

4.

U PVT-čeliji nalazi se  $250 \text{ cm}^3$  ugljikovodičnog plina relativne gustoće 0.89 pri tlaku 150 bar i temperaturi  $125^\circ\text{C}$ . Koliko žive treba utisnuti u čeliju da bi se tlak plina podigao do 220 bar? Pretpostavljamo da je temperatura sustava konstantna, da je plin realan i da je ostatak sustava (živa, čelija, pumpa, vodovi) nekompresibilan.

Potrebno je izračunati volumen koji plin zauzima pri zadanom većem tlaku. Volumen žive je razlika sadašnjeg volumena plina i volumena plina pri većem tlaku.

$$p_1 = 150 \text{ bar} = 151 \text{ bara}, \quad T_1 = 125^\circ\text{C} = 398 \text{ K}, \quad V_1 = 250 \text{ cm}^3$$

$$p_2 = 220 \text{ bar} = 221 \text{ bara}$$

$$T_2 = T_1 = 398 \text{ K}$$

$$\gamma_g = 0.89$$

$$V_2 = ?, \quad V_{Hg} = V_1 - V_2 = ?$$

Iz dijagrama ovisnosti pseudokritičnih veličina stanja o "specifičnoj težini" plina dobiju se vrijednosti pseudokritičnih veličina za zadani plin:

$$p_{pc} = 650 \text{ psia} = (650) \times (0.068947573) = 44.82 \text{ bara}$$

$$T_{pc} = 425^\circ\text{R} = 236.1 \text{ K}$$

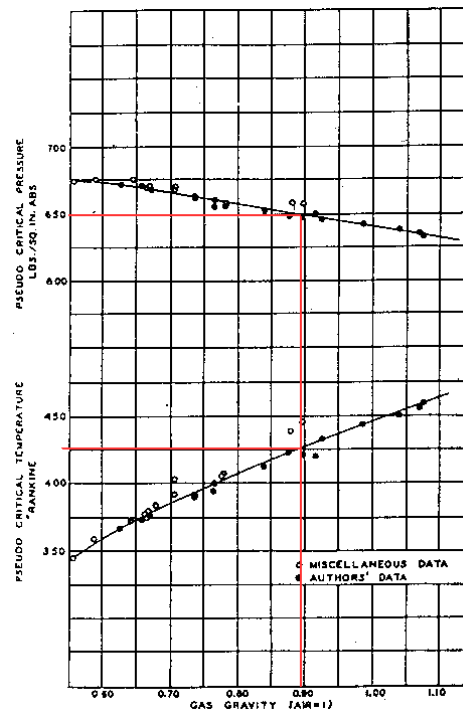
Nakon toga treba izračunati vrijednosti reduciranih veličina stanja za dva zadana  $p, T$ -uvjeta, te očitati odgovarajuće vrijednosti  $Z$ -faktora iz Standing-Katzova dijagrama:

$$p_{pr1} = 3.37, \quad T_{pr1} = 1.69, \quad Z_1 = 0.855$$

$$p_{pr2} = 4.93, \quad T_{pr2} = 1.69, \quad Z_2 = 0.872$$

$$V_2 = \frac{p_1 \times V_1 \times Z_2}{p_2 \times Z_1} = \underline{174.21} \text{ cm}^3$$

$$V_{Hg} = V_1 - V_2 = (250) - (174.21) = \underline{75.79} \text{ cm}^3$$



5.

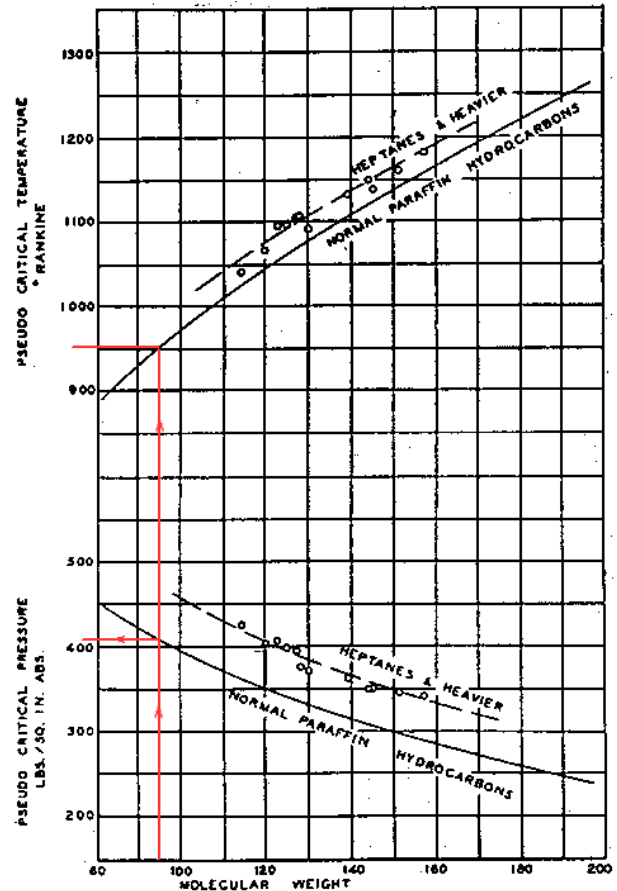
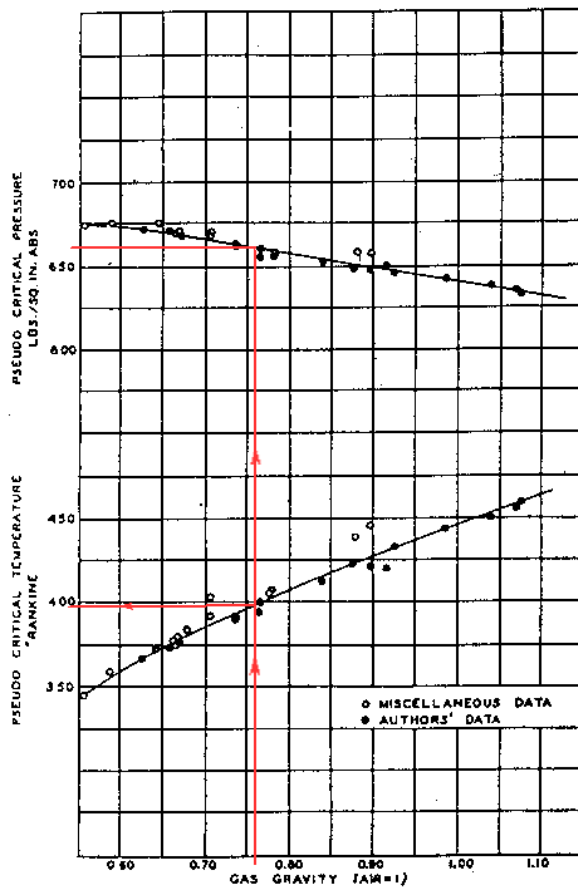
Analizom je ustanovljeno da 1 mol kondenzatnog plina pri standardnim uvjetima sadrži 0.793 mola suhog plina, relativne gustoće 0.76 i 0.207 mola tekućeg kondenzata molarne mase 95. Koliki je faktor kompresibilnosti tog ugljikovodičnog sustava pri tlaku 246 bara i temperaturi 453 K?

$$\gamma_g = 0.76, y_{plina} = 0.793, y_{kondenzata} = 0.207, M_{kondenzata} = 95$$

$$p = 246 \text{ bara}, T = 453 \text{ K}$$

$$Z = ?$$

Iz dijagrama ovisnosti  $T_{pc}, p_{pc} = f(\gamma_g)$  i  $T_{pc}, p_{pc} = f(M)$  odredimo  $p_{pc}$  i  $T_{pc}$ :



$$\text{Za plin: } T_{pc} = 395^\circ R, p_{pc} = 660 \text{ psia}$$

$$\text{Za kondenzat: } T_{pc} = 950^\circ R, p_{pc} = 410 \text{ psia}$$

$$T = 453 \text{ K} = \left( \frac{9}{5} \times (453 - 273) + 32 \right) [^\circ F] = 356^\circ F + 460 = 816^\circ R$$

$$p = 246 \text{ bara} \times \frac{14.5 \text{ psia}}{1 \text{ bara}} = 3567 \text{ psia}$$

$$p_{pc}^{sustav} = \sum y_i \times p_{pci} = (0.793 \times 660) + (0.207 \times 410) = 608.25 \text{ psia} \times \frac{0.068947 \text{ bar}}{1 \text{ psi}} = 41.94 \text{ bara}$$

$$T_{pc}^{sustav} = \sum y_i \times T_{pci} = (0.793 \times 395) + (0.207 \times 950) = 509.88^\circ R$$

Reducirane veličine stanja sustava su:

$$p_{pr} = \frac{p}{p_{pc}} = 5.86$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} = 1.6$$

Iz Standing-Katzovog dijagrama,  $Z = \underline{0.888}$

## 4. Korelacije PVT svojstava

**1**

Uzorak nafte pri standardnim uvjetima ima gustoću  $0.852 \text{ g/cm}^3$ . Kolika je relativna gustoća ("specifična težina") te nafte i koliko to iznosi u  $^\circ\text{API}$ ?

