

Predviđanja pada temperature praćenog padom tlaka za sustave proizvodnje prirodnog plina

A. Bahadori i H. B. Vuthaluru

STRUČNI ČLANAK

Za učinkovitu konstrukciju postrojenja za proizvodnju prirodnog plina neophodno je sigurno predviđanje pada temperature koji prati određeni pad tlaka. Sadašnji rigorozni kompozicijski modeli ovise o više varijabli i iziskuju informacije o sastavu fluida. U ovom je radu prikazana metoda, jednostavna za korištenje i lakša od danas dostupnih modela, za sigurno predviđanje odgovarajućeg pada temperature praćenog odgovarajućim padom tlaka u sustavima za proizvodnju prirodnog plina temeljena na modelu "black oil", a u svrhu dobivanja brzog aproksimativnog rješenja za pad temperature struje prirodnog plina u sustavima za proizvodnju plina. S obzirom na rezultate, novorazvijena korelacija preporuča se za brzu procjenu pada temperature u sustavima proizvodnje plina za tlak do 45 MPa i pada tlaka do 25 MPa. Dobiveni rezultati pokazuju visoku podudarnost između podataka iz izvještaja i izračunatih vrijednosti dobivenih novom metodom. Srednja vrijednost odstupanja, između podataka iz izvještaja i predložene korelacije je oko 4,6 posto. Čini se da je predložena metoda superiorna zbog svoje preciznosti i pregledne numeričke podloge u čemu se relevantni koeficijenti za razne podatke mogu dobiti brzo.

Ključne riječi: prirodni plin, sadržaj tekućine, pad temperature, black-oil model, simulacija

1. Uvod

Predviđanje točnih profila temperature u sustavima za proizvodnju plina može poboljšati projektiranje postrojenja. Kao primjer, temperaturni profili se u sustavima primjenjuju za precizno predviđanje pada tlaka dvofaznoga strujanja, projektiranju plinskoga lifta itd. Ukoliko je poznat sastav plina, inženjeri predviđaju pad temperature korištenjem programa računalne simulacije koji se temelji na potpuno kompozicijskoj jednadžbi stanja (EOS), PVT (tlak, volumen, temperatura) formulaciji i izračunu fazne ravnoteže. Program će izvršiti proračun fazne ravnoteže i interne uravnotežene entalpije. Izračunati će temperaturu nizvodno od sarnice, što osigurava da je entalpija mješavine plina i tekućine uzvodno od sarnice jednaka entalpiji nove mješavine s više plina i manje fluida, nizvodno od sarnice. Inače se sustav proizvodnje plina može modelirati korištenjem modela tipa "black oil", što je također alat za modeliranje eksploatacije ležišta plina i izračun rezervi.¹²

"Black oil" simulatori zauzimaju veliki dio svih simulacijskih aplikacija i mogu dati model nemiscibilnog strujanja pod takvim uvjetima da se svojstva fluida mogu tretirati kao funkcije tlaka.¹² Coats⁶ je prikazao simulaciju radijalne bušotine s plinskim kondenzatom, kojom je pokazano da modificirana "black oil" PVT formulacija daje iste rezultate kao i potpuno kompozicijska jednadžba stanja prirodnog iskorištavanja, iznad i ispod točke rosišta. On je pronašao da pod izvjesnim uvjetima modificirani "black oil" model može reproducirati rezultate kompozicijske simulacije cikliranja plina iznad i ispod točke rosišta.

