Propusnost kao funkcija mehaničkog ponašanja stijenskih materijala

J. Pápay

IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Analizirano je djelovanje tlaka na propusnost korištenjem fenomenoloških modela. Prikazani su analitički algoritmi, koji sačinjavaju usklađenu jedinicu, za procjenu propusnosti stijene, iz toga proizlazi proizvodnost bušotine u slučaju krutih (nestlačivih), elastičnih, elastično-viskoznih, elastično-plastičnih i elastično-plastičnih-viskoznih stijena. Algoritmi se ujedno mogu koristiti za procjenu funkcija šupljikavost-tlak. Predstavljen je jedan primjer kako bi se prikazala primjena preporučenih metoda. Bez razumijevanja utjecaja naprezanja na propusnost u slučaju ležišta niske propusnosti i šupljikavosti ne može se predvidjeti proizvodnost bušotine. Analize potvrđuju da treba nastaviti s proučavanjem HT i HP ležišta kako bi se otkrio odnos između parametara stijene i naprezanja pri stlačivanju (toplinskom opterećenju) za stijene složenog mehaničkog ponašanja.

Ključne riječi: propusnost, šupljikavost, analitički algoritmi, proizvodnost bušotine

Uvod

U specijalnim slučajevima - HP, HT i stijena niske šupljikavosti - zbog naprezanja pri stlačivanju (toplinskom opterećenju), propusnost (i šupljikavost) mogu mijenjati učinkovitost tehnologije pridobivanja. Taj je proces vrlo kompliciran i sofisticiran, zbog toga su za razumijevanje mehaničkog ponašanja stijena kao funkcije tlaka preporučene vrlo jednostavne materijalne jednadžbe.

Postoji mnogo materijalnih jednadžbi, opći oblik im je slijedeći:

$$g(\sigma,\varepsilon,\dot{\sigma},\dot{\varepsilon},\tau)=0$$

gdje je:

g - opća oznaka funkcijskog odnosa,

σ - naprezanje pri stlačivanju (normalno naprezanje),

$\dot{\sigma}$ - derivat stresa kao funkcija vremena,

ε - specifična deformacij,

$\dot{\varepsilon}$ - derivat specifične deformacije kao funkcija vremena,

τ - vrijeme.

Rješenje ove materijalne jednadžbe je vrlo komplicirano, stoga se u praksi koristi opće aproksimativno rješenje - Kaliszky S.[6]

Specifična (tj. linearna) deformacija (ε) je izračunata na slijedeći način: - Kaliszky S.[6] - koristeći princip superpozicije

$$\varepsilon=\varepsilon_e+\varepsilon_p+\varepsilon_\nu$$

i

$$\sigma=\sigma_e+\sigma_p+\sigma_\nu$$

Indeks - komponenta (e) elastičnosti, (p) plastičnosti i (ν) viskoznosti

Svojstva stijena (tj. propusnost, šupljikavost itd.) ovise o obujamskoj (volumetrijskoj) deformaciji, ali obujamska deformacija je proporcionalna linearnoj deformaciji, stoga je naša analiza temeljena na zakonima linearne deformacije s nekim izmjenama. Na primjer promjena propusnosti (Δk) zbog naprezanje pri stlačivanju (i/ili toplinskom naprezanju) izražena je aproksimativno:

$$\Delta k=\Delta k_e+\Delta k_p+\Delta k_\nu$$

Jer je $\Delta k_\nu=\Delta k_\nu(\tau)$, slijedi $\Delta k=\Delta k(\tau)$, što je ovisno o vremenu.

U slijedećem odjeljku prihvaća se taj princip kako bi se razumjelo neuobičajeno ponašanje tih stijena u usporedbi s konvencionalnim ($\Delta k=0$) ležišnim materijalom stijena.

Istraživaći su već mnogo ranije uočili neuobičajeno ponašanje nekih stijena uslijed naprezanja pri stlačivanju ali u praksi tehnologije razrade ležišta to je bilo zanemareno.

