

# Teoretska i eksperimentalna analiza ispitivanja iscrpljivanja pri konstantnom volumenu i proračun fazne ravnoteže korištenjem modificiranog algoritma

H. Arabi, S. Farahani i A. Javadifar

IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Iscrpljivanje pri konstantnom volumenu (CVD) koja pobliže simulira stvarno ponašanje ležišta plinskoga kondenzata, vrlo je važan laboratorijski test. Rezultati dobiveni laboratorijskim mjerenjima mogu se direktno koristiti za određivanje količine proizvedenog kondenzata i plina kao funkcije tlaka ispod tlaka rosišta. Najsporiji dio kod simulacije plinsko-kondenzatnih ležišta je proračun fazne ravnoteže pa je predloženo nekoliko pristupa kako bi je se ubrzalo. Fizička svojstva fluida ovise o tomu da li je prisutan u jednoj fazi ili je razdvojen u nekoliko faza ravnoteže pri kontaktnim uvjetima protjecanja faza. Kako bi se odredio broj faznih ravnoteža, njihov sastav i količine, potrebno je u svakom vremenskom koraku učiniti proračun fazne ravnoteže pri kontaktnim uvjetima protjecanja faza. Tako se vrijeme potrebno za proračun povećava s porastom broja komponenti. Ovaj rad predstavlja simulaciju CVD testova za različite jednadžbe stanja (EOS) poput Peng-Robinson (PR) i Soave-Redlich-Kwong (SRK) korištenjem programa MATLAB te usporedbom rezultata s laboratorijskim podatcima. Ova studija je pokazala da je ušteda novca i vremena jedna od prednosti simuliranja CVD testa u usporedbi s laboratorijskom provebom i da rezultati dobiveni simulacijom pokazuju samo neznatne greške u odnosu na laboratorijske rezultate. Ova se metoda može koristiti i na drugim uzorcima plinsko-kondenzatnih fluida.

*Ključne riječi:* ispitivanje iscrpljivanja pri konstantnom volumenu, plinsko-kondenzatno ležište, proračun fazne ravnoteže, jednadžbe modela stanja, novi algoritam

## 1. Uvod

Ponašanje bušotina na plinsko-kondenzatnim ležištima je na neki način jedinstveno, karakterizira ga nagli pad produktivnosti bušotine. Dobro je poznato, kada dinamički tlak na dnu bušotine padne ispod tlaka rosišta, oko kanala bušotine se razvije područje visoke zasićenosti kondenzatom što uzrokuje manju proizvodnju plina, zbog smanjene propusnosti za plin.<sup>5</sup> Neophodna je pouzdana procjena djelovanja pada tlaka ležišta plinsko-kondenzatnih ležišta kako bi se odredile rezerve i procijenili načini odvajanja fluida.

Trenutačno se koriste dva pristupa za predviđanje promjena sastava retrogradnog plinskog kondenzata i procjene karakteristika pada tlaka u plinsko-kondenzatnim ležištima. Prvi pristup koristi jednadžbu stanja dok drugi koristi empirijske korelacije. Jednadžbe stanja (EOS) su slabi alati predviđanja za kompleksne sisteme ugljikovodika. Jednadžbe stanja je potrebno uskladiti u odnosu na podatke faznog ponašanja ležišnih fluida poznatog sastava.

Empirijska korelacija ne uključuje brojne brojčane izračune ali je njihova točnost ograničena.<sup>6</sup> Za planiranje budućih radova i ispitivanje ekonomičnosti projekata u cilju povećanja pridobivosti kapljevina koristi se i procijenjeno ponašanje. Takve procjene mogu se dobiti korištenjem empirijskih podataka prikupljenih provođenjem testova crpljenja pri konstantnom volumenu

(CVD) plinsko-kondenzatnih ležišta. Pretpostavimo da retrogradni kondenzat nastao u proizvodnji ostane nepokretan u ležištu pa su ovi testovi provedeni na uzorku ležišnog fluida na način da se simulira iscrpljivanje stvarnog ležišta. CVD test daje pet značajnih laboratorijskih mjerenja koja se mogu upotrijebiti u raznim predviđanjima tehnologije razrade ležišta:

- tlak rosišta,
- promjene sastava plinovite faze sa sniženjem tlaka,
- koeficijent odstupanja (stlačivosti) kod tlaka i temperature ležišta,
- iscrpak otkrivenih rezervi ugljikovodika kod bilo kojeg tlaka,
- akumulacija retrogradnog kondenzata tj. zasićenje kapljevinom.