Fevang i suradnici^{10,11} su polučili rezultate koji uglavnom podržavaju zaključke Coatsa.⁶ Međutim, oni su našli razlike u pridobivanju nafte predviđenim kompozicijskim i modificiranim "black oil" modelom (MBO) u slučaju da se radi o ležištu bogatom plinskim kondenzatom, a propusnost raste s dubinom.¹² Prema njihovom zaključku, "black oil" simulator može biti prikladan u slučaju da je djelovanje gustoće zanemarivo, a za studije injektiranja plina "black oil" model se može koristiti samo za siromašna do srednje bogatih ležišta plinskog kondenzata s cikliranjem plina iznad točke rosišta.¹² El-banbi i McCain^{7,8} sugeriraju da se modificirani "black oil" model (MBO) može koristiti bez obzira na složenost fluida. Njihov članak prezentira rezultate studije simulacije punog polja za ležište bogatog plinskog kondenzata. Rezultati modificiranog "black oil" modela (MBO) su uspoređeni s rezultatima kompozicijskog modela kod postojanja prodora vode u ležište, a provedena je i velika studija simulacijskog usaglašavanja historijata proizvodnje za slučajeve iznad i ispod točke rosišta.^{7,8} Njihov članak pokazuje precizno podudaranje između prodora vode u ležište i količine proizvedene vode. Autori su ujedno naveli, suprotno općem mišljenju, da se je modificirani "black oil" model pokazao dostatnim za modeliranje ponašanja plinskog kondenzata ispod i iznad točke rosišta, a korištenje modificiranog "black oil" modela (MBO), umjesto potpuno kompozicijskog pristupa, može rezultirati značajnom uštedom vremena posebno kod studija simulacije punog polja.⁷

El-Banbi i suradnici⁹ prezentirali su set korelacija za stvaranje modificiranog "black oil" pVT svojstva, a da pritom nije potrebno imati uzorke fluida ili razraditi proceduru izračuna jednadžbi stanja (EOS).

Gušenje ili ekspanzija plina od visokog tlaka na niži tlak, općenito je potrebno kako bi se kontrolirao kapacitet protjecanja plinske bušotine. Gušenje se postiže korištenjem sapnice ili kontrolnog ventila.⁸ Pad tlaka uzrokuje smanjivanje temperature plina pa se na sapnici ili kontrolnom ventilu mogu stvoriti hidrati. Za jednokomponentne fluide, kao što je metan, za izravan izračun pada temperature može se koristiti Mollierov dijagram. Međutim, prirodni plin nije jednokomponentan pa se Mollierov dijagram vjerojatno neće moći koristiti.¹

Za "black oil" modele i u slučaju kada nije poznat sastav plina, potrebno je razviti jednostavnu korelaciju za sigurno predviđanje odgovarajućeg pada temperature u sustavima proizvodnje plina temeljenu na "black oil" modelu, kako bi se dobilo brzo aproksimativno rješenje za pad temperature tokova prirodnog plina. Prema našem saznanju, u naftnoj literaturi ne postoji korelacija za "black oil" model za procjenu pada temperature povezanog s danim padom tlaka za tokove proizvodnje plina. Ovaj članak opisuje, za korištenje jednostavnu, metodu predviđanja pada temperature u sustavima proizvodnje plina za "black oil" modele.

2. Razvoj jednostavne korelacije

Podatci potrebni za razvoj te korelacije, navedeni su u opisu literature pod brojem 1 (na osnovu Gas Processors and Suppliers Association, Engineering Data Book, 9th edition, Tulsa, OK, 1972), za pad temperature koji prati dani pad tlaka kod različitih vrijednosti tlaka u smjeru protjecanja i za široki opseg sadržaja tekuće faze plinskoj.¹ U ovom je radu razvijena jednostavna korelacija kako bi se procijenio odgovarajući pad temperature u bušotinama prirodnog plina na temelju "black oil" modela u funkciji početnog tlaka plina, pada tlaka plina i sadržaja kapljevine plina. Za razvoj korelacije razvijena je i primijenjena sljedeća metodologija.

Prvo, odgovarajući pad temperature u sustavima proizvodnje prirodnog plina koreliran je kao funkcija početnog tlaka u smjeru protjecanja plina za različite vrijednosti pada tlaka. Nakon toga se izračunati koeficijenti za te polinome koreliraju kao funkcija pada tlaka. Izvedeni polinomi se primjenjuju za izračun novih koeficijenata za jednadžbu (1) za predviđanje odgovarajućeg pada temperature u sustavima proizvodnje plina. U tablica 1. prikazani su podešeni koeficijenti za jednadžbe (2) do (5).

