3,15 \text{ m}^3/\text{s}$$

65. Na jednom mestu troši se 230 m³/min vazduha temperature 20 °C i pritiska 1,5 bar. Prečnik dovodnog cevovoda za vazduh je $D = 150$ mm, dužine $l = 30$ m. Apsolutna hrapavost je $\delta = 0,1$ mm. Odrediti pritisak i temperaturu vazduha na početku cevovoda uzimajući da je strujanje u njemu adijabatsko.

Rešenje:

Ako se indeksom 1 obeleži početak cevovoda, onda su brzina strujanja, brzina zvuka i vrednost Mach-ovog broja na izlazu iz cevovoda:

$$v_2 = \frac{q_2}{A} = \frac{230}{0,0177 \cdot 60} = 217 \text{ m/s},$$

$$a_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 293} = 344 \text{ m/s},$$

$$M_2 = \frac{v_2}{a_2} = \frac{217}{344} = 0,63.$$

Sad se iz tabele 4 za $M_2 = 0,63$ nalazi

$$\lambda \frac{l_{1-2}}{D} = 0,38, \quad \frac{p_2}{p_*} = 1,68, \quad \frac{T_2}{T_*} = 1,111.$$

Da bi se izračunao Mach-ov broj na početku cevovoda mora se prethodno naći vrednost člana $\lambda \frac{l_{1-2}}{D}$. Kako je koeficijent dinamičke viskoznosti $\mu_2 = 18,15 \cdot 10^{-6}$ Ns/m² na temperaturi $t_2 = 20$ °C i gustina

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{150\,000}{286,8 \cdot 293} = 1,78 \text{ kg/m}^3,$$

to je vrednost Re broja na izlazu iz cevovoda

$$Re_2 = \frac{v_2 D}{\nu_2} = \frac{v_2 D \rho_2}{\mu_2} = \frac{217 \cdot 0,150 \cdot 1,78}{18,15 \cdot 10^{-6}} = 3,2 \cdot 10^6.$$

Relativnoj hrapavosti $\delta/D = 0,1/150 = 0,00067$ i nađenoj vrednosti Re broja odgovara koeficijent trenja $\lambda = 0,018$. Sada je

$$\lambda \frac{l_{1-2}}{D} = 0,018 \frac{30}{0,150} = 3,6,$$

odnosno

$$\lambda \frac{l_{1-2}}{D} = \lambda \frac{l_{1-2}}{D} + \lambda \frac{l_{2-*}}{D} = 3,6 + 0,38 = 3,98.$$

Ovoj vrednosti iz tabele 4 odgovaraju:

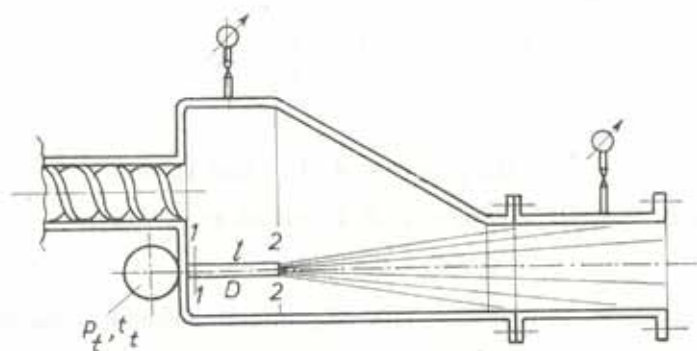
$$M_1 = 0,34, \quad \frac{p_1}{p_*} = 3,19, \quad \frac{T_1}{T_*} = 1,173.$$

Dakle, pritisak i temperatura vazduha na ulazu u cevovod iznose:

$$p_1 = \frac{p_1}{\frac{p_1}{p_*}} p_* = \frac{3,19}{1,68} 1,5 = 2,85 \text{ bar},$$

$$T_1 = \frac{T_1}{\frac{T_1}{T_*}} T_* = \frac{1,173}{1,111} 293 = 309 \text{ K}.$$

66. Fuller pumpa za pneumatski transport ima dva cilindrična mlaznika prečnika $D = 18 \text{ mm}$ i dužine $l = 100 \text{ mm}$ koji su na ulazu dobro zaobljeni. Za vreme normalnog pogona iz mlaznika ističe brzinom zvuka $2G \text{ (kg/s)}$ vazduha pritiska $2,5 \text{ bar}$ (ovoliki je približno i pritisak u komori za mešanje Fuller pumpe). Smanjenjem kapaciteta pneumatskog transporta smanjuje se protok vazduha na $2G' = 0,8 \cdot 2G$, pri čemu je brzina mešavine u cevovodu još uvek veća od minimalne brzine pri kojoj može doći do taloženja materijala na dnu cevi. Izračunati totalni pritisak vazduha na ulazu u mlaznike, kao i protok vazduha u oba slučaja ako je $\lambda = 0,023$ i totalna temperatura vazduha na ulazu u mlaznike $t_t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Za koliko će se smanjiti pritisak u komori za mešanje kad kroz mlaznike ističe (opet brzinom zvuka) $2G' \text{ (kg/s)}$ vazduha umesto $2G \text{ (kg/s)}$?



Rešenje:

Kako je $M_z \rightarrow 1$, to se prema vrednosti člana

$$\lambda \frac{l}{D} = 0,023 \frac{100}{18} = 0,127,$$

iz tabele 4 nalaze ove veličine:

$$M_1 = 0,75, \quad \frac{p_1}{p_*} = 1,38, \quad \frac{T_1}{T_*} = 1,079.$$

Dakle, zbog vrednosti pritiska na kraju mlaznika biće

$$p_1 = 1,38 \cdot p_2 = 1,38 \cdot 2,5 = 3,45 \text{ bar},$$

pa je totalni pritisak na ulazu u mlaznike, pri protoku $2G$,

$$p_t = p_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\kappa/(\kappa - 1)} = 3,45 (1 + 0,2 \cdot 0,75^2)^{3,5} = 5 \text{ bar}.$$

Posle izračunavanja i ostalih veličina na ulazu u mlaznike,

$$T_1 = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2} = \frac{313}{1 + 0,2 \cdot 0,75^2} = 282 \text{ K},$$

$$a_1 = \sqrt{\kappa R T_1} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 282} = 336 \text{ m/s},$$

$$v_1 = M_1 a_1 = 0,75 \cdot 336 = 252 \text{ m/s},$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{350\,000}{286,8 \cdot 282} = 4,33 \text{ kg/m}^3,$$

nalazi se količina vazduha

$$2G = 2\rho_1 v_1 A = 2 \cdot 4,33 \cdot 252 \cdot 0,000255 = 0,56 \text{ kg/s}.$$

Smanjenjem kapaciteta transporta smanjuje se i količina vazduha na vrednost $2G' = 0,8 \cdot 0,56 = 0,445 \text{ kg/s}$. Prema podacima u zadatku je $M'_1 = M_1$, $T'_1 = T_1$, $v'_1 = v_1$ pa se iz odnosa

$$\frac{G'}{G} = \frac{\rho'_1 v'_1 A}{\rho_1 v_1 A} = \frac{\rho'_1}{\rho_1} = 0,8$$

dobija

$$\rho'_1 = 0,8 \rho_1 = 0,8 \cdot 4,33 = 3,46 \text{ kg/m}^3.$$

Iz jednačina $p_1 = \rho_1 R T_1$ i $p'_1 = \rho'_1 R T'_1$ nalazi se

$$p'_1 = 0,8 p_1 = 0,8 \cdot 3,45 = 2,77 \text{ bar}.$$

Prema tome, totalni pritisak koji odgovara smanjenom kapacitetu je

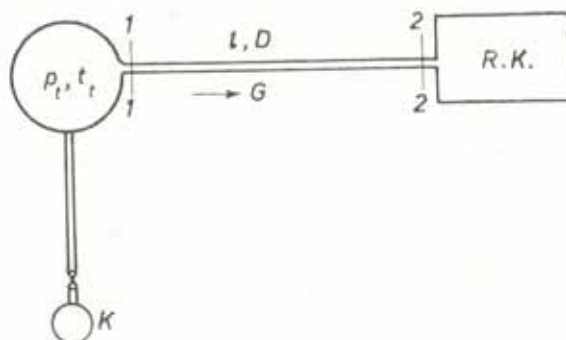
$$p'_t = p'_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\kappa/(\kappa - 1)} = 2,77 (1 + 0,2 \cdot 0,75^2)^{3,5} = 4 \text{ bar}.$$

I ovde važi odnos $p'_1/p'_2 = 1,38$ pa je pritisak u komori za mešanje pri kapacitetu $2G'$

$$p'_2 = \frac{p'_1}{1,38} = \frac{2,77}{1,38} = 2 \text{ bar}.$$

Dakle, pritisak u komori za mešanje Fuller pumpe smanjio se zbog smanjenja kapaciteta pneumatskog transporta i ono iznosi 0,5 bar.

67. Kroz pravu kratku cev dužine 1,34 m uvodi se vazduh u razvodnu komoru iz rezervoara koji je pod visokim pritiskom. Temperatura vazduha u rezervoaru je $t_t = 40\text{ }^\circ\text{C}$, dok je pritisak na kraju cevi $p_2 = 3\text{ bar}$ (ovaj pritisak je skoro isti kao i pritisak u razvodnoj komori). Odrediti prečnik cevi i totalni pritisak p_t vazduha u rezervoaru, za slučaj da kroz cev protiče 2,5 kg/s vazduha koji na kraju cevi postiže brzinu zvuka. Cev je na ulazu dobro zaobljena tako da se gubitak na ulazu može zanemariti. Uzeti da je koeficijent trenja u cevi $\lambda = 0,026$.