Istraživanje u odnosu na propusnost kao funkciji tlaka počelo je 1956.-57. u bivšem Sovjetskom Savezu na polju Groznyenszkij. Majdebor V.N.[11] Kuszakov M.M.,i Gudok N.Sz.[7],laboratorijskim mjerenjima su pokazali da cikličko naprezanje pri stlačivanju ima za rezultat trajno smanjenje propusnosti. Abgrall E.[1] je dobio isti rezultat u odnosu na mjerenja šupljikavosti i propusnosti. On je prikazao histerezu tih parametara uključujući njihovu rezidualnu promjenu. Matveev I.M. (1965) - je prema Kotjahovu F.I.[9], ispitivanjima na polju dokazao da u slučaju Malgobek-Voznyeszenkog ležišta, cikličko opterećenje bušotine (proizvodnja-injektiranje) indeks produktivnosti nije konstantan, postoji histereza. Nakon 2,5 mjeseci razlika u indeksu produktivnosti se smanjila. Neka od laboratorijskih mjerenja su pokazala da nakon određenog vremena rezidualna promjena propusnosti nestaje: Thomas R.D.,Ward D.C.[13] ili Aggour M.A., Mallk S.A., Hararl Z.Y.[2] Na primjer Thomas R.D.,Ward D.C.[13] su primijetili da je rezidualna promjena propusnosti zbog histereze nestala nakon 3-6 tjedana i jezgre su obnovile svoju prvobitnu propusnost. Ovo vrijeme se može skratiti stavljanjem jezgri u peć na 70 °C.

Aggour M.A., Mallk S.A., Hararl Z.Y.[2] analizirali su učinak cikličkog naprezanja pri stlačivanju.

Chen S., Li H., Zhang Q., Yang D.[4] su predstavili jednadžbu proizvodnosti naftne bušotine (L-6) na polju Qinszi u Kini, koja nije bila klasična (monotona) u odnosu na depresiju (naprezanje pri stlačivanju).

Podaci su slijedeći:

Δp (bar)*	0	85	100	140	155	210	340	510
Proizvodnja (m^3/d)*	0	120	130	147	148	140	120	35

napomena*: podatak je pročitan iz predstavljene tablice

Δp_{opt} - 180 bar; q_{max} - 150 m^3/d

Ostali podaci: dubina produktivne zone 4 000 - 5 000 m (13 123 - 16 404 ft), frakturirane stijene (dolomit, argilit i pudingov kamen), propusnost matriksa (0,45-3,16 mD), propusnost pukotina (100 mD), nezasićena nafta, viskoznost nafte (5,73 cP). Tijekom mjerenja vrijeme stabilizacije je bilo 3 - 5 dana kroz sapnicu 4,5 - 8 mm (11,3/64 - 20,2/64 in.). U slijedećem slučaju, korištenjem fenomenoloških analiza, pokušavamo shvatiti već objašnjeno neuobičajeno ponašanje ležišnih stijena složenih mehaničkih svojstava, pretpostavljajući da se radi o izotermičkim procesima. U našim analizama nisu razmatrana oštećenja stijena. Preporučeni algoritmi mogu se primijeniti i za izračunavanje odnosa šupljikavost - tlak. Objašnjavamo ih samo za tlačno naprezanje tijekom proizvodnje.

1. Nestlačive (krute) ležišne stijene

Stijena je nestlačiva, prema tome propusnost (k) je konstantna. U tom slučaju npr. protok bušotine izračunava se korištenjem dobro poznate Dupuitove jednadžbe:

$$q = \frac{2\pi hk}{\mu B}\frac{1}{s+\ln\frac{r_2}{r_1}}(p_2-p_1) \qquad (1)$$

gdje je:

- q protok
- h stvarna debljina produktivnog sloja
- k propusnost
- μ viskoznost
- B volumni koeficijent
- p_2 tlak pri vanjskom drenažnom radijusu (r_2)
- p_1 tlak pri radijusu bušotine (r_1)
- s skin efekt (oštećenje)

2. Elastična ležišna stijena

2.1. Elastična ležišna stijena bez prijelazne komponente (neviskozne stijene)

U tom slučaju pretpostavljeno je:

$$k(p) = k_0 e^{-\alpha(p_2-p)} \qquad (2)$$

gdje je:

- $k(p)$ tlak ovisan o propusnosti
- k_0 referentna propusnost (pri tlaku p_2)
- α faktor stlačivosti propusnosti (mD/mD · 1/bar)

Na osnovu te jednadžbe Gorbunova A.T.[5] formula je:

$$q = \frac{2\pi hk}{\mu B}\frac{1}{s+\ln\frac{r_2}{r_1}}\left[\frac{1-e^{-\alpha(p_2-p_1)}}{\alpha}\right] \qquad (3)$$

Pápay J. (2009) je poopćio Gorbunovu formula na slijedeći način:

$$q = \frac{2\pi hk}{\mu B}\frac{1}{s+\ln\frac{r_2}{r_1}}e^{-ic_e p_0}\left[\frac{e^{-ic_e p_2}-e^{-ic_e p_1}}{ic_e}\right] \qquad (4)$$

gdje je:

- p_0 referentni tlak kod kojeg je referentna propusnost određena
- i koeficijent strukture pora:
  - ako je stijena međučestične šupljikavosti jedan, tada je i=2;
  - ako je stijena pukotinske šupljikavosti jedan, tada je i=3;
- c_e izotermički efektivni faktor stlačivosti šupljikavosti

Ako je $k_0=k=k_2$, $p_0=p_2$ i $ic_e=\alpha$, onda se jednadžba (4) svodi na jednadžbu (3) ili ako je α=0 dobiva se jednadžba (1). U slučaju jednadžbi (1), (2) i (3) funkcije $q=q(\Delta p)$ su monotone.

Chen S., Li H., Zhang Q., Yang D.[4] su predložili slijedeću jednadžbu za dobivanje jednadžbe proizvodnosti maksimalne proizvodnje (q_{max}) kod Δp vrijednosti (Δp_{opt}): prema njihovim laboratorijskim mjerenjima je linearna funkcija naprezanja pri stlačivanju, a i b = konst.

$$\alpha = a(p_2-p_1)+b \qquad (5)$$

$\Delta p = p_2$-p_1;

Preporučeni oblik parametra stlačivosti - jednadžba (5) - može biti zamijenjen u obje jednadžbe (3) i (4).

Slika 1. prikazuje različite vrste jednadžbi proizvodnosti u slučaju laminarnog strujanja i čvrste (linija 1) ili elastične (linija 2 ili 3) stijene. U slučaju linije 3 jednadžba proizvodnosti nije monotona. U razmatranim slučajevima ne postoje histereze zbog cikličkog naprezanja pri stlačivanju.

U slijedećim točkama razmatrane su samo promjene propusnosti (šupljikavost se može analizirati na istovjetan način). Protok bušotine, temeljen na ovisnosti odnosa propusnost - tlak isključen je u slijedećim točkama zbog složenih relacija. Ako je promjena propusnosti, zbog naprezanja pri stlačivanju poznata, tada bi trebalo koristiti numerički model ili geometrijski prosjek propusnosti preporučen za izračunavanje protoka bušotine itd.

2.2 Elastične ležišne stijene s prijelaznom komponentom (viskozne stijene)

Prema Kotjahovu F.I.[9] specifična linearna deformacija (ε_e) za elastične stijene može se podijeliti u dvije komponente: trenutačnu (ε_{1e}) i prijelaznu (ε_{2e}).

$$\varepsilon_e = \varepsilon_{1e} + \varepsilon_{2e} \qquad (6)$$

Prijelazna komponenta je prema Kotjahovu F.I.[9] ili prema Kaliszkyom S.[6], jednaka:

$$\varepsilon_{2e} = \varepsilon_{2e0}\left(1 - e^{-\frac{E}{\nu}\tau}\right) \qquad (7)$$

gdje je:

E	modul elastičnosti
ν	viskoznost stijene koja može ovisiti o brzini transverzalnih valova
τ	vrijeme
ε_{2e0}	specifična linearna deformacija za slučaj beskonačnog trajanja naprezanja

I propusnost i šupljikavost su proporcionalne volumnoj deformaciji. Šupljikavost je proporcionalna linearnoj deformaciji, stoga šupljikavost i propusnost mogu ovisiti o vremenu npr. eksponencijalno.