Ukratko, za podešavanje korelacijskih koeficijenata ponavljaju se sljedeći postupci:

1. Koreliraj odgovarajući pad temperature u sustavima za proizvodnju prirodnog plina kao funkciju početnog tlaka (p_i) za dani pad tlaka (Δp);
2. Ponovi postupak 1 za ostale padove tlaka ;
3. Koreliraj odgovarajuće koeficijente polinoma, dobivene prijašnjim postupcima, u odnosu na pad tlaka, $a = f(\Delta p)$, $b = f(\Delta p)$, $c = f(\Delta p)$, $d = f(\Delta p)$ [vidi jednadžbe (2)-(5)].

Jednadžbe (1) do (5) predstavljaju novo razvijenu korelaciju u kojoj su korištena četiri koeficijenta za korelaciju pada temperature kao funkcije početnog tlaka u smjeru protjecanja plina u MPa, i odgovarajućeg pada

tlak u MPa. Podešeni koeficijenti dani su tablici 1, a ti usuglašeni koeficijenti pomažu u predviđanju pada temperature koji prati odgovarajući pad tlaka plinskih bušotina, za vrijednosti tlaka do 45 MPa i pada tlaka do 25 MPa. Ovi podešeni koeficijenti mogu se prema spomenutoj proceduri u budućnosti brzo nanovo podešiti, ako ubuduće bude na raspolaganju više podataka.

$$\ln(\Delta T_i) = a + b_p + c_p^2 + d_p^3 \quad (1)$$

Gdje je:

$$a = A_1 + B_1 (\Delta p) + C_1 (\Delta p) + D_1 (\Delta p)^3 \quad (2)$$

$$b = A_2 + B_2 (\Delta p) + C_2 (\Delta p) + D_2 (\Delta p)^3 \quad (3)$$

$$c = A_3 + B_3 (\Delta p) + C_3 (\Delta p) + D_3 (\Delta p)^3 \quad (4)$$

$$d = A_4 + B_4 (\Delta p) + C_4 (\Delta p) + D_4 (\Delta p)^3 \quad (5)$$

Ova se metoda temelji na sadržaju tekuće faze od 112,3 m³/milijun m³. Za svaki porast od 56 m³/milijun m³, korekcija pada temperature je 2,77 °C. Npr. ako nema tekuće faze, konačna temperatura je manja za 5,54 °C (pad temperature je veći za 5,54 °C) nego što je pokazano jednadžbom (1). Jednadžba (6) se primjenjuje za korekciju pada temperature na osnovu sadržaja kapljevine u plinu (L , m³/milijun m³), gdje se konačni pad temperature plina (ΔT) može odrediti primjenom jednadžbe (7). U tablici 2 dani su prilagođeni koeficijenti korišteni u jednadžbi (6).

$$\Delta T_{\text{korekcija}} = \alpha + \beta L + \gamma L^2 + \theta L^3 \quad (6)$$

$$\Delta T = \Delta T_i + \Delta T_{\text{korekcija}} \quad (7)$$

Dobiveni rezultati pokazuju da postoji dobro podudaranje između podataka iz izvještaja i vrijednosti

Tablica 1. Usuglašeni koeficijenti korišteni u jednadžbama (2) do (5)

