

# KARAKTERISTIKE NAFTNOG I GASNOG SLOJA



**Radoslav D. Mičić**

Univerzitet u Novom Sadu  
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin"  
Zrenjanin  
2020

Radoslav D. Mićić

# Karakteristike naftnog i gasnog sloja

Industrijsko inženjerstvo u eksploataciji nafte i gasa

Univerzitet u Novom Sadu  
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin"  
Zrenjanin

---



## Karakteritike naftnog i gasnog sloja

Autor:

Docent dr Radoslav D. Mičić

Redaktori:

Prof. dr Zvonimir Bošković

Prof. dr Sanel Nuhanović

Izdavač:

Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin

Za izdavača:

Prof. dr Dragica Radosav, dekan Tehničkog fakulteta „Mihajlo Pupin”,

Zrenjanin

CIP - Katalogizacija u publikaciji  
Biblioteke Mатице српске, Нови Сад

622.276(075.8)

**МИЋИЋ, Радослав, 1955-**

Karakteristike naftnog i gasnog sloja [Elektronski izvor]: industrijsko inženjerstvo u eksploataciji nafte i gasa / Radoslav D. Mičić. - Zrenjanin : Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", 2020. - 1 elektronski optički disk (CD-ROM) : ilustr. ; 12 cm. - (Biblioteka "Udžbenici" ; 239)

Bibliografija.

ISBN 978-86-7672-332-4

а) Нафта -- Експлоатација б) Гас – Експлоатација

COBISS.SR-ID 333327111

1. UVOD .....	1
2. KARAKTERIZACIJA REZERVOARA.....	2
3. REZERVOARI UGLJOVODONIKA .....	2
3.1. Uslovi za postojanje rezervoara za naftu ili gas.....	2
3.2. Generisanje ugljovodonika i njihove migracije .....	4
3.3. Zamke ugljovodonika .....	6
3.4. Temperatura i pritisak u rezervoaru .....	8
4. SASTAV LEŽIŠNIH FLUIDA .....	14
4.1. Ležišni fluidi.....	14
4.2. Izražavanje sastava u prirodnoj smesi ugljovodonika .....	14
4.3. Najzastupljeniji jedinjenja u ležištima nafte, gasa i kondenzata. ....	14
4.4. Klasifikacija ležišnih fluida .....	14
4.4.1. Klasifikacija prema McCainu .....	15
4.4.2. Klasifikacija prema Sečenu .....	16
4.4.3. Klasifikacija prema Ahmedu.....	18
5. FAZNO PONAŠANJE .....	19
5.1. Faza .....	19
5.2. Sistem .....	20
5.3. Broj stepeni slobode višefaznog sistema .....	20
5.4. Fazni prelazi.....	20
5.5. Čiste supstance.....	21
5.5.1. Fazno ponašanje jednokomponentnog sistema fluida (čisti metan, etan) .....	21
5.5.2. Dijagram pritiska i temperature za višekomponentne sisteme .....	22
5.6. Karakteristike faznog ponašanja višekomponentnog sistema.....	24
6. FUNDAMENTALNO PONAŠANJE GASNIH I NAFTNIH REZERVOARA.....	25
6.1. Klasifikacija rezervoara i rezervoarskih fluida .....	25
6.2. Naftni rezervoari .....	25
6.2.1. Obična sirova nafta.....	26
6.3. Rezervoari za gas .....	32
6.3.1. Rezervoari sa gasnim kondenzatom .....	33
6.3.2. Gasni kondenzat u blizini kritične tačke.....	35
6.3.3. Rezervoar vlažnog gasa .....	36
6.3.4. Rezervoar suvog gasa.....	37
6.4. Klasifikacija ugljovodoničnih tečnosti prema početnom sastavu .....	38
6.5. Nedefinisane naftne frakcije.....	39
7. KARAKTERISTIKE REZERVOARSKIH FLUIDA.....	42
7.1. Karakteristike prirodnog gasa .....	42
7.2. Ponašanje idealnih gasova.....	43
7.2.1. Zakonitosti i jednačine koje određuju karakteristike idealnih gasova .....	43
7.3. Gasne smeše, Molarna masa, molarna zapremina, Avogadrov broj.....	54