---

Rješenje:

$$\rho_{o(s.c.)} = 0.852 \text{ g/cm}^3, \quad \rho_{w(s.c.)} = 0.999 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_o = \left( \frac{\rho_o}{\rho_w} \right)_{sc} = ?$$

$$\rho_{API} = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5 = ?$$


---

$$\gamma_o = \frac{0.852}{0.999} = \underline{0.853}$$

$$\rho_{API} = \frac{141.5}{0.853} - 131.5 = \underline{34.4^\circ\text{API}}$$

**2**

Bačva pri standardnim uvjetima sadrži 24 galona nafte relativne gustoće  $41.2^\circ\text{API}$ . Kolika je masa nafte u bačvi? Kolika je gustoća nafte izražena u  $\text{lb/cuft}$ ?

---

Rješenje:

$$V_{(s.c.)} = 24 \text{ gal} \times \frac{3.7854 \text{ dm}^3}{1 \text{ gal}} = 90.85 \text{ dm}^3$$

$$\rho_{API} = 41.2^\circ \text{ API}$$

$$\gamma_o = \frac{141.5}{\rho_{API} + 131.5} = \frac{141.5}{41.2 + 131.5} = 0.8193$$

$$m = ?$$

$$\rho_{o(s.c.)} \left[ \frac{\text{lb}}{\text{cuft}} \right] = \rho_{o(s.c.)} \left[ \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right] = ?$$


---

$$\rho_{o(s.c.)} = \gamma_o \times \rho_{w(s.c.)} = (0.819) (0.999) = 0.818 \text{ g/cm}^3 = \underline{0.818 \text{ kg/dm}^3}$$

$$\rho_{o(s.c.)} \left[ \frac{\text{lb}}{\text{cuft}} \right] = 0.818 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \times \frac{1 \text{ lb}}{0.4536 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ dm}^3}{0.03532 \text{ cuft}} = \underline{51.09 \frac{\text{lb}}{\text{cuft}}}$$

$$m_{o(s.c.)} = \rho_{o(s.c.)} \times V_{(s.c.)} = (0.818) (90.85) = \underline{74.36 \text{ kg}}$$

3

Dubinski uzorak ležišnog fluida uzet je pri ležišnim uvjetima i ima volumen  $400 \text{ cm}^3$ . Nakon prolaska kroz laboratorijski separator i hlađenja uz otparavanje plinske faze do standardnih uvjeta, izmjereno je  $274 \text{ cm}^3$  površinske nafte (*Stock Tank Oil*; STO) te  $1.21 \text{ scf}$  otparenog plina. Koliki je volumni faktor te nafte? Koliki je  $R_s$ , tj. omjer otopljenog plina i nafte (*solution gas-to-oil ratio*, GOR) ? Preračunati dobivene rezultate i u angloameričke jedinice.

---

Rješenje

$$V_{o(R)} = 400 \text{ cm}^3 \quad (R - \text{ležišni } p, T\text{-uvjeti})$$

$$V_{o(sc)} = 274 \text{ cm}^3 \quad (sc - \text{standardni } p, T\text{-uvjeti})$$

$$V_{g(sc)} = 1.21 \text{ scf} \times \frac{28316.85 \text{ cm}^3}{1 \text{ ft}^3} = 34263.4 \text{ cm}^3$$

$$B_o = ? , \quad R_s = ?$$


---

$$B_o = \frac{V_{o(R)}}{V_{o(sc)}} = \frac{400}{274} = 1.46 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} = 1.46 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

$$R_s = \frac{V_{g(sc)}}{V_{o(sc)}} = \frac{34243}{274} = 125.1 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} = 125.1 \frac{\text{m}^3 \text{ plina}}{\text{m}^3 \text{ nafte}}$$

$$V_{o(sc)} = 274 \text{ cm}^3 \frac{1 \text{ STB}}{158987.2949 \text{ cm}^3} = 0.001723 \text{ STB}$$

$$R_s = \frac{1.21 \text{ scf}}{0.0017234 \text{ STB}} = 702.1 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$$

4

Toplivost plina u slojnoj nafti izražena je vrijednošću plinskog faktora  $R_s = 62.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Relativna gustoća naftnog plina je 0.750 (zrak = 1), a volumni faktor nafte je  $1.28 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Gustoća nafte pri standardnim uvjetima iznosi  $825 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Kolika je gustoća nafte pri ležišnim uvjetima?

Rješenje:

$$R_s = 62.3 \text{ m}^3 / \text{m}^3$$

$$\gamma_g = 0.750 \text{ (zrak} = 1)$$

$$\rho_{zraka(sc)} = 1.225 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$B_o = 1.28 \text{ m}^3 / \text{m}^3$$

$$\rho_o = 825 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\rho_{o(R)} = ?$$

$$\rho_g = (0.750) \times (1.225) = 0.919 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{- za } V_{o(sc)} = 1 \text{ m}^3 :$$

$$V_{g(sc)} = V_{o(sc)} \times R_s = 62.3 \text{ m}^3$$

$$\text{Iz } \rho_o = \frac{m_o}{V_o} :$$

$$m_o = \rho_{o(sc)} \times V_{o(sc)} = 825 \text{ kg}$$

$$m_g = \rho_{g(sc)} \times V_{g(sc)} = (0.919) \times (62.3) = 57.24 \text{ kg}$$

- rekombinirana ležišna nafta:

$$m_{o(R)} = m_o + m_g = (825) + (57.24) = 882.24 \text{ kg}$$

$$V_{o(R)} = B_o \times V_{o(sc)} = 1.28 \text{ m}^3$$

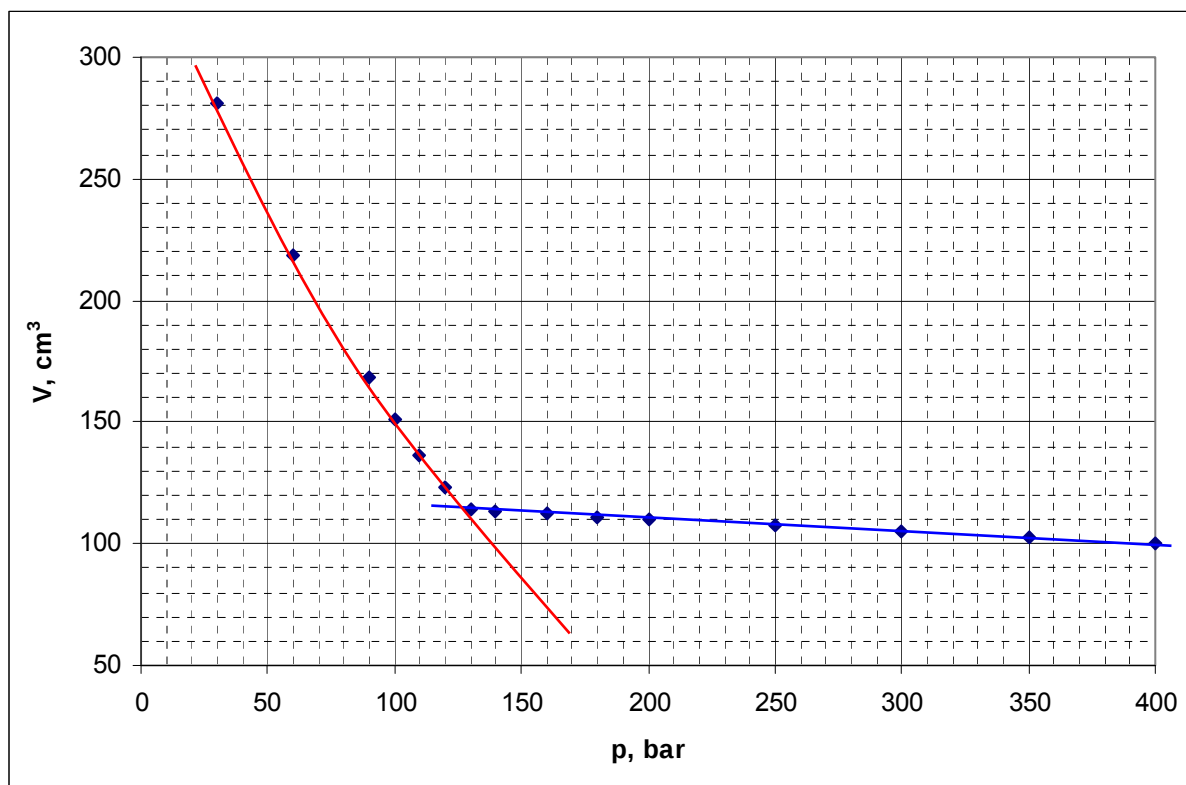
$$\rho_{o(R)} = \frac{m_{o(R)}}{V_{o(R)}} = \frac{(882.24)}{(1.28)} = 689.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

## 5.

Podaci o analizi uzorka ležišnog fluida dani su u tablici. Treba grafički prikazati pV-izotermu i ovisnost volumnog faktora nafte o tlaku fluida. Koliki je tlak zasićenja,  $p_b$ ? Volumen nafte pri standardnim uvjetima iznosi  $92.71 \text{ cm}^3$ . Ležišni tlak je  $172.3 \text{ bar}$ .