Koeficijent	Pad tlaka manji od 13 800 kPa	Pad tlaka veći od 13 800 kPa
A_1	1,040 719 991 7	9,362 950 815 33
B_1	5,863 426 642 58 x 10 ⁻¹	-6,939 607 862 509 x 10 ⁻¹
C_1	-6,342 086 209 79 x 10 ⁻²	-2,382 350 807 x 10 ⁻³
D_1	2,814 825 604 12 x 10 ⁻³	1,707 747 521 64 x 10 ⁻³
A_2	2,430 764 529 804 x 10 ⁻³	-1,0182 981 741 4
B_2	3,069 694 101 171 x 10 ⁻²	1,677 279 709 66 x 10 ⁻¹
C_2	-2,701 623 402 13 x 10 ⁻³	-6,403 523 610 97 x 10 ⁻³
D_2	2,322 543 561 003 x 10 ⁻⁵	-1,349 784 156 13 x 10 ⁻⁵
A_3	-4,474 832 714 94 x 10 ⁻³	3,407 062 549 01 x 10 ⁻²
B_3	-1,218 162 552 3 x 10 ⁻³	-6,307 680 717 04 x 10 ⁻³
C_3	1,731 754 226 62 x 10 ⁻⁴	2,974 089 458 302 x 10 ⁻⁴
D_3	-4,277 312 720 08 x 10 ⁻⁶	-2,195 720 171 01 x 10 ⁻⁶
A_4	1,155 971 384 07 x 10 ⁻⁴	-3,50 210 682 437 8 x 10 ⁻⁴
B_4	-8,871 530 681 92 x 10 ⁻⁶	5,983 899 386 423 x 10 ⁻⁵
C_4	-1,032 600 663 99 x 10 ⁻⁷	-2,950 536 870 498 x 10 ⁻⁶
D_4	-7,938 290 866 22 x 10 ⁻⁹	2,757 769 149 12 x 10 ⁻⁸

Tablica 2. Usuglašeni koeficijenti za jednadžbu (6)

Koeficijent	Vrijednost
α	-5,555 968 253 968
β	4,943 879 595 915 x 10 ⁻²
γ	8,171 231 318 052 x 10 ⁻⁸
θ	-2,610 407 344 111 x 10 ⁻¹⁰

Tablica 3. Točnost predložene metode

Tlak u smjeru protjecanja plina, MPa	Pad tlaka MPa	Pad temperature iz izvještaja °C ¹	Izračunati pad temperature °C	Postotak apsolutnog odstupanja
3,448 3	1,379 3	5,555 6	6,097	8,87
27,586	2,758 6	2,777 8	2,583	7,54
20,69	4,137 9	8,333 3	8,005	3,94
10,345	5,517 2	21,666 7	23,165 5	6,91
24,138	13,793	28,888 8	29,586	2,41
27,586 2	17,2413 8	32,222 2	31,508	2,21
41,379	20,689	12,222 2	12,082 4	1,14
41,379	27,586	27,777 7	26,817 2	3,45
Srednji postotak apsolutnog odstupanja				4,6

izračunatih korištenjem novo razvijene metode. Dodatno tome, selektirane su eksponencijalne funkcije za razvijanje korelacije. Te funkcije su jednadžbe koje su izglađene i dobro se ponašaju (tj. izglađene i neoscilirajuće), koje bi trebale dopustiti sigurnija predviđanja.²⁻⁵

3. Rezultati

Na slikama 1 i 2 prikazani su rezultati predložene metode u usporedbi s rezultatima iz izvještaja (8) kod različitih početnih vrijednosti tlaka, pada tlaka kod sadržaja kapljevine u plinu od 112,3 m³ na milijun m³. Brojke pokazuju izvrsno poklapanje između predložene metode i podataka iz izvještaja (8). Na sl. 3 prikazan je faktor korelacije pada temperature za prirodni plin kao funkcije sadržaja kapljevine u plinu. Na slikama 4 i 5 prikazani su rezultati predložene korelacije u predviđanju pada temperature kao funkcije tlaka i pada tlaka kod niskih i visokih vrijednosti pada tlaka, kod sadržaja kapljevine od 112,3 m³ na milijun m³ prirodnog plina. Ove brojke pokazuju izvrsne rezultate predložene korelacije. Međutim čim je veća količina kapljevine u plinu manji je pad temperature, što dovodi do veće izračunate konačne temperature. U tablici 3 prikazana je točnost predložene korelacije izražena postotkom srednjeg apsolutnog odstupanja od 4,6%, što je vrlo malo odstupanje od podataka iz izvještaja. Ovdje prikazani

primjer izračunavanja jasno predočuje jednostavnost predložene metode i koristi koje proizlaze iz takvih procjena.

