

Učinak ugljičnog dioksida u tercijarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta polja Ivanić

D. Novosel

IZVORNI ZNANASTVENI ČLANAK

Godišnja proizvodnja nafte u Hrvatskoj s više od 30 naftnih polja je nešto veća od 500 000 tona. Tijekom proteklih 50 godina iz naftnih ležišta u Hrvatskoj ostvaren je prosječan iscrpак nafte od 32,6% utvrđenih rezervi nafte. Sadašnja cijena nafte na svjetskom tržištu potencira primjenu tercijarnih metoda povećanja iscrpka nafte. Ukoliko se iz postojećih ležišta nafte u Hrvatskoj uz te metode poveća iscrpак nafte za 3%, to dovodi do povećanja godišnje proizvodnje od 15 000 tona nafte. U svjetskoj praksi sve zastupljenija je proizvodnja nafte tercijarnim metodama pri čemu utiskivanje ugljičnog dioksida u naftna ležišta ima najveću primjenu. Na temelju laboratorijskih ispitivanja primjene tercijarnih metoda povećanja iscrpka iz naftnih ležišta u Hrvatskoj utiskivanje ugljičnog dioksida je odabrano kao najpovoljnija metoda povećanja iscrpka nafte iz ležišta naftnog polja Ivanić.

Tijekom utiskivanja ugljičnog dioksida u naftno ležište mijenja se njegovo agregatno stanje iz kapljevitog u plinsko ili pregrijano stanje. Mjereni podaci o ugljičnom dioksidu u laboratorijskim uvjetima i uvjetima utiskivanja u ležište nažalost odstupaju. S obzirom na to da su mjerenja u bušotinskim uvjetima skupa, a neki puta i tehnološki neizvediva, za poznavanje stanja ugljičnog dioksida u bušotinskim uvjetima uzimaju se različite aproksimacije uz upotrebu raznovrsnih jednadžbi stanja. Izmjereni podaci o faznom stanju ugljičnog dioksida u širokom rasponu p, T uvjeta tijekom njegova utiskivanja u ležišta naftnog polja Ivanić tijekom pilot projekta željeli su se aproksimirati nekom od brojnih jednadžbi stanja i ne mogu se na nekom drugom ležištu koristiti. Od brojnih kubičnih jednadžbi stanja odabrane su van der Waalsova, Redlich-Kwongova, Soave-Redlich-Kwongova, Peng-Robinsonova, Valderrama-Cisternasova, Patel-Tejina, Lawal-Lake-Silberbergova i Martin-Houova jednadžba. Nakon sveobuhvatne analize mjerenih i računatih vrijednosti u širokom rasponu p, T uvjeta preporučene su jednadžbe stanja za proračunavanje faznih stanja ugljičnog dioksida kod njegova utiskivanja u ležišta naftnog polja Ivanić.

Ključne riječi: tercijarna faza iskorištavanja, naftno polje Ivanić, utiskivanje ugljičnog dioksida, termodinamičke promjene faznih stanja, jednadžbe stanja, inverzijska krivulja

1. UVOD

Relativno nizak iscrpак nafte, odnosno rezerve nafte preostale u ležištu nakon primarne i sekundarne faze iskorištavanja naftnih ležišta potaknule su teorijska znanstvena i praktična ispitivanja novih tehnologija povećanja iscrpka nafte. Tercijarna faza iskorištavanja naftnih ležišta (engleski: "Enhanced Oil Recovery Methods", u daljem tekstu: EOR metode) primjenjuje se u trenutku kada se sekundarne metode iskorištavanja približe granici ekonomičnosti.²¹ Utiskivanje ugljičnog dioksida prvi je puta primijenjeno za povećanje iscrpka nafte 1958. godine na polju Dewey-Bartlesville u Oklahomi - Sjedinjene Američke Države. U posljednje dvije godine u svijetu se u primjeni nalazi oko 300 EOR projekata. Ugljični dioksid prema sadašnjim podacima¹ dominira u primjeni metoda povećanja iscrpka nafte (65% metoda povećanja iscrpka nafte-EOR projekata u svijetu i 85% u SAD-u).

U proteklih 50 godina iz naftnih ležišta u Hrvatskoj proizvedeno je 103 milijuna m³ nafte i ostvaren je prosječni iscrpак od 32,6% utvrđenih (početnih) geoloških rezervi nafte. Visok stupanj istraženosti Panonskog bazena te izdašni izvori ugljičnog dioksida (plinska polja u Podravini, naftno-plinsko polje Šandrovac, lokalitet Kopčevac) otvaraju perspektive za primjenu tercijarnih metoda iskorištavanja naftnih ležišta.^{5,21} Prema rezultatima laboratorijskih istraživa-

nja⁸ i numeričke simulacije, na ograničenom dijelu ležišta naftnog polja Ivanić provedeno je od 2001. do 2006. pokusno naizmjenično utiskivanje ugljičnog dioksida i vode (u daljem tekstu: pilot projekt). Nakon dva naizmjenična ciklusa utiskivanja ugljičnog dioksida i vode ukupno je do kraja 2008. godine proizvedeno iz dvije proizvodne bušotine preko 5 000 m³ nafte. Time je potvrđena djelotvornost ugljičnog dioksida za istiskivanje nafte iz ležišta.

Tijekom izvođenja pilot-projekta ugljični dioksid se utiskivao u kapljevitom stanju. U kanalu bušotine zbog geotermičkog gradijenta, ugljični dioksid je promijenio agregatno stanje. Na ušću bušotine i dijelu utisnih cijevi bio je u kapljevitom stanju, zatim nadalje u utisnim cijevima bio je kao mješavina faza te je na dnu bušotine bio u pregrijanom području (pregrijana para ugljičnog dioksida). Promjene termodinamičkih svojstava ugljičnog dioksida tijekom utiskivanja, ponekad je teško utvrditi mjerenjem ali ih je zato moguće numerički definirati pomoću jednadžbi stanja realnih plinova i para. Jednadžbe stanja prema matematičkom obliku⁶ dijele se na kubične (rješive po volumenu) i polinomске (virialne) jednadžbe stanja. Za analizu promjena termodinamičkih svojstava ugljičnog dioksida, od brojnih kubičnih jednadžbi stanja arbitrarno su odabrane: van der Waalsova, Redlich-Kwongova, Soave-Redlich-Kwongova, Peng-Robinsonova, Patel-Teji-