7.3.1.	Fizičke karakteristike gasne smeše .....	55
<b>7.4.</b>	<b>Osobine realnih gasova .....</b>	<b>67</b>
7.4.1.	Van der Waalsova jednačina stanja .....	67
7.4.2.	Faktor kompresibilnosti .....	67
7.4.3.	Zakon (načelo) korespondentnih stanja (ZKS) za čiste gasove .....	69
7.4.4.	Kritični parametri naftnih gasova .....	70
7.4.5.	Generalizovana korelacija za određivanje Z-faktora smese .....	71
7.4.6.	Određivanje pseudokritičnih karakteristika kada nije poznat sastav gasa .....	85
7.4.7.	Efekti ne ugljovodoničnih komponenti na faktor kompresibilnosti (Z) .....	87
<b>8.</b>	<b>LABORATORIJSKE ANALIZE REZERVOARSKOG FLUIDA (EKSPERIMENTALNI POSTUPCI ZA PVT KARAKTERIZACIJU FLUIDA) .....</b>	<b>93</b>
<b>8.1.</b>	<b>Karakteristike rezervoara koje se određuju iz PVT-dijagrama .....</b>	<b>93</b>
<b>8.2.</b>	<b>Metode određivanja karakteristika .....</b>	<b>94</b>
<b>8.3.</b>	<b>Sastav rezervoarskog fluida .....</b>	<b>94</b>
8.3.1.	Ispitivanje sastava ekspanzijom uzorka konstantnog sastava .....	96
<b>8.4.</b>	<b>Zapreminski faktor nafte (Bo) .....</b>	<b>109</b>
8.4.1.	Određivanje zapreminskog faktora .....	111
<b>8.5.</b>	<b>Faktor rastvorljivosti gasa u nafti (Rs) .....</b>	<b>115</b>
8.5.1.	Određivanje faktora rastvorljivosti .....	116
<b>8.6.</b>	<b>Dvofazni zapreminski faktor nafte (B<sub>to</sub>) .....</b>	<b>125</b>
<b>8.7.</b>	<b>Zapreminski faktor realnog gasa (Bg) .....</b>	<b>126</b>
<b>8.8.</b>	<b>Faktor isparljivosti nafte iz gasa (R<sub>v</sub>) .....</b>	<b>127</b>
<b>8.9.</b>	<b>Dvofazni zapreminski faktor stvaranja gasa (B<sub>tg</sub>) .....</b>	<b>129</b>
<b>8.10.</b>	<b>Pritisak zasićenja (pritisak u mehurićima), P<sub>b</sub> .....</b>	<b>130</b>
<b>9.</b>	<b>RAVNOTEŽNI ODNOSI FAZA KOD UGLJOVODONIČNIH SISTEMA .....</b>	<b>137</b>
9.1.	Ravnotežni odnosi .....	137
9.2.	Flash kalkulacija .....	141
<b>10.</b>	<b>KUBNE JEDNAČINE STANJA REALNIH GASOVA .....</b>	<b>158</b>
<b>10.1.</b>	<b>Van der Waalsova jednačina stanja .....</b>	<b>158</b>
<b>10.2.</b>	<b>Parametri kubne jednačine stanja .....</b>	<b>159</b>
<b>10.3.</b>	<b>Rešenja Van der Waalsove jednačine .....</b>	<b>160</b>
<b>10.4.</b>	<b>Pravila mešanja .....</b>	<b>161</b>
<b>10.5.</b>	<b>Druge poznate kubne jednačine stanja .....</b>	<b>162</b>
10.5.1.	Jednačina stanja Redlicha i Kwonga .....	162
10.5.2.	Soave-Redlich-Kwongova jednačina .....	163
10.5.3.	Jednačina stanja Penga i Robinsona .....	163
<b>10.6.</b>	<b>Korekcija zapremine tečne faze (volume shift ) .....</b>	<b>164</b>
<b>11.</b>	<b>LEŽIŠNE VODE .....</b>	<b>165</b>
11.1.	Hemijske karakteristike podzemnih voda ležišta nafte i gasa .....	166
<b>12.</b>	<b>VISKOZNOST LEŽIŠNIH FLUIDA .....</b>	<b>168</b>

