

# Uzroci smanjivanja čepa otapala pri procesima istiskivanja nafte u uvjetima miješanja, s osvrtom na simulacijske aspekte takvih procesa

A. Feigl

PREGLEDNI ČLANAK

U ovom radu ukratko su obrađeni efekti difuzije i disperzije i drugi efekti prisutni tijekom procesa istiskivanja nafte tekućinama podatljivim miješanju, odnosno otapalima. Prilikom tih procesa dolazi do značajnog povećanja iscrpka nafte, ali istovremeno i do smanjivanja, a moguće i potpunog gubljenja čepa otapala. Kod projektiranja ovakvih procesa od iznimne je važnosti određivanje optimalne veličine čepa otapala koji je u direktnom kontaktu s ležišnim fluidima i gdje je spomenute efekte potrebno uzeti u obzir. Pri tome primjena simulacije ležišta kao prognosne metode proračuna dodatnog iscrpka može biti od pomoći ukoliko je dovoljno kvalitetnih podataka, npr. na osnovi laboratorijskih mjerenja na jezgrama, zatim tzv. slim-tube testova i/ili pilot ispitivanja reprezentativnih dijelova ležišta, raspoloživo za pojedini simulacijski projekt, a osvrt na to je dat u završnom dijelu teksta.

*Cljučne riječi:* čep otapala, difuzija, disperzija, dodatna metoda iskorištavanja, fazno ponašanje

## UVOD

Procesi povećanja iscrpka nafte (EOR procesi), među koje spada i istiskivanje s tekućinama podatljivim miješanju, temelje se na različitim, a često puta i kombiniranim mehanizmima djelovanja, kao što je npr. primjena kemikalija s različitim efektima djelovanja, smanjenje omjera pokretljivosti istiskujućeg i istiskivanog fluida (M), korištenje termalne energije, optimalizacija ležišnog tlaka i brzine istiskivanja, itd.<sup>2,13</sup> Osnovni princip djelovanja takvih procesa je ostvarenje dodatnog iscrpka mijenjanjem kemijskih (npr. promjenom vrijednosti *pH*) i/ili fizikalnih svojstava na kontaktu između istiskivanih fluida (različitih vrsta nafte) i istiskujućih fluida (surfaktanata - PAT, mikroemulzija, lužina, otapala, ugljičnog dioksida, itd.).<sup>2,6</sup> U skladu s time, promjenama temperature i tlaka u ležištu postižu se dodatni efekti promjene fizikalnih i kemijskih svojstava istiskujućih i istiskivanih fluida, i još intenzivnije međusobno djelovanje na kontaktu između njih. Svrha procesa povećanja iscrpka je, kao što i sam naziv opisuje, dodatni iscrpak nafte iz ležišta koju se nije moglo pridobiti, u najvećem broju slučajeva, konvencionalnim sekundarnim procesima,<sup>8</sup> na primjer zavodnjavanjem,<sup>3,15,23</sup> a preostala je u ležištu nakon primjene istih. Ovaj rad je znatnim dijelom usredotočen na efekte difuzije i disperzije koji su prisutni isključivo tijekom izvođenja procesa istiskivanja nafte u uvjetima miješanja, a opisani su i neki drugi efekti prisutni ne samo kod tih procesa nego i kod drugih koji se izvode u svrhu povećanja iscrpka nafte.

Efikasnost istiskivanja nafte kod procesa u uvjetima miješanja temelji se na poništavanju međupovršinske napetosti između istiskujućeg i istiskivanog fluida,

prilikom čega na kontaktu između tih fluida dolazi do efekata difuzije i disperzije.<sup>6,14,15,19</sup> U laboratorijskim uvjetima ovakvim metodama postižu se efikasnosti iscrpka i do 100 %. Fluidi se dovode u takve *p*, *T* uvjete kod kojih se miješaju u svim omjerima bez stvaranja razdjelne površine između njih, dakle stvara se, odnosno postoji, samo jedna faza. Pri tim uvjetima između nafte i istiskujućeg fluida formira se zona miješanja, to jest čep, koji je po sastavu njihova mješavina. Prema načinu na koji se formira taj čep, odnosno prema vrsti fluida koji se utiskuje, postoje tri osnovne vrste procesa povećanja iscrpka u uvjetima miješanja, a to su utiskivanje suhog plina pod visokim tlakom, utiskivanje obogaćenog plina i utiskivanje otapala.<sup>2</sup>