Rešenje:

Kako je na izlazu iz cevi $M_2 = 1$ to se mogu naći sledeće veličine u ovom preseku:

$$T_2 = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2} = \frac{313}{1 + 0,2 \cdot 1^2} = 260\text{ K},$$

$$v_2 = a_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 260} = 324\text{ m/s},$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{300\,000}{286,8 \cdot 260} = 4,02\text{ kg/m}^3,$$

$$q_2 = \frac{G}{\rho_2} = \frac{2,5}{4,02} = 0,62\text{ m}^3/\text{s},$$

$$A = \frac{q_2}{v_2} = \frac{0,62}{324} = 0,00196\text{ m}^2.$$

Dakle, prečnik cevi je $D = 50\text{ mm}$. Sa druge strane je

$$\lambda \frac{l}{D} = 0,026 \frac{1,34}{0,050} = 0,73,$$

pa je, zbog $M_2 = 1$, iz tabele 4

$$M_1 = 0,58, \quad \frac{p_1}{p_*} = \frac{p_1}{p_2} = 1,83,$$

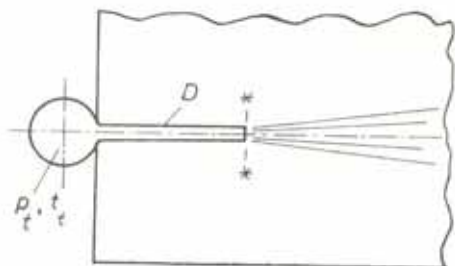
odnosno

$$p_1 = 1,83 p_2 = 1,83 \cdot 3 = 5,49 \text{ bar.}$$

Prema tome, totalni pritisak vazduha u rezervoaru iznosi

$$p_t = p_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\kappa/(\kappa - 1)} = 5,49 (1 + 0,2 \cdot 0,58^2)^{3,5} = 6,9 \text{ bar.}$$

68. U komoru za mešanje Fuller pumpe ulazi vazduh brzinom zvuka kroz četiri cilindrična mlaznika prečnika $D = 15 \text{ mm}$. Stanje vazduha ispred mlaznika određeno je sa $p_t = 3 \text{ bar}$ i $t_t = 40^\circ \text{C}$. Izračunati protok vazduha kroz mlaznike pri ovim podacima. Ako se protok vazduha poveća za 30% za koliko će se procenata povećati totalni pritisak ispred mlaznika, pod pretpostavkom da vazduh iz mlaznika i ovom prilikom ističe brzinom zvuka? Izračunati ovaj protok vazduha kroz mlaznike.



Rešenje:

S obzirom na veličine koje su poznate, odmah se mogu izračunati za izlazni presek mlaznika (mlaznici su paralelno postavljani):

$$T_* = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_*^2} =$$

$$= \frac{313}{1 + 0,2 \cdot 1^2} = 260 \text{ K,}$$

$$v_* = a_* = \sqrt{\kappa R T_*} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 260} = 325 \text{ m/s,}$$

$$p_* = \frac{p_t}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_*^2 \right)^{\kappa/(\kappa - 1)}} = \frac{3}{(1 + 0,2 \cdot 1^2)^{3,5}} = 1,58 \text{ bar,}$$

$$\rho_* = \frac{p_*}{R T_*} = \frac{158\,000}{286,8 \cdot 260} = 2,12 \text{ kg/m}^3,$$

pa je protok vazduha kroz mlaznike

$$G = 4 \rho_* v_* A = 4 \cdot 2,12 \cdot 325 \cdot 0,000177 = 0,49 \text{ kg/s.}$$

Posle povećanja protok iznosi $G' = 1,3 \cdot G = 1,3 \cdot 0,49 = 0,63 \text{ kg/s}$. Kako je i posle povećanja protoka $M' = M_*$ to je $T' = T_*$ i $v' = v_*$, pa se iz odnosa

$$\frac{G'}{G} = \frac{\rho' v' A}{\rho_* v_* A} = 1,3$$

dobija $\rho' = 1,3 \rho_* = 1,3 \cdot 2,12 = 2,76 \text{ kg/m}^3$. Na kraju, iz jednačina stanja

$$p_* = \rho_* R T_*, \quad p' = \rho' R T',$$

sleđuje

$$p' = \frac{\rho'}{\rho_*} p_* = 1,3 \cdot 1,58 = 2,05 \text{ bar},$$

pa je totalni pritisak ispred mlaznika, koji odgovara povećanom protoku,

$$p'_i = p' \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M'^2 \right)^{\kappa/(\kappa - 1)} = 2,05 (1 + 0,2 \cdot 1^2)^{3,5} = 3,8 \text{ bar}.$$

Prema tome, povećanje totalnog pritiska u procentima iznosi:

$$\frac{p'_i - p_t}{p_t} 100 = \frac{3,8 - 3}{3} 100 = 26,6\%.$$

69. Za vreme jednog tehnološkog procesa metan ($\kappa = 1,3$, $R = 518 \text{ J/kgK}$) struji adijabatski kroz cev prečnika $D = 50 \text{ mm}$, dužine $l = 2,5 \text{ m}$ i apsolutne hrapavosti $\delta = 0,1 \text{ mm}$. Na kraju cevi izmeren je pritisak $p_2 = 2 \text{ bar}$, temperatura $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ i protok $q_2 = 0,52 \text{ m}^3/\text{s}$. Izračunati temperaturu i pritisak metana na početku cevi. Dinamička viskoznost metana na $20 \text{ }^\circ\text{C}$ iznosi $\mu_2 = 11 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$.

Rešenje:

Posle izračunavanja brzine strujanja i brzine zvuka na kraju cevi,

$$v_2 = \frac{q_2}{A} = \frac{0,52}{0,00196} = 265 \text{ m/s},$$

$$a_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,3 \cdot 518 \cdot 293} = 442 \text{ m/s},$$

nalazi se vrednost Mach-ovog broja

$$M_2 = \frac{v_2}{a_2} = \frac{265}{442} = 0,60$$

na osnovu koje se iz tabele 5 pročitaju:

$$\frac{T_2}{T_*} = 1,0911, \quad \frac{p_2}{p_*} = 1,741, \quad \frac{l_{2-*}}{D} = 0,5409.$$

Kako je dalje

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{200\,000}{518 \cdot 293} = 1,32 \text{ kg/m}^3,$$

$$Re_2 = \frac{v_2 D \rho_2}{\mu_2} = \frac{265 \cdot 0,050 \cdot 1,32}{11 \cdot 10^{-6}} = 1,59 \cdot 10^6,$$

$$\frac{\delta}{D} = \frac{0,1}{50} = 0,002,$$

to se iz dijagrama 1 nalazi koeficijent trenja $\lambda = 0,024$. Vrednosti člana

$$\lambda \frac{l_{1-2}}{D} = \lambda \frac{l_{1-2}}{D} + \lambda \frac{l_{2-3}}{D} = 0,024 \frac{2,5}{0,05} + 0,5409 = 1,7409,$$

iz tabele 5 odgovaraju:

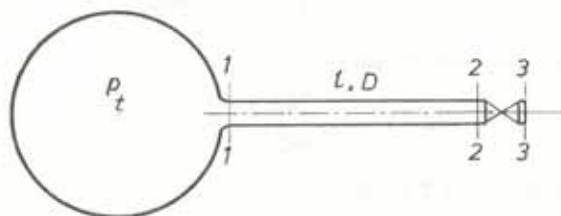
$$M_1 = 0,45, \quad \frac{T_1}{T_*} = 1,116, \quad \frac{p_1}{p_*} = 2,348.$$

Dakle, pritisak i temperatura metana na početku cevi iznose:

$$p_1 = \frac{p_1}{p_*} p_* = \frac{2,348}{1,741} 2 = 2,7 \text{ bar},$$

$$T_1 = \frac{T_1}{T_*} T_* = \frac{1,116}{1,091} 293 = 300 \text{ K}.$$

70. Iz rezervoara pod pritiskom ističe vazduh u atmosferu kroz kratku cev prečnika $D = 20$ mm, dužine $l = 1,866$ m i koeficijenta trenja $\lambda = 0,02$. Na kraju cevi nalazi se ventil koeficijenta otpora $\zeta = 2$. Ako se želi da pritisak iza ventila bude $p_3 = 1$ bar i da vazduh ističe brzinom zvuka ($M_3 = M_* = 1$), koliki mora da bude totalni pritisak p_t vazduha u rezervoaru i strujni pritisak ispred ventila?



Rešenje:

Prvo se iz desne strane jednakosti

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{M_2 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2}}{M_3 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_3^2}} = \frac{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_2^2}{1 + \kappa M_3^2}$$

nalazi vrednost Mach-ovog broja ispred ventila $M_2 = 0,447$, jer je $M_2 = 1$ i $\zeta = 2$, pa zatim iz tabele 4, prema $M_2 = 0,45$, sledeći odnosi:

$$\frac{p_2}{p_*} = 2,40, \quad \lambda \frac{l_{2-*}}{D} = 1,56.$$

Kako je $p_2 = p_*$ to je strujni pritisak vazduha ispred ventila

$$p_2 = 2,40 p_* = 2,40 \cdot 1 = 2,40 \text{ bar.}$$

Članu

$$\lambda \frac{l_{1-*}}{D} = \lambda \frac{l_{1-2}}{D} + \lambda \frac{l_{2-*}}{D} = 0,02 \frac{1,866}{0,020} + 1,56 = 3,45,$$

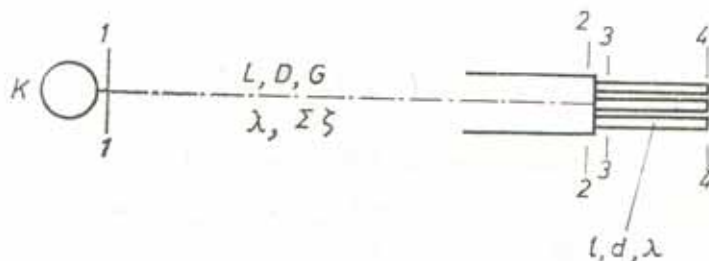
odgovaraju iz iste tabele

$$M_1 = 0,35, \quad \frac{p_1}{p_*} = 3,09.$$

Pošto se sad izračuna $p_1 = 3,09 p_* = 3,09 \cdot 1 = 3,09$ bar nalazi se totalni pritisak vazduha u rezervoaru

$$p_t = p_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\kappa / \kappa - 1} = 3,09 (1 + 0,2 \cdot 0,122)^{3,5} = 3,36 \text{ bar.}$$

71. Izračunati pritisak p_1 (bar) i protok G (kg/h) vazduha koji se od kompresora K dovodi do tri paralelno montirana cilindrična mlaznika Fuller pumpe za pneumatski transport. Prema skici poznati su sledeći podaci: $L = 90$ m, $D = 100$ mm, $l = 122$ mm, $d = 18$ mm, $\lambda = 0,02$, $\Sigma \zeta = 12$, $t_1 = t_2 = 40$ °C, $p_2 = p_{t_2}$, $M_4 = 0,8$, $p_4 = 2,2$ bar.