Prihvaćajući taj princip, zbog naprezanja pri stlačivanju, elastična promjena propusnosti (šupljikavosti) je:

$$\Delta k_e = \Delta k_{e1} + \Delta k_{e2} \qquad (8)$$

gdje je:

Δk_{e1}	trenutačna promjena propusnosti
Δk_{e2}	promjena propusnosti ovisna o vremenu

Za izračun tih promjena preporučuju se slijedeće formule:

$$\Delta k_{e1} = lk_0\left(1 - e^{-\alpha\Delta p}\right) \qquad (9a)$$

i

$$\Delta k_{e2} = (1-l)k_0\left(1 - e^{-\lambda\tau}\right)\left(1 - e^{-\alpha\Delta p}\right) \qquad (9b)$$

To znači da je viskozna komponenta ovisna o vremenu

gdje je:

l	frakcija trenutačne promjene propusnosti u odnosu na ukupnu (u slučaju beskonačnog vremena)
k_0	referentna propusnost (npr. kod početnog tlaka p_0 koji je referentni)
$\Delta p = p_0 - p$	
α	promjena specifične propusnosti zbog promjene jediničnog tlaka (mD/mD *1/bar)
λ	brzina konvergencije za postizanje konačne propusnosti (1/dan ili 1/mjesec)
τ	vrijeme (dan ili mjesec)

Ako je vrijeme beskonačno (ili dovoljno dugo), onda je:

$$\Delta k_e = k_0\left(1 - e^{-\alpha\Delta p}\right) \qquad (10)$$

Ovaj model odgovara Kelvin - Voightovom mehaničkom modelu stijene.

Ako se naprezanje pri stlačivanju mijenja kao funkcija vremena predlaže se slijedeći proces izračuna:

Vremenski korak	$\Delta\tau_1$	$\Delta\tau_2$	$\Delta\tau_3$	....	$\Delta\tau_n$
p_0-p_i promjena tlaka	Δp_1	Δp_2	Δp_3	....	Δp_n
Δp za izračun	$(p_0-p_1)/2$	$(p_0-p_2)/2$	$(p_0-p_3)/2$	....	$(p_{n-2}-p_n)/2$

Vrijeme je: $\tau = \sum \Delta\tau_i$; pojednostavljeno: $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = \Delta\tau_3 = \Delta\tau_4 =$ ----- $= \Delta\tau$

Promjena propusnosti izračunata je kao funkcija koraka u vremenu.

Na kraju **prvog vremenskog koraka** promjena propusnosti je:

$$\Delta k_{e1} = lk_0\left(1 - e^{-\alpha\Delta p1}\right)$$

$$\Delta k_{e2} = (1-l)k0\left(1 - e^{-\lambda\Delta\tau}\right)\left(1 - e^{-\alpha\Delta p_1}\right)$$

i

$$\Delta k_e = \Delta k_{e1} + \Delta k_{e2}\big|_1 \qquad (11.\ a)$$

Na kraju **drugog vremenskog koraka** promjena propusnosti je:

$$\Delta k_{e1} = lk_0\left(1 - e^{-\alpha(\Delta p_1 - \Delta p_2)}\right)$$

$$\Delta k_{e2} = (1-l)k_0\left\{\left(1 - e^{-2\lambda\Delta\tau}\right)\left(1 - e^{-\alpha\Delta p_1}\right) + \left(1 - e^{-\lambda\Delta\tau}\right)\left[e^{-\alpha\Delta p_1} - e^{-\alpha(\Delta p_1 + \Delta p_2)}\right]\right\}$$

i

$$\Delta k_e = \Delta k_{e1} + \Delta k_{e2}\big|_2 \qquad (11.\ b)$$

Na kraju ***n*-tog vremenskog koraka** promjena propusnosti je:

$$\Delta k_{e1} = l\,k_0\left(1 - e^{-\alpha\sum_{i=1}^{n}\Delta p_i}\right)$$

$$\Delta k_{e2} = (1.-l)k_0\left\{\left(1 - e^{-n\lambda\Delta\tau}\right)\left(1 - e^{-\alpha\Delta p_1}\right) + \left(1 - e^{-(n-1)\lambda\Delta\tau}\right)\left[1 - e^{-\alpha\Delta p_1} - e^{-\alpha\sum_{i=1}^{n}\Delta p_i}\right] + \right\}$$
$$\left(1 - e^{-(n-2)\lambda\Delta\tau}\right)\left[e^{-\alpha\sum_{i=1}^{2}\Delta p_i} - e^{-\alpha\sum_{i=1}^{3}\Delta p_i}\right] + \ldots\ldots + \left(1 - e^{-\lambda\Delta\tau}\right)\left[e^{-\alpha\sum_{i=1}^{n-1}\Delta p_i} - e^{-\alpha\sum_{i=1}^{n}\Delta p_i}\right]$$

and

$$\Delta k_e = \Delta k_{e1} + \Delta k_{e2}\big|_n \qquad (11.\ c)$$

3. Elastično - plastične ležišne stijene

Opisana su dva modela a ujedno je prikazana i koherencija među njima. Njihovo fizičko značenje predočeno je na slici 2.

Slika 2a. prikazuje propusnost u odnosu na tlak za slučaj elastične ležišne stijene bez viskozne komponente. Ako Δp raste, propusnost pada duž linije 012. Ako Δp pada, propusnost raste duž linije 210. Histereze propusnosti ne postoje.

Slika 2b. prikazuje propusnost u odnosu na tlak za slučaj plastičnih ležišnih stijena. U tom slučaju koeficijent elastičnosti je: $\eta > 10$ (npr. model Gorbunova A.T.-1981). Ako Δp raste, propusnost pada duž linije 012. Ako je $\Delta p = \Delta p_1$ propusnost je k_1. Ako Δp pada ($\Delta p \rightarrow 0$), propusnost ostaje konstantna ($k = k_1 = k'_1$). Ako je Δp veći od Δp_1 ($\Delta p \rightarrow \Delta p_1$), propusnost pada duž linije 12. Ako je $\Delta p = \Delta p_2$ propusnost je k_2. Ako Δp pada, u odnosu na ($\Delta p \rightarrow 0$) propusnost ostaje konstantna ($k = k_2 = k'_2$) itd. To znači da nikad nema povratka na k_0, postoji histereza propusnosti, prema tome postoji i histereza kapaciteta proizvodnje.

Na slici 2c. prikazana je propusnost u odnosu na tlak za slučaj elastično-plastičnih ležišnih stijena. U tom je slučaju koeficijent elastičnosti: $0<\eta<10$ (npr. model Gorbunova A.T.-1981).

Ako Δp raste, propusnost pada duž linije 012. Ako je $\Delta p = \Delta p_1$ tada je propusnost k_1. Ako Δp pada ($\Delta p \to 0$), propusnost lagano raste ($k>k_1$; $k_{max} = k'_1$). Ako Δp ponovo raste ($\Delta p \to \Delta p_1$), propusnost lagano pada duž linije 1'1 ($k<k'_1$; $k_{min} = k_1$). Ako je Δp veći Δp_1 ($\Delta p \to \Delta p_1$), propusnost pada duž linije 12. Ako je ($\Delta p \to \Delta p_2$), propusnost je k_2. Ako Δp ponovo pada ($\Delta p \to 0$), propusnost lagano raste duž linije 22' ($k>k_2$; $k$max$= k'_2$). Ako Δp ponovo raste ($\Delta p \to \Delta p_2$), propusnost lagano pada ($k<k'_2$; $k_{min} = k_2$) po istoj liniji. To znači da nikad nema povratka na k_0 postoji histereza propusnosti, prema tome postoji i histereza kapaciteta proizvodnje.

Opisani procesi se mogu simulirati s dva prikazana analitička modela.

