

FIZIČKE VELIČINE ZA KVANTIFIKACIJU NAFTE I NAFTNIH DERIVATA

Piše:

Miroljub Babić, dipl.el.inženjer
MAKPETROL – Beograd

Uskladištenje proizvoda na stovarištu nafte i naftnih derivata, pre svega, zahteva njihovo količinsko merenje u procesima prijema, isporuke i skladištenja. Fizičke veličine, pomoću kojih se izražava kvantitet proizvoda, odnosno, izražava količina proizvoda su zapremina, masa i težina .

1. Zapremina na referentnoj temperaturi

Zapremina fluida (V), kao veličina stanja, je zavisna od temperature fluida (t) i pritiska fluida (p). Njena matematička funkcija se može izraziti kao:

$$V = V(p, t)$$

Svaka veličina stanja, pa i zapremina, ima za karakteristiku, da ukupna promena te veličine zavisi samo od početka i kraja procesa promene, a ne i od načina obavljanja procesa promene .

Zbog toga, veličina stanja (zapremina) je funkcija stanja nekog fizičkog sistema, a ne funkcija procesa u datom fizičkom sistemu, koju karakteriše veličina procesa (toplota, mehanički rad ,..).

Ova karakteristika veličine stanja fluida, zapremine se, matematički rečeno, iskazuje postojanjem totalnog diferencijala ($dV(p, t) \neq 0$), odnosno :

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_t \cdot dp + \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_p \cdot dt$$

Ukupna (totalna) promena zapremine fluida zavisi od ukupnih promena ostalih veličina stanja, temperature i pritiska (dt i dp).

Relativna promena, odnosno, ukupna promena zapremine fluida po jedinici zapremine fluida je :

$$\frac{dV}{V} = \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_p \cdot dt + \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_t \cdot dp$$

Ako definišemo sa α - zapreminski koeficijent termičkog širenja (cubical expansion coefficient or coefficient of thermal expansion) kao:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_p$$

a sa z - zapreminski koeficijent stišljivosti (isothermal compressibility coefficient) kao :

$$z = - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_t$$

onda imamo da je relativna promena zapremine fluida :

$$\frac{dV}{V} = \alpha(p, t) \cdot dt - z(p, t) \cdot dp$$

Veličine $\alpha = \alpha(p, t)$ i $z = z(p, t)$ su isključivo zavisne od fluida, odnosno, one su jedne od osnovnih karakteristika svakog fluida .

Na osnovu definicije veličine stanja, gustine (ρ), kao masa jedinične zapremine, lako se dokazuje tvrdnja da je :

$$\frac{dV}{V} = - \frac{dp}{\rho}$$

Polazići od zakona o održanju mase nekog zatvorenog fizičkog sistema, u uprošćenom obliku:

$$dm = 0$$

uopšteno, za fluide važi jednakost :

$$m = V(p, t) \cdot \rho(p, t)$$

Naime, ako imamo dva različita stanja jednog fluida, opisanog sa veličinama stanja :

a). prvo stanje fluida $F\{V, p, t\} = 0$

b). drugo stanje fluida $F\{V_R, p_R, t_R\} = 0$

imaćemo da je :

$$m_R = V_R(p_R, t_R) \cdot \rho_R(p_R, t_R) = V(p, t) \cdot \rho(p, t) = m \quad \dots \quad (1)$$

Na osnovu prethodne jednačine (1) proizilazi da je :

$$\frac{V_R(p_R, t_R)}{V(p, t)} \equiv \frac{\rho(p, t)}{\rho_R(p_R, t_R)} = k(p, t)$$

1.1 Zapreminski korekcionni faktor

U poređenju sa drugim tečnostima, na primer sa vodom, nafta i tečni naftni derivati imaju koeficijente termičkog širenja i stišljivosti znatno većih vrednosti, što je glavni razlog pridavanju značaja uticaju temperature i pritiska na vrednost izmerene zapremine nafte ili tečnog naftnog derivata .

Takođe se mora naglasiti, da je efekat uticaja temperature kod nafte i tečnih naftnih derivata višestruko veći nego uticaj pritiska na veličinu zapremine.