Rešenje:

Račun se mora početi od mlaznika. Vrednosti $M_4 = 0,8$ iz tabele 4 odgovaraju:

$$\frac{T_4}{T_*} = 1,064, \quad \frac{p_4}{p_*} = 1,29, \quad \lambda \frac{l_{4-*}}{d} = 0,07.$$

Dalje je

$$\lambda \frac{l_{3-4}}{d} = \lambda \frac{l_{3-4}}{d} + \lambda \frac{l_{4-5}}{d} = 0,02 \frac{122}{18} + 0,07 = 0,205,$$

prema kojoj se vrednosti iz iste tabele nalazi:

$$M_3 = 0,70, \quad \frac{T_3}{T_*} = 1,093, \quad \frac{p_3}{p_*} = 1,49.$$

Posle odredivanja

$$T_3 = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_3^2} = \frac{313}{1 + 0,2 \cdot 0,49} = 285 \text{ K},$$

$$T_4 = \frac{T_3/T_*}{T_3/T_*} T_3 = \frac{1,064}{1,093} 285 = 278 \text{ K},$$

$$a_4 = \sqrt{\kappa R T_4} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 278} = 333 \text{ m/s},$$

$$v_4 = M_4 a_4 = 0,8 \cdot 333 = 266 \text{ m/s},$$

$$\rho_4 = \frac{p_4}{R T_4} = \frac{220\,000}{286,8 \cdot 278} = 2,76 \text{ kg/m}^3,$$

nalazi se protok vazduha kroz mlaznike

$$G = 3 \rho_4 v_4 A_4 = 3 \cdot 2,76 \cdot 266 \cdot 0,000255 = 0,55 \text{ kg/s}.$$

Pošto se još izračunaju sledeće veličine:

$$\frac{p_3}{p_*} = \frac{p_3}{p_4} \frac{p_4}{p_*} = \frac{1,49}{1,29} 2,2 = 2,55 \text{ bar},$$

$$p_2 \approx p_{t2} = p_3 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_3^2 \right)^{\kappa/(\kappa - 1)} =$$
$$= 2,55 (1 + 0,2 \cdot 0,49)^{3,5} = 3,52 \text{ bar},$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{352\,000}{286,8 \cdot 313} = 3,92 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G}{\rho_2 A_2} = \frac{0,55}{3,92 \cdot 0,00785} = 18,9 \text{ m/s},$$

može se naći vrednost člana

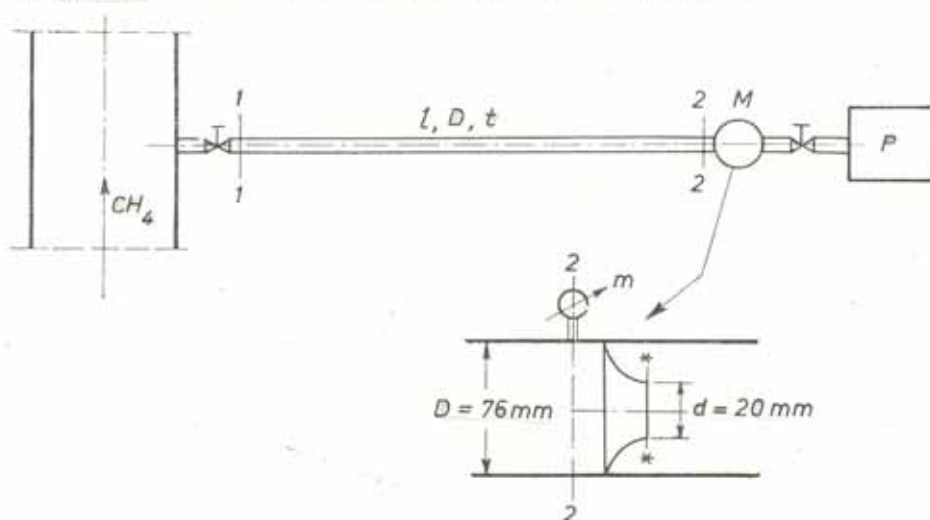
$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2 p_2} = \left(\lambda \frac{L}{D} + \Sigma \zeta \right) \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 =$$

$$= \left(0,02 \frac{90}{0,100} + 12 \right) \frac{3,92}{2} 357 = 20\,992,$$

odakle je pritisak

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 20992} = \sqrt{13,87 \cdot 10^{10}} = 3,72 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

72. Na skici je prikazan horizontalni cevovod ($D = 76 \text{ mm}$, $l = 2 \text{ km}$, $\delta/D = 0,003$, $\Sigma \zeta = 10$) kroz koji se transportuje metan ($R = 518 \text{ J/kgK}$, $\kappa = 1,3$, $t = 15^\circ \text{C}$) od magistralnog gasovoda do potrošača P . Na kraju cevovoda nalazi se mlaznik M koji reducira pritisak metana na $p_* = 2 \text{ bar}$ i ujedno služi kao merač protoka očitavanjem pritiska p_{m2} na manometru m . Izračunati totalni pritisak p_{t2} ispred mlaznika pri kome će se na njegovom kraju postići $M_* = 1$. Zatim, naći odgovarajuću količinu G (kg/h) metana i pad pritiska u cevovodu uzimajući da je $p_2 \approx p_{t2}$. Superstičljivost i gubitke u mlazniku zanemariti.



Rešenje:

Prvo se izračuna totalni pritisak metana na izlazu iz mlaznika

$$p_{t*} = p_* \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_*^2 \right)^{\kappa/(\kappa - 1)} = 2 (1 + 0,15 \cdot 1^2)^{4,32} = 3,64 \text{ bar}.$$

Pošto se zanemaruju gubici u mlazniku, to je totalni pritisak ispred mlaznika

$$p_{t2} = p_{t*} = 3,64 \text{ bar}.$$

Radi određivanja potrošnje metana treba izračunati redom sledeće veličine:

$$T_* = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_*^2} = \frac{288}{1 + 0,15 \cdot 1^2} = 250 \text{ K}$$

$$\rho_* = \frac{p_*}{R T_*} = \frac{200\,000}{518 \cdot 250} = 1,54 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_* = \sqrt{\kappa R T_*} = \sqrt{1,3 \cdot 518 \cdot 250} = 410 \text{ m/s},$$

$$G = \rho_* v_* A_* = 1,54 \cdot 410 \cdot 0,000314 = 0,199 \text{ kg/s} = 716 \text{ kg/h}.$$

Prema uslovu zadatka je $p_2 \approx p_{t_2} = 3,64 \text{ bar}$, i ovom pritisku odgovaraju:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{364\,000}{518 \cdot 288} = 2,44 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G}{\rho_2 A_2} = \frac{0,199}{2,44 \cdot 0,00454} = 18 \text{ m/s},$$

$$Re_2 = \frac{v_2 D \rho_2}{\mu} = \frac{18 \cdot 0,076 \cdot 2,44}{10,86 \cdot 10^{-6}} = 300\,000.$$

Ovoj vrednosti Re broja i relativnoj hrapavosti $0,003$ odgovara koeficijent trenja $\lambda = 0,026$. Sada se iz jednačine

$$\begin{aligned} \frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} &= \left(\lambda \frac{l}{D} + \sum \zeta \right) \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = \\ &= \left(0,026 \frac{2000}{0,076} + 10 \right) \frac{2,44}{2} \cdot 324 = 274400, \end{aligned}$$

nalazi pritisak na početku cevovoda.

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 274400} = \sqrt{32,2 \cdot 10^{10}} = 5,76 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2,$$

i, zatim, pad pritiska kao $\Delta p = p_1 - p_2 = 2,12 \text{ bar}$.

73. Za grejanje jedne hale u nekoj fabrici troši se $200 \text{ m}^3/\text{h}$ propan-butan gasa ($R = 158 \text{ J/kgK}$, $c_p = 1634 \text{ J/kgK}$, $\kappa = 1,107$) koji se u tečnom stanju iz rezervoara ispušta u isparivač, i odavde horizontalnim neizolovanim cevovodom ($D = 50 \text{ mm}$, $l = 100 \text{ m}$, $\alpha_w = 4,4 \text{ J/m}^2\text{sK}$) transportuje pri stalnoj temperaturi $t_w = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ u uređaj za mešanje sa vazduhom pre sagorevanja. Odrediti:

a) temperaturu t_1 propan-butan gasa na početku cevovoda (odmah iza isparivača) ako pritisak i temperatura mešavine na kraju cevovoda treba da budu $p_2 = 3 \text{ bar}$ i $t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Viskoznost i koeficijent provođenja toplote mešavine na temperaturi t_2 iznose $\mu = 7,55 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ i $\lambda_w = 0,015 \text{ J/msK}$. Koeficijent α_t ($\text{J/m}^2\text{sK}$) prelaza toplote sa mešavine na cevovod može da se računa prema obrascu $Nu = 0,116 (Re^{2/3} - 125) \cdot Pr^{1/3}$, u kome se Re i Pr određuju za temperaturu t_2 ,

b) prečnik mlaznika postavljenog na kraju cevovoda, kroz koji ističe propan-butan gas u uređaj za mešanje sa vazduhom, ako pritisak mešavine na izlazu iz mlaznika treba da iznosi 2 bar . Ovaj deo računa obaviti sa $p_t \approx p_2$ i $t_t \approx t_2$. Gubitke u mlazniku zanemariti.

Rešenje:

a) Radi određivanja temperature propan-butan gasa na početku cevovoda moraju se izračunati sledeće veličine:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R T_0} = \frac{101\,325}{158 \cdot 288} = 2,23 \text{ kg/m}^3,$$

$$G = \rho_0 q_0 = \frac{2,23 \cdot 200}{3600} = 0,124 \text{ kg/s} = 446 \text{ kg/h.}$$

$$v_z \rho_z = \frac{G}{A} = \frac{0,124}{0,00196} = 63,5,$$

$$Re_z = \frac{v_z D \rho_z}{\mu_z} = \frac{63,5 \cdot 0,050}{7,55 \cdot 10^{-6}} = 420\,000,$$

$$Pr = \frac{\mu_z c_p}{\lambda_n} = \frac{7,55 \cdot 10^{-6} \cdot 1634}{0,015} = 0,815,$$

$$Nu = 0,116 (420\,000^{2/3} - 125) \cdot 0,815^{1/3} = 0,116 (5500 - 125) \cdot 0,932 =$$

$$= 0,116 \cdot 5375 \cdot 0,932 = 582,$$

$$\alpha_t = \frac{Nu \lambda_n}{D} = \frac{582 \cdot 0,015}{0,050} = 175 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$k \approx \frac{\alpha_t \alpha_a}{\alpha_t + \alpha_a} = \frac{175 \cdot 4,4}{175 + 4,4} = 4,3 \text{ J/m}^2\text{sK},$$

$$a l = \frac{k D \pi l}{G c_p} = \frac{4,3 \cdot 0,050 \cdot 3,14 \cdot 100}{0,124 \cdot 1634} = 0,336,$$

Prema tome, temperatura mešavine na početku cevovoda je:

$$t_1 = t_a + (t_2 - t_a) e^{a l} = -20 + (10 + 20) 2,72^{0,336} = 20,8 \text{ }^\circ\text{C.}$$

b) Kako je $p_t \approx p_2 = 3 \text{ bar}$ i $t_t \approx t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, to se uz zanemarivanje gubitaka u mlazniku, iz jednačine

$$p_t = p \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right)^{\kappa / \kappa - 1}$$

nalazi kvadrat Mach-ovog broja na izlazu iz mlaznika

$$M^2 = \frac{2}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{p_t}{p} \right)^{\kappa / \kappa - 1} - 1 \right] = \frac{2}{0,107} \left[\left(\frac{3}{2} \right)^{0,097} - 1 \right] = 0,75.$$