| $p$ | $V_t$         | $V_o$         |
|-----|---------------|---------------|
| bar | $\text{cm}^3$ | $\text{cm}^3$ |
| 400 | 100.32        | 100.32        |
| 350 | 102.71        | 102.71        |
| 300 | 105.14        | 105.14        |
| 250 | 107.55        | 107.55        |
| 200 | 110.12        | 110.12        |
| 180 | 111.23        | 111.23        |
| 160 | 112.34        | 112.34        |
| 140 | 113.47        | 113.47        |
| 130 | 114.05        | 114.05        |
| 120 | 123.12        | 113.02        |
| 110 | 136.14        | 111.94        |
| 100 | 151.02        | 110.58        |
| 90  | 168.18        | 109.11        |
| 60  | 218.26        | 104.01        |
| 30  | 281.47        | 98.26         |

Tlak zasićenja odredi se iz grafa ovisnosti ukupnog (totalnog) volumena o tlaku,  $V_t = f(p)$ , kao X-vrijednost koordinata sjecišta linearnog dijela (podzasićena nafta, plava linija – dobra aproksimacija je pravac) i nelinearnog dijela (zasićena nafta+plin; crvena linija, dobra aproksimacija je kubična jednadžba) eksperimentalne  $p, V$ -krivulje. Y-vrijednost sjecišta je  $V_b$ , vrijednost volumena dotičnog uzorka zasićene nafte pri tlaku zasićenja,  $p_b$ . Treba primijetiti kako se smanjenjem tlaka ispod  $p_b$ , volumen nafte,  $V_o$ , počinje smanjivati zbog otparavanja lakih ugljikovodika. To i objašnjava nelinearnost crvene linije i uzimajući u obzir da je zasićena nafta zanemarivo kompresibilna naspram plina, karakteristika te krivulje je slična karakteristici Boyleove izoterme.



Nakon što se grafički odredi posljednja točka koja pada na pravac podzasićene (*undersaturated*) nafte, moguće je te točke unijeti u MSExcel, napraviti dijagram (*insert chart*) i pronaći koeficijente (klik desne tipke na mišu na točke u dijagramu > *add trendline*>*linear*, kasnije klik na trendline > *format trendline* > *options*, obilježiti *display equation on chart* i *display R-squared value on chart*) Isti postupak se može napraviti i s točkama na Boyleovoj izotermi, ali se ne odabire linearna ovisnost za trendline nego polinom 3. stupnja.

Analitičko rješenje tlaka zasićenja će tada biti rješenje sustava jednadžbi (plavi pravac i crveni polinom 3. stupnja).

Za ispitivani uzorak, na ležišnoj temperaturi dakle je  
 $p_b = 126.011 \text{ bar}$  i  $V_b = 114.04 \text{ cm}^3$

Podaci iz MSExcela pomoću kojih je dobiveno rješenje za tlak zasićenja:

Iznad tlaka zasićenja:  $V = a \times p + b$

Ispod tlaka zasićenja:  $V = a \times p^3 + b \times p^2 + c \times p + d$

|                           |                     |         |
|---------------------------|---------------------|---------|
| <b>do 130 bar (i 130)</b> | <u>koeficijenti</u> |         |
| (pravac)                  | a                   | -0.0508 |
|                           | b                   | 120.45  |

ukupna pogreška  $R^2$  0.9991

|                       |   |           |
|-----------------------|---|-----------|
| <b>od 120 (i 120)</b> | a | -0.000024 |
| (kubična jedn.)       | b | 0.0105    |
|                       | c | -2.8875   |
|                       | d | 359.1999  |
| ukupna pogreška $R^2$ |   | 0.9999    |

Vrijednost volumena nafte, zaostale nakon otparavanja i mjerene pri standardnim uvjetima je zadana kao  $V_{o(sc)} = 92.71 \text{ cm}^3$

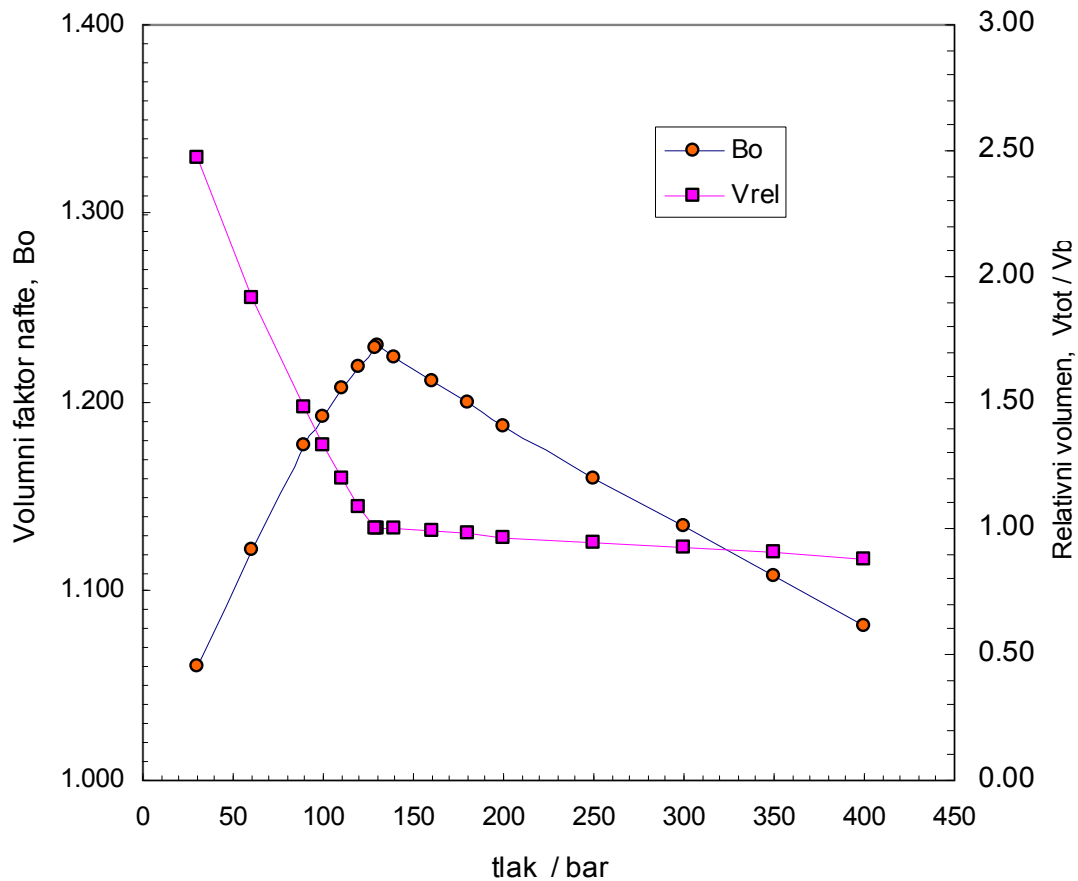
Vrijednosti volumnih faktora za pojedine tlakove računaju se na temelju definicijskog izraza za volumni faktor nafte,  $B_{o(p,T)} = \frac{V_{o(p,T)}}{V_{o(sc)}}$ .

Iz mjerenih podataka računa se također i relativni volumen ležišnog fluida,  $V_{rel}$ , definiran kao

$$V_{rel} = \left( \frac{V_t}{V_b} \right)_T$$

Rezultati se prikazuju u obliku o tablica i odgovarajućih dijagrama:

| $p$<br><i>bar</i> | $V_{uk}$<br><i>cm<sup>3</sup></i> | $V_o$<br><i>cm<sup>3</sup></i> | $B_o$         | $V_{rel}$     |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------|---------------|
| 400               | 100.32                            | 100.32                         | 1.0821        | 0.8808        |
| 350               | 102.71                            | 102.71                         | 1.1079        | 0.9018        |
| 300               | 105.14                            | 105.14                         | 1.1341        | 0.9231        |
| 250               | 107.55                            | 107.55                         | 1.1601        | 0.9442        |
| 200               | 110.12                            | 110.12                         | 1.1878        | 0.9668        |
| 180               | 111.23                            | 111.23                         | 1.1998        | 0.9766        |
| 160               | 112.34                            | 112.34                         | 1.2117        | 0.9863        |
| 140               | 113.47                            | 113.47                         | 1.2239        | 0.9962        |
| 130               | 114.05                            | 114.05                         | 1.2302        | 1.0013        |
| <b>126</b>        | <b>114</b>                        | <b>114</b>                     | <b>1.2296</b> | <b>1.0000</b> |
| 120               | 123.12                            | 113.02                         | 1.2191        | 1.0809        |
| 110               | 136.14                            | 111.94                         | 1.2074        | 1.1953        |
| 100               | 151.02                            | 110.58                         | 1.1928        | 1.3259        |
| 90                | 168.18                            | 109.11                         | 1.1769        | 1.4766        |
| 60                | 218.26                            | 104.01                         | 1.1219        | 1.9162        |
| 30                | 281.47                            | 98.26                          | 1.0599        | 2.4712        |



6.

Koliki je prosječni koeficijent izotermičke kompresibilnosti fluida zadanog u prošlom zadatku 23 za tlačni interval između 400 i 140 bar?