12.1. Definicija viskoznosti i podela fluida prema reološkim svojstvima .....	168
12.2. Klasifikacija fluida na njutnovske i nenjutnovske fluide .....	174
12.3. Uticaj pritiska, temperature i sastava na viskoznost ležišnih fluida .....	177
12.4. Isplake .....	177
<b>13. KOLEKTORSKE (REZERVOARSKJE) KARAKTERISTIKE STENA .....</b>	<b>186</b>
13.1. Vrste kolektorskih (rezervoarskih) stena .....	186
13.2. Poroznost .....	187
13.2.1. Podela poroznosti prema genezi pora .....	187
13.2.2. Podela poroznosti prema veličini pora i praznina .....	188
13.2.3. Podela prema karakteru sistema pora .....	189
13.2.4. Vrste poroznosti .....	194
13.2.5. Merenje poroziteta .....	196
13.2.5.1. Helijumska porozimetrija .....	198
13.3. Mehaničke karakteristike stena .....	207
13.3.1. Kompresibilnost stena .....	211
13.3.2. Kompresibilnost formacije .....	215
13.3.3. Određivanje kompresibilnosti stena .....	215
13.4. Permeabilitet .....	222
13.4.1. Vrste fluida prema kompresibilnosti .....	225
13.4.2. Geometrija proticanja .....	226
13.4.3. Režimi proticanja fluida .....	226
13.4.4. Linearni protok nestišljivog fluida (tečnost) .....	227
13.4.5. Linearni protok slabo stišljivog fluida (tečnost) .....	228
13.4.6. Linearni protok stišljivog fluida (gas) .....	228
13.4.7. Varijacije propusnosti u linearnom sistemu proticanja fluida .....	229
13.4.8. Radialni protok nestišljivog fluida .....	231
13.4.9. Radialni protok slabo stišljivog fluida (tečnost) .....	232
13.4.10. Radialni protok stišljivog fluida (gas) .....	233
13.4.11. Varijacije propusnosti u radialnom sistemu proticanja fluida .....	234
13.4.12. Merenje propusnosti .....	236
13.5. Raspodela zasićenja fluidima u ležišnim stenama .....	250
13.5.1. Površinski napon .....	250
13.5.2. Eksperimentalne metode određivanja kapilarnog pritiska .....	252
13.6. Relativna propusnost i višefazni protok .....	262
13.6.1. Relativna propustljivost .....	262
13.6.2. Proračun nemešljivog istiskivanja fluida .....	263

## Legenda:

%CA, procenat ugljenika u aromatskim strukturama;

%CN, procenat ugljenika u naftenskim strukturama;

%CP, procenat ugljenika u parafinskim strukturama;

A, površina kontakta sloja tečnosti (gasa), koji se kreću, m<sup>2</sup>;

A, površina poprečnog preseka;

B, molska frakcija H<sub>2</sub>S u gasnoj smeši;

B<sub>o</sub>, zapreminski faktor formacije;

B<sub>of</sub>, zapreminski faktor nafte;

CFPP, tačka zagušenja hladnog filtera, filtrabilnost, °C;

C<sub>H+</sub>, koncentracija vodonikovih jona, mmol/l;

CP, tačka zamućenja, °C;

c, kompresibilnost;

d, prečnik;

d, relativna gustina;

dv, razlika između brzine koja se kreće sloj tečnosti (gasa) ;

dy, rastojanje između pokretnih slojeva tečnosti (gasa), m;

dS<sub>D</sub>, promena (porast) zasićeni potiskujući fluidom;

E, koeficient toplotne ekspanzije, promen zapremine kada promeni temperatura za 1°C;

E<sub>h</sub>, potencijalna energija (= F<sub>g</sub> · h = m · g · h (=) J);

F, sila sa kojom se deluje na ploče, N = 1 kgm/s<sup>2</sup>;

FP, tačka smrzavanja, °C;

f<sub>D</sub>, frakciona protok potisne faze u ukupnom protoku za zadati period (u ukupnoj smeši za podrazumevani interval vremena Q<sub>t</sub>dt;

g, gravitaciono ubrzanje, m/s<sup>2</sup>;

GCV, ukupna toplotna vrednost, MJ/kg, kJ/kg;

g, maseni udeo frakcije, težinski udeo;

H, dubina, m;

H<sub>tot</sub>, ukupna tvrdoća vode, (= H<sub>carb</sub> + H<sub>nocarb</sub>,  $\left(\frac{\text{mg}_{\text{kv}}}{\text{l}}\right)$ ), sadržaj soli u miligramima ekvivalenta po litri;

Ik, indeks korelacije;