Posle ovoga, mogu da se odrede i ostale veličine na izlazu iz mlaznika:

$$T = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2} = \frac{283}{1,04} = 272 \text{ K},$$

$$a = \sqrt{\kappa R T} = \sqrt{1,107 \cdot 158 \cdot 272} = 216 \text{ m/s},$$

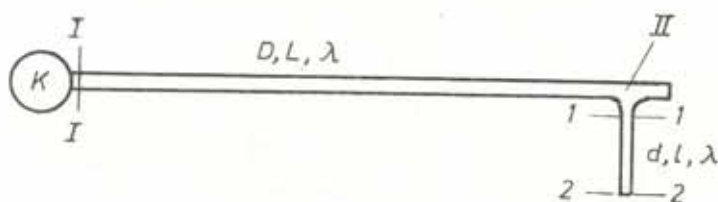
$$v = M a = 0,865 \cdot 216 = 187 \text{ m/s},$$

$$\rho = \frac{p}{R T} = \frac{200\,000}{158 \cdot 272} = 4,65 \text{ kg/m}^3.$$

Dakle, prečnik mlaznika treba da bude

$$d = \sqrt{\frac{4G}{\rho \pi v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,124}{4,65 \cdot 3,14 \cdot 187}} = 0,0136 \text{ m} = \underline{13,6 \text{ mm}}.$$

74. Kroz horizontalni cevovod ($D = 50 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ m}$) dovodi se iz kompresora vazduh do mlaznika ($d = 20 \text{ mm}$, $l = 200 \text{ mm}$) Fuller pumpe koja služi za pneumatski transport sipkavih materijala. Na kraju mlaznika, radi pneumatskog transporta, potrebno je ostvariti pritisak $p_2 = 2 \text{ bar}$ i Mach-ov broj $M_2 = 0,7$. Izračunati pritisak vazduha na ulazu u cevovod i protok G (kg/h), ako je njegova temperatura u cevovodu stalna i iznosi $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ a koeficijent trenja $\lambda = 0,02$. Uzeti da je pritisak na kraju cevovoda jednak totalnom pritisku na ulazu u mlaznik.



Rešenje:

Prema oznakama na skici i vrednosti Mach-ovog broja $M_2 = 0,7$ iz tabele 4 sleduje:

$$\frac{p_2}{p_0} = 1,49, \quad \lambda \frac{l_2-0}{d} = 0,21.$$

Vrednosti člana

$$\lambda \frac{l_1-0}{d} = \lambda \frac{l_1-2}{d} + \lambda \frac{l_2-0}{d} = 0,02 \frac{200}{20} + 0,21 = 0,41,$$

iz iste tabele odgovara

$$M_1 = 0,62, \quad \frac{p_1}{p_0} = 1,70.$$

Dakle, pritisak vazduha na početku mlaznika je

$$p_1 = \frac{p_1}{p_0} p_2 = \frac{1,70}{1,49} 2 = 2,28 \text{ bar},$$

pa je totalni pritisak na tom mestu

$$p_{t1} = p_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\kappa/(\kappa-1)} = 2,28 (1 + 0,2 \cdot 0,62^2)^{3,5} = 2,95 \text{ bar.}$$

Dalje je

$$T_1 = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2} = \frac{323}{1 + 0,2 \cdot 0,62^2} = 300 \text{ K,}$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{228\,000}{286,8 \cdot 300} = 2,65 \text{ kg/m}^3,$$

$$a_1 = \sqrt{\kappa R T_1} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 300} = 347 \text{ m/s,}$$

$$v_1 = M_1 a_1 = 0,62 \cdot 347 = 215 \text{ m/s,}$$

$$G = \rho_1 v_1 A_1 = 2,65 \cdot 215 \cdot 0,000314 = 0,179 \text{ kg/s} = 644 \text{ kg/h.}$$

Prema uslovu zadatka je $p_{II} \approx p_{t1} = 2,95 \text{ bar}$ pa je

$$\rho_{II} = \frac{p_{II}}{R T_{II}} = \frac{295\,000}{286,8 \cdot 323} = 3,18 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_{II} = \frac{G}{\rho_{II} A_{II}} = \frac{0,179}{3,18 \cdot 0,00196} = 28,7 \text{ m/s,}$$

$$\frac{p_1^2 - p_{II}^2}{2p_{II}} = \lambda \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho_{II} v_{II}^2 = 0,02 \frac{100}{0,050} \frac{3,18}{2} \cdot 825 = 52492,$$

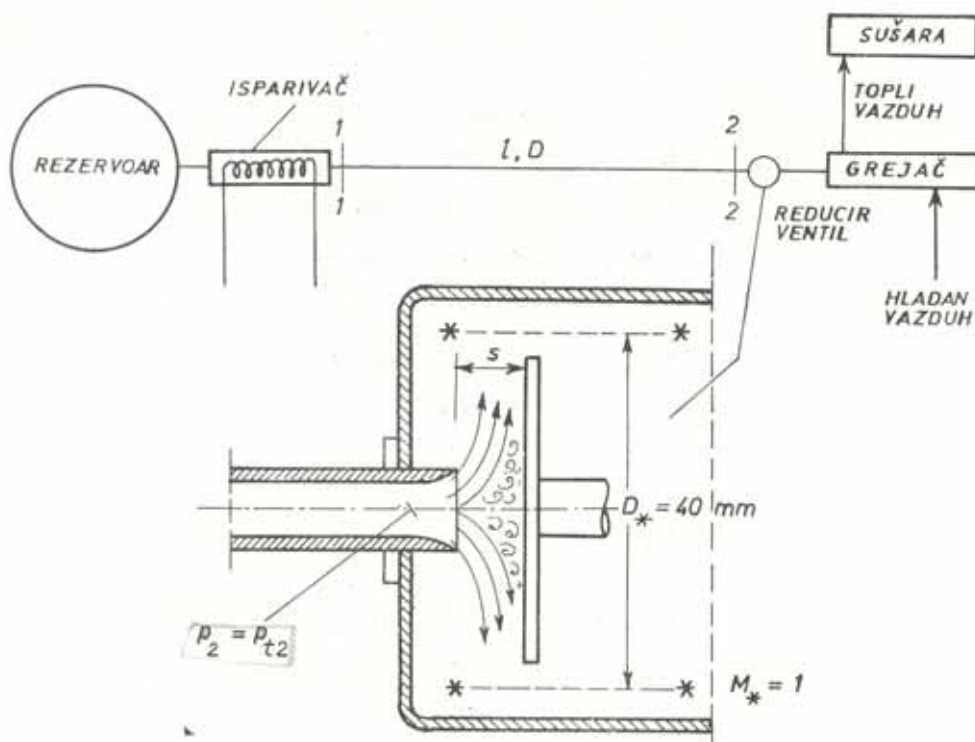
$$p_I = \sqrt{p_{II}^2 + 2p_{II} \cdot 52492} = \sqrt{(8,7 + 3,1) 10^{10}} = 3,44 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

75. Za potrebe jedne sušare zagrevanje vazduha obavlja se u grejaču koji je podešen za loženje propanom i metanom. Kada se koristi propan, tada on u tečnom stanju ističe iz rezervoara u isparivač i dalje kao gas struji, pri konstantnoj temperaturi od 15°C do gorionika u grejaču, kroz horizontalni cevovod prečnika $D = 38 \text{ mm}$, dužine $l = 1120 \text{ m}$ i relativne hrapavosti $\delta/D = 0,004$. Na kraju cevovoda postavljen je reducir-ventil koji održava konstantan pritisak ispred grejača. Količina toplote koja se troši na zagrevanje vazduha iznosi $\dot{Q} = 1,74 \cdot 10^6 \text{ J/s}$. Treba odrediti:

a) pritisak p_2 propana na kraju cevovoda ako je njegova vrednost na početku cevovoda $p_1 = 3 \text{ bar}$; potrebni podaci o propanu su: $R = 188,4 \text{ J/kgK}$, $H_d = 46,4 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$, $\mu = 7,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ na 15°C i $\kappa = 1,13$;

b) pritisak p_1 metana kada se ovaj koristi u gasnom stanju umesto propana, iz uslova da njegov pritisak na kraju cevovoda bude isti kao i pritisak propana i da i metan struji pri konstantnoj temperaturi $t = 15^\circ\text{C}$; potrebni podaci o metanu su: $R = 518 \text{ J/kgK}$, $H_d = 46,9 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$, $\mu = 9,91 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ na 15°C i $\kappa = 1,31$;

c) rasipanje „s“ od kraja cevi do prigušnog diska reducir-ventila za oba slučaja, ako je totalna temperatura i propana i metana $t_t = 15^\circ\text{C}$. Koefficient kontrakcije mlaza određen je odnosom $A_m^*/A_* = 0,6$, a koefficient brzine $\varphi = 0,8$. Ostali podaci o ventilu dati su na skici.