Na primer: kod motornog benzina će promena temperature od $1^{\circ}C$ izazvati povećanje ili smanjenje zapremine za više od 0,1%, tačnije,

$$|\Delta V(\Delta t = 1^{\circ}C)| \cong 1,2 \times 10^{-3} V \Rightarrow \left| \frac{\Delta V}{V} \right|_{\Delta t = 1^{\circ}C} = 0,12\%$$

Odnosno, za promenu temperature $|\Delta t|$ zapremina motornog benzina (gasoline) će se promeniti za :

$$|\Delta V(\Delta t)| = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot |\Delta t| \Rightarrow \left| \frac{\Delta V}{V} \right|_{\Delta t} = 0,12 \cdot |\Delta t| \cdot \left[\frac{\%}{1^{\circ}C} \right]$$

Promena zapremine motornog benzina, kao i kod većine tečnih naftnih derivata, sa promenom pritiska $|\Delta p(\text{bar})|$ je :

$$|\Delta V(\Delta p)| = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot |\Delta p| \Rightarrow \left| \frac{\Delta V}{V} \right|_{\Delta p} = 0,01 \cdot |\Delta p| \cdot \left[\frac{\%}{1\text{bar}} \right]$$

Na osnovu ranijeg iznesenog stava, imamo da su uticaji promena temperature (Δt) i pritiska (Δp) na gustinu (ρ) motornog benzina sledeći :

$$\left| \frac{\Delta \rho}{\rho} \right|_{\Delta t} = 0,12 \cdot |\Delta t| \cdot \left[\frac{\%}{1^{\circ}C} \right] \quad \wedge \quad \left| \frac{\Delta \rho}{\rho} \right|_{\Delta p} = 0,01 \cdot |\Delta p| \cdot \left[\frac{\%}{1bar} \right]$$

Ako se polazi od činjenice da je uticaj promene atmosferskog pritiska $|\Delta p_a|$, kao pritiska sistema uskladištenja nafte i tečnih naftnih derivata,

$$\left| \frac{\Delta V}{V} \right|_{\Delta p_a} = 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot |\Delta p_a| \cdot \left[\frac{\%}{1mbar} \right] \quad \ll \quad \left| \frac{\Delta V}{V} \right|_{\Delta t} = 0,12 \cdot |\Delta t| \cdot \left[\frac{\%}{1^{\circ}C} \right]$$

na promenu zapremine, zanemarljiv u odnosu na uticaj promene temperature $|\Delta t|$, imaćemo

$$\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_{p_a} \Rightarrow \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = \alpha(t) \quad \dots (2)$$

diferencijalnu jednačinu (2), koju da bi rešili potrebno je znati funkcionalnu zavisnost, $\alpha = f(t) = \alpha(t)$, koeficijenta termičkog širenja od temperature za određenu tečnost, odnosno za određeni tečni naftni derivat, tj. imamo rešenje u obliku :

$$\int_{V(t_R)}^{V(t)} \frac{dV}{V} = \int_{t_R}^t \alpha(t) \cdot dt \quad \Rightarrow \quad \ln_{(e)} \frac{V(t)}{V(t_R)} = \int_{t_R}^t \alpha(t) dt \quad \dots (3)$$

gde su: $V(t_R) = V_R$ - zapremina pri standardnim (referentnim) uslovima, tj. referentna zapremina na referentnoj temperaturi

t_R - referentna temperatura

$V(t) = V$ - zapremina na trenutnoj temperaturi kvantifikovanog tečnog naftnog Derivata

t - trenutna temperatura tečnog naftnog derivata

Rešenje diferencijalne jednačine (3) može se predstaviti i u sledećim oblicima,

$$V(t) = V(t_R) \cdot \exp \left[\int_{t_R}^t \alpha(t) \cdot dt \right] \quad \vee \quad V(t_R) = V(t) \cdot \exp \left[- \int_{t_R}^t \alpha(t) \cdot dt \right]$$

Zapremski korekcionni faktor (Volume Correction Faktor - VCF) je faktor kojim se pretvara izmerena veličina zapremine fluida na datim mernim ulovima (pri temperaturi (t) i pritisku (p)) u njen ekvivalent, tj. veličinu zapremine na standardnim (referentnim) uslovima (pri referentnoj temperaturi (t_R) i referentnom pritisku (p_R)).

Prema gornjoj definiciji možemo napisati,

$$V(p_R, t_R) \equiv VCF(p, t) \cdot V(p, t) \quad \Rightarrow \quad VCF(p, t) \equiv \frac{V(p_R, t_R)}{V(p, t)} = \frac{V_R}{V}$$

Na osnovu matematičkog stava, koji je proizašao iz osnovnog fizičkog zakona prirodnosti nafte i tečnih naftnih derivata, odnosno tečnosti, opisanog jednačinom (1) imamo da je zapremski korekcionni faktor

$$VCF(p, t) \equiv k(p, t) = \frac{V(p_R, t_R)}{V(p, t)} = \frac{V_R}{V} = \frac{\rho(p, t)}{\rho(p_R, t_R)} = \frac{\rho}{\rho_R}$$

Uzimajući u obzir već više puta navedenu činjenicu o uticajima promene temperature i promene pritiska na veličinu zapremine uskladištene nafte i tečnog naftnog derivata, proizilazi da je,

$$VCF(p, t) \Rightarrow VCF(t) = \frac{V(t_R)}{V(t)} = \frac{V_R}{V} = \frac{\rho(t)}{\rho(t_R)} = \frac{\rho}{\rho_R}$$

zapreminski korekcionni faktor funkcija temperature,

$$VCF(t) = \exp \left[- \int_{t_R}^t \alpha(t) dt \right]$$

odnosno, funkcija zapreminskog koeficijenta termičkog širenja, kao osnovne prirodne karakteristike date tečnosti.

Na osnovu višegodišnjeg istraživanja američkog instituta za naftu i naftne derivate (American Petroleum Institute – API) i američkog nacionalnog biroa za standarde (National Bureau of Standards – NBS), preporučeno je da se zapreminski korekcionni faktor izračunava na osnovu jednačine, koja sa određenom tačnošću garantuje njegove vrednosti, za tačno utvrđene i ispitivane grupe ugljovodonika konstantnog kvaliteta i poznatih fizičko-hemijskih osobina :

$$VCF(t) = \frac{\rho(t)}{\rho(t_R = 15^{\circ}C)} = \exp \left[- \alpha(t_R) \cdot (t - t_R) \cdot (1 + 0,8 \cdot \alpha(t_R) \cdot (t - t_R)) \right] \dots (4)$$

gde je :

a) za sirovu naftu, čija se vrednost gustine na referentnoj temperaturi nalazi u opsegu $\rho_R \in [770,5 - 787,5] \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, uzima se, za vrednost zapreminskog koeficijenta termalnog širenja na referentnoj temperaturi :

$$\alpha(t_R) = \alpha_R = \frac{K_0}{\rho_R^2} + \frac{K_1}{\rho_R}, \quad K_0 = -0,00336312 \left[\frac{(kg/m^3)^2}{^{\circ}C} \right], \quad K_1 = 2680,3206 \left[\frac{(kg/m^3)}{^{\circ}C} \right]$$

b) za motorni benzin, čija se vrednost gustine na referentnoj temperaturi nalazi u opsegu $\rho_R \in [600,0 - 770,4] \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, uzima se za vrednost zapreminskog koeficijenta termalnog širenja na referentnoj temperaturi :

$$\alpha(t_R) = \alpha_R = \frac{K_0}{\rho_R^2} + \frac{K_1}{\rho_R}, \quad K_0 = 346,4228 \left[\frac{(kg/m^3)^2}{^{\circ}C} \right], \quad K_1 = 0,4388 \left[\frac{(kg/m^3)}{^{\circ}C} \right]$$

c) za kerozin i Jet-A-1, čije se vrednosti gustina na referentnoj temperaturi nalaze u opsegu $\rho_R \in [787,6 - 838,5] \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, uzima se za vrednost zapreminskog koeficijenta termalnog širenja na referentnoj temperaturi :

$$\alpha(t_R) = \alpha_R = \frac{K_0}{\rho_R^2}, \quad K_0 = 594,5418 \left[\frac{(kg/m^3)^2}{^{\circ}C} \right]$$

d) za **lož-ulje**, čija se vrednost gustine na referentnoj temperaturi nalazi u opsegu $\rho_R \in [838,6 - 1200,0] \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, uzima se za vrednost zapreminskog koeficijenta termalnog širenja na referentnoj temperaturi :

$$\alpha(t_R) = \alpha_R = \frac{K_0}{\rho_R^2} + \frac{K_1}{\rho_R}, \quad K_0 = 186,9696 \left[\frac{(kg/m^3)^2}{^0C} \right], \quad K_1 = 0,4862 \left[\frac{(kg/m^3)}{^0C} \right]$$

e) za **maziva**, čija se vrednost gustine na referentnoj temperaturi nalazi u opsegu $\rho_R \in [750,0 - 1164,0] \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, uzima se za vrednost zapreminskog koeficijenta termalnog širenja na referentnoj temperaturi :

$$\alpha(t_R) = \alpha_R = \frac{K_1}{\rho_R}, \quad K_1 = 0,6278 \left[\frac{(kg/m^3)}{^0C} \right]$$

Na osnovu izloženog, može se zaključiti sledeće :

a) **Da bi se dobila neophodno potrebna temperaturnozavisna funkcija zapreminskog korekcionog faktora ($VCF(t)$) na osnovu koje se utvrđuje vrednost zapreminskog korekcionog faktora za datu temperaturu, a na osnovu koje se preračunava zapremina tečnosti za referentne uslove, potrebno je tačno znati funkciju temperaturne zavisnosti zapreminskog koeficijenta termalnog širenja $\alpha(t)$ date tečnosti!**

b) **Ili drugačije rečeno, korišćenje jedne funkcije temperaturne zavisnosti zapreminskog koeficijenta termičkog širenja je moguće samo za tačno određenu tečnost, za onu, kojoj taj koeficijent pripada!**

c) **Uočava se da preporučena jednačina (4), sa aproksimativnim vrednostima zapreminskog koeficijenta termičkog širenja (α_R), određenih na osnovu predloženih konstanti (K_0, K_1) i poznate tačne vrednosti gustine (ρ_R) tečnosti na referentnim uslovima, za rešenja ima približnu vrednost zapreminskog korekcionog faktora ($VCF(t)_{API}$, koji odstupa od tačne vrednosti!**

d) Konačno, sam izbor zapremine, kao fizičke veličine za izražavanje kvantiteta proizvoda, unosi određen nivo netočnosti i nepouzdanosti u proces premeravanja količine nafte i tečnih naftnih derivata !

2. Težina

Težina tečnosti, kao fizička veličina pomoću koje ćemo izraziti količinu nafte i tečnih naftnih derivata, je reakciona sila tečnosti na delovanje prirodne gravitacione sile.

Matematičkim jezikom rečeno (Njutnov zakon gravitacije) sila kojom se privlače dva tela mase m_1 i m_2 na rastojanju d je:

$$\left| \vec{G} \right| = G = k_G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

Imajući u vidu i opšte zakone relativnosti, vrednosti Njutnove gravitacione konstante (k_G) usvojene su onako kako su eksperimentalno utvrđivane . Sa tačnošću ($1 : 10^4$) nisu poznate bolje vrednosti od ove koju su dobili G.G.Luther i W.R.Towler 1982 godine, a ona iznosi :

$$k_G = 6,67259(43) \times 10^{-11} \cdot \left[\frac{m^3}{kg \cdot s^2} \right]$$

Težina tela, kao reakciona sila na podlogu je jednaka intezitetu privlačne gravitacione sile između mase (m) tog tela i mase (m_Z) Zemlje na rastojanju ($d \approx r_Z$) poluprečnika Zemlje, i ima vrednost :

$$G = \left| \vec{G} \right| = k_G \cdot \frac{m \cdot m_Z}{d^2} \approx m \cdot \frac{k_G \cdot m_Z}{r_Z^2} = m \cdot g$$

gde je sa (g) obeležena fizička veličina, ubrzanje, koja odražava prirodno delovanje sile.

U ovom slučaju to je gravitaciono ubrzanje izazvano delovanjem gravitacione sile na površini Zemlje i zbog toga je ono različito na raznim tačkama površine Zemlje.

$$g = \frac{k_G \cdot m_Z}{r_Z^2} = f(r_Z) \equiv g(r_Z)$$

Još jednom podvlačimo, da je težina „reakciona“ sila na neku delujuću („akcionu“) silu, što znači da „akciona“ sila može biti i rezultanta više delujućih sila, što je i najčešći slučaj, imajući u vidu fizičko okruženje tela čija se težina želi odrediti .

Na telo, koje se nalazi na površini Zemlje u njenoj atmosferi, deluje rezultatna sila, gravitacione sile ($\left| \vec{G} \right|$) i potisne sile ($\left| \vec{P} \right|$), tako da je intezitet reakcione sile (G) tela na površinu Zemlje, odnosno težina tela :

$$G' = \left| \vec{G} \right| - \left| \vec{P} \right| \quad \wedge \quad \left| \vec{P} \right| = P = \rho_A(p_a, t_a) \cdot g(r_Z) \cdot V(p, t) = \rho_A(p_a, t_a) \cdot g(r_Z) \cdot \frac{m}{\rho(p, t)}$$

i konačno imaćemo da je težina tela, koje se nalazi na površini Zemlje u njenoj atmosferi („weight in air“), zavisna od sledećih fizičkih promenljivih veličina (p_a - atmosferskog pritiska, t_a - temperature vazduha i r_Z - poluprečnika Zemlje) :

$$G' = G'(p_a, t_a, r_Z) = m \cdot \frac{k_G \cdot m_Z}{r_Z^2} - \frac{\rho_A(p_a, t_a)}{\rho(p, t)} \cdot m \cdot \frac{k_G \cdot m_Z}{r_Z^2} = m \cdot g(r_Z) \cdot \left[1 - \frac{\rho_A(p_a, t_a)}{\rho(p, t)} \right]$$

Težina tela, koje se nalazi na površini Zemlje na koje deluje samo gravitaciona sila bez uticaja potisne sile („weight in vacuum“) je ustvari zavisna samo od jedne promenljive veličine (r_Z - poluprečnika Zemlje) :

$$G = G(r_Z) = m \cdot \frac{k_G \cdot m_Z}{r_Z^2} = m \cdot g(r_Z)$$

Na osnovu gornjih dveju jednačina, koje definišu pojmove „težina u vazduhu“ (weight in air) (G') i „težina u vakuumu“ (weight in vacuum) (G) može se naći veza :

$$G'(p_a, t_a, r_Z) = G(r_Z) \cdot \left[1 - \frac{\rho_A(p_a, t_a)}{\rho(p, t)} \right]$$

Ako se pretpostavi da telo, čija se težina određuje, ima gustinu ($\rho = \rho(p, t)$) koja je znatno veća od gustine vazduha ($\rho_A = \rho_A(p_a, t_a)$), imaćemo da je :

$$G(r_Z) = G'(p_a, t_a, r_Z) \cdot \left[1 - \frac{\rho_A(p_a, t_a)}{\rho(p, t)} \right]^{-1} \approx G'(p_a, t_a, r_Z) \cdot \left[1 + \frac{\rho_A(p_a, t_a)}{\rho(p, t)} \right], \quad (\rho \gg \rho_A)$$

Na osnovu izloženog možemo zaključiti sledeće :

- a) **Težina nafte i naftnih derivata zavisi od poluprečnika Zemlje, odnosno geografske širine mesta gde se ona nalazi!**
- b) **Takođe, težina nafte i naftnih derivata zavisi i od promenljivih ambijentnih uslova u kojima se ona trenutno nalazi !**
- c) **Konačno, samim izborom težine, kao fizičke veličine za izražavanja kvantiteta proizvoda, unosimo određen nivo netačnosti i nepouzdanosti u procesu premeravanja količine nafte i naftnih derivata!**

3. Masa

Polazeći sa stanovišta klasične fizike i njenog učenja o prirodi fizičke stvarnosti pokušajmo odgovoriti na pitanja:

Šta jeste materija?

To je realna supstancija od kojih su stvarni fizički objekti ovoga sveta sačinjeni!

Kako se kvantifikuje ova supstancija?

To je masa objekta ili fizičkog sistema objekata, koja izražava količinu materije koju objekat ili fizički sistem objekata sadrži !

Polazeći sa stanovišta klasične fizike, pa i sa stanovišta teorije relativnosti, odnosno čuvene Ajnštajnovе formule o izmenjivosti jedne u drugu, mase (m) i energije (E),

$$E = m \cdot c^2$$

masa je doista očuvana, i stoga ukupni materijalni sadržaj bilo kog fizičkog sistema mora ostati isti bez obzira na prirodne procese koji se odvijaju u njemu !

Na kraju možemo da konstatujemo sledeće :

- a) **Nema druge fizičke veličine koja se može ozbiljno uporediti sa masom kao pravom merom količine supstancije!**
- b) **Konačno, samim izborom mase, kao fizičkom veličinom za kvantifikovanje proizvoda, obezbeđuje se potreban nivo tačnosti i pouzdanosti u procesu premeravanja količine nafte i naftnih derivata!**

Miroljub Babić
dipl.el.inženjer
MAKPETROL – Beograd