Kod procesa istiskivanja nafte suhim plinom dolazi pod povišenim tlakom do isparavanja srednjih ugljikovodičnih komponenti nafte u plin kojim se ta nafta istiskuje. Na taj način između utiskujućeg plina i nafte u ležištu se formira čep obogaćenog plina koji se miješa i s naftom i s plinom. Da bi se ispunio uvjet miješanja potrebno je da u ležištu vladaju određena temperatura, i pri toj temperaturi tlak koji nije manji od minimalnog tlaka miješanja (MMP), a nafta mora biti takvog sastava da sadrži dovoljnu koncentraciju lakših, od C<sub>2</sub> do C<sub>6</sub>, ugljikovodičnih komponenti.

Utiskivanje obogaćenog plina primjenjuje se kod ležišta s težim naftama. Obogaćeni plin sadrži srednje komponente, od C<sub>2</sub> do C<sub>6</sub>, koje nafta apsorbira iz njega i tom prilikom dolazi do formiranja zone miješanja između fluida. Potisni fluid, koji u puno većim količinama slijedi iza čepa obogaćenog plina, je suhi plin iza kojeg može slijediti voda. Osnovna razlika između ovog i prethodno spomenutog procesa je da se kod potiskivanja suhim

plinom stvara zona miješanja na način da srednje komponente,  $C_2$ - $C_6$ , najvećim dijelom prelaze iz nafte u plin, dok kod potiskivanja obogaćenim plinom srednje komponente većinom prelaze iz plina u naftu, dakle obratno.

Utiskivanje otapala, koje je predmet detaljnijeg razmatranja u nastavku ovog rada, je proces sličan postupku utiskivanja obogaćenog plina. Ta se metoda primjenjuje za istiskivanje teških nafte u uvjetima nižih ležišnih tlakova. Otapala se uobičajeno utiskuju u ograničenim količinama u obliku čepova iza kojih slijedi drugi potisni fluid. To je zbog skupoće otapala, jer bi kod primjene njihovih većih količina proces istiskivanja postao nerentabilan. Potisni fluidi koji slijede iza čepa otapala, najčešće suhi plin (većinom metan) ili ugljični dioksid, znatno su jeftiniji i utiskuju se u daleko većim količinama.

Procesi utiskivanja otapala dalje se dijele prema vrstama otapala koja se utiskuju, a to su ukapljeni prirodni (naftni) plin (LNG ili LPG), alkohol i ugljični dioksid.<sup>14,15</sup>

Ukapljeni prirodni plin utiskuje se u naftno ležište kao primarni čep koji se dalje kroz ležište potiskuje sa suhim plinom i/ili vodom kao sekundarnim potisnim fluidom (čepom). Kod protiskivanja ukapljenog naftnog plina sa suhim plinom, u ležištu se mora podržavati dovoljno visoki tlak da se ova dva fluida dovedu u stanje kod kojeg su međusobno podatljivi miješanju. Ako se primarni čep ukapljenog naftnog plina direktno potiskuje s vodom kao sekundarnim čepom, onda u ležištu iza primarnog čepa zaostaju njegove velike količine jer sistem 'ukapljeni naftni plin - voda' nije podatljiv miješanju. Zbog toga prije vremena dolazi do direktnog kontakta između nafte i vode i ukupno prestaju uvjeti miješanja čime proces prelazi u klasično zavodnjavanje. Da se izbjegne taj problem, neki autori predlažu da se kao potisni čep neposredno nakon ukapljenog naftnog plina koristi suhi plin, a tek iza znatno većih količina suhog plina mogla bi slijediti voda.<sup>2</sup>

Proces istiskivanja nafte čepom butilnog ili propilnog alkohola sličan je prethodno opisanom procesu, ali s mnogo povoljnijim omjerom pokretljivosti.<sup>14,15</sup> Čep se potiskuje s vodom s kojom je podatljiv miješanju. Nedostaci ovog postupka su visoka cijena alkohola i njegov još brži gubitak u ležištu u odnosu na ukapljeni naftni plin.