Rešenje:

a) Kada se za loženje koristi propan biće:

$$\underline{G} = \frac{Q}{H_d} = \frac{1,74 \cdot 10^6}{46,4 \cdot 10^6} = 0,0375 \text{ kg/s,}$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{300\,000}{188,4 \cdot 288} = 5,53 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_1 = \frac{G}{\rho_1 A} = \frac{0,0375}{5,53 \cdot 0,001135} = 6 \text{ m/s,}$$

$$v_1 = \frac{\mu}{\rho_1} = \frac{7,9 \cdot 10^{-6}}{5,53} = 1,43 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

$$Re_1 = \frac{v_1 D}{\nu_1} = \frac{6 \cdot 0,038}{1,43 \cdot 10^{-6}} = 160\,000.$$

Ovoj vrednosti Re broja i relativnoj hrapavosti 0,004 odgovara koeficijent trenja $\lambda = 0,028$ iz dijagrama 1. Sad se iz jednačine

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = 0,028 \frac{1120}{0,038} \frac{5,53}{2} 36 = 82146,$$

dobija pritisak propana na kraju cevovoda:

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - 2p_1 \cdot 82146} = \sqrt{(9 - 4,9) 10^{10}} = 2,02 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

b) Za određivanje pritiska p_1 metana na početku cevovoda, moraju se prethodno izračunati sledeće veličine:

$$G = \frac{Q}{H_d} = \frac{1,74 \cdot 10^6}{46,9 \cdot 10^6} = 0,0371 \text{ kg/s},$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} = \frac{202000}{518 \cdot 288} = 1,35 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G}{\rho_2 A} = \frac{0,0371}{1,35 \cdot 0,001135} = 23,3 \text{ m/s},$$

$$\nu_2 = \frac{\mu}{\rho_2} = \frac{9,91 \cdot 10^{-6}}{1,35} = 7,39 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re_2 = \frac{v_2 D}{\nu_2} = \frac{23,3 \cdot 0,038}{7,39 \cdot 10^{-6}} = 120000.$$

Vrednosti $Re_2 = 120\,000$ i $\delta/D = 0,004$ pri strujanju metana odgovara koeficijent trenja $\lambda = 0,029$ iz dijagrama 1. Prema tome, iz jednačine

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 = 0,029 \frac{1120}{0,038} \frac{1,35}{2} 543 = 310\,900,$$

nalazi se pritisak metana na početku cevovoda

$$\begin{aligned} p_1 &= \sqrt{p_2^2 + 2p_2 \cdot 310900} = \sqrt{4 \cdot 10^{10} + 4 \cdot 10^5 \cdot 310900} = \\ &= \sqrt{(4 + 12,44) 10^{10}} = 4,05 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = \underline{4,05 \text{ bar}}. \end{aligned}$$

c) Istovremeno će se dati vrednosti odgovarajućih veličina i za propan i za metan. Najpre se navode obrasci pa, zatim, vrednosti za propan i u zagradama odgovarajuće vrednosti za metan. Određivanje rastojanja „s“ ide ovim redom:

$$p_* = \frac{p_{t2}}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_*^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}} = 1,162 \text{ bar (1,092 bar)},$$

$$T_* = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_*^2} = 270 \text{ K (250 K)},$$

$$\rho_* = \frac{p_*}{R T_*} = 2,28 \text{ kg/m}^3 \text{ (0,83 kg/m}^3\text{)},$$

$$v_* = \varphi \sqrt{\kappa R T_*} = 190 \text{ m/s (327 m/s)},$$

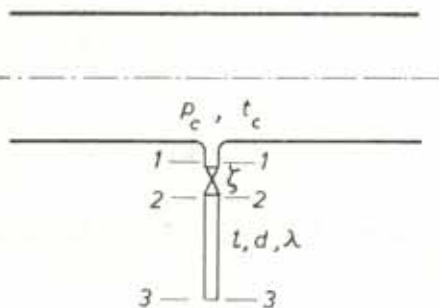
$$A_m^* = \frac{G}{\rho_* v_*} = 86,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ (137} \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{)},$$

$$A_* = \frac{A_m^*}{0,6} = 145 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ (228} \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{)},$$

$$s = \frac{A_*}{D_* \pi} = 1150 \cdot 10^{-6} \text{ m (1800} \cdot 10^{-6} \text{ m)}.$$

Dakle, kada se za grejanje troši propan biće $s = 1,15 \text{ mm}$, odnosno $s = 1,80 \text{ mm}$ kada se troši metan.

76. Magistralni gasovod za metan zaštićen je u jednom preseku ventilom sigurnosti koji je postavljen u cevi prečnika $d = 50 \text{ mm}$, i dužine $l = 1,5 \text{ m}$. Zanemarujući pad pritiska na ulazu u cev ventila, izračunati pritisak metana u odgovarajućem preseku gasovoda uzimajući da je $p_e = p_t$ i da ventil tog trenutka ispušta iz gasovoda $4,2 \text{ kg/s}$ metana. Ostali podaci su: $t_e = t_t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $R = 518 \text{ J/kgK}$, $\lambda = 0,020$, $\zeta = 2$, $\kappa = 1,3$ i $M_g = 1$.



Rešenje:

Strujne veličine metana na kraju cevi ventila imaju vrednosti:

$$T_3 = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_3^2} = \frac{293}{1 + 0,15 \cdot 1^2} = 254 \text{ K},$$

$$v_3 = a_3 = \sqrt{\kappa R T_3} = \sqrt{1,3 \cdot 518 \cdot 254} = 414 \text{ m/s},$$

$$\rho_3 = \frac{G}{v_3 A} = \frac{4,2}{414 \cdot 0,00196} = 5,13 \text{ kg/m}^3,$$

$$p_3 = \rho_3 R T_3 = 5,13 \cdot 518 \cdot 254 = 6,75 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Posle izračunavanja člana

$$\lambda \frac{l}{d} = 0,02 \frac{1,5}{0,050} = 0,6,$$

pročitaju se prema njegovoj vrednosti iz tabele 5

$$M_2 = 0,60, \quad \frac{p_2}{p_2} = \frac{p_2}{p_w} = 1,741.$$

Prema tome, pritisak metana iza ventila je

$$p_2 = 1,741 \cdot 6,75 = 11,8 \text{ bar.}$$

Iz leve jednakosti sledeće veze

$$\frac{M_1 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}}{M_2 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2}} = \frac{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_1^2}{1 + \kappa M_2^2} = \frac{p_2}{p_1}$$

dobija se, za $\zeta = 2$ i $M_2 = 0,60$, jednačina

$$M_1^4 + 6,66 M_1^2 - 1,175 = 0$$

čije je rešenje $M_1 = 0,412$. Sada se iz desne strane iste veze nalazi odnos

$$\frac{p_1}{p_2} = 1 + \kappa M_2^2 = 1 + 1,3 \cdot 0,36 = 1,468$$

odakle je pritisak metana ispred ventila

$$p_1 = 1,468 p_2 = 1,468 \cdot 11,8 = 17,2 \text{ bar.}$$

Najzad, pritisak metana u gasovodu, u preseku gde je ugrađena cev sa ventilom, iznosi:

$$\begin{aligned} p_0 = p_t = p_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2\right)^{\kappa/\kappa - 1} = \\ = 17,2 (1 + 0,15 \cdot 0,17)^{4,34} = 19,4 \text{ bar.} \end{aligned}$$

77. Na kraju horizontalnog cevovoda ($D = 1000$ mm, $L = 1$ km) nalaze se tri cilindrična mlaznika ($d = 25$ mm, $l = 500$ mm) kroz koje ističe $G = 3300$ kg/h vazduha pritiska 3 bar i temperature 20°C . Uzimajući da je pritisak vazduha na kraju cevovoda jednak totalnom pritisku na ulazu u mlaznike, odrediti pritisak i temperaturu vazduha na početku cevovoda. Napomena: strujanje u mlaznicima je adijabatno, u cevovodu izotermno, pad pritiska i pad temperature na ulazu u mlaznike zanemariti. Zbir koeficijenata lokalnih otpora u cevovodu iznosi $\sum \zeta = 10$, koeficijent trenja je isti i za cevovod i za mlaznike i ima vrednost $\lambda = 0,025$.

Rešenje:

Za poznate podatke na izlazu iz mlaznika dobija se:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{300\,000}{286,8 \cdot 293} = 3,57 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G}{3\rho_2 A_2} = \frac{0,882}{3 \cdot 3,57 \cdot 0,00049} = 171 \text{ m/s},$$

$$a_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 293} = 342 \text{ m/s},$$

$$M_2 = \frac{v_2}{a_2} = \frac{171}{342} = 0,50.$$

Ovoj vrednosti Mach-ovog broja odgovaraju iz tabele 4:

$$\frac{T_2}{T_*} = 1,143, \quad \frac{p_2}{p_*} = 2,14, \quad \lambda \frac{l_{2-*}}{d} = 1,07.$$

Kada se nađe vrednost člana

$$\lambda \frac{l_{1-*}}{d} = \lambda \frac{l_{1-2}}{d} + \lambda \frac{l_{2-*}}{d} = 0,025 \frac{500}{25} + 1,07 = 1,57,$$

može se iz iste tabele odrediti

$$M_1 = 0,45, \quad \frac{T_1}{T_*} = 1,153, \quad \frac{p_1}{p_*} = 2,385.$$

Prema tome, veličine na ulazu u mlaznike su:

$$p_1 = \frac{p_1}{p_*} p_2 = \frac{2,385}{2,140} \cdot 3 = 3,34 \text{ bar},$$

$$T_1 = \frac{T_1}{T_*} T_2 = \frac{1,153}{1,143} \cdot 293 = 295,5 \text{ K},$$

$$\underline{p_{t1}} = p_1 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2 \right)^{\kappa/(\kappa - 1)} = 3,34 (1 + 0,2 \cdot 0,45^2)^{3,5} = 3,82 \text{ bar}.$$

Prema uslovu zadatka je $p_{II} = p_{I}$ i $T_{II} = T_1$, gde II označava presek na kraju cevovoda.

Pošto se izračuna specifična gustina i brzina vazduha na kraju cevovoda,

$$\rho_{II} = \frac{p_{II}}{R T_{II}} = \frac{382000}{286,8 \cdot 295,5} = 4,51 \text{ kg/m}^3, \checkmark$$

$$v_{II} = \frac{G}{\rho_{II} A_{II}} = \frac{0,897}{4,51 \cdot 0,00785} = 25,5 \text{ m/s}, \checkmark$$

nalazi se pritisak na početku cevovoda iz jednačine:

$$\begin{aligned} \frac{p_I^2 - p_{II}^2}{2p_{II}} &= \left(\lambda \frac{L}{D} + \sum \zeta \right) \frac{1}{2} \rho_{II} v_{II}^2 = \\ &= \left(0,025 \frac{1000}{0,100} + 10 \right) \frac{4,51}{2} \cdot 650 = 380000, \\ p_I &= \sqrt{p_{II}^2 + 2p_{II} \cdot 380000} = \sqrt{14,6 + 29} \cdot 10^{10} = \\ &= 6,6 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 6,6 \text{ bar}. \end{aligned}$$

Strujanje u cevovodu je izotermno pa je $T_I = T_{II} = 295,5 \text{ K}$.

78. Kroz kratku cev prečnika 40 mm i dužine 2 m ističe vazduh u atmosferu velikom brzinom. Izračunati protok G (kg/h) vazduha ako su: $p_1 = 4 \text{ bar}$, $\lambda = 0,02$, $t_2 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ i $M_2 = 0,8$ (indeks 1 označava početak, a 2 kraj cevi). Koliki je pritisak, temperatura i brzina vazduha na udaljenju 1,16 m od početka cevi?