na, Lawal-Lake-Silberbergova, Valderrama-Cisternasova i polinomska Martin i Houova jednadžba stanja. Istraživački pristup problematici promjena faznih stanja ugljičnog dioksida do kojih dolazi kod njegova utiskivanja u ležišta na naftnom polju Ivanić podrazumijevao je utvrđivanje tlaka zasićenja i proračun volumena kod tri uvjeta utiskivanja. Upotrebom računalnog programa KJS¹⁸ uspoređeni su rezultati proračuna za tri odabrana uvjeta utiskivanja ugljičnog dioksida s mjerenim podacima. U daljnjem razmatranju učinka ugljičnog dioksida izračunat je tlak inverzije ugljičnog dioksida za razmatrana tri uvjeta utiskivanja u bušotinu Iva-28 prema već prije spomenutim jednadžbama stanja.

Dobiveni rezultati proračuna odnosno odstupanja izračunatih od mjerenih vrijednosti omogućuju donošenje odluke o upotrebi pojedinih jednadžbi stanja za analitička razmatranja utiskivanja ugljičnog dioksida u tercijarnoj fazi iskorištavanja ležišta na naftnom polju Ivanić.

2. POVIJEST PROIZVODNJE NAFTE I PLINA NA NAFTNOM POLJU IVANIĆ

Ekonomski značajne količine ugljikovodika otkrivene su u pješčenjacima gama ležišta na naftnom polju Ivanić tijekom 1963. godine. Proizvodnja nafte i plina na naftnom polju Ivanić započela je u studenom 1963. godine sa samo 5 proizvodnih bušotina. Najveća proizvodnja nafte ostvarena je u primarnoj fazi iskorištavanja tijekom 1966. godine. Tijekom primarne faze u ležištu je bio dominantan nepovoljni utjecaj režima otopljenog plina, što je izravno utjecalo na iscrpak nafte, koji je trebao iznositi 18% a iscrpljeno je svega 9,2%. Analizom procesa iskorištavanja naftnih ležišta potvrđen je utjecaj režima otopljenog plina te su u cilju povećanja iscrpka nafte primijenjene sekundarne metode povećanja iscrpka nafte. Utiskivanje vode za održavanje tlaka u ležištu započelo je 1972. godine. Maksimalna proizvodnja nafte u sekundarnoj fazi iskorištavanja ležišta zabilježena je 1977. godine.⁵ Na slici 1. prikazan je tijek proizvodnje nafte i plina u primarnoj i sekundarnoj fazi iskorištavanja.

Tercijarne metoda povećanja iscrpka nafte primijenjene su 2001. godine.¹³ Tada se, uz obustavljanje proizvodnje nafte i plina na ograničenom dijelu ležišta gama 2/4, započelo s utiskivanjem vode. Cilj je bio povećati tlak u ležištu na minimalni tlak miješanja utvrđen tijekom laboratorijskih ispitivanja.⁸ Time je započeo pilot projekt. Nakon dvije godine utiskivanja vode izmjeren je tlak od 170 bar. Daljnjeg porasta tlaka u ležištu nije bilo zbog vrlo snažnog vodenog okruženja. Pilot projekt je nastavljen u uvjetima u ležištu koji su bili bliski miješanju.¹³ Nakon izgradnje postrojenja a koje se sastojalo od dva rezervoara za tekući ugljični dioksid, dvije klipne pumpe za utiskivanje ugljičnog dioksida, površinske cjevovode i ostalu mjereno instrumentacijsku opremu, prvi ciklus utiskivanja ugljičnog dioksida započeo u studenom 2003. Ugljični dioksid u kapljevitom stanju transportiran je autocisternama pri temperaturi: $T = 255,16 \text{ K}$ ($t = -18 \text{ °C}$), i tlaku $p = 18 \text{ bar}$.¹⁴ U bušotinu je utiskivan u kapljevitom stanju. Zbog

geotermičkog gradijenta bušotine, u utisnim cijevima došlo je do promjene njegova agregatnog stanja.

3. TOPLINSKA SVOJSTVA I FAZNA STANJA UGLJIČNOG DIOKSIDA

U inženjerskoj praksi bitno je poznavati termodinamička p, V, T stanja neke tvari. To je naročito značajno kod primjene metoda za povećanje iscrpka nafte iz ležišta. Utiskivanjem ugljičnog dioksida u tercijarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta dolazi do promjene ravnotežnih odnosa odnosno do promjena njegovih p, V, T osobitosti. Te promjene događaju se u nadzemnoj a naročito u podzemnoj opremi bušotina. Njih je teško utvrditi mjerenjem već ih je moguće izračunati uz poznavanje matematičkih, fizikalnih i kemijskih zakonitosti. To su ustvari jednadžbe stanja plinova i para kojima su međusobno povezane osnovne termodinamičke veličine stanja (p, V, T), odnosno makroskopska svojstva materije.^{2,4} Iskustveno je utvrđeno da su tlak - p , volumen - V i temperatura T - povezani sljedećom jednadžbom:

$$f(p, V, T) = 0 \quad (1)$$

Po Bošnjakoviću² ta se jednadžba naziva termičkom jednadžbom stanja a izražena je u implicitnom obliku te je njezin matematički oblik različit za raznovrsne tvari. Ta jednadžba vrijedi za sva agregatna stanja tvari, a može se za jedno-komponentne plinove i njihove mješavine izraziti u eksplicitnom obliku:

$$p = f_1(T, V), V = f_2(p, T) \text{ i } T = f_3(p, V) \quad (2)$$

Termodinamička površina realnih plinova predstavlja međusobnu povezanost termodinamičkih veličina stanja - i prikazana je na slici 2:

$$\left(\begin{array}{c} p \\ V \\ T \end{array} \right) \left\{ \begin{array}{l} pV \\ VT \\ pT \end{array} \right. \quad (3)$$

ali i entalpije - i entropije s : $\frac{1}{s}$. Grafički prikaz faza ili fazni dijagram je uobičajeni način prikazivanja neke tvari i uvjeta u kojima njene faze postoje. U termodinamici dva su najviše korištena tipa dijagrama za prikaz termodinamičkih svojstava :

p, V u kojem su površine predstavljene radom ili energijom, i

T, s u kojem su površine unutar dijagrama predstavljene toplinom

Realno područje za neku tvar može se ilustrirati p, V dijagramom (slika 3). Od točke A do točke B, kao što je prikazano na slici 3, istovremeno postoje kapljevina i plin. Ta linija od točke A do točke B naziva se linija napetosti, a područje ispod nje je dvofazno područje ili zasićeno područje.

Promjene termodinamičkih svojstava ugljičnog dioksida tijekom utiskivanja u ležište moguće je numerički definirati pomoću jednadžbi stanja realnih plinova. Jednadžbe stanja prema matematičkom obliku^{2,3} dijele se na kubične (rješive po volumenu) i polinomske (virialne) jednadžbe stanja.⁶ Jednadžbe

stanja realnih plinova od velike su važnosti za naftno rudarstvo.^{6,7,17,21,26} U svim analizama promjena termodinamičkih svojstava potrebno je krenuti od temeljne jednadžbe stanja koju je 1873. godine postavio J. D. van der Waals.²⁵ Nakon toga brojni znanstvenici predložili su više od stotinu jednadžbi stanja³ a i danas pokušavaju izvesti nove oblike. Na primjeru utiskivanja ugljičnog dioksida tijekom pilot projekta, usporedit će se osam arbitrarno odabranih jednadžbi. Uspoređeni su rezultati dobiveni korištenjem jednadžbi kubičnog oblika po volumenu: van der Waalsova²⁵ (1873.), Redlich-Kwongova²⁰ (1949.), Soave-Redlich-Kwongova²² (1972.), Peng-Robinsonova¹⁷ (1976.), Valderrama-Cisternasova²³ (1986.) Patel-Tejina¹⁶ (1982.), Lawal-Lake-Silberbergova¹⁰ (1983.), i polinomskoj (virialnoj) jednadžbi stanja Martin i Houa^{11,12} (1955./ 1959.) s mjerenim vrijednostima.

4. REZULTATI PRORAČUNA VOLUMENA I TLAKA ZASIĆENJA KOD UTISKIVANJA UGLJIČNOG DIOKSIDA U LEŽIŠTA NAFTNOG POLJA IVANIĆ

Tijekom utiskivanja ugljičnog dioksida izmjerena je promjena tlaka i temperature u kanalu utisne bušotine (Iva-28).^{13,15} Rezultati tih mjerenja prikazani su u tablici

Tablica 1. Izmjereni podaci promjene tlaka i temperature u ovisnosti o dubini bušotine tijekom utiskivanja ugljičnog dioksida u bušotinu Iva-28			
Dubina mjerenja m	Tlak bar	Temperatura °C	
0	54,35	-18,00	Prvi uvjet: CO ₂ kao kapljevinu
50	60,26	-18,00	
100	60,25	-18,00	
150	69,87	-18,00	
200	75,43	-18,00	
250	80,25	-17,00	
300	85,26	-10,00	Drugi uvjet: CO ₂ kao mješavina
350	89,89	-5,70	
400	94,53	-3,00	
450	98,97	0,00	
500	103,61	3,00	
550	108,24	5,00	
600	113,06	8,00	
650	117,14	10,00	
700	121,58	13,20	
750	125,85	15,60	
800	130,11	17,50	
900	138,27	18,00	
1 000	146,65	27,00	Treći uvjet: CO ₂ u pregrijanom području
1 100	155,04	31,00	
1 200	162,87	36,20	
1 300	170,51	40,70	
1 400	178,33	45,20	
1 500	185,60	49,30	
1 550	189,33	51,40	
1 700	204,91	58,40	

Izvor: NOVOSEL, D.: Initial Results of WAG CO₂ IOR Pilot Project Implementation in Croatia, SPE 97639, SPE, IORC Asia Pacific, Kuala Lumpur, 2005., p.4.

1. Kao arbitrarni primjer u razmatranju promjena faznih stanja kod utiskivanja ugljičnog dioksida razmotrit će se tri uvjeta iz tablice 1. Ti uvjeti grafički su prikazani na slici 4.^{13,15} Analiziranjem tih uvjeta utiskivanja ugljičnog dioksida tijekom pilot-projekta može se zaključiti da je ugljični dioksid u kanalu utisne bušotine promijenio agregatno stanje iz kapljevitog na ušću bušotine, do ugljičnog dioksida u pregrijanom području (pregrijana para ugljičnog dioksida) na dnu.

Jednadžbe i njihove konstante prikazane su u tablici 2 odnosno tablici 3. Usporedba rezultata ustvari je odstupanje izračunate vrijednosti od mjerene i izražava se postotno.³ Vrijednosti za usporedbu očitane su za ugljični dioksid iz Termodinamičkih tablica¹⁹ i uzimaju se kao mjerene vrijednosti. Prema vrijednostima tlaka i temperature iz prvog uvjeta (slika 4) ugljični dioksid je u kapljevitom stanju i nalazi se u realnom dvofaznom ili zasićenom području. Izračunat će se volumen na donjoj graničnoj liniji ili volumen zasićene kapljevine (V_l), volumen na gornjoj graničnoj liniji ili volumen zasićene pare (V_g) te tlak zasićenja (p_{1g}) (slika 3) za zadanu temperaturu. Na slici 5 dan je grafički prikaz tog uvjeta utiskivanja. Numerička rješenja prema izabranim jednadžbama stanja prikazana su u tablici 4.¹⁵

Veličine iz drugog uvjeta (slika 4) utiskivanja ugljičnog dioksida (ugljični dioksid kao mješavina) uvrštene su u izabrane jednadžbe te su ponovno kao i za prvi uvjet izračunate vrijednosti volumena (V_l) i (V_g) te tlaka zasićenja (p_{1g}) ugljičnog dioksida. Temperatura iz tog uvjeta (31,0 °C) je vrlo blizu vrijednosti kritične temperature ugljičnog dioksida. Dobiveni rezultati uspoređeni su s mjernim podacima te su izračunata odstupanja.^{3,15}