Princip povećanja iscrpka nafte utiskivanjem čepa ugljičnog dioksida sličan je prethodno navedenim metodama utiskivanja ukapljenog prirodnog plina i alkohola. Ugljični dioksid, kao utisni medij, ima vrlo široke primjene u svijetu. Ako je pri ležišnoj temperaturi ležišni tlak veći od minimalnog tlaka miješanja, onda dolazi do miješanja i s naftom ispred i s vodom iza čepa pri čemu dolazi do pojave većeg broja pozitivnih efekata koji su utvrđeni laboratorijskim ispitivanjima i koji imaju znatan utjecaj na povećanje konačnog iscrpka.<sup>14,15</sup>

Ukratko, koliki će dodatni iscrpak nafte biti postignut tijekom procesa istiskivanja otapalom ovisi o tipu ležišne stijene, vrsti nafte koja se istiskuje, odabiru i količini otapala, odabiru i količini fluida s kojim se potiskuje čep otapala, temperaturi i tlaku u ležištu i brzini odvijanja

procesa istiskivanja. Na sl. 1 shematski je prikazana podjela prethodno opisanih procesa.

## 1. UZROCI SMANJIVANJA ČEPA OTAPALA

Kod projektiranja veličine čepa otapala s kojim se istiskuje nafta potrebno je u prvom redu uzeti u obzir osnovne fizikalno-kemijske pojave prisutne tijekom istiskivanja nafte u uvjetima miješanja, a to su fazno ponašanje i uz njega vezani efekti difuzije i disperzije. Proračun količine otapala, kojeg je potrebno utisnuti, od velike je važnosti zbog njegove skupoće. Čep otapala, koji se nalazi između nafte i potisnog fluida, mora pri zadanim ležišnim uvjetima imati svojstvo miješanja s obadva fluida. Poteškoća je da se čep otapala razlijeva po ležištu velikom brzinom, pa je pri projektiranju veličine čepa potrebno odrediti njegovu optimalnu količinu koja će biti dovoljna za održavanje 100 %-tne koncentracije između smjese nafte i otapala na čelu i smjese otapala i potisnog fluida na začelju čepa, i to tijekom cjelokupne izvedbe projekta. Pri tome navedene smjese moraju imati koncentraciju veću od kritične (MME)<sup>6</sup>, gdje su kritična koncentracija i drugi dodatni pojmovi vezani uz ovu problematiku objašnjeni u nastavku, u potpoglavljima 1.1 - 1.6. Kod tih procesa mogu biti prisutni slijedeći uzroci, u prvom redu gubljenja otapala,<sup>14,15</sup> i općenito neefikasnosti primjene takvih procesa:

- prebrzo miješanje procesima difuzije i disperzije sa slojnim tekućinama na čelu i s potisnim fluidima na začelju čepa (npr. sa suhim plinom kao potisnim fluidom),
- razlijevanje čepa zbog nepovoljne mreže bušotina: u praksi se često koriste utisno-proizvodne mreže bušotina s nepravilnim rasporedom zbog nepovoljne površinske konfiguracije terena, oblika i heterogenosti ležišta, ali i zbog racionalnosti korištenja postojećih proizvodnih bušotina za utis koje su u međuvremenu zavodnile a položaj im je u smislu utisa dobar, mada ne i optimalan,
- gubitak otapala po jako propusnim proslojcima, odnosno u ležištima sa znatnije izraženom heterogenošću (definicija heterogenosti i način na koji se izražava objašnjeni su u nastavku teksta),
- nepovoljni omjeri viskoznosti nafte i otapala, te otapala i potisnog fluida (nepovoljni omjeri pokretljivosti),
- zasićenje naftnog ležišta plinom: zbog postojanja različitih faza proces istiskivanja se ne odvija u uvjetima miješanja jer se tijekom istiskivanja između fronte čepa otapala i nafte formira sve veći čep plina,
- vrsta kolektora: postoje kolektorske stijene s tipom šupljikavosti u kojem dio nafte i pri uvjetima miješanja nije dostupan,<sup>6</sup> i
- brzina istiskivanja: ako u dijelovima ležišta, ili ukupno, nisu postignuti uvjeti miješanja, preostalo zasićenje naftom će biti to veće, to jest iscrpak nafte manji, što je brzina istiskivanja manja (prisutnost Jaminovog efekta,<sup>6,14</sup> ukratko objašnjenog u nastavku teksta). Ipak se utjecaj brzine istiskivanja može relativizirati, jer pri vrlo malim brzinama može radi drugih efekata s

obrnutim djelovanjem doći do smanjenja preostalog zasićenja naftom (npr. pri manjim brzinama je bolje uspostavljanje ravnoteže među tekućinama,<sup>14,15</sup> gdje u kosim ležištima s dobro razvijenom vertikalnom propusnošću može doći do izražaja pozitivni mehanizam gravitacijskog odjeljivanja).

Na slici 2. je prikazan idealizirani profil koncentracije kod procesa u uvjetima miješanja za čep otapala koji napreduje kroz ležište.

U nastavku su pojašnjeni efekti koji se zbivaju tijekom istiskivanja nafte u uvjetima miješanja, kao i neki češće korišteni pojmovi vezani uz analize uzroka smanjivanja čepa otapala.

### 1.1. UTJECAJ FAZNOG PONAŠANJA NA POJAVU DIFUZIJE I DISPERZIJE

Kod svih procesa istiskivanja nafte u uvjetima miješanja dolazi u ležištu do međusobnog prijenosa mase na kontaktu između prisutnih fluida, a nazivaju se procesima difuzije i disperzije.<sup>6,14,15,19</sup> Ti procesi uzrokuju međusobno razrjeđivanje i otapanje istiskujućeg i istiskivanog fluida i na taj način utječu na njihovo fazno ponašanje. Pošto je projektiranje procesa u uvjetima miješanja vezano uz analize faznog ponašanja fluida pri kojem se intenziviraju efekti difuzije i disperzije, potrebno je poznavanje takvog ponašanja, i paralelno s time mehanizma miješanja fluida.

#### 1.1.1. Fazno ponašanje

Prikladan način za ilustraciju faznog ponašanja prethodno spomenutih procesa je pseudoternarni<sup>6</sup> dijagram. U slučajevima kad treba prikazati pri određenom tlaku i temperaturi međusobno djelovanje, to jest fazno ponašanje, tri komponenti, npr. metana ( $C_1$ ) ili ugljičnog dioksida ( $CO_2$ ), srednje pseudokomponente (od  $C_2$  do  $C_6$ ) i teže (teške) pseudokomponente - ležišne nafte ( $C_{7+}$ ), često se koristi takav način prikazivanja.<sup>14,15</sup> Na slici 3, gdje je prikazan jedan primjer takvog dijagrama, mogu se razlikovati dva područja. To su:

- dvofazno područje koje je omeđeno krivuljom fazne granice, koja se sastoji od krivulje rosišta i u nastavku krivulje vrelišta, i gdje su plinovita i tekuća faza međusobno u ravnoteži, a nalazi se s lijeve strane kritične točke,
- jednofazno područje desno i iznad kritične točke, to jest desno i iznad krivulje rosišta, gdje prevladava mješavina ugljičnog dioksida ( $CO_2$ ) i srednje ugljikovodične pseudokomponente ( $C_2-C_6$ ), koje je zajedničko s jednofaznim područjem ispod kritične točke, odnosno ispod krivulje vrelišta, gdje prevladava mješavina srednje ugljikovodične pseudokomponente i ležišne nafte ( $C_{7+}$ ).

Linije koje povezuju dvije suprotne točke unutar dvofaznog područja, kojeg omeđuju krivulje vrelišta i rosišta, nazivaju se spojnicama<sup>14,15</sup> (poveznice) i nekoliko njih je prikazano na slici. Granična spojnica je tangenta u kritičnoj točki. Ternarni (trokomponentni) dijagrami imaju svojstvo da bilo koja smjesa dvaju fluida leži na pravcu između točaka koje predstavljaju njihove početne sastave.

Procese istiskivanja, koje se nastoji održavati u uvjetima miješanja, potrebno je izvoditi pri određenom tlaku, koji nije manji od tlaka miješanja ( $MMP$ ), i određenoj temperaturi ( $p, T = \text{const.}$ ). Osim toga, potrebno je u skladu s prethodnim laboratorijskim ispitivanjima barem približno poznavati tijekom čitavog odvijanja procesa sastave smjesa na kontaktu između nafte ( $C_{7+}$ ) i primarnog čepa ( $C_2-C_6$ ), kao i na kontaktu između primarnog čepa ( $C_2-C_6$ ) i potisnog fluida - sekundarnog čepa ( $CO_2$  ili  $C_1$ ). Ukratko, u skladu sa sl. 2, sastavi smjesa istiskivanih i istiskujućih fluida trebaju se za  $FCM$  procese održavati u okviru pseudoternarnog dijagrama uzduž pravaca (pravaca između točaka početnih sastava) koji se u čitavoj dužini nalaze unutar jednofaznog područja, ili se za  $MCM$  procese trebaju odvijati uzduž pravaca koji u početnom dijelu procesa u manjoj mjeri presijecaju dvofazno područje.<sup>6</sup>