Rešenje:

Vrednosti $M_2 = 0,8$ iz tabele 4 odgovaraju:

$$\frac{T_2}{T_*} = 1,064, \quad \frac{p_2}{p_*} = 1,29, \quad \frac{v_2}{v_*} = 0,825, \quad \lambda \frac{l_{2-*}}{D} = 0,07.$$

Kako je

$$\lambda \frac{l_{1-*}}{D} = \lambda \frac{l_{1-2}}{D} + \lambda \frac{l_{2-*}}{D} = 0,02 \frac{2000}{40} + 0,07 = 1,07,$$

to se iz iste tabele, prema ovoj vrednosti, nalaze:

$$M_1 = 0,50, \quad \frac{T_1}{T_*} = 1,143, \quad \frac{p_1}{p_*} = 2,14, \quad \frac{v_1}{v_*} = 0,535.$$

Dalje je

$$\underline{p_2} = \frac{\underline{p_2}}{\underline{p_*}} p_1 = \frac{1,29}{2,14} 4 = 2,41 \text{ bar,}$$

$$\underline{\rho_2} = \frac{\underline{p_2}}{R T_2} = \frac{241000}{286,8 \cdot 253} = 3,32 \text{ kg/m}^3,$$

$$a_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 253} = 318 \text{ m/s,}$$

$$v_2 = M_2 a_2 = 0,8 \cdot 318 = 254 \text{ m/s,}$$

$$G = \underline{\rho_2} v_2 A = 3,32 \cdot 254 \cdot 0,00126 = 1,06 \text{ kg/s} = 3827 \text{ kg/h.}$$

Neka „x“ označava presek cevi gde se traže pritisak, temperatura i brzina vazduha. Tada je

$$\begin{aligned} \lambda \frac{l_{x-0}}{D} &= \lambda \frac{l_{x-z}}{D} + \lambda \frac{l_{z-0}}{D} = \\ &= 0,02 \frac{2 - 1,16}{0,04} + 0,07 = \underline{0,49}. \end{aligned}$$

Ovoj vrednosti iz tabele 4 odgovaraju:

$$\underline{M_x} = 0,60, \quad \frac{T_x}{T_*} = 1,119, \quad \frac{p_x}{p_*} = 1,76, \quad \frac{v_x}{v_*} = 0,635.$$

Prema tome, tražene veličine imaju vrednosti:

$$\underline{p_x} = \frac{\underline{p_x}}{\underline{p_*}} p_1 = \frac{1,76}{2,14} 4 = 3,3 \text{ bar,}$$

$$T_x = \frac{T_x}{T_*} T_2 = \frac{1,119}{1,064} 253 = 266 \text{ K,}$$

$$v_x = \frac{v_x}{v_*} v_2 = \frac{0,635}{0,825} 254 = 196 \text{ m/s.}$$

79. Na kraju cilindričnog mlaznika ($D = 50$ mm, $l = 350$ mm, $\lambda = 0,02$) izmereni su brzina, pritisak i temperatura vazduha i njihove vrednosti su: $v_2 = 384$ m/s, $p_2 = 4$ bar, $t_2 = -17$ °C. Odrediti pritisak p_1 (bar) na početku mlaznika i protok G (kg/h) vazduha u ovom slučaju.

Rešenje:

Kako je brzina zvuka na kraju mlaznika

$$a_2 = \sqrt{\kappa R T_2} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 256} = 320 \text{ m/s,}$$

to je odgovarajući Mach-ov broj

$$M_2 = \frac{v_2}{a_2} = \frac{384}{320} = 1,2.$$

Ovo znači da mora biti $M_1 > M_2$ i da je dužina cevi dovoljna, nadzvučno strujanje bi se usporilo do brzine zvuka $v_* = a_*$. Prema tome, vrednosti $M_2 = 1,2$ iz tabele 4 odgovaraju:

$$\left(\frac{p_2}{p_*} = 0,80, \quad \lambda \frac{l_{2-*}}{D} = 0,03. \right)$$

Vrednosti člana

$$\lambda \frac{l_{1-*}}{D} = \lambda \frac{l_{1-2}}{D} + \lambda \frac{l_{2-*}}{D} = 0,02 \frac{350}{50} + 0,03 = 0,17,$$

prema istoj tabeli odgovaraju:

$$M_1 = 1,6, \quad \frac{p_1}{p_*} = 0,56.$$

Prema tome, pritisak vazduha na početku mlaznika iznosi

$$p_1 = \frac{p_1}{p_*} \frac{p_*}{p_2} p_2 = \frac{0,56}{0,80} 4 = 2,8 \text{ bar.}$$

Posle određivanja veličina:

$$T_1 = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2} = \frac{330}{1 + 0,2 \cdot 1,6^2} = 218 \text{ K,}$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{280000}{286,8 \cdot 218} = 4,48 \text{ kg/m}^3,$$

$$a_1 = \sqrt{\kappa R T_1} = \sqrt{1,4 \cdot 286,8 \cdot 218} = 294 \text{ m/s},$$

$$v_1 = M_1 a_1 = 1,6 \cdot 294 = 472 \text{ m/s},$$

nalazi se protok vazduha kao

$$G = \rho_1 v_1 A = 4,48 \cdot 472 \cdot 0,00196 = 4,14 \text{ kg/s} = 14900 \text{ kg/h}.$$

**NEIZOTERMNO I ADIJABATSKO STRUJANJE
VODENE PARE**

P A R O V O D I

80. Izračunati količinu vodene pare G_p (t/h) koja se troši na zagrevanje sirove nafte u sabirnom rezervoaru, ako kotao proizvodi pregrejanu paru pritiska $p = 15$ bar i temperature $t = 250$ °C. Gubitak toplote kroz rezervoar iznosi 30% od ukupno potrebne količine toplote. Entalpija ulazne i izlazne pare je $i_p = 2920$ kJ/kg i $i_k = 620$ kJ/kg. Ostali podaci su: proizvod koeficijenta prolaza toplote i srednjeg prečnika naftovoda je $k D_m = 0,435$ J/msK, dužina naftovoda $l = 30$ km, srednja specifična toplota nafte $c_n = 1885$ J/kgK, temperatura nafte na početku i na kraju naftovoda $t_1 = 40$ °C i $t_2 = 20$ °C.

Rešenje:

Za naftovod je

$$a l = \ln \frac{t_1}{t_2} = \ln \frac{40}{20} = 0,693,$$

pa je njegov kapacitet

$$G_n = \frac{k D_m \pi l}{a l c_n} = \frac{0,435 \cdot 3,14 \cdot 30\,000}{0,693 \cdot 1885} = 31,4 \text{ kg/s} = 113 \text{ t/h.}$$

Potrebna količina toplote, koja se troši na zagrevanje nafte od t_2 do t_1 i na gubitke kroz rezervoar, iznosi

$$Q = G_n c_n (t_1 - t_2) + 0,30 \cdot Q,$$

odnosno

$$Q = \frac{G_n c_n (t_1 - t_2)}{0,7} = \frac{31,4 \cdot 1885 \cdot 20}{0,7} = 1,69 \cdot 10^6 \text{ J/s.}$$

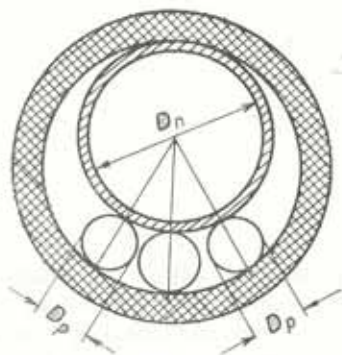
Tražena količina pare je

$$G_p = \frac{Q}{i_p - i_k} = \frac{1,69 \cdot 10^6}{2,3 \cdot 10^6} = 0,735 \text{ kg/s} = 2,65 \text{ t/h.}$$

81. Naftovod dužine $l_n = 2$ km i prečnika $D_n = 200$ mm, kroz koji se transportuje 120 t/h sirove nafte iz tankera u rafineriju, zagreva se usputno vodenom parom koja struji kroz dve cevi prečnika $D_p = 50$ mm, priljubljene uz naftovod sa donje strane. Između cevi za paru smeštena je povratna cev za kondenzat. Sve četiri cevi obavijene su zajedničkom izolacijom kao što je prikazano na skici. Srednja razlika nivoa nafte u rezervoaru i u tankeru iznosi $H_g = 10$ m. Treba izračunati:

a) snagu pumpe koja potiskuje naftu iz tankera u rezervoar rafinerije, ako je temperatura nafte 50 °C i odgovarajuća viskoznost 20 °E, srednja gustina nafte $\rho = 900$ kg/m³ i koeficijent korisnosti pumpe $\eta_p = 0,75$. Lokalni gubici određeni

su zbirnim koeficijentom $\Sigma \zeta = 12$. Pad temperature u naftovodu može da se zanemari zbog usputnog zagrevanja.



(b) pad pritiska u parovodima kroz koje struji para čije je stanje na ulazu u parovode: $p_1 = 10$ bar, $t_1 = 180$ °C, $\rho_1 = 5$ kg/m³ i $r = 2020$ kJ/kg. Uzeti da se sva para kondenzuje do kraja parovoda. Količina toplote potrebna za usputno zagrevanje naftovoda i gubitke kroz izolaciju iznosi $Q = 408$ kJ/s.

Napomena: U parovodima se zanemaruju lokalni gubici i geodezijska visina između početka i kraja parovoda. Apsolutna hrapavost cevovoda za paru je 0,1 mm.

Rešenje:

a) Pad pritiska u naftovodu iznosi

$$\Delta p = \left(\lambda \frac{l_n}{D_n} + \Sigma \zeta \right) \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g H_{gp}$$

gde su:

$$q = \frac{G}{\rho} = \frac{33,4}{900} = 0,037 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v = \frac{q}{A} = \frac{0,0370}{0,0314} = 1,18 \text{ m/s},$$

$$\nu \approx 7,60 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 7,60 \cdot 20 = 152 \text{ cSt} = 152 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re = \frac{v D}{\nu} = \frac{1,18 \cdot 0,200}{152 \cdot 10^{-6}} = 1550, < 2300 - \text{Re}$$

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1550} = 0,0413.$$

Prema tome je

$$\begin{aligned} \Delta p &= \left(0,0413 \frac{2000}{0,200} + 12 \right) \frac{900}{2} 1,39 + 900 \cdot 9,81 \cdot 10 = \\ &= 265837,5 + 88290 = 354127,5 \text{ N/m}^2 = 3,54 \text{ bar}, \end{aligned}$$

pa je snaga za pogon pumpe

$$P = \frac{q \Delta p}{1000 \cdot \eta_{p}} = \frac{0,037 \cdot 354 \cdot 127,5}{1000 \cdot 0,75} = 17,5 \text{ kW.}$$

b) Pošto se sva para kondenzuje do kraja cevovoda, to je $G_2 = 0$ i $\varphi_p = 1/3$ pa je količina pare na početku cevovoda

$$G_1 = \frac{Q}{r} = \frac{408 \ 000}{2020000} = 0,202 \text{ kg/s} = 725,4 \text{ kg/h.}$$