Primjer:

Struja plina protječe kod 10 MPa i imat će pad tlaka oko 4,14 MPa. Treba izračunati pad temperature za plin ako je sadržaj kapljevine 240 m³/milijun m³.

Rješenje:

Kako je pad tlaka manji od 13,8 MPa, koristimo koeficijente iz prve kolone tablice 1 pa dobivamo:

$$a=2,580\ 9 \text{ [iz jednadžbe (2)]}$$

$$b=0,061\ 0 \text{ [iz jednadžbe (3)]}$$

$$c=-0,006\ 9 \text{ [iz jednadžbe (4)]}$$

$$d=0,000\ 076\ 536 \text{ [iz jednadžbe (5)]}$$

$$\Delta T_i = 13,22\ ^\circ\text{C} \text{ [iz jednadžbe (1)]}$$

Sada pomoću jednadžbi (6) i (7) korigiramo pad temperature za sadržaj kapljevine od 240 m³/milijun m³:

Iz jednadžbe (6):

$$\Delta T_{\text{correction}} = 6,31\ ^\circ\text{C}$$

Iz jednadžbe 7:

$$\Delta T = \Delta T_i + \Delta T_{\text{correction}} = 13,22 + 6,31 = 19,53\ ^\circ\text{C}$$

Ovaj je klasični primjer koji pokazuje kako se informacija nastala iz ove korelacije može iskoristiti za predviđanje pada temperature koja prati pad tlaka, za sustave proizvodnje plina.

4. Zaključci

U ovom je radu razvijena korelacija, jednostavna za korištenje, za predviđanje pada temperature kod danog pada tlaka u sustavima za proizvodnju prirodnog plina. Novo razvijena korelacija osniva se na modelu "black oil", koji je jednostavniji od modela koji su trenutačno na raspolaganju, a koji uključuju veliki broj parametara te zahtijevaju kompliciranija i dulja izračunavanja. S obzirom na rezultate, novo razvijena korelacija se preporuča za brzu procjenu pada temperature u kanalu bušotine u sustavima proizvodnje plina, tlaka do 45 MPa i pada tlaka do 25 MPa. Ovaj koncept, jednostavan za korištenje, može biti od velike praktične vrijednosti za inženjere razrade plinskih ležišta i inženjere u proizvodnji jer im omogućuje brzu provjeru pada temperature za sustave proizvodnje plina, kod različitih uvjeta u kanalu bušotine. Posebno, osoblje koje surađuje s nadzornim tijelima proizvodnje plina nalazi da je predloženi koncept prilagođen korisniku i ne uključuje komplicirane izraze s izračunima koji korisniku nisu vidljivi. Predložena korelacija u ovom radu je jednostavan i jedinstven izričaj nepostojeći u literaturi. To je očekivana korist pri donošenju odluka koje mogu voditi do saznanja o padu temperature u „black-oil“ modelu.

Zahvala

Autor zahvaljuje australijskom Ministarstvu za obrazovanje, znanost i osposobljavanje na Endeavour International Postgraduate Research stipendiji (EIPRS), Uredu za istraživanje i razvoj na Curtin univerzitetu za tehnologiju iz Perth, Zapadna Australija, na dodjeli njihove stipendije za poslijediplomska istraživanja i Vladi Zapadne Australije na dodjeli dodatne stipendije putem Western Australian Energy Research Alliance (WA:ERA).



Authors:

Alireza Bahadori, Department of Chemical Engineering, Curtin University of Technology, GPO Box U1987 Perth, Western Australia, 6845.

Phone: +61 8 9266 1782,

Fax: +61 8 9266 2681,

email: alireza.bahadori@postgrad.curtin.edu.au

Hari B. Vuthaluru, Deptment of Chemical Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia