

Analize modificiranog izokronog ispitivanja plinskih bušotina, primjer iz Bliskog istoka

A. A. Al-Subaie, B. D. Al-Anazi, A. F. Al-Anazi

STRUČNI ČLANAK

U zadnje je vrijeme prirodni plin postao glavni izvor energije pa je određivanje optimalne proizvodnje plinskih bušotina vrlo važno za učinkovito planiranje proizvodnje. U svrhu procjene hidrauličkog frakturiranja formacije na plinskoj bušotini, izvedeno je modificirano izokronalno ispitivanje. Kako bi se utvrdio uspjeh tretmana napravljene su analize ispitivanja tlaka. Isto tako su napravljene indikatorske krivulje bušotina te predviđanja tlaka i proizvodnje, služeći se pri tome jednadžbom difuzivnosti kao i jednadžbom materijalne bilance. Studija je provedena na plinskoj bušotini ležišta na Bliskome istoku. Analize pokazuju da je postupak hidrauličkog frakturiranja formacije na plinskoj bušotini bio uspješan jer je rezultirao povećanjem proizvodnje bušotine. Svojstva ležišta su određena ispitivanjem tlaka a uspješno su generirane i indikatorske krivulje bušotina pa se mogu koristiti za daljnja proučavanja.

Ključne riječi: izokronalno ispitivanje, hidrauličko frakturiranje, indikatorska krivulja, maksimalni kapacitet proizvodnje

1. UVOD

Učinkovitost pritijecanja se može definirati kao odnos između kapaciteta protjecanja i pada tlaka ili kapaciteta proizvodnje i dinamičkog tlaka. Slika 1 prikazuje pomicanje plina iz ležišta do bušotine i iz bušotine kroz cijev ulazne kolone ili zaštitnu cijev do površine. Učinkovitost pritijecanja ovisi o svojstvima ležišta i fluida kao što su permeabilnost i viskoznost. Učinkovitost pritijecanja određuje produktivnost bušotine a bušotina može dati samo ono što joj ležište pruža.

Ciljevi studije učinkovitosti pritijecanja su slijedeći:

1. Odrediti kapacitet proizvodnje kod kojeg će bušotina proizvoditi s određenom geometrijom kanala bušotine i ugrađenom opremom (prvotno uz prirodno strujanje).
2. Odrediti pri kojim uvjetima protjecanja bušotina prestaje proizvoditi. To je funkcija vremena pri iscrpljivanju nalazišta.
3. Optimizirati uvjete bušotine i geometrijski sistem kako bi se najisplativije postigao ciljani kapacitet proizvodnje.
4. Analizirati svaki element unutar sistema bušotine kako bi se ustanovilo da li je ograničavanje kapaciteta proizvodnje nepotrebno kada se uspoređuje s kapacitetom proizvodnje drugih komponenti sistema.

Ukupno gledajući, učinkovitost pritijecanja omogućuje menadžmentu operatora i inženjerskom osoblju da ustanovi na koji će način povećati stopu proizvodnje. To je vrlo važan element u omogućavanju grafičkog prikaza proizvodnih karakteristika bušotine s "optimizacijom proizvodnje".

Pregled literature:

Predviđanje učinkovitosti pritijecanja plinskih ležišta je proces koji gotovo isključivo ovisi o nekome obliku višestrukih ispitivanja bušotina.. Konvencionalni test

protutlaka ili ispitivanje metodom protok za protokom, izokronalno testiranje i modificirano izokronalno testiranje korišteni su za predviđanje produktivnosti plinskih bušotina.

Rawlins and Schellhardt¹ predstavili su metodu protutlaka za testiranje plinskih bušotina. Ona ovisi o zahtjevu da se niz podataka o kapacitetu protjecanja i podataka o odgovarajućem tlaku može dobiti pri stabiliziranim uvjetima protjecanja.

Kod ove metode se zahtijeva da podaci o količini protjecanja i odgovarajućem tlaku budu dobiveni kod stabiliziranih uvjeta protjecanja.

Konvencionalna jednadžba protutlaka glasi:

$$q_{gsc} = C(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)^n \quad (1)$$

Podaci u prikazani na logaritamskim koordinatama razlike tlakova na kvadrat u odnosu na kapacitet protjecanja kako bi se odredile konstante, C , i , n . Kada se odrede C i n , kapacitet protjecanja se može odrediti kao funkcija dinamičkog tlaka na dnu bušotine.

Kako je korištenje metode koju su predstavili Rawlins i Schellhardt¹⁶ proširilo industrijom, postalo je očigledno da se ta metoda ispitivanja može primijeniti na bušotinama koje su u relativno kratkome vremenu postizale stabilne uvjete proizvodnje. Ovom metodom nisu se mogle odrediti stabilne karakteristike proizvodnje za bušotine koje su polako postizale stabilne uvjete proizvodnje, koji se obično pojavljuju u ležištima niže propusnosti.

Kako bi se prevladala spora stabilizacija, Cullender⁴ je predložio izokronalnu metodu ispitivanja za određivanje karakteristika protjecanja plinskih bušotina. Cullender je upotrijebio termin izokronalno jer se razmatraju samo oni uvjeti koji su nastali kao rezultat pojedinačnog poremećaja konstantnog trajanja. Izrazom "pojedinačni poremećaj konstantnog trajanja" htjelo se je definirati one uvjete koji vladaju oko bušotine, a koji su rezultat

konstantne količine protjecanja i traju određeni vremenski period od privremenoga zatvaranja bušotine. Cullender je razvio empirijsku metodu kod koje se za određenu plinsku bušotinu iz krivulje protutlaka može odrediti eksponent produktivnosti n . Kada se jednom odredi eksponent produktivnosti, na proširenu stabiliziranu točku protjecanja se primjenjuje karakterističan nagib krivulje, kako bi se odredio koeficijent produktivnosti C . Iako je Cullenderova metoda bila napredak, ipak je imala nedostatak produženih perioda zatvaranja bušotine kako bi se postigao stabilizirani tlak prije svakog perioda protjecanja.

Kako bi se prevladali produženi periodi zatvaranja bušotine radi postizanja stabiliziranoga tlaka, Katz¹² je predstavio modificiranu metodu izokronalog ispitivanja plinske bušotine. Katz je predložio periode protjecanja jednake dužine i periode zatvaranja bušotine, između perioda protjecanja, jednake dužine iza kojih slijedi produljena, stabilizirana točka protjecanja i period zatvaranja. Kada se jednom prikupe podaci, obrađuju se na način vrlo sličan Cullenderovom, pri čemu se eksponent produktivnosti određuje iz podataka ispitivanja prijelaznog režima, a koji se onda primjenjuju na podatke produženog, stabiliziranog protjecanja kako bi se odredio koeficijent produktivnosti.

Houpeurt¹⁰ je predstavio analitičku jednadžbu produktivnosti kojom se objašnjava "ne-Darcyjev" efekt strujanja. Houpeurtova jednadžba glasi:

$$q_{sc} = \frac{703 \cdot 10^6 kh (\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)}{\bar{T}_\mu z [\ln(0,472 r_e / r_w) + s + Dq_{sc}]} \quad (2)$$

Houpeurtova jednadžba koristi Forcheimerov oblik jednadžbe protjecanja budući da uključuje pojam ubrzanja.

2. Režim protjecanja:

Kada se bušotina otvori za proizvodnju iz stanja privremenog zatvaranja, poremećaj tlaka nastao u bušotini širi se kroz porozan medij brzinom određenom svojstvima stijene i fluida. Razmatrani su različiti režimi protjecanja u odnosu na ponašanje tog poremećaja tlaka.

2.1. Stacionarno stanje

Stacionarno stanje podrazumijeva da se tlak na bilo kojem mjestu u ležištu ne mijenja s vremenom. To se događa u slučaju kontinuiranog održavanja tlaka kao kod ležišta s vodotlačnim režimom, kod kojih je količina vode koja prodire u ležište jednaka obroku crpljenja kao što je to prikazano na slici 2.

2.2. Pseudo - stacionarno stanje

Tlak se mijenja s vremenom, no s istom brzinom svugdje u ležištu (uključujući i raskrivenu površinu dna bušotine). Većina životnoga vijeka ležišta biti će u pseudo stacionarnome stanju protjecanja kao što je prikazano na slici 3.