Modeli su temeljeni na slijedećim principima:

- funkcija $k = k(\Delta p)$ je hiperbolička (model-I) ili eksponencijalna (model-II),
- postoje dvije vrste krivulja (slika 2b ili 2c), 012 glavna krivulja i sporedne krivulje 11' ili 22'. Obje vrste funkcija (glavna i sporedna krivulja) su funkcije iste vrste (hiperbolička ili eksponencijalna), ali su njihovi nagibi različiti. Nagib glavne krivulje' je veći od nagiba sporedne' krivulje. Posljednja je različta od svih drugih, ako se radi o elastično-plastičnoj stijeni, ako je stijena plastična tada je nagib sporednih krivulja nula,
- u točkama presjecišta stvarna propusnost je ista za obje vrste krivulja,
- k_1' or k_2' je izračunat ($\Delta p=0$) pomoću propusnosti na presjecištu (k_1 ili k_2) i s nagibom (ili parametrom) sporednih funkcija prema danom algoritmu,
- promjena propusnosti je trenutna.

Model - I je proces Barenblatta G.I.[3], (jednadžba -12a) i Korotaeva Ju.P., Gerova L.G., Zakirova Sz.N., Scserbakova G.A.[10], (jednadžba -12b), koji je predložio hiperboličke funkcije (jednadžbe snage) za izračunavanje propusnosti u odnosu na naprezanje pri stlačivanju.

$$k = k_0\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\alpha^*} \quad \text{jednadžba glavne krivulje} \qquad (12\text{ a})$$

$$\alpha_i^* = \alpha^*\left(\frac{p_i}{p_0}\right)^{\eta^*} \quad \text{parametri pomoćnih krivulja'} \qquad (12\text{ b})$$

Model - II je proces Gorbunova A.T.[5], (jednadžbe 13a i 13b), koji je koristio eksponencijalne funkcije (npr. jednadžba 2) umjesto hiperboličkih:

$$k = k_0 e^{-\alpha(p_0-p)} \quad \text{jednadžba glavne krivulje} \qquad (13\text{ a})$$

$$\alpha_i = \alpha e^{-\eta(p_0-p_i)} \quad \text{parametri pomoćnih krivulja'} \qquad (13\text{ b})$$

Usklađenost između dva modela je slijedeća:

$$\alpha = \alpha * \frac{2{,}3}{p_0-p}\log\frac{p_0}{p} \qquad (14\text{ a})$$

$$\eta = \eta * \frac{2{,}3}{p_0-p}\log\frac{p_0}{p} \qquad (14\text{ b})$$

Ako je $p>0{,}4p_0$ oba modela daju sličan rezultat.

Parametri u jednadžbama (12) i (13) su:

k_0	referentna propusnost (kod početnog tlaka p_0),
k	stvarna propusnost (kod stvarnog ležišnog tlaka p),
α, α^*	koeficijenti stlačivosti koji se odnose na propusnost u slučaju da je stijena potpuno elastična,
α_i, α_i^*	koeficijenti stlačivosti koji se odnose na propusnost u slučaju da se radi o elastično - plastičnoj stijeni, ($\alpha>\alpha_i$ i $\alpha^*>\alpha_i^*$)
η, η^*	koeficijenti plastičnosti ako je:
	$\eta=0$ ležišna stijena je eastična
	$0<\eta<10$ stijena je elastično-plastična
	$\eta>10$ stijena je elastično-plastična[5]

Oba modela uzimaju u obzir trenutnu promjenu propusnosti za elastično-plastičnu ležišnu stijenu.

4. Elastično-plastična-viskozna stijena

Tekstura stijene može biti vrlo kombinirana, prema tome materijalna jednadžba je vrlo složena. U praksi se rješavanje materijalne jednadžbe često obavlja aproksimacijom i pojednostavljenjem. Za točno rješenje numeričkih modela preporuča se da se u obzir uzme kretanje fluida i mehaničko ponašanje stijenskih materijala. Ovi modeli se nazivaju povezani geomehanički modeli a posljednjih se godina sve više preporučuju i koriste u praksi. Mi predlažemo slijedeći algoritam za procjenu promjene propusnosti korištenjem principa superpozicije.

$$\Delta k_p = \eta^{**}(\Delta k_e + \Delta k_v)_{max} \qquad (15)$$

opaska: do točke u vremenu maksimalne promjene propusnosti $(\Delta k_e + \Delta k_v)_{\max}$ razmatra se događa u tom periodu gdje je:

koeficijent plastičnosti ($\eta^{**}<=1$), koji može biti konstantan ili ovisan o naprezanju pri stlačivanju (tj. eksponencijalan).

$$\eta^{**} = \eta_0^{**} e^{-c_\eta \Delta p_{max}} \qquad (16)$$

gdje je:

η_0^{**}	referentni koeficijent elastičnosti
c_η	parametar elastičnosti (npr. $c_\eta=0$)
Δp_{max}	maksimalno naprezanje pri stlačivanju u vremenskom intervalu

Početak vremenskog intervala je uvijek $\tau=0$, njegov kraj je stvarno vrijeme: τ.

$$\Delta p_{max} = [p_0(\tau=0) - p(\tau)]_{max}$$

Ukupna promjena propusnosti ovisna o vremenu je:

$$\Delta k(\tau) = \Delta k_e + \Delta k_v(\tau) + \Delta k_p \qquad (17)$$

$(\Delta k_e + \Delta k_v)$ su izračunati prema podacima u točki 2.

Vrijednost Δk_p se nikada ne smanjuje već samo raste ili je konstantna. Na primjer ako od određene točke u vremenu naprezanje pri stlačivanju pada, Δk_p ostaje na svojoj prijašnjoj maksimalnoj vrijednosti. Kod plastičnih procesa propusnost se nikada ne obnavlja i nikada se ne vraća na početnu vrijednost.

Tablica 1.

Vrsta stijene	1 mjesec	2 mjesec	3 mjesec	4 mjesec	5 mjesec	6 mjesec	Napomena
Čvrsta	0	0	0	0	0	0	$\alpha=0$
Elastična	40	40	40	0	0	0	$\alpha=0{,}005111/\text{bar}$
Elastično-viskozna	34	37,8	39,2	5,7	2,1	0,8	I=0,6 $\lambda=11/\text{mjesec}$
Elastična-plastična	40	40	40	40	40	40	$\eta>10$
Elastična-plastična-viskozna	34	37,8	39,2	19,6	19,6	19,6	I=0,6 $\eta^{**}=\text{const}=0{,}5$

Napomena: proizvodnost bušotine je proporcionalna stvarnoj (srednjoj) propusnosti.

Primjer

Početni ležišni tlak 200 bara (2 900 psi) kod $\tau=0$, nakon čega se trenutačno snižava Δp=bar. Tijekom tri mjeseca tlak 100 bara (1 450 psi), nakon čega se trenutačno poveća na početnu vrijednost. Trajanje ukupnog intervala je 6 mjeseci. Potrebno je izračunati promjenu propusnosti kao funkciju vremena, ako je početna propusnost 100 mD i pretpostavljena različita svojstva mehanike stijena. Rješenja su prikazana u slijedećoj tablici 1.

Sažetak

- Na osnovu koherencije razvijeni su algoritmi za procjenu stvarne propusnosti ležišnih stijena, kao funkcije naprezanja pri stlačivanju u slučaju kada stijene imaju složeno mehaničko ponašanje.
- Protok bušotine ovisi o mehaničkim svojstvima stijene.
- Proizvodnost bušotine u posebnih slučajevima je ovisna o vremenu i u nekim slučajevima dolazi do histereze kapaciteta proizvodnje (utiskivanja).
- HT i HP ležišta niske šupljikavosti ponašaju se posve drugačije od klasičnog tipa ležišta zbog naprezanja pri stlačivanju,
- Točne analize ukazuju na važnost ispitivanja s obzirom na ležišne stijene koje imaju složena mehanička svojstva.

❖

Autor:
József Pápay, Professor Emeritus - Miskolc University, Mol- PLC

UDK : 553.982 : 502.7 : 622.24.63 : 519.876.5

553.982	ležišta nafte i plina
502.7	iscrpljivanje ležišta
622.24.63	rudarstvo, bušotine, iscrpljivanje ležišta
519.876.5	simulacije, algoritmi