#### 1.1.2. Molekularna i efektivna difuzija

Do pojave molekularne difuzije dolazi kad su u neposrednom kontaktu dva ili više različitih fluida koji su pri određenim (ležišnim) uvjetima podložni miješanju. Za opis molekularne difuzije u definicijskom smislu može poslužiti jednadžba koja prema pojednostavljenom modelu opisuje difuzijsko protjecanje kroz neku površinu:<sup>6</sup>

$$D_{BA} = \frac{m_{Bx}}{A \cdot \left( \frac{\partial C_B}{\partial x} \right)} \quad (1)$$

Iz te jednadžbe proizlazi da je količina difuzije fluida  $B$  u fluid  $A$  razmjerna gradijentu koncentracije  $\partial C_B / \partial x$  fluida  $B$ . Veličina te razmjernosti naziva se koeficijent molekularne difuzije,  $D_{BA}$ . Negativni predznak na desnoj strani jednadžbe je iz razloga što se proces difuzije odvija u smjeru smanjenja koncentracije fluida  $A$ .

Koeficijent difuzije, definiran prema jednadžbi (1), obično je u funkciji koncentracije, temperature i kemijskog sastava fluida koji se miješaju. Za preciznije analize treba zavisnost o koncentraciji i/ili temperaturi biti uključena u jednadžbu difuzije. Međutim, pretpostavka konstantne vrijednosti koeficijenta molekularne difuzije kroz čitav raspon koncentracija i temperatura tijekom nekog procesa često puta je u praksi zadovoljavajuća.<sup>6</sup>

Jednadžbu (1) može se direktno primijeniti ukoliko je tip pornog prostora stijene sličan snopu ravnih kapilarnih cjevčica, što u stvarnosti najčešće nije slučaj. Fluidi u ležištu struje zavojito kroz porni prostor. Ako kao mjeru prosječne zavojitosti za neki određeni tip kolektora, odnosno njegov porni prostor, pretpostavimo prosječan nagib od  $45^\circ$  u odnosu na osnovni smjer protjecanja, onda možemo koeficijent difuzije korigirati pomoću slijedeće jednadžbe:

$$\frac{D_{aBA}}{D_{BA}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad (2)$$

Difuziju u poroznoj sredini može se predstaviti kao funkciju od električnog otpora stijene. To se temelji na analogiji između električne provodljivosti i difuzije mase u poroznoj sredini. To znači da je put kojim protječe električna struja kroz stijenu zapravo analogan putu

kojim se zbog difuzije giba fluid *B*. Tu analogiju možemo predstaviti sa slijedećom jednažbom:

$$\frac{D_{aBA}}{D_{BA}} = \frac{1}{F_R \cdot \phi} \quad (3)$$

Vrijednosti faktora  $D_{aBA}/D_{BA}$  obično se kreću od 0,6 do 0,7, premda mogu biti i znatno niže, što ovisi o vrsti porodne sredine. Korekcijom jednažbe (1), s vrijednostima faktora dobivenih pomoću jednažbi (2) ili (3), dobivaju se koeficijenti efektivne difuzije.

Difuzija je po svojim karakteristikama proces na razini molekula, gdje do miješanja čestica dolazi zbog njihovog nasumičnog gibanja na granici dvaju fluida. Difuzivni proces, kao mehanizam miješanja, dominantan je, ako su brzine protjecanja u poroznoj sredini vrlo male.