## 2. Eksperimentalni postupak pri kontaktnim uvjetima protjecanja

Eksperimenti iscrpljivanja pri konstantnom volumenu (CVD) napravljeni su na hlapljivim naftama i plinskim kondenzatima kako bi se simuliralo djelovanje iscrpljivanja ležišta i promjene komponenti. Test daje raznolike važne i korisne informacije koje se koriste u proračunima razrade ležišta.

Laboratorijska procedura testa prikazana je shematski na slici 1.

Tablica 1. Komponentni sastav fluida korištenih u ovim simulacijama i druga svojstva

Br.	Komponente	Sastav (mol%)	$T_c$ (K)	$p_c$ (bar)	$\omega$	Molarna masa kg/kmol
1	N <sub>2</sub>	0,3243	126,20	33,94	0,040 0	28,01
2	CO <sub>2</sub>	1,904 9	304,20	73,77	0,225 0	44,01
3	C <sub>1</sub>	76,203	190,60	46,00	0,011 5	16,04
4	C <sub>2</sub>	9,736 7	305,40	48,84	0,090 8	30,07
5	C <sub>3</sub>	4,318	369,80	42,45	0,145 4	44,10
6	iC <sub>4</sub>	0,566 7	408,10	36,48	0,176 0	58,12
7	nC <sub>4</sub>	1,629 6	425,20	38,00	0,192 8	58,12
8	iC <sub>5</sub>	0, 450 7	460,26	33,83	0,227 1	72,15
9	nC <sub>5</sub>	0,754 9	469,60	33,74	0,227 3	72,15
10	CC <sub>5</sub>	0,058 0	511,60	45,09	0,192 3	70,14
11	PC <sub>6</sub>	0,600 1	503,79	30,07	0,2860	86,18
12	CC <sub>6</sub>	0,414 8	547,41	39,90	0,221 5	84,16
13	PC <sub>7</sub>	0,423 9	536,44	27,60	0,336 4	100,21
14	CC <sub>7</sub>	0,505 6	566,27	34,69	0,245 1	98,19
15	AC <sub>7</sub>	0,306 3	591,70	41,14	0,256 6	92,14
16	PC <sub>8</sub>	0,329 1	565,05	25,02	0,381 6	114,23
17	CC <sub>8</sub>	0,377 5	594,05	29,74	0,239 1	112,21
18	AC <sub>8</sub>	0,306 4	619,46	35,84	0,322 8	106,16
19	PC <sub>9</sub>	0,263 0	590,64	23,29	0,423 0	128,25
20	CC <sub>9</sub>	0,164 0	621,21	28,39	0,299 8	125,97
21	AC <sub>9</sub>	0,120 8	644,06	32,08	0,372 5	120,16
22	PC <sub>10</sub>	0,244 2	613,72	21,46	0,464 6	142,28

Ova se eksperimentalna procedura ponavlja nekoliko puta dok se ne postigne minimalni tlak ispitivanja, nakon čega se utvrđuje količina i sastav plina i retrogradnog kondenzata preostalog u čeliji. Procedura ispitivanja može se isto tako usmjeriti na uzorak hlapljive nafte. U tom slučaju, umjesto plina, PVT čelija prvenstveno sadrži kapljevину pri tlaku zasićenja.

