

# Utjecaj zasićenja zarobljenim plinom na iscrpak nafte kod primjene sekundarnih metoda iskorištavanja ležišta

A. Feigl

PREGLEDNI ČLANAK

U ovom radu je prikazan učinak zarobljenog plina tijekom izvođenja sekundarnih procesa, ili preciznije, u periodu primjene konvencionalnog zavodnjavanja djelomično iscrpljenih naftnih ležišta. Ti se procesi mogu simulirati s analognim pokusima na uzorcima ležišne stijene, na sintetskim modelima u laboratorijskim uvjetima ili pomoću numeričkih modela. Objašnjenje fizikalnih mehanizama koji se odvijaju tijekom tih procesa potrebno je da se bolje razumije korisnost zasićenja plinskom fazom, a uz to su objašnjeni dodatni povoljni i nepovoljni faktori prisutni kod takvih procesa. Osim toga, objašnjeni su i postupci za pronalaženje optimalnog zasićenja zarobljenim plinom s kojim se za odabrano djelomično iscrpljeno ležište i odabranu kombinaciju fluida zavodnjavanjem uz održavanje približno konstantnog ležišnog tlaka postigne maksimalan konačni iscrpak. Istodobno to predstavlja smjernicu da sa zavodnjavanjem treba započeti kad se u ležištu tijekom prirodnog procesa iskorištavanja režimom otopljenog plina postigne spomenuto optimalno zasićenje. Na završetku je ukratko dat pregled rezultata raznih simulacijskih studija takvih procesa kod kojih se, između ostalog, koriste krivulje trofaznih relativnih propusnosti s izraženim efektima histereza.

*Ključne riječi:* maksimalan iscrpak, optimalno zasićenje, zarobljeni plin, zavodnjavanje

## 1. UVOD

U naftnim ležištima s režimom otopljenog plina zbog crpljenja pada tlak i kao posljedica toga u njima dolazi do sve većeg izdvajanja plina iz nafte, odnosno proizvodnje sa sve većim omjerom plina i nafte. Ako se u takvim ležištima primijeni metoda održavanja ležišnog tlaka zavodnjavanjem, prisutan plin ima određeni utjecaj na količinu nafte koja preostaje u ležištu nakon završetka takvog procesa, a isto tako i na veličinu konačnog iscrpka.

Kod ovakvih procesa za makroskopsko proučavanje učinkovitosti istiskivanja najčešće se koristi linearni model protjecanja. Za pojednostavljene proračune to podrazumijeva primjenu Buckley-Leverettovog modela frontalnog istiskivanja, dok se za složenije proračune mogu koristiti jedno ili višedimenzionalni numerički modeli.

Do odstupanja od linearnog modela protjecanja dolazi tijekom početnog perioda zavodnjavanja kad je protjecanje fluida radialno, i takvo je sve do momenta dok se fronte susjednih bušotina ne spoje u zajedničku frontu. To se, naravno, odnosi na linijski raspored utisno-proizvodnih bušotina kod kojeg spajanje fronti zavodnjavanja susjednih utisnih bušotina u nastavku podrazumijeva linearni protok.

Ležišta s velikom plinskom kapom općenito nisu dobri kandidati za zavodnjavanje zbog mogućnosti da vodena fronta zaobide naftu kroz područje plinske kape i zbog rizika da se nafta zavodnjavanjem utisne u područje plinske kape i tamo ostane zarobljena.

## 2. OPIS PROCESA ZAVODNJAVANJA UZ PRISUTNOST ZAROBLJENOG PLINA

U većem broju stručnih knjiga i članaka u znatnom su opsegu opisane fizikalne karakteristike procesa zavodnjavanja uz prisutnost zarobljenog plina.<sup>1,3,7,11,12,13</sup> U mnogim slučajevima potvrđeno je da prisutnost slobodne plinske faze kod zavodnjavanja uzrokuje smanjenje preostalog zasićenja naftom u usporedbi sa zavodnjavanjem bez prisutnosti plina. Ovo važi i za proces prirodnog djelovanja vodonapornog režima, međutim zbog karakteristika tog režima da u manjoj ili većoj mjeri podržava tlak, paralelno s time dolazi do izdvajanja iz nafte samo manjih količina plina koje također mogu korisno djelovati. Osim toga, ako je srednji tlak u ležištu viši od tlaka zasićenja plin se izdvaja samo lokalno u još manjim količinama.

### 2.1. Makroskopski aspekti procesa zavodnjavanja

Koristan učinak slobodnog plina kod procesa istiskivanja nafte vodom proizlazi iz formiranja zasićenja nepokretnim odnosno zarobljenim plinom u području fronte zavodnjavanja. Ako prilikom zavodnjavanja u ležištu prije nadolaska naftne fronte postoji kontinuirana plinska faza, dio plina biva potisnut naftnom frontom, dok drugi dio biva zarobljen unutar nje. Slika 1 shematski prikazuje raspored zasićenja kod takvog procesa, dok slika 2 ilustrira njegov pojednostavljeni linearni model.

Kod tih procesa tlak u ležištu ostaje uglavnom konstantan, tako da se učinci stlačivosti plina i topivosti plina u nafti mogu zanemariti.

Kao potvrda prethodno iznesenog mogu poslužiti rezultati pokusa izvedeni na jezgrama u laboratorijskim uvjetima.<sup>7</sup> Na slici 3 su prikazani profili zasićenja naftom i plinom u ovisnosti o ukupno utisnutoj količini vode. Pokus je izveden na jezgri s početnim zasićenjem pokretnim plinom. Na početku zavodnjavanja samo se proizvodi slobodni plin. Nakon toga plin se potpuno prestaje proizvoditi nakon čega se na izlaznom završetku jezgre proizvodi nafta bez plina (označeno linijom O-O'). To je za očekivati s obzirom na povoljne omjere pokretljivosti za sistem nafta-plin ( $M = 0,1$ ),<sup>13</sup> i zato jer istiskivani plin uvijek ima ulogu nemoćivog fluida.<sup>7</sup> Nakon proboja vode (označeno linijom W-W') proizvodi se i dalje nafta, ali sa znatno povećanim udjelom vode u ukupnoj kapljevini sve do završetka pokusa zavodnjavanja.

Slika 3, i opis pokusa uz tu sliku, pokazuju da se kod takvog procesa formiraju dvije različite fronte, prva naftna iza koje slijedi vodena fronta. Te dvije fronte zajedno se pomiču kroz uzorak jezgre tijekom utiskivanja vode na ulaznom kraju jezgre, a to je u obliku profila zasićenja ilustrirano na istoj slici.

Na slici 4 je prikazan rezultat pokusa kod kojeg je na početku zavodnjavanja uzorak jezgre uz naftu zasićen samo zarobljenim plinom. Iz slike se vidi da zasićenje plinom u jezgri ostaje konstantnim tijekom cijelog pokusa, i da se u početku proizvodi samo nafta, te u nastavku nafta i voda sa sve većim udjelom vode u ukupnoj kapljevini. Na taj način zavodnjavanje u prisutnosti zarobljenog plina je u stvarnosti analogno dvofaznom voda-nafta istiskivanju koje se odvija u dijelu pornog prostora koji nije zasićen plinskom fazom.<sup>7</sup>

Krivulje referentnog zavodnjavanja na sl. 3 i 4 (tanje linije) odnose se na pokuse zavodnjavanja bez zasićenja jezgre plinskom fazom. Razlika u zasićenju naftom između zavodnjavanja bez prisutnog i sa prisutnim plinom (deblje linije) ukazuje na koristan efekt plina tijekom utiskivanja vode u smislu većeg smanjenja preostalog zasićenja naftom u svakom trenutku trajanja pokusa.

## 2.2. Mikroskopski aspekti procesa zavodnjavanja

Zarobljeni plin kao nemoćiva faza nalazi se u ležištu diskontinuiran u obliku međusobno razdvojenih kuglica ili isprekidanih vlaknaca.<sup>3</sup> Unutar naftnog vala, a ispred vodenog vala, nafta popunjava porni prostor oko zarobljenog plina, osim u onom dijelu ležišta koji je zasićen vezanom vodom. U vodomočivom sistemu koji sadrži naftu, vodu i plin, za očekivati je da će plin biti smješten unutar nafte. To je položaj minimalne ukupne slobodne površinske energije, pošto je međupovršinska napetost između plina i nafte manja nego međupovršinska napetost između plina i vode.<sup>3</sup> Slika 5 shematski prikazuje položaje nafte i plina u međuzrnskom prostoru kod preostalog zasićenja naftom.<sup>3</sup>

U prethodnom potpoglavlju obrazložene pojave se odnose na vodomočive stijene, odnosno na pokuse na vodomočivim uzorcima ležišnih stijena. Pokusi izvedeni na naftomočivim uzorcima pokazuju da prisutnost zarobljenog plina nema učinka na konačno preostalo

zasićenje naftom. Objašnjenje zašto zarobljeni plin smanjuje preostalo zasićenje naftom u vodomočivim uzorcima, a ne smanjuje u naftomočivim, je sljedeće:

- u vodomočivoj stijeni konačno preostalo zasićenje naftom je zarobljeno od vode dok je preostali plin zarobljen unutar nafte i na taj način zauzima dio pornog prostora koji bi inače bio zasićen s dodatnom preostalom naftom.
- u naftomočivoj stijeni konačno preostalo zasićenje naftom u kontaktu je s površinom stijene, dok preostalo zasićenje zarobljenim plinom zauzima prostor koji bi inače bio zasićen vodom.

Vežano uz vodomočivi ležišni sistem, smanjenje preostalog zasićenja naftom zbog zasićenja zarobljenim plinom je u smislu povećanja konačnog iscrpka najkorisniji efekt prilikom procesa zavodnjavanja. Zbog toga je ovo poglavlje u najvećoj mjeri posvećeno opisivanju i tumačenju tog efekta. U nastavku su pobrojani i ukratko opisani i drugi, koji put nepoželjni učinci prisutni tijekom ovih procesa.

## 3. DODATNI FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROCESSE ZAVODNJAVANJA LEŽIŠTA UZ PRISUTNOST ZAROBLJENOG PLINA

Osim osnovnog efekta, prije opisanog smanjenja preostalog zasićenja naftom, postoji i veći broj drugih faktora koji u manjoj ili većoj mjeri utječu pozitivno ili negativno na procese zavodnjavanja u prisutnosti zarobljenog plina. Ovdje su navedeni neki od važnijih:

1. Viskozitet nafte: što je nafta viskozija, to je manje plina u njoj zarobljeno.<sup>7,12</sup> Međutim, efikasnost zasićenja zarobljenim plinom pokazuje se najvećom kod zavodnjavanja viskoznih nafte.<sup>7</sup>
2. Povećanje tlaka u ležištu: to je nepovoljan efekt ako se uzme u obzir da dolazi do gubljenja zarobljenog plina. Ako je naftni val veće debljine, potreban je veći tlak istiskivanja zbog čega dolazi do stlačivanja plina i njegovog topljenja u nafti. Sa smanjenjem zarobljenog plina na mjestima gdje naftni val prelazi u vodeni povećava se preostalo zasićenje naftom i paralelno s time dolazi do smanjenja konačnog iscrpka. Drugim riječima, proces u manjoj ili većoj mjeri prelazi u dvofazno zavodnjavanje - bez prisutnosti plina. Osim toga, dolazak naftnog vala do proizvodnih bušotina se odgađa za količinu nafte koja tijekom zavodnjavanja zbog povećavanja tlaka u ležištu zauzima porni prostor prethodno zasićen plinom.<sup>13</sup> Povećanje tlaka u ležištu predstavlja istovremeno i povoljan efekt jer otapanjem zarobljenog plina u nafti dolazi do njezinog bubrenja i smanjenja viskoziteta.<sup>7</sup> Bubrenje nafte smanjuje njezino preostalo zasićenje dok sa smanjenjem viskoziteta nafte dolazi do povoljnijeg omjera pokretljivosti nafte i vode. Dakle, ako se prilikom zavodnjavanja planira koristiti učinak zarobljenog plina, onda se taj proces treba odvijati pri gradijentu tlaka koji je vrlo malen u usporedbi s apsolutnim tlakom u ukupnom sistemu.

3. Smanjenje relativne propusnosti za naftu: to je nepovoljan efekt do kojeg dolazi zbog prisutnosti zarobljenog plina i kao posljedica toga dolazi do ranijeg proboja vode. Ipak je taj efekt manji u odnosu na povoljan efekt smanjenja preostalog zasićenja naftom koji je objašnjen u prethodnom poglavlju. Na slici 6 je prikazan primjer smanjenja relativnih propusnosti za naftu zbog prisutnosti plina.
4. Vežanost (konsolidiranost) stijene: u dobro konsolidiranim vodomogućim stijenama efekt zasićenja zarobljenim plinom na preostalo zasićenje naftom je znatno veći u odnosu na nekonsolidirane.<sup>13</sup>
5. Brzina odvijanja procesa zavodnjavanja: pri većim brzinama plin se zbog povećanog gradijenta tlaka otopi u nafti i proces prelazi u dvofazno zavodnjavanje, te efekt zasićenja plinskom fazom izostaje.<sup>2</sup> Zbog toga kod svih količina ukupno utisnute vode prosječno zasićenje naftom, koja zaostaje u ležištu, povećava se pri povećanim brzinama istiskivanja. Drugim riječima, za sve vrijednosti kumulativne utisnute vode iscrpak nafte je najviši kod najnižih brzina istiskivanja.<sup>2</sup>
6. Gravitacijski efekti tijekom zavodnjavanja djeluju nepovoljno: uvođenje gravitacijskog efekta u proračun zavodnjavanja u prisutnosti plina uzrokuje bitno drugačije ponašanje od onog u jedno-dimenzionalnim horizontalnim sistemima. To je zbog neravnomjerne vertikalne raspodjele početnog zasićenja plinom i gravitacijskih efekata na raspodjelu utisnute vode.<sup>2</sup> Gravitacijski efekti su vezani uz brzinu odvijanja procesa, debljinu ležišta, fizikalne karakteristike ležišnih i utisnih fluida (topivost, viskozitet i stišljivost), relativne propusnosti i arealni uzorak zavodnjavanja (raspored proizvodno-utisnih bušotina).<sup>2</sup> Kad se razmatraju gravitacijski efekti, manje brzine zavodnjavanja u okviru određenog raspona brzina uzrokuju niže iscrpke nafte. Za bilo koje horizontalno ležište postoji optimalna brzina zavodnjavanja zbog suprotnog efekta koji imaju gravitacijsko djelovanje i početno zasićenje slobodnim plinom.<sup>2</sup>
7. Koeficijent prostiranja (spreading coefficient): povoljno djeluje ako je pozitivan. Mada se u radu koji opisuje taj koeficijent<sup>10</sup> pokusi izvode u obrnutom slijedu od onih procesa koje je potrebno obraditi u ovom radu (dvostruko drenirajući mehanizam: utiskivanje plina u strogo vodomoguću sredinu, zasićenu vodom i preostalom naftom), efekt tog koeficijenta se može i ovdje razmotriti. Koeficijent prostiranja je predstavljen slijedećom jednadžbom:

$$S_{ow} = \sigma_{wg} - \sigma_{og} - \sigma_{ow} \quad (1)$$

gdje su:

- |               |   |   |
|---------------|---|---|
| $S_{ow}$      | = | koeficijent prostiranja nafta/voda, dyne/cm         |
| $\sigma_{wg}$ | = | međupovršinska napetost sistema voda/plin, dyne/cm  |
| $\sigma_{og}$ | = | međupovršinska napetost sistema nafta/plin, dyne/cm |
| $\sigma_{ow}$ | = | međupovršinska napetost sistema nafta/voda, dyne/cm |

Ako je taj koeficijent pozitivan, nastoji uspostaviti neprekinuti film nafte između vode i plina. Kroz taj film, ako je dovoljne debljine, protječe nafta i time se smanjuje njezino preostalo zasićenje. Ako je taj koeficijent negativan dolazi do kidanja filma nafte i prekida protjecanja kroz njega. Pokusi su pokazali da se u slučaju pozitivnih koeficijenata prostiranja postižu znatno veći iscrpci nego u slučaju negativnih.

#### 4. OPTIMALNO ZASIĆENJE PLINOM ZA POSTIZANJE MAKSIMALNOG ISCRPKA NAFTE ZAVODNJAVANJEM

Istraživanja utjecaja većeg broja povoljnih i nepovoljnih faktora prikazana u prethodna dva poglavlja pokazala su nedvojbeno korisnost prisutnosti slobodnog i, vezano uz to, zarobljenog plina u ležištu. Slijedom toga više autora je nastojalo ustanoviti optimalno zasićenje zarobljenim plinom s kojim se nakon zavodnjavanja, koje slijedi iza primarne faze crpljenja, postiže maksimalan dodatni iscrpak nafte.

Jedan od autora je pomoću programa za izračunavanje regresija s više varijabli nastojao ustanoviti korelaciju s kojom se izračunava optimalno zasićenje plinom.<sup>5</sup> Dobio je regresijsku jednadžbu koja sadrži 4 koeficijenta i koja zadovoljava sve komplete podataka s prosječnim apsolutnim odstupanjem od 4,6%.

U novijem radu, drugi je autor koristio različite modele krivulja relativnih propusnosti.<sup>8</sup> Jedne je koristio iz prijašnje literature za opis primarne faze crpljenja s režimom otopljenog plina kod kojeg je drenažni smjer procesa. Druge, koje je sam izračunao, služe za opis zavodnjavanja i za proces u smjeru upijanja. Svoje proračune je provjeravao pomoću Buckley-Leverettovog proračuna frontalnog napredovanja. Na temelju proračuna je izradio različite nomograme za dobivanje optimalnog zasićenja plinom u ovisnosti o različitim gustoćama nafte, tlakovima zasićenja, raspodjelama veličina pora i stupnjevima zavodnjavanja (kod proboja vode, nakon jednog ili dva utisnuta pora volumena vode). Na slici 7 je prikazan jedan od tipičnih rezultata proračuna koji je zajedno s ostalima poslužio za izradu serije prethodno opisanih nomograma. Na toj slici su prikazani rezultati proračuna dobiveni korištenjem nafte gustoće 876 kg/m<sup>3</sup> (30° API) i za prosječne krivulje relativnih propusnosti. Iz slike je uočljivo da za taj sistem fluida i pora sve krivulje pokazuju maksimalan iscrpak nafte pri početnom zasićenju plinom, ili preciznije, zasićenju plinom na početku procesa zavodnjavanja, od oko 20%. Korištenjem drugih kombinacija prije spomenutih parametara dobivene su krivulje oblika sličnog krivuljama na slici 7.<sup>8,11</sup>

#### 5. PRIMJENA TROFAZNIH RELATIVNIH PROPUSNOSTI KOD SIMULACIJE PROCESA ZAVODNJAVANJA S PRISUTNIM ZAROBLJENIM PLINOM

U više novijih radova prikazani su rezultati numeričke simulacije izvedeni s trofaznim relativnim propusnostima.<sup>4,6,9</sup> U prvom od njih, opisuje se simulacija

procesa zavodnjavanja s prisutnim plinom u linearnom sistemu.<sup>9</sup> U model ležišta uključeni su efekti histereze relativnih propusnosti i zarobljavanja plina od strane naftne fronte. Za ilustraciju su na slici 8 prikazane drenažne krivulje relativnih propusnosti za naftu ( $k_{ro}$ ) i plin ( $k_{rg}$ ) s više relativnih propusnosti za plin u smjeru upijanja.