### 1.1.3. Longitudinalna i transversalna disperzija

Kod protjecanja kroz poroznu sredinu, naročito pri većim brzinama, dolazi do dodatnog miješanja između različitih fluida, što se naziva disperzijom. Do povećanja intenziteta miješanja dolazi zbog nejednolikog strujanja tekućina i/ili razlike u koncentracijama. Razlikujemo longitudinalnu i transversalnu disperziju, ovisno o smjeru odvijanja procesa disperzije. Longitudinalna disperzija se odvija u smjeru u kojem se istiskuje nafta, dok se transversalna zbiva okomito na taj smjer. Te se dvije vrste disperzije razvijaju međusobno različitim intenzitetom, koji se mijenja s obzirom na vrijeme i položaj u odnosu na početne uvjete. Intenzitet miješanja ovisi o uzajamnom djelovanju molekularne difuzije i disperzije. U području gdje istovremeno djeluju difuzija i disperzija, ukupni koeficijent disperzije bit će jednak zbroju ta dva koeficijenta. Ako je longitudinalna disperzija veća od molekularne difuzije u istom smjeru, onda je ona razmjerna prosječnoj brzini protjecanja kroz poroznu sredinu. Mnoge studije disperzije pokazale su da je koeficijent disperzije funkcija svojstava porodne sredine, karakteristika istiskivajućeg/istiskivanog fluida i brzine protjecanja.<sup>7</sup> Vjerojatno najbolji pristup u opisivanju disperzije temelji se na uvođenju koeficijenta disperzije kao parametra koji je analogan koeficijentu molekularne difuzije. Slijedeća jednažba predstavlja korelaciju koja u mnogim slučajevima može dovoljno dobro poslužiti za proračun longitudinalne disperzije:<sup>6</sup>

$$\frac{K_i}{D_{BA}} = \frac{1}{F_R \cdot \phi} + 0,5 \cdot \left( \frac{v F_i d_p}{D_{BA}} \right) \text{ za } \frac{v F_i d_p}{D_{BA}} < 50 \quad (4)$$

Ova jednažba je bezdimenzionalna, te se može primijeniti za bilo koju grupu međusobno konzistentnih jedinica. U istom obliku, ali s različitim koeficijentom razmjernosti, predstavljena je jednažba za transversalnu disperziju:

$$\frac{K_i}{D_{BA}} = \frac{1}{F_R \cdot \phi} + 0,0157 \cdot \left( \frac{v F_i d_p}{D_{BA}} \right) \text{ za } \frac{v F_i d_p}{D_{BA}} < 10^4 \quad (5)$$

Prosječna brzina istiskivanja nafte čepom, prisutna u jednažbama (4) i (5), izračunava se prema jednažbi:

$$v = \frac{q}{\phi \cdot A} \quad (6)$$

Kod malih brzina protjecanja molekularna difuzija je dominantna u odnosu na disperziju, jer ima dovoljno vremena da osigura podjednaku koncentraciju fluida u svim dijelovima pornog prostora. Kod većih brzina protjecanja koeficijent disperzije je zbog konvektivnog strujanja veći od koeficijenta molekularne difuzije.

## 1.2. HETEROGENOST LEŽIŠNE STIJENE

Pod heterogenošću se razumijeva razlika u svojstvima među različitim dijelovima ležišta, kao što su npr. propusnost i šupljikavost. Heterogenost se dijeli u tri osnovne kategorije:<sup>14</sup>

- promjene svojstava po površini ležišta (arealno),
- promjene svojstava po debljini ležišta (proslojenost), i
- raspucanost stijena (različiti tipovi šupljikavosti u istom kolektoru).

Heterogenost se najčešće izražava sa stupnjem promjene propusnosti po debljini ležišta koja pokazuje stupanj proslojenosti ležišta. Tri su najčešće spominjana načina na koja se određuje odnosno procjenjuje stupanj heterogenosti ležišta:<sup>6,14,15</sup>

1. Približavanje položaju: kod te metode stupanj heterogenosti definiran je Lorenzovim koeficijentom koji se kreće od 0 do 1. Npr., Lorenzov koeficijent savršeno homogenih ležišta jednak je nuli.
2. Varijacija propusnosti je parametar koji može poslužiti kao mjera stupnja vertikalne heterogenosti. Izračunava se prema slijedećoj jednažbi:

$$V = \frac{k_{av} - K_{\sigma}}{k_{av}} \quad (7)$$

Ako su za određeno ležište poznati varijacija propusnosti i omjer pokretljivosti mogu se koristiti Dykstra-Parsonsovi dijagrami iz kojih se očitava koeficijent efikasnosti vertikalnog istiskivanja, poznat i kao koeficijent vertikalnog obuhvata.<sup>6,14</sup>