K, Karakterizacioni broj;

k<sub>o</sub> i μ<sub>o</sub> propustljivost i viskoznost nafte;

k<sub>D</sub> i μ<sub>D</sub> propustljivost i viskoznost potiskujućeg fluida;

k<sub>o</sub>, koeficient propusnosti nafte, D;

k<sub>D</sub>, koeficient propusnosti potiskujućeg fluida, D;

K. Henrijeva konstanta Genri (K=f(α));



$k_{dry}$ , koeficient suvoće;  
 $k_{wet}$ , koeficient vlažnosti;  
 $M$ , molekulska masa, kg/kmol;  
 $m_{v,i}$ , koncentracija jona u vodi (mg/l);  
 $N$ , količina supstance, kmol;  
 $n$ , indeks refrakcije;  
 $n$ , broj ugljenikovih atoma;  
 $N_A = 6,023 \times 10^{23}$  molekula, Avogadrov broj;  
 $NCV$ , neto toplotna vrednost, MJ/kg, kJ/kg;  
 $n_i$ , kmol, broj molova;  
 $N_i$ , broj molekula (čestica) ;  
 $P$ , apsolutni pritisak, Pa;  
 $P_b$ , pritisak zasićenja, Pa;  
 $p_c$ , kapilarni pritisak (razlika pornog pritiska potiskujućeg fluida i nafte koja se istiskuje u segmentu u), atm;  
 $p_c$ , kritični pritisak, psi;  
 $p_{pc}$ , pseudo-kritičan pritisak, psi;  
 $p'_{pc}$  = korigovan pseudo-kritičan pritisak, psi;  
 $P$ , pritisak gasa iznad površine tečnosti; Pa  
 $P_i$ , parcijalni pritisak i-te komponente u smeši;  
 $PP$ , tačka stinjanja, °C;  
 $p_{sc}$ , standardni pritisak, psia, kPa;  
 $Q_n$ , donja toplota sagorevanja, MJ/kg, kJ/kg;  
 $Q_v$ , gornja toplota sagorevanja, MJ/kg, kJ/kg;  
 $Q_v$ , zapreminski protok, m<sup>3</sup>/s;  
 $R$ , univerzalna gasna konstanta, Pa × m<sup>3</sup> / (kmol × stepeni), u SI 8.3145  $\left[ \frac{\text{kPa m}^3}{\text{K kgmol}} \right]$  ;  
 $Re = f(d, v, \rho, \mu)$ , Reynoldsov broj;  
 $R_{sf}$ , gasni faktor;  
 $R_{sfb}$ , faktor rastvorenog gasa pri pritisku zasićenja (CCE test);  
 $R_{sdb}$ , faktor rastvorenog gasa pri pritisku zasićenja (test dif. otparavanja);  
 $\sin\alpha$ , određuje nagib protočnog segmenta (ugao je pozitivan kod otklona prema gore od horizontalne ravni);  
 $T$ , apsolutna temperatura, K;  
 $T_c$ , kritična temperatura, °R  
 $T_{pc}$ , pseudo-kritična temperatura, °R;  
 $T'_{pc}$  =korigovana pseudo-kritična temperatura, °R;  
 $T_b$ , temperature, temperatura ključanja, °R;  
 $T_{sc}$ , standardna temperatura, °R, °K;