Rješenje

$$p_1 = 400 \text{ bar} \quad , \quad V_{o_1} = 100.32 \text{ cm}^3$$

$$p_2 = 140 \text{ bar} \quad , \quad V_{o_2} = 113.47 \text{ cm}^3$$

$$V_{poč} = 100.32 \text{ cm}^3$$

$$c_o = -\frac{1}{V_{poč}} \times \frac{V_{o_2} - V_{o_1}}{p_2 - p_1} = ?$$

$$c_o = -\frac{1}{(100.32)} \times \frac{(113.47) - (100.32)}{(140) - (400)} = \underline{5.042 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}}$$

7.

Nafta gustoće 38°API ima tlak zasićenja 3811 psia pri ležišnoj temperaturi 180°F. Prosječna specifična težina naftnog plina je 0.732. Treba odrediti faktor otopljenog plina,  $R_s$ , uporabom slijedećih korelacija:

- a) Beal-ove,
- b) Standing-ove,
- c) Lasater-ove,
- d) Glasø-ve.

Usporedite vrijednosti dobivene pomoću korelacija s izmjerenom vrijednošću koja iznosi 909 scf/STB. Usporediti točnost korelacija izračunom odstupanja korelacijskih od mjerene vrijednosti

$$\text{u \% prema } \Delta = \left[ \frac{(R_s)_{\text{korelacija}} - (R_s)_{\text{mjereno}}}{(R_s)_{\text{mjereno}}} \right] \times 100$$

Rješenje:

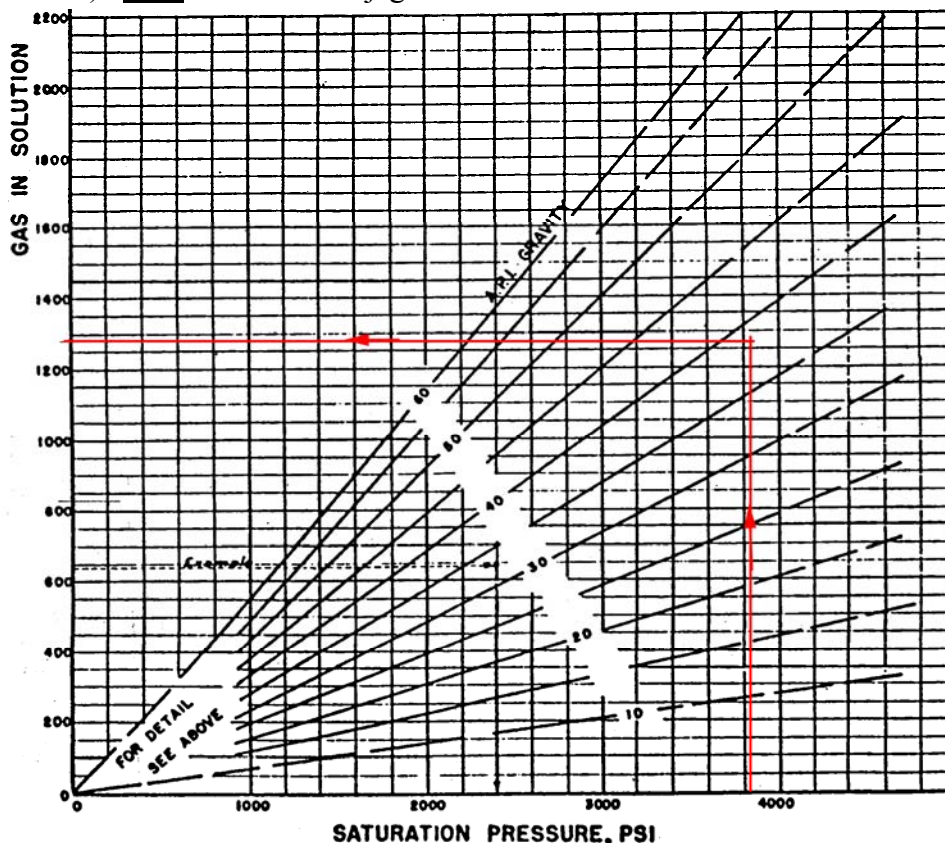
Zadatak se računa uz pomoć korelacija u grafičkom obliku, (dijagrami) ili matematičkih izraza, koji opisuju pojedinu korelaciju.

Zadano je  $\gamma_o = 38^\circ \text{API}$ ,  $p_b = 3811 \text{ psia}$ ,  $T = 180^\circ \text{F}$ ,  $\gamma_g = 0.732$

i  $R_{s(\text{mjereno})} = 909 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$

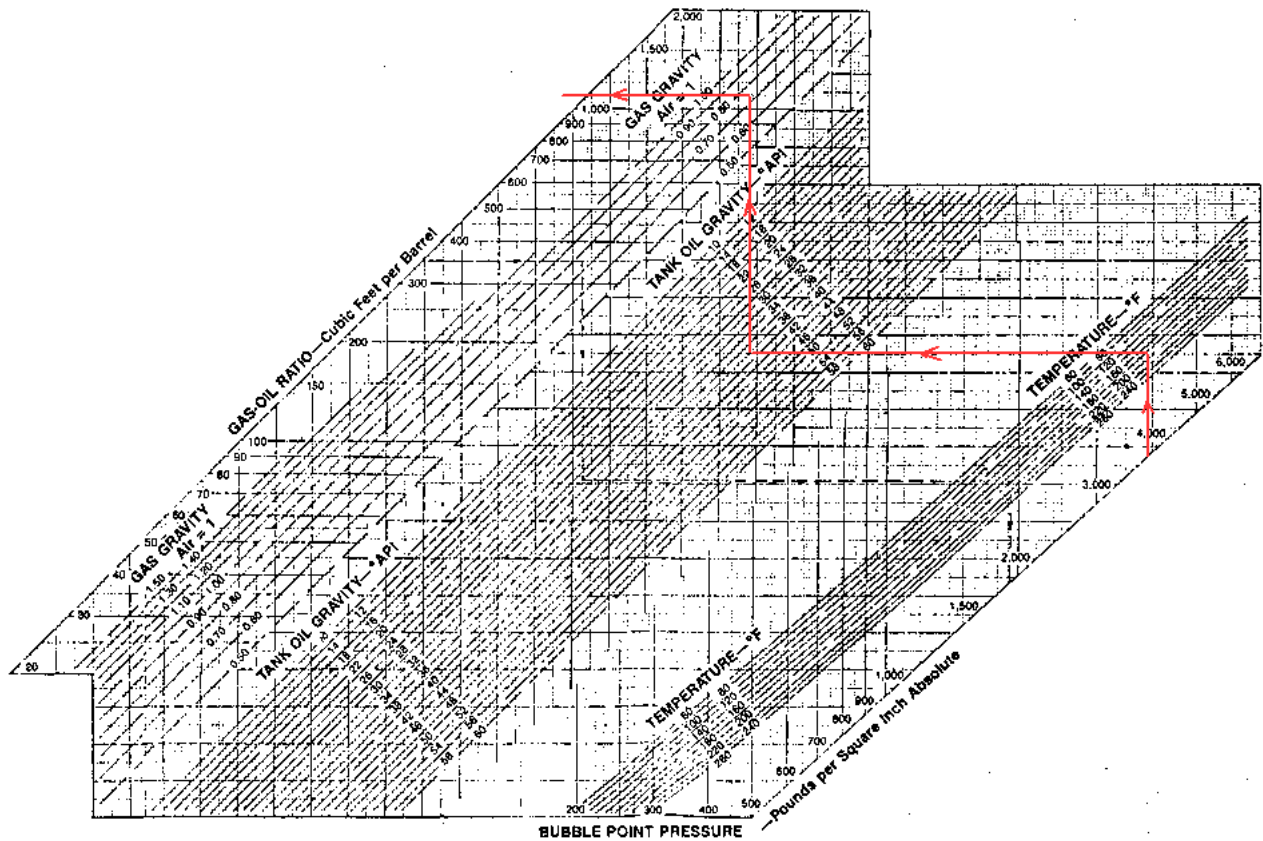
$R_{s(\text{korelacije})} = ?$

a) **Beal** – očitano u dijagramu:



$$R_s = 1280 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$$

b) Standing -



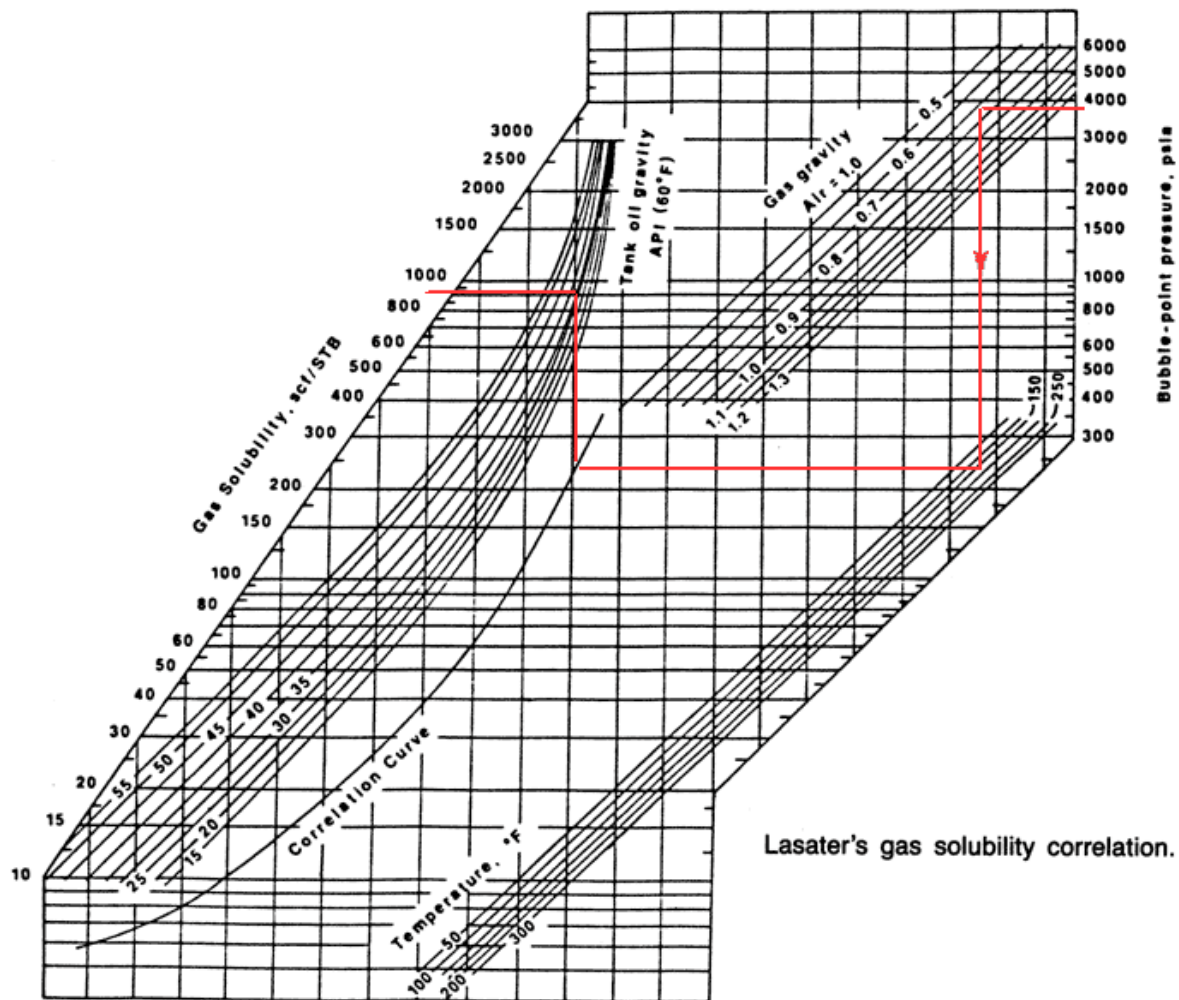
Očitano u dijagramu:  $R_s \approx 1100 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$

- Analitički ( $T$  u °F,  $p_b$  u psia,  $R_s$  u  $\frac{\text{scf}}{\text{STB}}$ )

$$R_s = \gamma_g \left[ \left( \frac{p_b}{18.2} + 1.4 \right) \times 10^{0.0125 \rho_{oAPI} - 0.00091 \times T} \right]^{1.2048}$$

$$R_s = 0.732 \left[ \left( \frac{3811}{18.2} + 1.4 \right) \times 10^{0.0125 \times 38 - 0.00091 \times 180} \right]^{1.2048} = 1094 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$$

c) Lasater - očitano u dijagramu :



$$R_s \approx 930 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$$

#### d) Glasø

$$\left( T \text{ u } ^\circ F, p_b \text{ u } \text{psia}, R_s \text{ u } \frac{\text{scf}}{\text{STB}} \right)$$

$$R_s = \gamma_g \left[ \frac{\gamma_{oAPI}^{0.989}}{T^{0.172}} \times p_b^* \right]^{1.225}, \text{ gdje je korekcijski broj } p_b^* = 10^{2.8869 - (14.1811 - 3.3093 \times \log p_b)^{0.5}}$$

$$R_s = 935 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$$

Usporedbom rezultata može se zaključiti (a) da sve korelacije daju veće vrijednosti  $R_s$  od prave, i (b) da Glasøva i Lasaterova korelacija u ovom slučaju daju rezultat najbliži eksperimentalnoj vrijednosti.

|                | $R_s$      | $\Delta\%$ |
|----------------|------------|------------|
| <b>Mjereno</b> | <b>909</b> | -          |
| Beal           | 1280       | 40.8       |
| Standing       | 1100       | 21.0       |
| Standing       | 1094       | 20.4       |
| Lasater        | 930        | 2.3        |
| Glasø          | 935        | 2.9        |

8.

Nafta ima relativnu gustoću 32°API, uz tlak zasićenja od 3200 psia pri ležišnoj temperaturi od 140°F. Specifična težina naftnog plina je 0.85. Treba odrediti omjer otopljenog plina prema Beal-ovoj, Standing-ovoj, Lasater-ovoj i Glasø-voj korelaciji.

Rješenje:

Postupak rješavanja identičan je postupku u zadatku 7.

$$\gamma_{oAPI} = 32^\circ API$$

$$p_b = 3200 \text{ psia}$$

$$T = 140^\circ F$$

$$\gamma_g = 0.85$$

$$R_{s(korelacije)} = ?$$

$$R_{s(Beal)} = 850 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$$

$$R_{s(Standing)} = 926.5 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$$

$$R_{s(Lasater)} = 900 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$$

$$R_{s(Glasø)} = 741.64 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}$$

9.

Uzorak nafte relativne gustoće 36.6°API pri temperaturi 242°F ima tlak zasićenja 3410 psia. Faktor otopljenog plina iznosi 688 scf/STB, a relativna gustoća naftnog plina je 0.710. Treba odrediti volumni faktor nafte uz uporabu slijedećih korelacija:

- Standing-ove,
- Marhoun-ove,
- Glasø-ve
- Arp-ove.

Rješenje

a) **Standing** je 1981. dao svoju korelaciju iz 1947. godine u matematičkom obliku:

$$B_{o\text{Standing}} = 0.9759 + 0.00012 \times \left[ R_s \times \left( \frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0.5} + 1.25 \times T \right]^{1.2}$$

b) **Glasø**va korelacija (1980.):

$$B_{oGlasø} = 1 + 10^A$$

$$A = -6.58511 + 2.91329 \times \log(B_{ob})^* - 0.27683 \times \log^2(B_{ob})^*$$

$$(B_{ob})^* \text{ je "korelacijski broj" definiran kao } (B_{ob})^* = R_s \left( \frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0.526} + 0.968 \times T$$

**c) Marhounova** korelacija (1988) izvedena je korištenjem analize mnogostruke nelinearne regresije 160 podataka koji su dobiveni iz 69 polja Srednjeg Istoka:

$$B_{o_{Marhoun}} = 0.497069 + 0.862963 \times 10^{-3} \times (T + 460) + 0.182594 \times F \times 10^{-2} \\ + 0.318099 \times 10^{-5} \times F^2,$$

$$a = 0.74239$$

$$\text{gdje je } F = R_s^a \times \gamma_g^b \times \gamma_o^c \quad \text{i} \quad b = 0.323294$$

$$c = -1.20204$$

**d) Arp** je 1962. dao pojednostavljenu jednadžbu kojom se računa  $B_o$  iz omjera otopljenog plina i nafte  $R_s$ . Ta korelacija služi za brzo određivanje približne vrijednosti volumnog faktora jedino kada nisu dostupni dodatni PVT podaci, potrebni za druge korelacije.

$$B_{o_{Arp}} = 1.05 + 0.0005 R_s$$

pri čemu su u svim korelacijama:

$$T = \text{ležišna temperatura u } ^\circ F; \quad R_s = \text{omjer otopljenog plina i nafte} \left[ \frac{\text{scf}}{\text{STB}} \right]$$

$$\gamma_o = \text{relativna gustoća nafte [stock tank oil]}; \quad \gamma_g = \text{relativna gustoća naftnog plina}$$

Iz zadanih podataka:

$$\gamma_g = 0.71$$

$$\gamma_{oAPI} = 36.6 \text{ } ^\circ \text{API}$$

$$\gamma_o = \frac{141.5}{(36.6 + 131.5)} = 0.842$$

$$p_b = 3410 \text{ psia}$$

$$T_r = 242 \text{ } ^\circ \text{F}$$

$$R_s = 688 \text{ scf/STB}$$

$$B_o = ?$$

korelacije daju slijedeće vrijednosti volumnog faktora nafte:

$$B_{o_{(S \tan ding)}} = 1.416$$

$$B_{o_{(Glaso)}} = 1.382$$

$$B_{o_{(Marhoun)}} = 1.423$$

$$B_{o_{(arp)}} = 1.394$$

**10.**

Prema korelacijama za volumni faktor nafte koje su navedene u prethodnom zadatku treba odrediti  $B_o$  za naftu slijedećih karakteristika: relativna gustoća 29°API, temperatura 195°F, tlak zasićenja 2800 psia, faktor otopljenog plina 720 scf/STB, relativna gustoća naftnog plina 0.78.