3. Kovalova metoda određivanja heterogenosti ležišne stijene: veličinu heterogenosti stijene određuje iscrpak nafte (%) dobiven nakon što je 1 p.v. otapala utisnut u uzorak stijene, gdje su tijekom ispitivanja viskoziteti nafte i otapala izjednačeni.<sup>19</sup>

## 1.3. JAMINOV EFEKT I KAPILARNI BROJ

Poznavanje Jaminovog efekta važno je za razumijevanje procesa istiskivanja u dijelovima ležišta gdje ne vladaju uvjeti miješanja, ili kod procesa ukupno u uvjetima nemiješanja. Jaminov efekt podrazumijeva veličinu tlaka potrebnu za protiskivanje nemoćivog fluida kroz kapilarni sistem u ležištu.<sup>6</sup> U sklopu istraživanja tog efekta spadaju ispitivanja pojava vezanih uz kapilaritete različitih fluida i različite geometrije pornog prostora. Uz to spada i poznavanje veličine kapilarnog broja, bezdimenzionalne grupe parametara, koji pokazuje koliki je omjer viskozne u odnosu na kapilarnu silu kod protjecanja kroz poroznu sredinu.<sup>6,13,20,22</sup> Pri većim brzinama protjecanja fluida u ležištu viskozne sile više dolaze do izražaja te je kapilarni broj veći i ujedno je manje izražen nepovoljan Jaminov efekt, u slučaju da je porozna sredina nemoćiva u odnosu na istiskujući fluid. Kapilarni broj je predstavljen slijedećom jednažbom:<sup>20</sup>

$$n_c = \frac{\mu_w U_w}{\sigma_{ow} \phi} \quad (8)$$

Postoji zavisnost između veličine kapilarnog broja i efikasnosti istiskivanja, odnosno preostalog zasićenja naftom. Kapilarni broj se kreće u granicama od  $10^{-8}$  do  $10^{-1}$ , i što je kapilarni broj veći to je efikasnost istiskivanja bolja. Kod vrijednosti kapilarnog broja većih od  $10^{-4}$  zamijećena su značajna povećanja efikasnosti istiskivanja, jer viskozne sile postaju dominantne u odnosu na kapilarne. Kod vrijednosti većih od  $10^{-2}$  koeficijent efikasnosti istiskivanja je jednak jedinici. Bez obzira na povoljan efekt povećanja brzine protjecanja u ležištu, ipak jedini u praksi efikasan način povećanja kapilarnog broja (do vrijednosti koje omogućuju znatnije povećanje iscrpka) je smanjenje međupovršinske napetosti.<sup>13</sup>

#### 1.4. UBRZANO SMANJIVANJE ČEPA OTAPALA U PRVOJ FAZI ISTISKIVANJA

Tijekom cijelog procesa protiskivanja čepa otapala dolazi do miješanja fluida i s njegove prednje strane s naftom i sa stražnje strane s potisnim plinom (i/ili vodom), što dovodi do formiranja dviju zona miješanja. Proces miješanja tijekom istiskivanja traje dok se koncentracija otapala ne smanji do vrijednosti pri kojoj prestaju uvjeti miješanja. Proces miješanja je najintenzivniji na početku procesa dok se u dovoljnoj mjeri ne formiraju zone miješanja na čelu i začelju čepa otapala koje usporavaju njegovo daljnje smanjivanje. Na taj način uspijeva se održavati dovoljno visoka koncentracija otapala u središnjem dijelu čepa i time se osigurava nastavak procesa u uvjetima miješanja koji osigurava dodatni iscrpak. Slika 4 shematski prikazuje idealizirani FCM proces istiskivanja s formiranim zonama miješanja koji uključuje utiskivanje čepa s određenim volumenom otapala koji je podatljiv miješanju, i s naftom ispred i s potisnim suhim plinom iza čepa.

Dodatna je nepovoljna okolnost što kod proračuna veličine čepa također treba uzeti u obzir da se s početkom utiskivanja potisnog fluida ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_1$  ili vode) čep otapala sve više stanjuje po sve udaljenijem i sve dužem opsegu oko utisne bušotine. Taj se nepovoljni trend događa u prvoj fazi utiskivanja sve dok se fronte istiskivanja susjednih utisnih bušotina ne spoje u zajedničku frontu. To se, između ostalog, rješava rasporedom i gustoćom rasporeda utisnih i proizvodnih bušotina, pri čemu se uzima u obzir i geometrija pornog prostora u ležišnoj stijeni.