2.3. Prijelazno (neustaljeno) strujanje:

Tlak ležišta mijenja se s vremenom na svim mjestima u ležištu. Brzina promjene tlaka s vremenom je različita na

različitim mjestima i u različito vrijeme. Moguće je da se na mjestima koja se nalaze daleko od bušotine tlak neće mijenjati. Iako je kapacitet protoka bušotine poželjan za pseudo-stacionarno stanje ili stabilizirane uvjete, mnogo korisnije informacije mogu se dobiti ispitivanjem kod prijelaznog režima. Ove informacije uključuju propusnost, skin-faktor, koeficijent turbulencije i prosječan tlak ležišta kao što je prikazano na slici 4.

3. Jednadžba protjecanja

Odnos stacionarnog stanja dobivenog iz Darcyeva zakona za nekompresibilni fluid (nafta) prikazan je jednadžbom

$$p_e - p_i = \frac{141,2q B\mu \left(\ln \frac{r_e}{r_w} \right)}{kh} \quad (3)$$

Ovaj se odnos može prilagoditi plinskoj bušotini pretvaranjem kapaciteta protoka iz stb/d u Mscf/d i korištenjem srednje vrijednosti obujamskog koeficijenta plina između p_e i p_{wf} . Prema tome dobivamo:

$$\bar{B}_g = \frac{0,0283z\bar{T}}{(p_e + p_{wf}) / 2} \quad (4)$$

$$p_e - p_{wf} = \frac{141,2(1000 / 5,615)q(Mscf / d)(0,0283)\bar{z}\bar{T}_\mu \ln \frac{r_e}{r_w}}{[(p_e + p_{wf}) / 2]kh} \quad (5)$$

Nakon preslagivanja i prikupljanja članova jednadžbe dobiva se

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{1422q\mu\bar{z}\bar{T}}{kh} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (6)$$

Jednadžba stacionarnog strujanja (6) pretpostavlja da u formaciji nema turbulentnog strujanja i oštećenja oko kanala bušotine. Posljedice turbulencije i oštećenja biti će objašnjene u slijedećem odlomku.

Iako se protok stacionarnog stanja u plinskim ležištima rijetko postiže, uvjeti oko kanala bušotine mogu se približiti stacionarnom stanju. Jednadžba stacionarnog stanja koja uključuje turbulenciju glasi:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{1422q\mu\bar{z}\bar{T} \ln(r_e / r_w)}{kh} + \frac{3,161 \cdot 10^{12} \beta \gamma_g \bar{z} q_{sc}^2 T \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right)}{h^2} \quad (7)$$

4. Produktivnost plinske bušotine

Produktivnost plinske bušotine može se definirati kao sposobnost bušotine da proizvodi usprkos restrikcijama kanala bušotine i uvjetima u kojima mora proizvoditi u bušotini. Ove restrikcije i prepreke moraju se savladati energijom u ležištu. Smanjenjem veličine kanala bušotine ili povećanjem tlaka sistema u koji bušotina mora proizvoditi, povećava se otpor strujanju pa se tako smanjuje produktivnost bušotine. Ispitivanje proizvodnog kapaciteta bušotine omogućava prognozu količine protoka za različite linije i tlakove ležišta. Postoje tri vrste ispitivanja za predviđanje proizvodnog kapaciteta bušotine: ispitivanje metodom protok za protokom, izokronalno ispitivanje i modificirano izokronalno ispitivanje, kako je prikazano na slikama 5, 6 i 7.

Tablica 1. Podaci plinskoga ležišta		
Vrsta bušotine	=	Vertikalna bušotina
Ukupna dubina bušotine	=	9 233 ft = 2 814 m
Parametri formacije		
Efektivna debljina (h)	=	200 ft = 61 m
Porozitet (ϕ)	=	8%
Zasićenje plinomn (S_g)	=	70%
Zasićenje vodom (S_w)	=	30%
Zasićenje naftom (S_o)	=	0%
Polumjer bušotine (r_w)	=	0,26 ft = 0,08 m
Propusnost (k)	=	1,7 mD
Temperatura formacije (T)	=	286 °F = 141 °C
Početni tlak ležišta (p_i)	=	3 366 psia = 232 bar
Svojstva fluida		
Spec. težina plina (zrak=1)	=	0,607
CH ₄	=	90,95%
C ₂ H ₆	=	0,04%
CO ₂	=	7,20%
N ₂	=	1,82%
H ₂ S	=	Ništa
Podaci perforacije		
Gustoća perforacije	=	10 SPF
Broj perforacija po stopi (shots per foot -SPF)	=	2 716-2 724 m=8 910-8 938,6 ft
Podaci frakturiranja		
Polovična dužina (x_f)	=	83,5 m
Širina pukotine (w)	=	0,167 in. = 0,05 m
Visina	=	71,6 m
Srednja vodljivost pukotine	=	1,1 mD·m = 3,7 mD·ft
Srednja vodljivost	=	584,6 mD·m = 1 918 mD·ft

Obavljena su ispitivanja depresija za procjenu stvarnog skin efekta, kako bi se odredile krivulje produktivnosti i potencijalni maksimalni kapacitet proizvodnje (AOF), kako je prikazano na slici 8. Krivulje produktivnosti koriste se za predviđanje količine proizvodnje u odnosu na vrijednosti depresija. Za plinske bušotine, odnos količine i tlaka na dnu bušotine prikazan je slijedećom jednadžbom protutlaka:

Tablica 2. Radni uvjeti prije frakturiranja				
Period	Time hrs	Veličina sapnice in.	BHP bar	Količina proizvodnje Mm ³ /d
Privremeno zatvaranje	136,00	0	190,71	0
Prvi radni uvjet	3,95	24/64	139,20	0,189
Prvo privremeno zatvaranje	4,00	0	189,54	0
Drugi radni uvjet	4,00	32/64	104,32	0,261
Drugo privremeno zatvaranje	4,00	0	188,64	0
Treći radni uvjet	4,00	40/64	78,94	0,315
Treće privremeno zatvaranje	4,00	0	187,88	0
Četvrti radni uvjet	4,00	48/64	60,05	0,348
Produženo strujanje	32,00	48/64	59,85	0,340
Konačno zatvaranje	201,50	0	190,16	0

$$q_{gsc} = C(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2) \quad (8)$$

5. Rezultat i diskusija

Vertikalna plinska bušotina hidraulički je frakturirana kako bi se povećala produktivnost a analiza je napravljena korištenjem spomenutih tehnika kako bi se ustanovila učinkovitost frakturiranja te osobine bušotine i ležišta. Karakteristike (parametri) ležišta kao i opis završnog proizvodnog opremanja bušotine sažeti su i prikazani u tablici 1.

5. 1. Analiza plinske bušotine

Modificirano izokronalno ispitivanje obavljeno je na ispitivanoj plinskoj bušotini kako bi se dobili podaci o karakteristikama produktivnosti ležišta. Proizvodnja na bušotini provedena je na četiri erupcijske sapnice (različitih dimenzija) i s odgovarajućim podacima. Podaci su prikazani na grafu, kako bi se objasnilo ponašanje količine proizvodnje i tlaka, s tijekom vremena, kao što je prikazano na slici 9.

Tablica 3. Radni uvjeti nakon frakturiranja						
Period	Datum i vrijeme		Trajanje sati	Veličina sapnice	BHP, bar	Količina proizvodnje Mm ³ /d
	Početak	Kraj				
Privremeno zatvaranje		30/07/2000 21:00		0	177,5	0
Prvi radni uvjet	30/07/2000 21:00	31/07/2000 09:00	12,00	32/64	144,2	0,360
Prvo privremeno zatvaranje	31/07/2000 09:00	31/07/2000 21:00	12,00	0	188,0	0
Drugi radni uvjet	31/07/2000 21:00	01/08/2000 09:00	12,00	40/64	119,7	0,477
Drugo privremeno zatvaranje	01/08/2000 09:00	01/08/2000 21:00	12,00	0	187,4	0
Treći radni uvjet	01/08/2000 21:00	02/08/2000 09:00	12,00	48/64	97,8	0,569
Treće privremeno zatvaranje	02/08/2000 09:00	03/08/2000 10:20	25,33	0	187,2	0
Četvrti radni uvjet	03/08/2000 10:20	03/08/2000 22:00	11,67	64/64	60,5	0,678
Produženo strujanje	03/08/2000 22:00	05/08/2000 22:00	48,00	64/64	59,85	0,642
Konačno zatvaranje	05/08/2000 22:00	09/08/2000 16:00	90,00	0	186,6	0

5.2 Indikatorska krivulja prije i poslije frakturiranja

Radni uvjeti prije frakturiranja prikazani su u tablici 2. a poslije frakturiranja u tablici 3.

Za analizu ispitivanja plinske bušotine prvo treba pripremiti podatke, kao što je to prikazano u tablicama 4 i 5. Nakon toga se u graf unose vrijednosti razlike tlaka $\Delta(p^2) = p_{ws}^2 - p_{wf}^2$ u odnosu na q_{sc} , kako bi se odredila vrijednost eksponenta n . Slijedeći korak je izračunavanje koeficijenta C koristeći vrijednosti statičkog ili srednjeg tlaka ležišta i vrijednosti p_{wf} i q_{sc} produženog

Tablica 4. Podaci modificiranog izokronog ispitivanja prije frakturiranja			
q_g 10 ⁶ m ³ /d	p_{ws} , bar	p_{wf} , bar	$p_{ws2} - p_{wf2}$ bar ²
0,189	190,71	139,20	16 993,66
0,261	189,53	104,32	25 038,95
0,315	188,64	78,94	29 353,53
0,348	187,88	60,05	31 692,00
0,340			
Stabilizirano	187,88	59,84	31 718,63

Tablica 5. Podaci modificiranog izokronog ispitivanja poslije frakturiranja			
q_g 10 ⁶ m ³ /d	p_{ws} , bar	p_{wf} , bar	$p_{ws2} - p_{wf2}$ bar ²
0,189	190,71	139,20	16 993,66
0,261	189,53	104,32	25 038,95
0,315	188,64	78,94	29 353,53
0,348	187,88	60,05	31 692,00
0,340			
Stabilizirano	187,88	59,84	31 718,63

ispitivanja. Slike 10 i 11 prikazuju rezultate izokronalnog ispitivanja prije i poslije frakturiranja.

Analiza prije frakturiranja

Parametar n određen je iz nagiba linije a vrijednost mu je 0,978. Vrijednost parametra C je $2,54 \times 10^{-6}$ a određen je korištenjem n i koordinata bilo koje točke na crti stabilizirane proizvodnje (tj. stabiliziranoj točki). Nakon toga je izračunat AOF:

$$AOF = C(p_R^2) = 2,54 \cdot 10^{-6} (2766^2) = 13,76 \text{ Mscf / d}$$

Analiza poslije frakturiranja

Parametar n određen je iz nagiba linije a vrijednost mu je 0,904. Vrijednost parametra C je $1,51 \times 10^{-5}$ a određen je korištenjem n i koordinata bilo koje točke na crti stabilizirane proizvodnje (tj. stabiliziranoj točki). Nakon toga je izračunat AOF:

Tablica 6. Podaci viskoznosti i koeficijenti odstupanja

p_R bar	Fm Pa·s	z	Fz mPa·s	C
190,01	0,018 811	0,969 692	0,018 241	1,505 33E-05
137,89	0,017 526	0,961 497	0,016 851	1,629 46E-05
103,42	0,016 789	0,963 32	0,016 173	1,697 77E-05

$$AOF = C(p_R^2) = 1,51 \cdot 10^{-5} (2757^2) = 25 \text{ Mscf / d}$$

6. Predviđanje ponašanja plinske bušotine

Kako bi se predvidjelo ponašanje plinske bušotine, generirane su buduće indikatorske krivulje bušotina za vrijednosti srednjeg tlaka ležišta tj. 137,9 bar (2 000 psia) i 103,4 bar (1 500 psia). Aproximacija učinka promjena u p_R na C može se napraviti mijenjanjem vrijednosti za C :

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{(\mu z)_2}{(\mu z)_1}$$

Kako bi se primijenile korekcije za promjene faktora viskoznosti i kompresibilnosti, izračunavaju se parametri na osnovu procijenjenih vrijednosti tlaka ležišta, kao u tablici 6, a onda se izračunava q_g (količina plina na dan) na osnovu p_R , kao u tablici 7.

Tablica 7. Izračunate količine proizvodnje kod različitih ležišnih tlakova			
q_g 10 ⁶ m ³ /d			
p_{wf} , bar	$p_R=190,09$ bar	$p_R=137,89$ bar	$p_R=103,42$ bar
190,01	0		
172,37	0,148		
137,89	0,360	0	
103,42	0,515	0,203	0
68,95	0,623	0,331	0,156
34,47	0,687	0,404	0,239
0	0,708	0,429	0,266

Npr., izračun se može napraviti na slijedeći način:

$$\text{Za } p_R = 2000 \text{ psia, } q_g = 1,62946 \times 10^{-5} (2000^2 - p_{wf}^2)^{0,904}$$

$$\text{Za } p_R = 1500 \text{ psia, } q_g = 1,69777 \times 10^{-5} (1500^2 - p_{wf}^2)^{0,904}$$

6.1. Produktivnost Bušotine

Produktivnost bušotine prikazana je unasanjem tlaka na dnu bušotine u odnosu na davanje svake od sapnica različitih veličina i indikatorske krivulje bušotina (IPR), prikazano na sl. 15.

6.2. Analiza tlaka ispitivanja prijelaznog režima strujanja

Na sl.16. nanesene su vrijednosti p_{ws}^2 u odnosu na $\log((t+\Delta t)/t)$. Podaci su učitani u periodu konačnog zatvaranja modificiranog izokronalnog testa. Rezultati ispitivanja tlaka prikazani su u tablici 8 i pokazuju da je bušotina stimulirana i upućuju na uspješan obradu hidrauličkim frakturiranjem.

Tablica 8. Analize ispitivanja tlaka	
konačna proizvodnja $10^6 \text{ m}^3/\text{d}$	0,642
efektivna debljina, m	61
porozitet, %	8
radijus kanala bušotine, m	0,08
temperatura formacije °C	141
propusnost, mD	1,7
kh , mD·m	104
oštećenje	-1,76

6.3. Predviđanje proizvodnje plinske bušotine

Predviđanje tlaka i proizvodnje nakon frakturiranja napravljeno je korištenjem jednadžbe difuzije i jednadžbe materijalnog uravnoteženja plina. Rezultati prognoze prikazani su na slikama 19, 20, 21, 22, 23 i 24.

Crtanjem ovisnosti p/z i G_p dobiva se ravna linija kojom se procjenjuje količina otkrivenih zaliha plina G . $G = 5,4$ milijarde m^3 (190 Bscf), a određena je produženjem linije do sjecišta na $p/z = 0$, dobiva se, kao što je prikazano na sl. 22.

7. ZAKLJUČCI

Na osnovu provedenih istraživanja ove studije doneseni su slijedeći zaključci:

1. Hidrauličko frakturiranje je pokazalo povećanje proizvodnje, maksimalni radni kapacitet bušotine porastao je od 13,76 prije obrade na 25 Msc/d poslije obrade.
2. Ispitivanje radnog kapaciteta bušotine pri različitim depresijama te IPR krivulje pokazuju da bi bušotina za 18,25 godina mogla proizvesti 198 tisuća m^3 (7 Mscf/d) što je ukupno 2,6 milijardi m^3 (90.794 Bscf).
3. Rezerve je nemoguće izračunati jer je ležište djelovalo kao beskonačni sustav i ne postoje indikacije zatvorenih granica.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se dr. Hazimu N. Al-Dmouru iz odjela za inženjerstvo nafte i prirodnog plina fakulteta Ibn Saud za nadzor, podršku i smjernice koje nam je pružio u radu na ovom studiju.



Autori:

Abdullah Ayed Al-Subaie, Research Assistant, King Saud University, Asubiaae@ksu.edu.sa

Bandar Duraya Al-Anazi, Research Assistant, King Abdulaziz City for Science & Technology, Bandar.alanazi@gmail.com

Ammal Fannoush Al-Anazi, Saudi Aramco, Ammal.anazi@aramcoservices.com

UDK : 553.981 : 622.24 : 662.279 : 502.7

553.981 ležište plina
622.24 rudarstvo, bušotine
662.279 pridobivanje prirodnog plina
502.7 iscrpljivanje bušotine