### Proračun fazne ravnoteže pri kontaktnim uvjetima protjecanja

Određivanje fazne ravnoteže u višekomponentnim ugljikovodičnim sustavima vrlo je interesantno za mnoge grane naftnoga inženjerstva. Jednadžbe stanja (EOS) se općenito koriste za izračunavanje fazne ravnoteže višekomponentnih ugljikovodika. Jedan važan aspekt izračunavanja ponašanja faza kod komponentnog modeliranja je izračun ravnoteže dvije faze plin-tekućina i fizikalnih svojstava fluida u čeliji ili sekciji, ovisno o tome da li je fluid prisutan kao jedna faza ili se dijeli u nekoliko uravnoteženih faza. Fleš proračun je stoga potreban u svakom vremenskom koraku kako bi se odredio broj uravnoteženih faza, njihova količina i sastav. Čak i kod relativno malo sastavnih dijelova mješavine, vrijeme izračunavanja simulacije komponenta, prijelaznih simulacija, uvelike nadilazi vrijeme

potrebno za simulaciju sastava, baziranih na odgovarajućim tablicama, a vrijeme izračuna se povećava s povećanjem broja komponenti.<sup>8</sup> U izotermalnom izračunu fazne ravnoteže, fluid konačnoga ukupnog sastava je uravnotežen kod dane temperature i tlaka. Za proračune fazne ravnoteže pri kontaktnim uvjetima, tlak, temperatura te ukupni molni udjeli, jasno su iskazani a izračunate su količine faza i njihov sastav koji čine ravnotežu a izračunat je i faktor  $z$  za tekuću i plinovitu fazu. Termodinamički kriterij za ravnotežu između dvije faze je potreban da bi ukupna Gibbsova slobodna energija bila minimalna.

### 3. Definiranje problema

Cilj ovoga projekta je napisati MATLAB program za proračun fazne ravnoteže pri kontaktnim uvjetima protjecanja, a pretpostavlja se da će ulazni parametri biti tlak, temperatura i sastav fluida ( $z_i$  za 3 komponente) a izračunate će biti vrijednosti  $K$  za svaku komponentu na temelju 3 jednadžbe stanja (EOS- RK, SRK i PR). Sastav kapljevina i plina također je dobiven ovim programom.

#### Algoritmi

Algoritmi pokazuju da će čak i s optimiziranim algoritmom proračun fazne ravnoteže u pravilu činiti 70-80%

od ukupnog vremena izračunavanja potrebnog za simulacije komponentnih, prijelaznih simulacija. Zbog toga je jako poželjna mogućnost smanjivanja vremena potrebnog za proračun fazne ravnoteže.<sup>9</sup> Koriste se različiti algoritmi uključujući metodu sukcesivnog uvrštavanja (SS), modificiranog sukcesivnog uvrštavanja i novog algoritma koji izračunava Jacobian i numerički i analitički za ažuriranje vrijednosti  $K$  za definiranje dvofazne ravnoteže.

### Novi algoritam

U ovom algoritmu (Sl. 2) izračunat je Jacobian ( $J$ ) i numerički i analitički a umjesto  $K$  simultano su ažurirane vrijednosti je  $\psi = \ln(K)$  i broj molova plinske faze.

$$\psi_{new} = \psi_{old} - J^{-1} \cdot g \quad (1)$$

$$n_{vnew} = n_{vold} - f/f \quad (2)$$

### Simulacija CVD testa pomoću EOS

U slučaju kada za CVD test nema dosta podataka, predviđanje režima pada tlaka na konkretnom sustavu plin-kondenzat može se postići korištenjem bilo koje od jednadžbi stanja za izračunavanje faznog ponašanja, kada je poznat sastav ukupnog sustava plinskog kondenzata. Korištenje slijeda postupaka izračunavanja korištenjem Peng-Robinson EOS, što je reprezentativna jednadžba stanja, sažeto je zajedno s dijagramom toka na sl. 3.

Sastavni dijelovi fluida, korištenih u ovoj simulaciji i njihova svojstva, dani su tablici 1.

U ovom dijelu članka prikazan je laboratorijski CVD test i simulacija programa MATLAB i uspoređeni su podaci dobiveni iz različitih jednadžbi stanja (EOS) PR76, PR78, SRK G&D.

### 4. Usporedba rezultata različitih EOSa dobivenih programom MATHLAB i u laboratoriju

Usporedba promjena različitih koeficijenta odstupanja (stlačivosti) plina u odnosu na promjene tlaka, dobivenih u laboratoriju, prikazana je na sl. 4, a rezultati dobiveni korištenjem MATHLAB programa na sl. 5.

Usporedba količine proizvedenog plina, izražene postotkom od početnog mola u odnosu na promjenu tlaka dobiveno u laboratoriju, prikazani su na sl. 6 a dobiveni pomoću MATHLAB programa na sl. 7. Usporedba količine proizvedene kapljevine, izražene postotkom od početnog volumena u odnosu na promjene tlaka, dobivena u laboratoriju, dana je na sl. 8 a dobivena pomoću MATHLAB programa na sl. 9.

### 5. Izazovi

Ovo su problemi koji za rješavanje zahtijevaju mnogo vremena:

- Usaglašavanje podataka programa s laboratorijskim podacima za ukupno proizvedeni plin (mol % početnog fluida) koji je uspješno usklađen.

- Usaglašavanje podataka programa s laboratorijskim podacima za smanjenje kapljevine (vol. postotak početnog fluida). Iako se izvodi nekoliko izračunavanja kao rastući red grešaka i padajuće veličine  $\Delta \ln(\psi)$  (za numerički izračun) u cilju njihovog usaglašavanja, nije ih bilo moguće usaglasiti za veliki interval.

Drugi problem je, trebamo li ili ne, koristiti i ažurirati molarnu masu (MW) komponenti za svaki korak izračunavanja CVD, na kraju vidimo da nije potrebno koristiti MW.

Podešavanje dobrih početnih procjena za  $n_v$  i  $K$ -vrijednosti jer su sva tri algoritma jako ovisna o prvoj procjeni ova dva parametra.

### 6. Zaključak i preporuka

1. Čini se da je algoritam modificiranog sukcesivnog uvrštavanja bolji od algoritama koji izračunavaju Jakobian analitički i numerički, jer je njegova točnost ista kao i kod ostala dva algoritma ali je mnogo brži.
2. CVD test daje pet važnih laboratorijskih mjerenja koji se mogu koristiti za različita predviđanja razrade ležišta:
  - a) Tlak rosišta
  - b) Promjene sastava plinske faze sa sniženjem tlaka
  - c) Koeficijent odstupanja (stlačivosti) kod tlaka i temperature ležišta
  - d) Iscrpak otkrivenih ugljikovodika kod bilo kojeg tlaka
  - e) Akumulacija retrogradnog kondenzata tj. zasićenje tekućom fazom.
3. CVD test je izveden na uzorku ležišnog fluida na način da je simulirano iscrpljivanje stvarnog ležišta uz pretpostavku da retrogradni kondenzat, koji se pojavljuje u ležištu tijekom proizvodnje, ostaje nepokretan. Mi mislimo da je to progresivan korak, ako se ovaj test može simulirati pretpostavljajući da je retrogradni kondenzat nastao u proizvodnji.
4. Pri izračunavanju je očigledna važnost binarnih koeficijenata međusobnog djelovanja, čini se da su binarni koeficijenti međusobnog djelovanja jedan od glavnih izvora greške (CMG također koristi iste binarne koeficijente međusobnog djelovanja za različite EOS) pa bi za nesigurne parametre trebalo podesiti jednadžbe stanja (EOS).

## 7. Popis oznaka

$\rho_{wf}$	dinamički tlak na dnu bušotine
$\rho_d$	tlak rosišta
$J$	Jacobian
$T_C$	kritična temperatura
$\rho_c$	kritični tlak
$z$	koeficijent odstupanja (stlačivosti) plina
$K$	konstanta fazne ravnoteže
$n_V$	broj molova plinovite faze
$n_L$	broj molova kapljevite faze
$V_V$	volumen plina
$V_L$	volumen kapljevine



Authors:

**Hamed Arabi**, Institute of petroleum engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

**Soheyla Farahani**, Chemical Engineering Department, Arak University, Arak, Iran

**Aliakbar Javadifar**, Chemical & Petroleum Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

UDK: 553.982 : 502.7 : 519.876.5

553.982      ležišta plina  
502.7        iscrpljivanje ležišta  
519.876.5    simulacije, algoritmi