Rješenje:

Postupak rješavanja zadatka identičan je prethodnom zadatku.

$$\gamma_g = 0.78$$

$$\gamma_o = 29^\circ \text{API}$$

$$\gamma_o = \frac{141.5}{(29 + 131.5)} = 0.88162$$

$$p_b = 2800 \text{ psia}$$

$$T_R = 195^\circ \text{F}$$

$$R_s = 720 \text{ scf/STB}$$

$$B_o = ?$$

$$B_{o(S \text{ tan ding})} = 1.409$$

$$B_{o(Glasø)} = 1.38244$$

$$B_{o(Marhoun)} = 1.3856$$

$$B_{o(arp)} = 1.41$$

**11.**

Uzorak ležišne nafte nalazi se na tlaku koji je iznad tlaka zasićenja. Omjer otopljenog plina i nafte,  $R_s$ , je 580 scf/STB, temperatura 131°F, a relativna gustoća STO nafte 39.7°API. Specifična težina naftnog plina je 1.075. Treba odrediti tlak zasićenja nafte uz uporabu korelacija slijedećih autora:

- Standing,
- Lasater,
- Glasø.

Rješenje:

Kao i za volumni faktor, postoji više korelacija za određivanje tlaka zasićenja,  $p_b = f(R_s, \gamma_g, \gamma_o, T)$ :

Najčešće rabljene korelacije za  $p_b$  su:

**1.) Standingova:**

$$p_b = 18.2 \left\{ \left[ \left( R_s / \gamma_g \right)^{0.83} \times 10^a \right] - 1.4 \right\} \quad [psia]$$

$$a = 0.00091 \times T - 0.0125 \times ^\circ \text{API}$$

**2.) Lasaterova** - grafičko određivanje, iz nomograma.

**3.) Glasøva:**

$$\log p_b = 1.7669 + 1.7447 \log p_{b*} - 0.30218 \log^2 p_{b*}$$

$$p_{b*} \text{ je korelacijski broj; } p_{b*} = \left( \frac{R_s}{\gamma_g} \right)^a \times T^b \times (\rho_{o(API)})^c$$

gdje je  $a = 0.816$ ,  $b = 0.172$ ,  $c = -0.989$

pri čemu su u svim korelacijama

$T$  = ležišna temperatura u  $^{\circ}F$

$R_s$  = omjer otopljenog plina i nafte  $\left[ \frac{scf}{STB} \right]$

$\gamma_o$  = relativna gustoća nafte [stock tank oil]

$\gamma_{oAPI}$  = relativna gustoća nafte u  $^{\circ} API$

$\gamma_g$  = relativna gustoća naftnog plina

$$R_s = 580 \frac{scf}{STB}$$

$$T = 131^{\circ} F$$

$$\gamma_{oAPI} = 39.7^{\circ} API$$

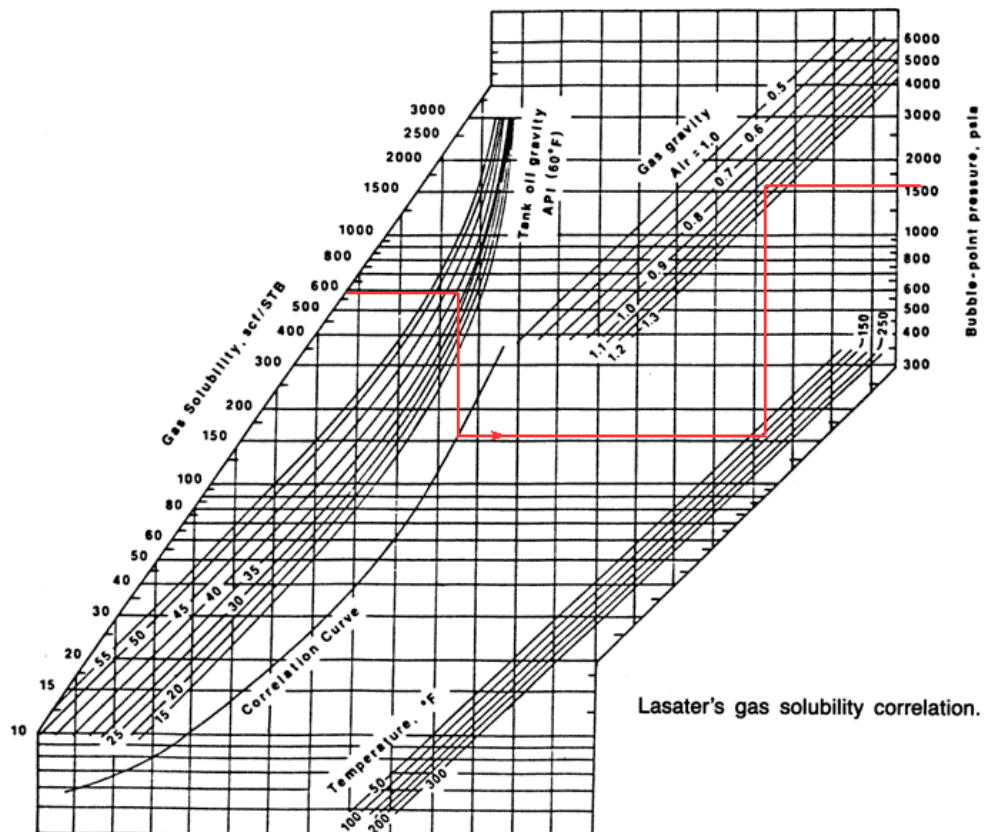
$$\gamma_g = 1.075$$

$$p_b = ?$$

$$1.) \text{ Standingova: } a = (0.00091 \times 131) - (0.0125 \times 39.7) = -0.377$$

$$p_{b \text{ standing}} = 18.2 \left[ \left( \frac{580}{1.075} \right)^{0.83} \times 10^{-0.377} - 1.4 \right] = 1389.04 \text{ psia} = 95.77 \text{ bara}$$

$$2.) \text{ Lasaterova: } p_{b \text{ Lasater}} \text{ očitano iz dijagrama } p_{b \text{ Lasater}} = 1550 \text{ psia} = 106.87 \text{ bara}$$



3.) Glasøva:

$$p_{b*} = \left( \frac{580}{1.075} \right)^{0.816} \times T^{0.172} \times 39.7^{-0.989} = 10.287$$

$$p_{b_{Glasø}} = 10^{1.7669 + 1.7447 \times \log(10.287) - 0.30218 \times \log^2 10.287} = \underline{1672.6 \text{ psia}} = \underline{115.3 \text{ bara}}$$

12.

Na temelju korelacija za tlak zasićenja nafte opisanih u prethodnom zadatku treba odrediti  $p_b$  pri temperaturi od  $160^\circ\text{F}$  uzorka nafte koja sadrži 620 scf/ STB otopljenog plina, specifična težina naftnog plina je 0.95 a relativna gustoća površinske nafte je  $28^\circ\text{API}$ .

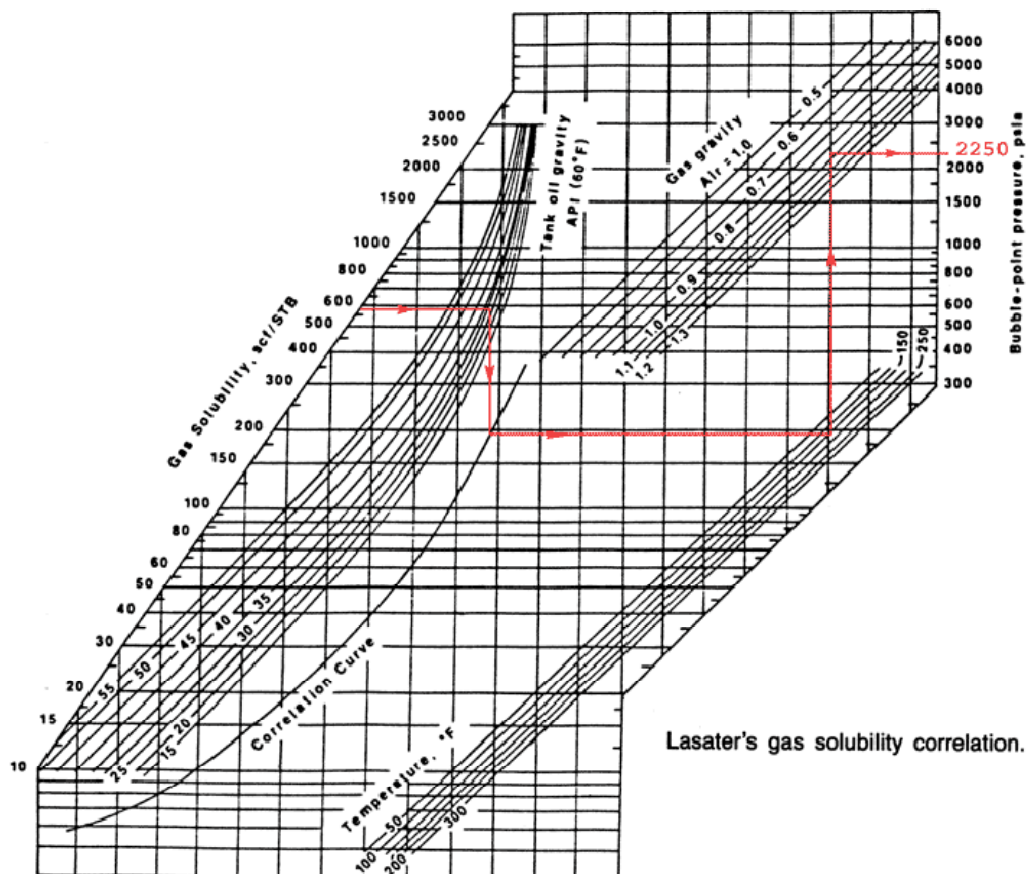
Rješenje: kao i u prethodnom zadatku, zadatak se rješava Standingovom i Lasaterovom korelacijom

$$\text{Zadano: } R_s = 620 \frac{\text{scf}}{\text{STB}}; \quad T = 160^\circ\text{F}; \quad \gamma_{oAPI} = 28^\circ\text{API}; \quad \gamma_g = 0.95$$