Kod trećeg uvjeta utiskivanja, a to je pregrijano stanje na dnu utisne bušotine Iva-28, izračunat je volumen prema izabranim jednadžbama stanja te je uspoređen s mjerenim podatkom. Taj volumen izračunat je kod zadanih vrijednosti tlaka i temperature za sva tri uvjeta utiskivanja iz slike 4. Te vrijednosti uspoređene su s volumenom izračunatim po arbitrarno izabranim jednadžbama stanja te su utvrđena odstupanja.¹⁵

Također, po izabranim jednadžbama stanja izračunat je volumen te je uspoređen s mjerenim podacima,⁹ odnosno s volumenom izračunatim iz mjerenih podataka tlaka i temperature tijekom utiskivanja ugljičnog dioksida u bušotinu Iva-28 (tablica 1).¹⁵

PRVI UVJET: → KAPLJEVITO STANJE UGLJIČNOG DIOKSIDA

Komparativni pregled rezultata proračuna za sedam odabranih kubičnih jednadžbi i jednu polinomsku jednadžbu stanja prikazan je u tablici 4 gdje su crvenom bojom označena izračunata najmanja odstupanja od mjerenih vrijednosti.¹⁵

Najmanje odstupanje izračunatih V_l volumena od mjerenih vrijednosti dobiven je po Peng-Robinsonovoj jednadžbi stanja (0,56%). Najbliži rezultati tome su oni dobiveni po Laval-Lake-Silberbergovoj (7,05%) i Valderama- Cisternasovoj (9,2%) jednadžbi stanja. Po ostalim jednadžbama stanja dobivena su velika odstupanja. Najmanja odstupanja izračunatog volumena V_g od mjerenih vrijednosti dobivena su korištenjem Redlich-Kwongove jednadžbe stanja (0,08%) dok se po

Tablica 2. Pregled izabranih jednadžbi stanja		
Dvoparametarske kubične jednadžbe stanja		Konstante jednadžbi za CO ₂
Van der Waals (1873.)	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}$	$a = 3,658\ 281\ \text{bar m}^6/\text{kmol}^2$ $b = 0,042\ 857\ \text{m}^3/\text{kmol}$
Redlich-Kwong (1949.)	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{\sqrt{T}V(V+b)}$	$a = 3,706\ 886\ \text{bar m}^6/\text{kmol}^2$ $b = 0,297\ 05\ \text{m}^3/\text{kmol}$ $\alpha = 1,092\ 004$
Soave-Redlich-Kwong (1972.)	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)}$	$a = 3,706\ 886\ \text{bar m}^6/\text{kmol}^2$ $b = 0,297\ 05\ \text{m}^3/\text{kmol}$ $\alpha = 1,143\ 892$
Peng-Robinson (1976.)	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b) + b(V-b)}$	$a = 3,964\ 909\ \text{bar m}^6/\text{kmol}^2$ $b = 0,026\ 673\ \text{m}^3/\text{kmol}$ $\alpha = 1,122\ 871$
Troparametarska kubična jednadžba stanja		
Patel-Teja (1982.)	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b) + c(V-b)}$	$a = 4,319\ 800\ \text{bar m}^6/\text{kmol}^2$, $b = 0,022\ 877\ \text{m}^3/\text{kmol}$, $c = 0,610\ 28\ \text{m}^3/\text{kmol}$ $\alpha = 1,122\ 717\ 5$
Četveroparametarska kubična jednadžba stanja		
Lawal-Lake-Silberberg (1983.)	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2 + \alpha_L bV - \beta_L b^2}$	$a = 4,856\ 928\ \text{bar m}^6/\text{kmol}^2$ $b = 0,033\ 705\ \text{m}^3/\text{kmol}$ $\alpha = 1,114\ 389\ 2$ $\alpha_L = 2,810\ 637$ $\beta_L = 3,249\ 487$
Valderrama-Cisternas (1986.)	$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b) + c(V-b)}$	$a = 3,925\ 426\ \text{bar m}^6/\text{kmol}^2$ $b = 0,027\ 17\ \text{m}^3/\text{kmol}$, $c = 0,022\ 303\ \text{m}^3/\text{kmol}$ $\alpha = 1,130\ 383\ 2$
Polinomska jednadžba stanja		in Table 3.
Martin and Hou (1955./1959.)	$p = \frac{f_1}{V-b} + \frac{f_2}{(V-b)^2} + \frac{f_3}{(V-b)^3} + \frac{f_4}{(V-b)^4} + \frac{f_5}{(V-b)^5}$	

Tablica 3. Konstante Martin-Houove jednadžbe stanja za CO ₂		
Konstanta	Prva jednadžba iz 1955. godine	Modificirana jednadžba iz 1959.
T_c	31,01 °C	31,01 °C
p_c	73,7 bar	73,7 bar
V_c	0,002 156 363 m ³ /kg	0,002 156 363 m ³ /kg
Z_c	0,276 71	0,276 71
m	14,0	14,0
β	3,25	3,25
T_b/T_c	0,80	0,80
n	-	1,70
y	-	3,50
b	0,007 495	0,007 495
A_2	-8,927 363 1	-8,927 363 1
A_3	0,189 078 19	0,179 486 21
A_4	-2,112 459 x 10 ⁻³	-2,112 459 x 10 ⁻³
A_5	-	7,017 835 x 10 ⁻⁶
B_1 or R	0,243 81	0,243 81
B_2	5,262 476 x 10 ⁻³	5,262 476 x 10 ⁻³
B_3	-7,046 17 x 10 ⁻⁵	-5,770 542 x 10 ⁻⁵
B_5	1,956 559 3x 10 ⁻⁸	1,023 511 x 10 ⁻⁸
C_2	-150,975 87	-150,975 87
C_3	4,083 142 4	4,705 805
C_5	-	-4,55437 x 10 ⁻⁴

Izvor: MARTIN, J., J., KAPOOR, R., M., DE NEVERS, N.: An Improved Equation of State for Gases, A.I.Ch.E. Journal, Volume 5, Number 2., 1959., p 160.

Peng-Robinsonovoj jednadžbi stanja također dobiva izuzetno dobar rezultat (0,12%). Ostali rezultati razlikuju se od mjerenih vrijednosti u vrlo velikom postotnom iznosu i ne zadovoljavaju. Odstupanje izračunatih vrijednosti po polinomske Martin-Houovoj jednadžbi stanja za oba izračunata volumena prilično odstupaju od mjerenih vrijednosti (-47,3% i 29,74%) i također ne zadovoljavaju. Pravac koji u tri točke (slika 3) siječe izotermu ispod kritične točke između minimalnog i maksimalnog tlaka prema Maxwellovom pravilu jednakih površina određuje vrijednost tlaka zasićenja (p_{lg}). U tablici 4 prikazani su rezultati proračuna tlaka zasićenja ugljičnog dioksida za zadanu izotermu. Najmanje odstupanje od mjerenih vrijednosti za zadanu izotermu dobiveno je po Soeve-Redlich-Kwongovoj (u daljem tekstu: SRK) i Peng-Robinsonovoj jednadžbi stanja (-0,57% i 0,68%). Objašnjenje tog rezultata je u činjenici da parametri tih jednadžbi stanja nisu definirani samo kritičnim tlakom i kritičnom temperaturom već i faktorom acentričnosti. Za Soeve-Redlich-Kwongovu jednadžbu stanja grafički prikaz rezultata dan je na p, V dijagramu na slici 6.¹⁵

Tablica 4. Usporedba izračunatih vrijednosti V_l , V_g i ρ_{1g} ugljičnog dioksida i mjerenih vrijednosti za zadanu izotermu $t = -10\text{ }^\circ\text{C}$

Broj	Jednadžba stanja	IZRAČUNATI	Mjereni v_l iz termod. tablica	Odstupanje od	Izračunati V_g	Mjereni v_g iz termod. tablica	Odstupanje od	Izračunati ρ_{1g}	Mjereni ρ_{1g}	Odstupanje od
		V_l		mjerene vrijednosti			mjerene vrijednosti			%
		m^3/kmol	m^3/kmol	%	m^3/kmol	m^3/kmol	%	bar	bar	%
1	van der Waals	0,072 838	0,044 846	-62,42	0,369 079	0,624678	40,92	40,21	26,46	-51,97
2	Redlich-Kwong	0,052 928		-18,02	0,515 509		17,48	30,86		-16,63
3	Soeve-Redlich-Kwong	0,050 595		-12,82	0,625 208		-0,08	26,61		-0,57
4	Peng-Robinson	0,044 596		0,56	0,623 944		0,12	26,28		0,68
5	Patel-Teja	0,036 247		19,17	0,711 283		-13,86	23,32		11,87
6	Laval-Lake-Silberberg	0,041 685		7,05	0,956 244		-53,08	18,29		30,88
7	Valderrama - Cisternas	0,040 721		9,20	1,181 681		-89,17	15,58		41,12
8	Martin-Hou	0,066 075		-47,34	0,438 877		29,74	32,65		-23,39

Izvor: NOVOSEL, D.: Učinak ugljičnog dioksida u tercijarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta polja Ivanić, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009., p. 87-90.

Tablica 5. Komparativna analiza rezultata izračunatog i mjerenog volumena ugljičnog dioksida za zadane uvjete $t = -10\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 85,26\text{ bar}$

Broj	Jednadžba stanja	Izračunati V (m^3/kmol)	Očitani V iz termod. atlasa (m^3/kmol)	Odstupanje od volumena iz Termod. Atlasa (%)	Mjereni V iz HDM-a (m^3/kmol)	Odstupanje od mjerene vrijednosti (%)
1	van der Waals	0,067 472	0,044 01	-53,31	0,043 122 7	-56,47
2	Redlich-Kwong	0,049 656		-12,83		-15,15
3	Soeve-Redlich-Kwong	0,047 957		-8,97		-11,21
4	Peng-Robinson	0,042 444		3,56		1,57
5	Patel-Teja	0,034 880		20,75		19,11
6	Laval-Lake-Silberberg	0,041 103		6,61		4,68
7	Valderrama - Cisternas	0,039 546		10,14		8,29
8	Martin-Hou	0,048 722		-10,71		-12,98

Izvor: NOVOSEL, D.: Učinak ugljičnog dioksida u tercijarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta polja Ivanić, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009., p. 91.

Izračunate vrijednosti volumena ugljičnog dioksida za zadane uvjete uspoređeni su s volumenom (slika 7) očitanim iz Termodinamičkog atlasa⁹ i volumenom izračunatim iz mjerenih podataka promjene tlaka i temperature (hidrodinamska mjerenja, u daljem tekstu HDM) po dubini bušotine Iva-28.¹³ U tablici 5 dane su izračunate vrijednosti volumena za zadane uvjete $t = -10\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 85,26\text{ bar}$ i njihova odstupanja od volumena dobivenog hidrodinamskim mjerenjima.

Uspoređivanjem izračunatih i mjerenih vrijednosti volumena najmanje odstupanje dobiveno je korištenjem Peng-Robinsonove jednadžbe stanja (3,56% i 1,57%), Zadovoljavajući rezultat dobiven je i proračunom volumena po Laval-Lake-Silberbergovoj jednadžbi stanja (4,68% i 6,61%) dok ostali rezultati ne zadovoljavaju (odstupaju od mjerene vrijednosti više od 5%). Rezultat dobiven rješenjem polinomske jednadžbe stanja Martin i Houa (-10,71% i 12,98%) također ne zadovoljava taj kriterij.

DRUGI UVJET: → UGLJIČNI DIOKSID KAO MJEŠAVINA

Pregled rezultata proračuna za odabrane jednadžbe stanje te odstupanja tih vrijednosti od mjerenih prikazan je u tablici 6.

Najmanje odstupanje volumena na donjoj graničnoj liniji od mjerenih vrijednosti (tablica 6) dobiveno je

korištenjem Valderama-Cisternasove (u daljem tekstu: VC) jednadžbe stanja (-3,58%). Najmanje odstupanje volumena suhozasićene pare ugljičnog dioksida V_g od mjerenih vrijednosti dobiveno je korištenjem Patel-Tejine jednadžbe stanja (-4,06%). Zadovoljavajući rezultati dobiveni su i korištenjem Laval-Lake-Silberbergove jednadžbe (-4,45%) te Martin-Houove jednadžbe stanja (-4,61%). Odstupanja izračunatih rezultata tlaka zasićenja od mjerene vrijednosti su malena i kreću se od 0,08% do -0,29%. Najmanje odstupanje dobiveno je korištenjem Valderama-Cisternasove jednadžbe stanja (0,08%). Najveće odstupanje kao i za prvi uvjet dobiveno je korištenjem vdW jednadžbe stanja. Na slici 9 dan je grafički prikaz proračuna Maxwellovog uvjeta i tlaka zasićenja za zadanu izotermu po VC jednadžbi stanja.¹⁵

Slikom 10 grafički su prikazani u T,s dijagramu podaci temperature i tlaka iz drugog uvjeta utiskivanja ugljičnog dioksida: $t = 31\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 155,04\text{ bar}$. U tablici 7 dane su izračunate vrijednosti volumena za zadane uvjete i njihova odstupanja od volumena očitanoog iz Termodinamičkog atlasa⁹ i onog dobivenog hidrodinamskim mjerenjima.

Analizom rezultata iz tablice 6 utvrđeno je da su najmanja odstupanja dobivena po Valderama-Cisternasovoj (3,59% i -4,79%) i Laval-Lake-Silberbergovoj jednadžbi stanja (-0,18% i 7,75%). Zadovoljavajući rezultat dobiven

Tablica 6. Usporedba izračunatih vrijednosti V_f , V_g i p_{1g} ugljičnog dioksida i mjerenih vrijednosti za zadanu izotermu $t = 31,0\text{ }^\circ\text{C}$

Broj	Jednadžba stanja	Izračunati V_f	Mjereni V_f iz termod. tablica	Odstupanje od mjerene vrijednosti	Izračunati V_g	Mjereni V_g iz termod. tablica	Odstupanje od mjerene vrijednosti	Izračunati p_{1g}	Mjereni p_{1g}	Odstupanje od mjerene vrijednosti
		m ³ /kmol	m ³ /kmol	%	m ³ /kmol	m ³ /kmol	%	bar	bar	%
1	van der Waals	0,125 346	0,094 885 56	-32,10	0,131 946	0,094 885 56	-39,06	73,72	73,51	-0,29
2	Redlich-Kwong	0,110 369		-16,32	0,118 490		-24,88	73,70		-0,26
3	Soeve-Redlich-Kwong	0,109 968		-15,90	0,118 927		-25,34	73,69		-0,24
4	Peng-Robinson	0,101 131		-6,58	0,109 910		-15,83	73,69		-0,24
5	Patel-Teja	0,089 544		5,63	0,098 738		-4,06	73,68		-0,23
6	Laval-Lake-Silberberg	0,089 290		5,90	0,099 105		-4,45	73,65		-0,19
7	Valderrama - Cisternas	0,098 279		-3,58	0,116 715		-23,01	73,45		0,08
8	Martin-Hou	0,089 094		6,10	0,099 259		-4,61	73,69		-0,24

Izvor: NOVOSEL, D.: Učinak ugljičnog dioksida u tercijarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta polja Ivanić, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009., p. 92-94.

Tablica 7. Komparativna analiza rezultata izračunatog i mjerenog volumena ugljičnog dioksida za zadane uvjete $t = 31\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 155,04\text{ bar}$

Broj	Jednadžba stanja	Izračunati V (m ³ /kmol)	Očitani V iz termod. Atlasa (m ³ /kmol)	Odstupanje od volumena iz Termod. atlasa (%)	Mjereni V iz HDM-a (m ³ /kmol)	Odstupanje od mjerene vrijednosti (%)
1	van der Waals	0,072 716	0,055 892 7	-30,10	0,051 467	-41,29
2	Redlich-Kwong	0,058 982		-5,53		-14,60
3	Soeve-Redlich-Kwong	0,058 978		-5,52		-14,59
4	Peng-Robinson	0,053 029		5,12		-3,03
5	Patel-Teja	0,045 580		18,45		11,44
6	Laval-Lake-Silberberg	0,051 559		7,75		-0,18
7	Valderrama - Cisternas	0,053 932		3,51		-4,79
8	Martin-Hou	0,054 617		2,28		-6,12

Izvor: NOVOSEL, D.: Učinak ugljičnog dioksida u tercijarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta polja Ivanić, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009., p. 95.

Tablica 8. Komparativna analiza rezultata izračunatog i mjerenog volumena ugljičnog dioksida za zadane uvjete $t = 58,4\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 204,91\text{ bar}$

Broj	Jednadžba stanja	Izračunati V (m ³ /kmol)	Očitani V iz termod. atlasu (m ³ /kmol)	Odstupanje od volumena iz Termod. Atlasu (%)	Mjereni V iz HDM-a (m ³ /kmol)	Odstupanje od mjerene vrijednosti (%)
1	van der Waals	0,075 252	0,066 015	-13,99	0,057 900 97	-29,97
2	Redlich-Kwong	0,064 903		-2,19		-12,09
3	Soeve-Redlich-Kwong	0,067 460		-2,19		-16,51
4	Peng-Robinson	0,061 598		6,69		-6,39
5	Patel-Teja	0,055 822		15,44		3,59
6	Laval-Lake-Silberberg	0,065 333		1,03		-12,84
7	Valderrama - Cisternas	0,071 137		-7,76		-22,86
8	Martin-Hou	0,055 801		15,47		3,63

Izvor: NOVOSEL, D.: Učinak ugljičnog dioksida u tercijarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta polja Ivanić, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009., p. 97.

je proračunom volumena po Peng-Robinsonovoj jednadžbi stanja (5,12% i -3,03%). Izračunati volumen ugljičnog dioksida dobiven po Martin-Houvoj jednadžbi također se može ocijeniti zadovoljavajućim jer odstupa od uspoređenih volumena za 2,28% i -6,12%.

TRÉCI UVJET: → UGLJIČNI DIOKSID U PREGRIJANOM PODRUČJU - PREGRIJANA PARA UGLJIČNOG DIOKSIDA

Grafički prikaz trećeg uvjeta utiskivanja u utisnu bušotinu Iva-28 - pregrijana para ugljičnog dioksida

prikazan je na slici 11. Za izabrane jednadžbe stanja komparativni pregled rezultata proračuna volumena za pregrijanu paru ugljičnog dioksida dan je u tablici 8.¹⁵

Odstupanje izračunatih vrijednosti volumena ugljičnog dioksida u pregrijanom području od volumena očitano u Termodinamičkom atlasu⁹ najveće je kao i za prva dva razmatrana uvjeta po van der Waalsovoj jednadžbi (-13,99% i -29,97%). Najmanje odstupanje izračunatih vrijednosti volumena ugljičnog dioksida od onog očitano iz termodinamičkog atlasu dobiveno je

korištenjem Laval-Lake-Silberbergove jednadžbe stanja 1,03%. Zadovoljavajući rezultat dobiven je i korištenjem Redlich-Kwongove i Soeve-Redlich-Kwongove jednadžbe stanja (-2,19 %). Uspoređivanjem izračunatog volumena s volumenom ugljičnog dioksida izračunatog na temelju HDM mjerenja, uočava se da je najmanje odstupanje dobiveno korištenjem Patel-Tejine jednadžbe (3,59%) a približan tome je i rezultat dobiven po Martin-Houovoj jednadžbi stanja (3,63%).

5. REZULTATI PRORAČUNA TLAKA INVERZIJE KOD UTISKIVANJA UGLJIČNOG DIOKSIDA U LEŽIŠTA NAFTNOG POLJA IVANIĆ

Nadalje će se u razmatranju učinka s termodinamičkog stajališta razmotriti tlak inverzije ugljičnog dioksida prema jednadžbama stanja iz tablice 2. Inverzijska krivulja za ugljični dioksid na slici 12 označena je zelenom bojom. Tri razmatrana uvjeta utiskivanja ugljičnog dioksida ucrtana su u T_s dijagram (točke 1, 2 i 3) i nalaze se desno od inverzijske krivulje gdje se plin hladi i gdje je promjena temperature po tlaku pozitivna. S obzirom na to da su podaci utiskivanja ucrtani u dijagram koji je publiciran u jedinicama Tehničkog sustava⁹ (dijagram ovakvoga tipa u jedinicama IS nije kod nas još publiciran), kod njegove upotrebe potrebno je koristiti sljedeće pretvorbene koeficijente:

- atmosfera (at) $\times 0,980\ 389 = \text{bar}$
- kcal/kg $\times 4,186\ 8 = \text{J/kg}$

U daljnjem razmatranju učinka ugljičnog dioksida izračunat je tlak inverzije ugljičnog dioksida a rezultati proračuna prikazani su u tablici 9.

Najmanje odstupanja izračunatih vrijednosti od mjerenih za prvi uvjet dobiveno je korištenjem van der Waalove jednadžbe stanja (-5%). Kod razmatranja drugog uvjeta po svim jednadžbama stanja dobivena su velika odstupanja od mjerenih vrijednosti. Najmanje odstupanje dobiveno je korištenjem van der Waalove jednadžbe (45,89%), iako je dobiveno odstupanje preveliko. Za treći uvjet (dno utisne bušotine), kada je ugljični dioksid u pregrijanom području, najbolji

rezultat dobiven je po Laval-Lake-Silberbergovoj jednadžbi stanja (-2,65%). Odstupanja pojedine jednadžbe stanja ovisno je o uvjetima iz kojih su izvedene konstante jednadžbi stanja. Sve jednadžbe stanja izvode se iz van der Waalove jednadžbe stanja. Konstante jednadžbi stanja određene su s tri veličine stanja: p_c, T_c, V_c . Van der Waals²⁵ je u svojim istraživanjima iz odnosa veličina stanja u kritičnoj točki definirao koeficijent odstupanja realnog od idealnog plina u kritičnoj točki z_c u iznosu od $3/8$ (0,375). Pojedini autori jednadžbi stanja definiraju različite vrijednosti z_c . Po jednadžbi stanja Redlich-Kwonga i Soeve-Redlich-Kwonga, vrijednost $z_c=0,333$ a po Peng-Robinsonu je $z_c=0,307$. Konstante van der Waalove jednadžbe određene su sa dvije kritične veličine, odnosno iz tri kombinacije tih veličina stanja: p_c, T_c, V_c . Autori novijih verzija jednadžbi stanja van der Waalov zakon podudarnih stanja proširuju trećim kriterijem. To je faktor acentričnosti, ω odnosno korekcija jednadžbe stanja zbog nesferičnosti i polarnosti molekula. Taj faktor u jednadžbi stanja opisuje promjenu u privlačenju molekula kao funkciju temperature $a(T)$. To sve predstavlja uvjete iz kojih su autori jednadžbi stanja izveli konstante. One se izvode iz različitih uvjeta, tako da i rezultati u tablici 8 zbog toga odstupaju.

6. ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA PRORAČUNA S KOMENTAROM UČINKA UGLJIČNOG DIOKSIDA S TERMODINAMIČKOG STAJALIŠTA

U postupku utvrđivanja termodinamičkih svojstava ugljičnog dioksida tijekom njegova utiskivanja na pilot-projektu uspoređeni su rezultati dobiveni korištenjem kubičnih jednadžbi stanja i polinomske jednadžbe stanja. Iz izvedene analize može se zaključiti da za kapljevito stanje ugljičnog dioksida Peng-Robinsonova i Soeve-Redlich-Kwongova jednadžba stanja daje najbolje rezultate kod izračunavanja volumena u realnom dvofaznom području, odnosno za proračun tlaka zasićenja. U uvjetima kada je u utisnim cijevima ugljični dioksid bio mješavina (temperatura

Tablica 9. Usporedba izračunatog tlaka inverzije ugljičnog dioksida s mjerenim tlakom inverzije za tri razmatrana uvjeta

Broj	Jednadžbe stanja	Tlak inverzije za $t=-10\text{ }^\circ\text{C}$ i $\rho=85,26\text{ bar}$ (bar)	Mjereni tlak inverzije (bar)	Odstupanje od mjerenog tlaka inverzije (%)	Tlak inverzije za $t=31,0\text{ }^\circ\text{C}$ i $\rho=155,04\text{ bar}$ (bar)	Mjereni tlak inverzije (bar)	Odstupanje od mjerenog tlaka inverzije (%)	Tlak inverzije za $t=58,0\text{ }^\circ\text{C}$ i $\rho=204,9\text{ bar}$ (bar)	Mjereni tlak inverzije (bar)	Odstupanje od mjerenog tlaka inverzije (%)
1	Van der Waals	94.5	90	-5.00	189.4	350	45.89	244.8	550	55.49
2	Redlich-Kwong	489.2		-443.56	558.8		-59.66	604.3		-9.87
3	Sove-Redlich-Kwong	507.9		-464.33	583.6		-66.74	633		-15.09
4	Peng-Robinson	563.9		-526.56	648.9		-85.40	704.6		-28.11
5	Patel-Teja	666.7		-640.78	769.5		-119.86	837.5		-52.27
6	Laval-Lake-Silberberg	451.3		-401.44	519.7		-48.49	564.6		-2.65
7	Valderrama - Cisternas	600.1		-566.78	697.2		-99.20	761.4		-38.44
8	Martin - Hou	15.4		82.89	73.7		78.94	111.3		79.76

Izvor: NOVOSEL, D.: Učinak ugljičnog dioksida u terciarnoj fazi iskorištavanja naftnih ležišta polja Ivanić, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009., p. 105.

ugljičnog dioksida vrlo blizu kritične temperature) za izračunavanja volumena u realnom dvofaznom području, odnosno za proračun tlaka zasićenja, najbolji rezultat dobiven je po Valderama-Cisternasovoj jednadžbi. Rezultati dobiveni po Martin-Houovoj jednadžbi stanja ne odstupaju bitno od onih dobivenih po Valderama-Cisternasovoj jednadžbi. Kod proračuna volumena za treći uvjet (pregrijana para ugljičnog dioksida) najbolji rezultat dobiven je po Laval-Lake-Silberbergovoj jednadžbi stanja.

Izračunati tlak inverzije uspoređen je s mjerenim inverzijskim tlakom iz Termodinamičkog atlasa.⁹ Najmanje odstupanje za prva dva razmatrana uvjeta dobiveno je po van der Waalovoj jednadžbi (5%) i (45,9%), Za treći razmatrani uvjet najmanje odstupanje dobiveno je po Laval-Lake-Silberbergovoj jednadžbi stanja (-2,65%).

Na temelju provedene usporedbe ne može se izvesti jedinstveni zaključak o primjeni neke od jednadžbi stanja. U numeričkoj simulaciji za proračun fazne ravnoteže sistema nafta-ugljični dioksid u uvjetima miješanja u ležištima Naftnog polja Ivanić korištena je Peng-Robinsonova jednadžba stanja. Ta jednadžba razvijena je za primjenu u naftnom rudarstvu te se često koristi. Kod numeričke simulacije pilot-projekta također je korištena Peng-Robinsonova jednadžba stanja.^{8,21} HDM mjerenja^{13,14} utvrdila su uvjete miješanja između utiskivanog ugljičnog dioksida i nafte na samom dnu utisne bušotine Iva-28.

Proizvodne bušotine Iva-11 i Iva-19 prije izvođenja pilot-projekta bile su zatvorene zbog visokog sadržaja vode u proizvedenoj kapljevini. Nakon prvog ciklusa utiskivanja ugljičnog dioksida i vode na proizvodnoj bušotini Iva-11 došlo je do povećanja proizvodnje kapljevine, smanjenja sadržaja vode u kapljevini i samim time većom proizvodnjom nafte. Tijekom drugog ciklusa utiskivanja ugljičnog dioksida došlo je do istovremenog povećanja proizvodnje nafte na obje bušotine. Bušotine su ukupno kroz ta dva ciklusa proizvele 5 000 m³ nafte. U toj fazi pilot-projekta bušotine su proizvodile naftu eruptivno,^{13,15} što je potvrda uspješnog djelovanja mehanizma istiskivanja nafte u uvjetima miješanja. To ujedno znači da je utisnuti ugljični dioksid u ležištu neprestano bio u kontaktu s naftom te se zbog promjene fazne ravnoteže otapao u nafti. Stoga, može se zaključiti da je izbor Peng-Robinsonove jednadžbe stanja za proračun fazne ravnoteže sistema nafta-ugljični dioksid u uvjetima miješanja u ležištima Naftnog polja Ivanić bio dobar izbor.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu je s termodinamičkog stajališta analizirana promjena faznih stanja ugljičnog dioksida do kojih dolazi kod njegova utiskivanja. U naftnom inženjerstvu potrebna su mjerenja. Ona su ili skupa ili ih je nemoguće ostvariti zbog na primjer tlaka, temperature ili pak velike dubine bušotine. U trenutku kada nema mjerenih podataka pomažu analitička rješenja.

To je značilo utvrđivanje tlaka zasićenja, proračun volumena za utiskivanje i proračun tlaka zasićenja kod tri uvjeta utiskivanja. Pri tome su korištene arbitrarno odabrane jednadžbe stanja: van der Waalova, Redlich-

Kwongova, Soave-Redlick-Kwongova, Peng-Robinsonova, Patel-Tejina, Laval-Lake-Silberbergova, Valderrama i Cisternasova i Martin i Houova jednadžba stanja. Odstupanja izračunata od mjerenih vrijednosti za razmatrane uvjete utiskivanja ugljičnog dioksida dovode do zaključka o korištenju za realne uvjete, Peng-Robinsonove, Valderrama-Cisternasove i Lawal-Lake-Silberbergove jednadžbe stanja. Utiskivanjem ugljičnog dioksida u ležište dolazi do miješanja ugljičnog dioksida i nafte. Kod numeričke simulacije tercijarne faze iskorištavanja Naftnog polja Ivanić za proračun fazne ravnoteže sustava nafta-ugljični dioksid u ležištu korištena je Peng-Robinsonova jednadžba stanja. Na temelju dobivenih rezultata u ovom radu, za buduće proračune moguće je uz Peng-Robinsonovu koristiti i Valderrama-Cisternasovu i Lawal-Lake-Silberbergovu jednadžbu stanja.



Autor:

Dubravko Novosel, doktor tehničkih znanosti, INA-Industrija nafte i plina, Istraživanje i proizvodnja nafte i plina, Sektor istraživanja i proizvodnje nafte i plina za JI Europu, Ekspert, Šubićeva 29, 10000 Zagreb, e-mail: dubravko.novosel@ina.hr

UDK: 550.8 : 553.982 : 622.24.63 : 502.7 (497.5)

550.8	geološka istraživanja
553.982	ležišta nafte i plina
622.24.63	rudarstvo, iscrpljivanje ležišta
502.7	iscrpljivanje ležišta
(497.5)	RH Ivanić