Dalje je $\mu_1 = 18,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ iz tabele 6 za $t_1 = 180 \text{ }^\circ\text{C}$ i $p_1 = 10 \text{ bar}$. Sad se mogu naći sledeće veličine:

$$v_1 = \frac{\mu_1}{\rho_1} = \frac{18,6 \cdot 10^{-6}}{5} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$v_1 = \frac{G_1}{2\rho_1 A_p} = \frac{0,202}{2 \cdot 5 \cdot 0,00196} = 10,2 \text{ m/s},$$

$$Re_1 = \frac{v_1 D_p}{\nu_1} = \frac{10,2 \cdot 0,050}{3,7 \cdot 10^{-6}} = 135 \ 000,$$

$$\frac{\delta}{D_p} = \frac{0,1}{50} = 0,02, \quad \lambda = 0,025 \text{ (iz dijagrama 1).}$$

Pritisak na kraju parovoda nalazi se iz jednačine:

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2\rho_1 \nu_1} = \lambda \frac{l_p}{D_p} \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 \varphi_p =$$

$$= 0,025 \frac{2000}{0,05} \frac{5}{2} 104 \cdot \frac{1}{3} = 86666,$$

i njegova vrednost je

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - 2\rho_1 \cdot 86666} = \sqrt{82,7 \cdot 10^{10}} = 9,1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Dakle, pad pritiska u parovodu iznosi (isti je za oba parovoda jer su oni paralelni):

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 10 - 9,1 = 0,9 \text{ bar.}$$

82. Kroz parovod prečnika $D = 250 \text{ mm}$ i dužine $l = 1,8 \text{ km}$ transportuje se suva vodena para. Manometri na početku i na kraju cevovoda pokazuju pritiske 4 bar i 3 bar. Atmosferski pritisak je 1 bar. Osim toga, na kraju parovoda izmerena je količina kondenzata $\Delta G = 0,23 \text{ kg/s}$. Ostali podaci o pari su: apsolutnim pritiscima p_1 na početku i p_2 na kraju parovoda odgovaraju temperature $t_1 = 151 \text{ }^\circ\text{C}$ i $t_2 = 146 \text{ }^\circ\text{C}$ i gustina $\rho_1 = 2,32 \text{ kg/m}^3$. Srednjoj temperaturi $t_m = 148,5 \text{ }^\circ\text{C}$ odgovara srednja toplota isparavanja $r_m = 2110 \text{ kJ/kg}$. Spoljna temperatura je $t_a =$

$= 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i koeficijent trenja $\lambda = 0,020$. Zanemarujući lokalne otpore, treba da se odredi:

- a) protok G_1 pare na početku parovoda,
 b) proizvod $k D_m$, gde je k ($\text{J/m}^2\text{sK}$) koeficijent prolaza toplote kroz parovod, a D_m (m) srednji prečnik cevovoda koji je izolovan.

Rešenje:

- a) Iz izraza koji povezuje pritiske p_1 i p_2 ,

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \frac{\lambda l G_1^2}{2D \rho_1 A^2 G_1} = \frac{\lambda l G_1 (G_1 - \Delta G)}{2D \rho_1 A^2},$$

sleduje

$$\begin{aligned} G_1^2 - \Delta G \cdot G_1 &= \frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} \frac{2D \rho_1 A^2}{\lambda l} = \\ &= \frac{(25 - 16) 10^{10}}{2 \cdot 5 \cdot 10^5} \frac{2 \cdot 0,250 \cdot 2,32 \cdot 0,049^2}{0,020 \cdot 1800} = 6,96, \end{aligned}$$

odnosno, dobija se kvadratna jednačina

$$G_1^2 - 0,23 G_1 - 6,96 = 0.$$

Samo jedno rešenje ove jednačine dolazi u obzir i ono je

$$G_1 = 2,75 \text{ kg/s} = 9900 \text{ kg/h.}$$

- b) Proizvod $k D_m$, za $\Delta t_m \approx t_m$, iznosi:

$$k D_m = \frac{\Delta G r_m}{\pi l \Delta t_m} = \frac{0,23 \cdot 2110000}{3,14 \cdot 1800 \cdot 148,5} = 0,58 \text{ J/msK.}$$

83. Pregrejana vodena para iz kotla, pritiska 30 bar i temperature $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ulazi u dobro izolovan parovod brzinom 145 m/s . Cevovod je kratak, pregrejana vodena para ponaša se kao idealan gas. Odrediti temperaturu pare na kraju cevovoda za slučaj da je pritisak zbog gubitka opao na 17 bar . Može se uzeti da je za ovu paru $c_p = 2530 \text{ J/kgK}$ i $\kappa = 1,3$.

Rešenje:

Temperatura pare na kraju cevovoda izračunava se iz jednačine

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2},$$

kad se prethodno odrede T_1 , M_1 , M_2 . Temperatura na početku parovoda iznosi

$$T_1 = T_t - \frac{v_1^2}{2c_p} = 573 - \frac{21\,025}{2 \cdot 2\,530} = 569 \text{ K.}$$

Posle izračunavanja brzine zvuka na početku parovoda,

$$a_1 = \sqrt{\kappa R T_1} = \sqrt{1,3 \cdot 461 \cdot 569} = 584 \text{ m/s,}$$

nalazi se vrednost Mach-ovog broja u ovom preseku,

$$M_1 = \frac{v_1}{a_1} = \frac{145}{584} = 0,25.$$

Kako je pritisak na ulazu u parovod

$$p_1 = \frac{p_t}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2\right)^{\kappa/\kappa - 1}} = \frac{30}{(1 + 0,15 \cdot 0,25^2)^{4,34}} = 28,8 \text{ bar,}$$

to je odnos pritiska na kraju i na početku parovoda

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{M_1 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}}{M_2 \sqrt{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2}} = \frac{17}{28,8} = 0,590.$$

Iz ovog izraza se, posle zamene $M_1 = 0,25$ i $\kappa = 1,3$, dobija jednačina

$$M_2^4 + 6,66 M_2^2 - 1,2 = 0,$$

čije je rešenje $M_2 = 0,42$. Sad se nalazi odnos temperatura

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_1^2}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_2^2} = \frac{1 + 0,15 \cdot 0,25^2}{1 + 0,15 \cdot 0,42^2} = 0,983$$

odnosno, temperatura na kraju parovoda

$$T_2 = 0,983 T_1 = 0,983 \cdot 569 = 559,5 \text{ K,}$$

ili, $t_2 = 286,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

84. Zagrevanje sirove nafte u tankerima srednje nosivosti u jednom rečnom pristaništvu zahteva $G_p = 4 \text{ t/h}$ pregrejane vodene pare od 15 bar i $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Kotlarnica se nalazi u krugu rafinerije i para se do tankera transportuje kroz dobro izolovani horizontalni parovod prečnika $D_p = 100 \text{ mm}$ i dužine $l_p = 2,50 \text{ km}$.

Povratna para iz tankera koristi se za usputno zagrevanje nafte u cevovodu, jer su naftovod i parovod priljubljeni jedan uz drugi i obavijeni zajedničkom izolacijom. Treba da se izračuna:

a) pritisak i temperatura pare na ulazu u parovod, ako je: $k D_m = 0,058$ J/msK, $c_p = 2346$ J/kgK, $R = 461$ J/kgK, $\lambda = 0,02$ i $t_a = 0$ °C.

b) pad pritiska usled trenja i snaga za pogon pumpe koja crpi naftu iz tankera i potiskuje je u rafineriju, ako je: $G_n = 200$ t/h, $D_n = 250$ mm, $l_n = 2,6$ km, $\rho = 939$ kg/m³, $\nu_{np} = 0,75$, $\Sigma \zeta = 22$. Nafta se greje u tankerima na 70 °C ($\nu = 30$ °E) i njena temperatura ostaje konstantna u naftovodu zbog usputnog zagrevanja povratnom parom.

Rešenje:

a) U ovom slučaju je

$$a l_p = \frac{k D_m \pi l_p}{G_p c_p} = \frac{0,058 \cdot 3,14 \cdot 2500}{1,11 \cdot 2346} = 0,175,$$

pa je temperatura pare na ulazu u parovod

$$t_1 = t_2 e^{a l_p} = 300 \cdot 2,72^{0,175} = 355 \text{ °C.}$$

Posle određivanja sledećih pomoćnih veličina:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R T_2} = \frac{150000}{461 \cdot 573} = 5,68 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_2 = \frac{G_p}{\rho_2 A_p} = \frac{40000}{5,68 \cdot 0,00785 \cdot 3600} = 25 \text{ m/s,}$$

$$T_m = \frac{1}{2} (T_1 + T_2) = \frac{1}{2} (628 + 573) = 600 \text{ K,}$$

može se naći vrednost člana

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2 p_2} = \lambda \frac{l_p}{D_p} \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 \frac{T_m}{T_2} = 0,02 \frac{2500}{0,100} \frac{5,68}{2} \frac{600}{625} \frac{600}{573} = 929320,$$

odnosno, pritisak pare na početku parovoda,

$$p_1 = \sqrt{p_2^2 + 2 p_2 \cdot 929320} = \sqrt{(225 + 279) 10^{10}} = 22,4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 22,4 \text{ bar.}$$

b) Radi određivanja pada pritiska u naftovodu potrebno je izračunati ove veličine:

$$v = \frac{G_n}{\rho A_n} = \frac{200\,000}{939 \cdot 0,049 \cdot 3600} = 1,2 \text{ m/s,}$$

$$\nu \approx 7,60 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 7,60 \cdot 30 = 228 \text{ cSt} = 228 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Re = \frac{v D_n}{\nu} = \frac{1,2 \cdot 0,250}{228} 10^6 = 1325, < Re^*$$

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1325} = 0,0482.$$

Prema tome, pad pritiska u naftovodu iznosi:

$$\Delta p = \left(\lambda \frac{l_n}{D_n} + \sum \zeta \right) \frac{1}{2} \rho v^2 =$$

$$= \left(0,0482 \frac{2600}{0,250} + 22 \right) \frac{939}{2} 1,44 = 3,54 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2,$$

a snaga za pogon pumpe je

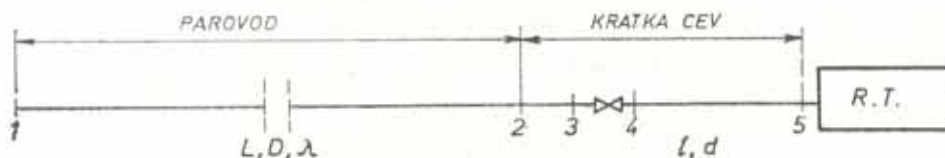
$$P = \frac{q \cdot \Delta p}{1000 \cdot \eta_p} = \frac{0,0592 \cdot 353779}{1000 \cdot 0,75} = 28 \text{ kW}.$$

85. Kroz horizontalni izolovani parovod ($D = 50 \text{ mm}$, $L = 800 \text{ m}$, $k D_m = 0,116 \text{ J/msK}$, $\lambda = 0,02$) transportuje se za potrebe jednog razmenjivača toplote $G = 1,5 \text{ t/h}$ pregrejane vodene pare čije je stanje određeno sa $p_1 = 30 \text{ bar}$, $t_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, $c_p = 2900 \text{ J/kgK}$, $\kappa = 1,3$, $R = 461 \text{ J/kgK}$. Između razmenjivača toplote i parovoda ugrađena je kratka cev dužine $l = 1,5 \text{ m}$ i prečnika d (mm) sa reducir-ventilom koeficijenta otpora ζ . Treba odrediti.:

a) pad temperature i pad pritiska u parovodu pri spoljnoj temperaturi $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$,

b) prečnik d (mm) cevi sa reducir-ventilom, ako je $M_s = 1$, $p_3 = 3,5 \text{ bar}$, $t_3 \approx t_{t3} \approx t_2$,

c) koeficijent otpora ζ reducir-ventila pretpostavljajući da je $p_3 \approx p_{t3} \approx p_2$ i $\lambda = 0,0196$ u cevi ventila.



Rešenje:

a) pad temperature izračunava se ovim redom:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{3000000}{461 \cdot 623} = 10,4 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_1 = \frac{G}{\rho_1 A_1} = \frac{0,417}{10,4 \cdot 0,00196} = 20,5 \text{ m/s,}$$

$$aL = \frac{k D_m \pi L}{G c_p} = \frac{0,116 \cdot 3,14 \cdot 800}{0,42 \cdot 2900} = 0,239,$$

$$t_2 = t_1 e^{-aL} = 350 \cdot 2,72^{-0,239} = 276 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 350 - 276 = 74 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Kako je srednja temperatura pare

$$T_m = \frac{1}{2}(T_1 + T_2) = \frac{1}{2}(623 + 549) = 586 \text{ K,}$$

to je vrednost člana

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \lambda \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 \frac{T_m}{T_1} =$$

$$= 0,02 \frac{800}{0,050} \frac{10,4}{2} 418,5 \frac{586}{623} = 655000,$$

odnosno, pritisak pare na kraju parovoda

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - 2p_1 \cdot 6,55 \cdot 10^5} = \sqrt{507 \cdot 10^{10}} = 22,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Dakle, pad pritiska u parovodu iznosi

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 30 - 22,5 = 7,5 \text{ bar.}$$

b) pošto je

$$T_5 = \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_5^2} = \frac{549}{1 + 0,15 \cdot 1^2} = 476 \text{ K,}$$

$$\rho_5 = \frac{p_5}{R T_5} = \frac{350000}{461 \cdot 476} = 1,59 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_5 = a_5 = \sqrt{\kappa R T_5} = \sqrt{1,3 \cdot 461 \cdot 476} = 535 \text{ m/s,}$$

$$A_5 = \frac{G}{\rho_5 v_5} = \frac{0,417}{1,59 \cdot 535} = 0,000490 \text{ m}^2,$$

to je prečnik cevi u kojoj je ugrađen reducir-ventil $d = 25 \text{ mm}$.

c) Na osnovu vrednosti

$$\lambda \frac{l_{4-5}}{d} = 0,0196 \frac{1500}{25} = 1,172,$$

i $M_3 = 1$ nalazi se iz tabele 5

$$M_4 = 0,50, \quad \frac{p_4}{p_*} = 2,106, \quad \frac{T_4}{T_*} = 1,1084,$$

pa su:

$$p_4 = 2,106 p_* = 2,106 \cdot 3,5 = 7,4 \text{ bar},$$

$$T_4 = 1,1084 T_* = 1,1084 \cdot 476 = 530 \text{ K},$$

$$\rho_3 = \frac{p_3}{R T_3} = \frac{2250000}{461 \cdot 549} = 8,89 \text{ kg/m}^3,$$

$$v_3 = \frac{G}{\rho_3 A_3} = \frac{0,417}{8,89 \cdot 0,00049} = 95,7 \text{ m/s},$$

$$a_3 = \sqrt{\kappa R T_3} = \sqrt{1,3 \cdot 461 \cdot 549} = 575 \text{ m/s},$$

$$M_3 = \frac{v_3}{a_3} = \frac{95,7}{575} = 0,166.$$

Sada se iz jednačine

$$\frac{p_3}{p_4} = \frac{1 + \kappa M_4^2}{1 + \kappa \left(1 - \frac{1}{2} \zeta\right) M_3^2} = \frac{22,5}{7,4},$$

nalazi koeficijent otpora $\zeta = 30$ reducir-ventila u cevi prečnika $d = 25 \text{ mm}$.

86. Kroz horizontalni izolovani parovod ($D = 400 \text{ mm}$, $l = 2,5 \text{ km}$, $\delta = 0,2 \text{ mm}$) za tehnološke potrebe doprema se $G = 45 \text{ t/h}$ pregrejane vodene pare čije je stanje na ulazu u parovod: $p_1 = 10 \text{ bar}$, $t_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_1 = 4,16 \text{ kg/m}^3$. Parovod je snabdeven sa 12 komada lira, 6 krivina poluprečnika $R = 4D$ i 2 šiber-ventila. Izračunati pad pritiska u parovodu ako se u njemu po jednom metru dužnom gubi 336 J/s toplote za vreme transporta. Proveriti da li se koeficijent k ($\text{J/m}^2\text{sK}$) prolaza toplote kroz parovod nalazi u preporučljivim granicama.

Rešenje:

Za određivanje pada pritiska $\Delta p = p_1 - p_2$ potrebno je izračunati pritisak pare na kraju cevovoda. Ovaj se pritisak nalazi iz jednačine

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \left(\lambda \frac{l}{D} + \Sigma \zeta \right) \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 \frac{T_m}{T_1},$$

u kojoj su:

$$v_1 = \frac{G}{\rho_1 \cdot A} = \frac{45000}{4,16 \cdot 0,1256 \cdot 3600} = 23,9 \text{ m/s,}$$

$$\mu_1 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2 \text{ iz tabele 6,}$$

$$\nu_1 = \frac{[\mu_1]}{[\rho_1]} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{4,16} = 4,81 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s,}$$

$$Re_1 = \frac{v_1 D}{\nu_1} = \frac{23,9 \cdot 0,400}{4,81 \cdot 10^{-6}} = 2000000,$$

$$\frac{\delta}{D} = \frac{0,2}{400} = 0,0005.$$

Vrednosti Re_1 i relativnoj hrapavosti δ/D odgovara koeficijent trenja $\lambda = 0,017$ iz dijagrama 1. Pošto se dalje odrede još i ove veličine:

$$c_p = 2340 \text{ J/kgK iz tabele 7,}$$

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{G c_p} = \frac{336 \cdot 2500}{12,5 \cdot 2340} = 28,8 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$t_2 = t_1 - 28,8 = 250 - 28,8 = 221,2 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$T_m = T_0 + \frac{1}{2}(t_1 + t_2) = 273 + \frac{1}{2}(250 + 221,2) = 508,5 \text{ K,}$$

$$T_1 = T_0 + t_1 = 273 + 250 = 523 \text{ K,}$$

$$\Sigma \zeta = 12 \cdot 0,7 + 6 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,25 = 10,1 \text{ (tabela 8),}$$

može se naći vrednost člana

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2\rho_1} = \left(0,017 \frac{2500}{0,400} + 10,1\right) \frac{4,16}{2} \cdot 571 \frac{508,5}{523} = 134355,$$

odakle je pritisak na kraju parovoda

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - 2\rho_1 \cdot 134355} = \sqrt{74,2 \cdot 10^{10}} = 8,6 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Dakle, pad pritiska u parovodu iznosi

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 10 - 8,6 = 1,4 \text{ bar.}$$

Kako je

$$\frac{k \cdot D_m \pi l}{G c_p} = a/l = \ln \frac{t_1}{t_2} = 0,124,$$

to je

$$k D_m = \frac{0,124 G c_p}{\pi l} = \frac{0,124 \cdot 12,5 \cdot 2340}{3,14 \cdot 2500} = 0,462 \text{ J/msK,}$$

odnosno

$$k = \frac{0,462}{D_m} \approx \frac{0,462}{0,400} = 1,155 \text{ J/m}^2\text{sK.}$$

87. U horizontalni izolovani parovod ABC , prečnika $D = 250$ mm, ulazi $G_A = 12$ t/h pregrejane vodene pare čije je stanje određeno veličinama: $p_A = 7,5$ bar, $t_A = 210$ °C, $\rho_A = 3,33$ kg/m³. U preseku B pregrejana para prelazi u suvo zasićenu paru. Ostali podaci su: $\lambda = 0,020$, $c_p = 2300$ J/kgK, $t_a = 0$ °C. Izračunati:

a) stanje pare u preseku B (p_B, t_B, ρ_B), ako je poznato $l_{AB} = 2060$ m, $(k D_m)_{AB} = 0,325$ J/msK,

b) stanje pare na kraju parovoda (p_C, t_C, ρ_C), ako je dato $l_{BC} = 2340$ m $(k D_m)_{BC} = 0,162$ J/msK, $r_m = 2120$ kJ/kg, $R = 441$ J/kgK.

Rešenje:

a) Račun treba da se obavi ovim redom:

$$(al)_{AB} = \frac{(k D_m)_{AB} \pi l_{AB}}{G_A c_p} = \frac{0,325 \cdot 3,14 \cdot 2060}{3,33 \cdot 2300} = 0,275,$$

$$t_B = t_A e^{-(al)_{AB}} = 210 \cdot 2,72^{-0,275} = 160 \text{ °C,}$$

$$T_m = T_0 + \frac{1}{2} (t_A + t_B) = 273 + \frac{1}{2} (210 + 160) = 458 \text{ K,}$$

$$\frac{p_A^2 - p_B^2}{2p_A} = \frac{\lambda_{AB} G_A^2}{2D A^2 \rho_A} \frac{T_m}{T_A} = \frac{0,020 \cdot 2060 \cdot 11,2}{2 \cdot 0,250 \cdot 0,0024 \cdot 3,33} \frac{458}{483} = 109\,500.$$

Iz poslednje jednačine dobija se pritisak u preseku B kao

$$p_B = \sqrt{p_A^2 - 2p_A \cdot 109\,500} = \sqrt{(56,2 - 16,4) 10^{10}} = 6,31 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 6,31 \text{ bar,}$$

i, posle njega, gustina pare

$$\rho_B = \frac{p_B}{R T_B} = \frac{631\,000}{441 \cdot 433} = 3,3 \text{ kg/m}^3.$$