STANDING:

$$a = (0.00091 \times 160) - (0.0125 \times 28) = -0.2044$$

$$p_{b_{\text{standing}}} = \underline{2439.68 \text{ psia}} = \underline{168.21 \text{ bara}}$$



$$p_b \text{ očitán iz Lasaterovog dijagrama} = \underline{2250 \text{ psia}} = \underline{155.1 \text{ bara}}$$

GLASO:

$$p_{b*} = \left( \frac{620}{0.95} \right)^{0.816} \times 160^{0.172} \times 28^{-0.989} = 17.565$$

$$p_{b_{Glasø}} = \underline{2953.3 \text{ psia}} = \underline{203.6 \text{ bara}}$$

### 13.

Na temelju zadanog sastava prirodnog plina treba odrediti njegovu viskoznost pri tlaku od 152 bara i temperaturi 75°C pomoću korelacije Carra, Kobayashija i Burrowsa te analitički, služeći se matematičkim opisima Standinga i Dempsey-a.

| $i$             | $z_i$ |
|-----------------|-------|
| CO <sub>2</sub> | 0.025 |
| C <sub>1</sub>  | 0.778 |
| C <sub>2</sub>  | 0.086 |
| C <sub>3</sub>  | 0.051 |
| C <sub>4</sub>  | 0.033 |
| C <sub>5</sub>  | 0.017 |
| C <sub>6+</sub> | 0.010 |
|                 | 1.000 |

Rješenje:

Poopćena korelacija za određivanje viskoznosti različitih smjesa prirodnog plina, koju su izradili Carr, Kobayashi i Burrows, uključuje uporabu dva dijagrama. Prvi dijagram daje vrijednost viskoznosti plina,  $\mu_1$ , pri tlaku od 1.013251 bar (1atm) u ovisnosti o molarnoj masi plina,  $M_g$ , i zadanoj temperaturi (u °F).

Drugi se dijagram temelji na zakonu korespondentnih stanja te daje vrijednosti omjera  $\frac{\mu}{\mu_1}$  kao funkciju pseudoreduciranog tlaka i pseudoreducirane temperature, gdje je  $\mu$  viskoznog plina pri zadanom  $p, T$ -uvjetu.

Postupak određivanja viskoznosti uključuje:

1. Na temelju poznatog sastava izračunaju se  $M_g$ , pseudokritične veličine i relativna gustoća plinske smjese,
2. Iz prvog dijagrama očita se vrijednost  $\mu_1$
3. Za zadani  $p, T$ -uvjet izračunaju se odgovarajuće vrijednosti pseudoreduciranih veličina.
4. Na temelju tih pseudoreduciranih veličina iz drugog dijagrama očita se vrijednost  $\frac{\mu}{\mu_1}$  omjera i dalje izračuna tražena  $\mu$  plina.

U sljedećoj tablici pokazani rezultati računanja u koraku 1.

|                 | $y_i$ | $M_i$   | $y_i M_i$ | $T_{ci} (K)$ | $y_i T_{ci}$ | $P_{ci}$ | $y_i P_{ci}$ |
|-----------------|-------|---------|-----------|--------------|--------------|----------|--------------|
| CO <sub>2</sub> | 0.025 | 44.01   | 1.10025   | 304.19       | 7.60475      | 73.82    | 1.8455       |
| C <sub>1</sub>  | 0.778 | 16.043  | 12.48145  | 190.56       | 148.25568    | 45.99    | 35.78022     |
| C <sub>2</sub>  | 0.086 | 30.07   | 2.58602   | 305.32       | 26.25752     | 48.72    | 4.18992      |
| C <sub>3</sub>  | 0.051 | 44.096  | 2.248896  | 369.83       | 18.86133     | 42.48    | 2.16648      |
| C <sub>4</sub>  | 0.033 | 58.123  | 1.918059  | 408.14       | 13.46862     | 36.48    | 1.20384      |
| C <sub>5</sub>  | 0.017 | 72.15   | 1.22655   | 460.43       | 7.82731      | 33.81    | 0.57477      |
| C <sub>6+</sub> | 0.01  | 100.204 | 1.00204   | 540.2        | 5.402        | 27.4     | 0.274        |
| $\Sigma$        |       |         | 22.56327  |              | 227.67721    |          | 46.03473     |

Molarna masa plina  $M_g = 22.56$  kg/kgmol. Iz dijagrama je očitana relativna gustoća plina,  $\gamma_g \cong 0.78$ ,

dok je izračunana  $\gamma_g = \frac{M_g}{M_a} = \frac{22.56}{28.96} = 0.779$ .

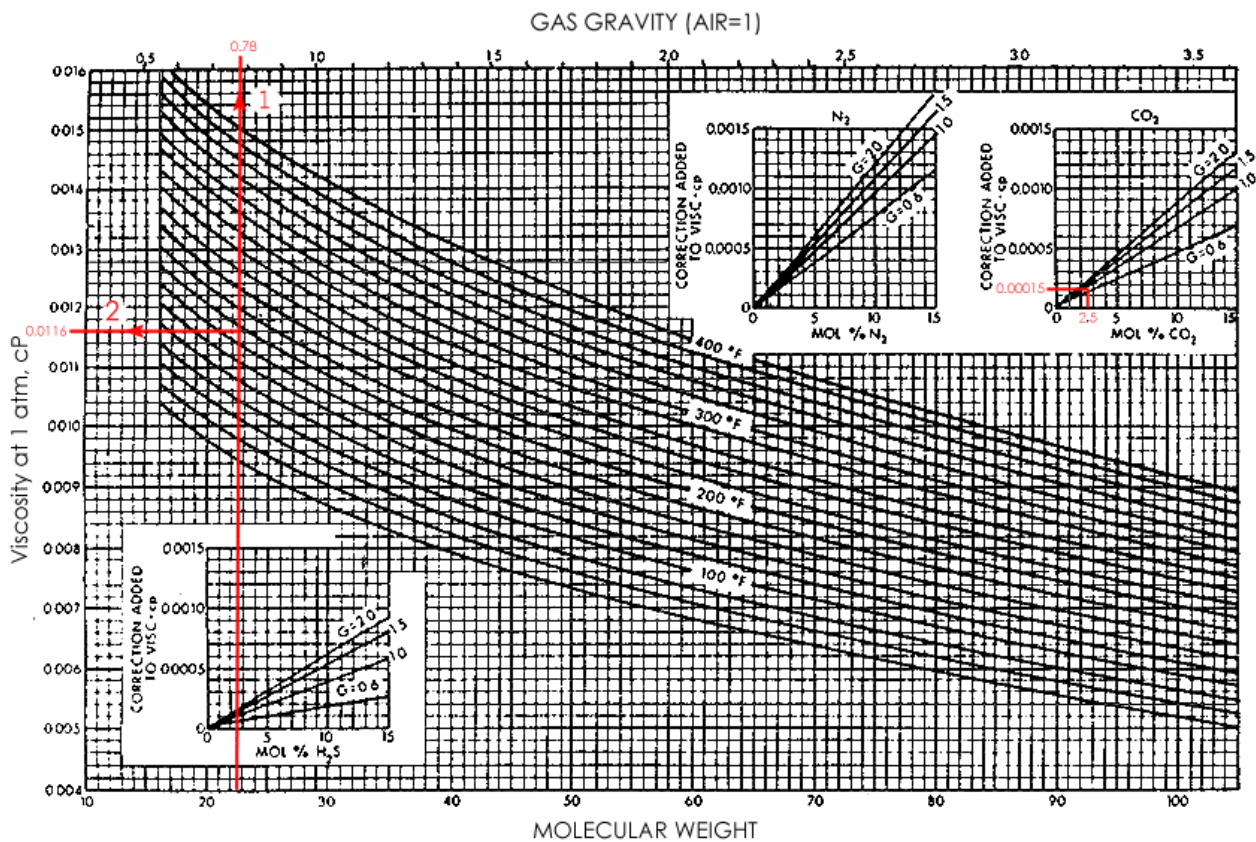
Za zadani tlak,  $p = 152 \text{ bara}$  i temperaturu,  $T = 75^\circ\text{C} = 348 \text{ K} = 167^\circ\text{F}$  pseudoreducirane veličine su

$$p_{pr} = \frac{p}{p_{pc}} = \frac{p}{\sum_{i=1}^7 y_i p_{ci}} = 3.3018 \quad ; \quad T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} = \frac{T}{\sum_{i=1}^7 y_i T_{ci}} = 1.5291$$

Iz dijagrama:

Viskoznost čistog ugljikovodičnog plina pri 1.01325 bar i  $75^\circ\text{C}$ ,  $\mu_1 = 0.0116 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

Za očitani  $\gamma_g = 0.78$  dalje se očitava korekcija viskoznosti zbog sadržaja neugljikovodičnog plina, ugljikova dioksida,  $\text{CO}_2$ :  $\mu_{\text{CO}_2\text{cor}} = 0.00015 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

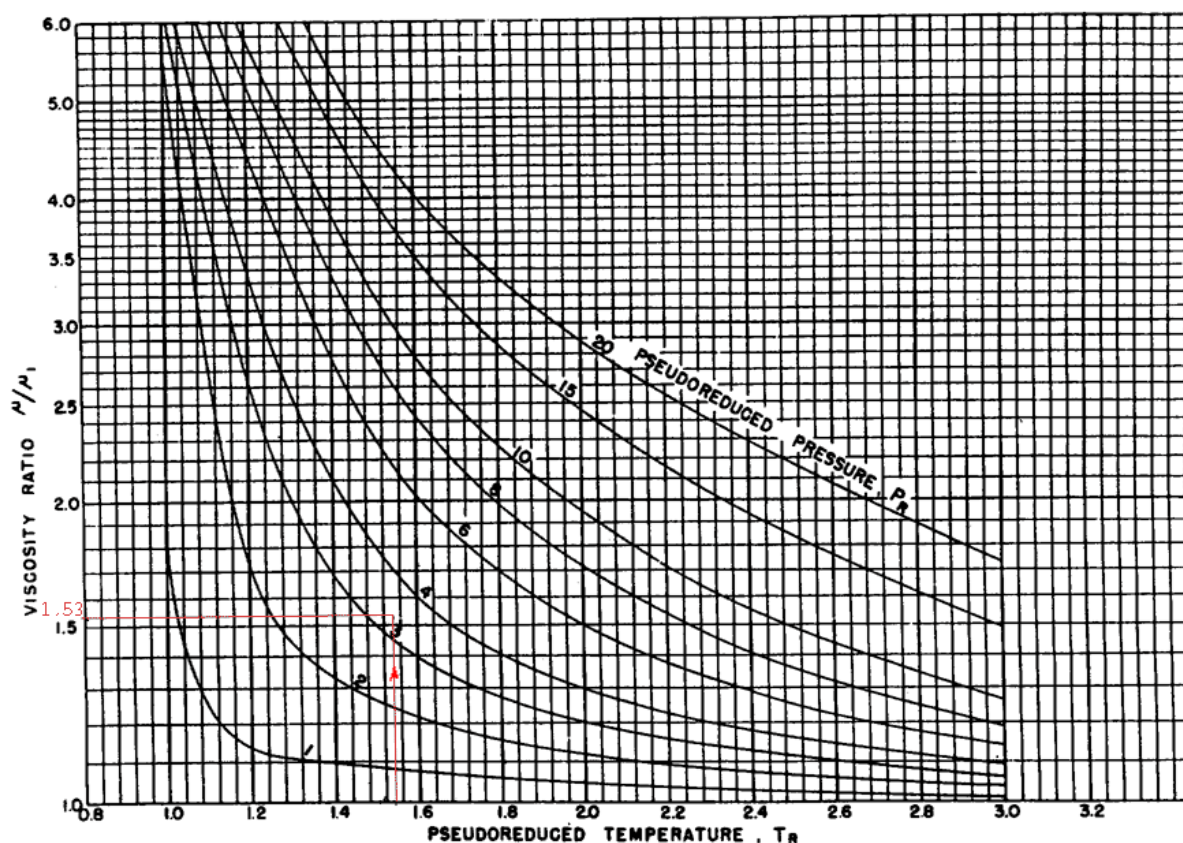


Viskoznost plina pri 1.01325 bar i  $75^\circ\text{C}$  je dakle

$$\mu_1^{cor} = \mu_1 + \mu_{\text{CO}_2\text{cor}} = (0.0116 + 0.00015) = 0.01175 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

Prije izračunanim vrijednostima pseudoreduciranog tlaka i temperature u dijagramu omjera viskoznosti

odgovara vrijednost omjera  $\frac{\mu}{\mu_1} = 1.53$ :



Pri zadanom  $p, T$ -uvjetu od 152 bar i  $75^\circ\text{C}$  viskoznost ovog prirodnog plina je

$$\mu_g = 1.53 \times \mu_1^{\text{cor}} = (1.53)(0.01175) = \underline{0.0179775} \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

Standing je 1977 godine dao matematički izraz za računanje viskoznosti prirodnog plina pri atmosferskom tlaku i ležišnoj temperaturi,  $\mu_1$  te korekciju zbog  $N_2$ ,  $CO_2$  i  $H_2S$  te je tako prvi matematički opisao dijagram Carr-Kobayashija :

$$\begin{aligned} \mu_1 &= (\mu_1)_{\text{uncorrected}} + (\Delta\mu)_{N_2} + (\Delta\mu)_{CO_2} + (\Delta\mu)_{H_2S} \\ (\mu_1)_{\text{uncorrected}} &= (1.709 \times 10^{-5} - 2.062 \times 10^{-6} \gamma_g)(T - 460) + 8.188 \times 10^{-3} - 6.15 \times 10^{-3} \log(\gamma_g) \\ (\Delta\mu)_{N_2} &= y_{N_2} \times (8.48 \times 10^{-3} \times \log(\gamma_g) + 9.59 \times 10^{-3}) \\ (\Delta\mu)_{CO_2} &= y_{CO_2} \times (9.08 \times 10^{-3} \times \log(\gamma_g) + 6.24 \times 10^{-3}) \\ (\Delta\mu)_{H_2S} &= y_{H_2S} \times (8.49 \times 10^{-3} \times \log(\gamma_g) + 3.73 \times 10^{-3}) \end{aligned}$$

gdje je  $\mu_1$  viskoznost plina pri atmosferskom tlaku i ležišnoj temperaturi u  $cP$ ,  $T$  ležišna temperatura u  $^\circ R$ ,  $\gamma_g$  relativna gustoća plina, a  $y_{N_2}$ ,  $y_{CO_2}$ ,  $y_{H_2S}$  su molni udjeli  $N_2$ ,  $CO_2$  i  $H_2S$ .

Dempsey (1965) je dao izraz za omjer viskoznosti,  $\mu_g/\mu_1$  :

$$\ln \left[ T_{pr} \left( \frac{\mu_g}{\mu_1} \right) \right] = a_0 + a_1 p_{pr} + a_2 p_{pr}^2 + a_3 p_{pr}^3 + T_{pr} (a_4 + a_5 p_{pr} + a_6 p_{pr}^2 + a_7 p_{pr}^3)$$

$$+ T_{pr}^2 (a_8 + a_9 p_{pr} + a_{10} p_{pr}^2 + a_{11} p_{pr}^3) \\ + T_{pr}^3 (a_{12} + a_{13} p_{pr} + a_{14} p_{pr}^2 + a_{15} p_{pr}^3)$$

gdje su  $T_{pr}$  i  $p_{pr}$  pseudoreducirani temperatura u °R i tlak u psia.

Koeficijenti za jednadžbu su:

$$a_0 = -2.46211820, a_1 = 2.970547414, a_2 = -0.286264054, a_3 = 0.00805420522 \\ a_4 = 2.80860949, a_5 = -3.49803305, a_6 = 0.360373020, a_8 = -0.793385648 \\ a_9 = 1.39643306, a_{10} = -0.149144925, a_{11} = 0.0041015512, a_{12} = 0.0839387178, \\ a_{13} = -0.186408848, a_{14} = 0.0203367881, a_{15} = -0.000609579263$$

Uvrštavanjem zadanih vrijednosti dobivamo:

$$(\Delta\mu)_{CO_2} = 0.025 (9.08 \times 10^{-3} \log(0.78) + 6.24 \times 10^{-3}) = 0.000131394 \text{ cP} \\ (\mu_1)_{uncorrected} = [1.709 \times 10^{-5} - 2.062 \times 10^{-6} (0.78)] \times 167 + 8.188 \times 10^{-3} - 6.15 \times 10^{-3} \log(0.78) = 0.01144 \\ \mu_1 = (\mu_1)_{uncorrected} + (\Delta\mu)_{CO_2} = 0.011572$$

Uvrštavanjem u Dempseyev izraz dobijemo:

$$\ln \left[ T_{pr} \left( \frac{\mu_g}{\mu_1} \right) \right] = 0.890387796 \Rightarrow \frac{\mu_g}{\mu_1} = \frac{e^{0.890387796}}{T_{pr}} = 1.5931$$

$$\mu_g = \mu_1 \times \frac{\mu_g}{\mu_1} = \underline{0.01844} \text{ mPa} \cdot \text{s} @ 152 \text{ bar i } 75^\circ \text{C}$$