Krivulje u smjeru upijanja omogućuju simulaciju zarobljavanja plina nakon početka zavodnjavanja. Koja će od krivulja krg biti aktivirana ovisi o stupnju postignutog zaplinjenja ležišta tijekom primarne faze crpljenja režimom otopljenog plina, kod kojeg je počelo zavodnjavanje. U model ležišta su uključeni i efekti stlačivosti plina i topivosti plina u nafti.

U slijedećem radu još veća pažnja je posvećena efektima histereze, koji su primijenjeni ne samo na krivulje relativnih propusnosti nego i na kapilarne krivulje.<sup>6</sup> Do izvjesne mjere numerički model se temelji na pamćenju historijata zasićenja u ležištu, što podrazumijeva da model u nastavku simulacije uzima u obzir prethodno postignute završne vrijednosti zasićenja gdje simulirani proces mijenja smjer. Da se to postigne, u model su ugrađeni algoritmi koji omogućuju izračunavanje krivulja glatkog prelaska iz drenažnih krivulja u krivulje upijanja i obratno (scanning curves). Osim toga, utjecaj zarobljenog plina ili zasićenja naftom na relativne propusnosti i kapilarne tlakove također je u modelu uzet u obzir. Kombiniranjem modela s uključenim efektom histereze i uz primjenu jednadžbe trofazne relativne propusnosti za naftu, simulator može realnije predvidjeti preostala zasićenja naftom.

U još novijem radu opisane su dodatne mogućnosti ugrađene u numerički model.<sup>4</sup> Osim aktivnih opcija histereze i trofaznih propusnosti, uključeni su i efekti sastava smjese i međupovršinske napetosti (kapilariteta) na relativne propusnosti. Korelacija s kojom je izračunata familija različitih krivulja relativnih propusnosti temelji se na interpretaciji mehanizma protjecanja na pornom nivou koji određuje dinamiku fluida. U ovom radu je opisano ležište s miješanim, odnosno prijelaznim tipom močivosti.

## 6. ZAKLJUČAK

Praktično značenje efikasnosti zasićenja zarobljenim plinom je da predstavlja direktnu mjeru dodatnog iscrpka u odnosu na iscrpak koji bi se dobio kod zavodnjavanja gdje tijekom čitavog procesa plin nije prisutan, ili gdje plinska faza tijekom zavodnjavanja nestaje zbog stlačivanja i topljenja u nafti. U skladu s time, efikasnost zasićenja zarobljenim plinom izražava se u obliku dodatnog iscrpka nafte kao udjela ili postotka od količine plina koja preostaje u pornom prostoru tijekom procesa zavodnjavanja. Pregledom podataka s aspekta učinkovitosti zasićenja zarobljenim plinom sigurno je da bi u većini praktičnih slučajeva prisutnost slobodnog plina trebala imati koristan učinak na iscrpak nafte koji se postiže zavodnjavanjem.



Autor:

**Alan Feigl**, MSc, Ekspert za razradu ležišta, INA-Industrija nafte d.d., SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina - Naftaplin, Sektor za upravljanje i inženjering polja, Služba za praćenje i nadzor ležišta, PJ za ležišni inženjering, Šubićeva 29, 10000 Zagreb, Hrvatska  
Tel.: + 385 1 459-2282  
Fax: + 385 1 459-2224  
E-mail: alan.feigl@ina.hr

UDK : 553.982 : 622.276/.279 : 622.24.63

553.982 ležišta nafte i plina  
622.276/.279 pridobivanje nafte i plina  
622.24.63 povećanje iscrpka ležišta