$t$ , vreme, s;  
 $u$ , udaljenost u smeru protoka, cm;  
 $V$ , brzina smicanja,  $s^{-1}$ ;  
 $v$ , specifična zapremina,  $m^3/kg$ ;  
 $V$ , zapremina  $m^3$ ;  
 $V_b$ , zapremina fluida pri pritisku zasićenja,  $m^3$ ;  
 $V_c$ , kritična zapremina,  $ft^3/lb$ ;  
 $V_{deg}$ , zapremina nafte pri atmosferskom pritisku i temperaturi od  $20^\circ C$  posle degazacije,  $m^3$ ;  
 $V_g$ , zapremina gasa, rastvorenog na datoj temperaturi;  $m^3$ ;  
 $V_i$ , zapreminski udeo frakcija;  
 $V_l$ , zapremina tečnog rastvarača;  $m^3$ ;  
 $V_L$ , zapremina retrogradnog fluida;  
 $V_m$ , v. molarna zapremina,  $22,4 dm^3/mol$  pri  $0^\circ C$  i  $101,3 kPa$ , zapremina 1 mola gasa ili  $23.645 m^3/kgmol$  pri  $15^\circ C$ ,  $1.01325 bar$ ;  
 $V_{rel}$ , relativna zapremina nafte;  
 $V_{sl}$ , zapremina nafte na uslovima sloja;  $m^3$ ;  
 $V_{sc}$ , standardna zapremina,  $scf/lb-mol$ ,  $m^3/kg-mol$  ( $scf = standard cubic feet$ );  
 $V_{sto}$ , količina tečne faze u separatoru,  $m^3$ ;  
 $\alpha$ , koeficient Joule-Thomson (zavisi od prirode gasa, pritiska, temperature);  
 $\alpha$ , koeficient rastvorljivosti gasa;  
 $\beta$ , koeficient kompresibilnosti, stišljivosti (ili elastičnosti zapremine),  $GPa^{-1}$ ;  
 $\beta_n$ , koeficient kompresibilnosti, stišljivosti (ili elastičnosti zapremine) nafte,  $GPa^{-1}$ ;  
 $\exists_i$ , ekvivalent i jona;  
 $\beta_w$ , faktor kompresibilnosti.  $Pa^{-1}$ , promena zapremine kada se pritisak promeni za jedinicu;  
 $\frac{\partial p_0}{\partial u}$ , promena pritiska fluida u smeru filtriranja u;  
 $q_t$ , ukupni protok po jedinici površine,  $cm^3/s/cm^2$ ;  
 $\rho$ , gustina,  $g/cm^3$ ;  $kg/m^3$ ;  
 $\sigma$ , provodljivost,  $S/m$ ,  $\mu S/cm$ ;  
 $\tau$ , smicajno naprezanje,  $Pa$ ,  $\frac{F(N)}{A(m^2)} = \frac{lb}{100ft^2}$ ;  
 $\tau_o$ , granica tečenja (kritično naprezanje na smicanje),  $MPa$ ;  
 $\mu$ , dinamički viskozitet,  $Pa s$ ,  $Nsm^{-2}$ ,  $kg \cdot m^{-1}s^{-1}$ ;  
 $\mu_o$ , viskoznost nafte,  $cP$ ;  
 $\mu_D$ , viskoznost potiskujućeg fluida,  $cP$ ;  
 $\mu_p$ , plastična viskoznost,  $Pa s$ ,  $Nsm^{-2}$ ,  $kg \cdot m^{-1}s^{-1}$ ;  
 $\gamma$  ili  $\rho^o$ , relativna gustina;

$\omega$ , acentrični faktor;

$\Delta$ , pogonska sila (razlika temperature, razlika koncentracije, razlika količine kretanja, ili razlika pritiska, itd.) između dva mesta na rastojanju  $l$  između kojih se vrši transport;

$\Delta\rho$ , razlika gustina potiskujućeg i istiskujućeg fluida,  $\rho_D - \rho_o$ ,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\epsilon$ , dielektrična konstanta nafte, F/m, As/Vm;

$\epsilon$ , korekcionni faktor pseudo-kritična temperature (Metoda korekcije Vichert-Aziza)

$\nu$ , kinematski viskozitet,  $\text{m}^2/\text{s}$ , cSt ( $1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$v$ , molarna zapremina ( $= 22.414 \left[ \frac{\text{dm}^3}{1 \text{ g mol}} \right] = 22.414 \left[ \frac{\text{m}^3}{1 \text{ kg mol}} \right]$  pri  $T=273.15 \text{ K}$  i  $p=1.01325 \text{ bar}$ ,

zapremina 1 mola gasa);

$\Phi$ , fluidnost,  $\text{m}^2/\text{Ns}$ ;

$\phi_{\text{Adx}}$ , zapremina pornog prostora u segmentu (uz napredovanje fluida po dužini od ulaska u segment,  $dx$ );

$\phi$ , fluks posmatrane veličine (toplote, mase, količine kretanja itd.), tj. količinu te veličine koja se prenese za jedinicu vremena u površinu kroz jediničnu površinu normalnu na pravac transporta;

$x$ , koeficient proporcionalnosti;

$x$ , dužina puta u pravcu brzine  $v$ , m;

$Y$ , rastojanje između ploča, m;

$y_i$ , molarni (molski) udeo frakcija;

$y_{\text{CO}_2}$ , molski udeo  $\text{CO}_2$ ;

$y_{\text{H}_2\text{S}}$ , molski udeo  $\text{H}_2\text{S}$ ;

$y_{\text{N}_2}$ , molski udeo  $\text{N}_2$ ;

$Z$ , faktor kompresibilnosti gasa;