#### 1.5. KRITIČNA KONCENTRACIJA OTAPALA

Kod analize pojave smanjivanja primarnog čepa otapala tijekom istiskivanja, potrebno je za sva tri prije opisana procesa obratiti pažnju i na smjese s kritičnom koncentracijom otapala. Pod time se, pri određenom fiksiranom tlaku, višem od minimalnog tlaka miješanja, i pri određenoj temperaturi, podrazumijeva minimalna koncentracija otapala ( $MME$ )<sup>6</sup> u ostatku čepa ispod koje prestaju uvjeti miješanja i tijekom nastavka procesa istiskivanja dolazi do formiranja dvofaznog područja.<sup>6,14,15,19</sup> Vezano uz to, isto tako važna veličina kod procesa istiskivanja s čepom otapala je brzina

njegovog otapanja, odnosno smanjivanja, koja služi za projektiranje potrebne količine otapala, to jest dužine čepa koji će se utiskivati.<sup>19</sup>

#### 1.6. ŠIRINA ZONE MIJEŠANJA

Kod procesa istiskivanja tekućinama podatljivim miješanju širina zone miješanja direktno se povezuje s proračunom veličine čepa koji je potrebno utisnuti u ležište. Ako se zona miješanja definira kao razmak između položaja na kojima je bezdimenzionalna koncentracija čepa otapala 10% i 90%, onda se širina zone miješanja može izračunati pomoću slijedeće jednadžbe:<sup>6</sup>

$$x_{10} - x_{90} = 3,625 \cdot \sqrt{K_f t} \quad (9)$$

Postoji niz različitih parametara koji utječu na efikasnost odvijanja takvih procesa. Na primjer, ispitivanjima je ustanovljeno da tekućine manjih viskoznosti imaju veći koeficijent difuzije i kao posljedica toga dolazi do većeg gubljenja na kontaktu s istiskivajućim plinom. Širina zone miješanja je ovisna i o omjeru pokretljivosti i razlici gustoća među tekućinama, te o brzini strujanja.

Potrebnu veličinu čepa otapala moguće je izračunati uz pretpostavku da se oko 50% zona miješanja u području čela i na začelju čepa sastoje od otapala. Kod istiskivanja viskoznijih nafti potrebna je veća količina obogaćenog plina negoli otapala. Kod proračuna veličine čepa potrebno je uzeti u obzir da su to minimalne količine koje treba utisnuti i da ih treba povećati za određeni faktor sigurnosti. Tu naročito valja naglasiti heterogenost ležišta, o kojoj je već bilo riječi u potpoglavlju 1.2, jer što je heterogenost veća to je potreban veći čep otapala.

## 2. SIMULACIJA PROCESA RAZRADE LEŽIŠTA ISTISKIVANJEM NAFTU U UVJETIMA MIJEŠANJA

Dio efekata opisanih u prethodnom poglavlju, naročito efekata difuzije i disperzije, potrebno je u određenom opsegu uzeti u obzir prilikom proračuna neophodnih za pripremu i planiranje procesa istiskivanja nafte u uvjetima miješanja. Postoji nekoliko metoda za proračun veličine dodatnog iscrpka iz različitih ležišta predviđenih za takve procese, kao i za proračun količina različitih fluida koje za tu namjenu treba u ležište utisnuti, a s čime se može procijeniti isplativost takvih procesa. Za iste namjene mogu se koristiti i različiti fizikalni modeli pogodni za izvođenje analognih pokusa u laboratorijskim uvjetima, kao i analitički modeli s kojima se do izvjesne mjere mogu oponašati uvjeti koji vladaju u ležištu tijekom odvijanja tih procesa.

Međutim, već duže vrijeme poznati su različiti simulacijski programi (simulatori), odnosno matematički modeli, kojima je svrha numerička simulacija procesa istiskivanja nafte u uvjetima miješanja.<sup>9,19</sup> Glavna je prednost ove metode proračuna, u odnosu na prije spomenute metode, što se simulacijom mogu opisati složeni i realistični uvjeti koji vladaju u ležištu prilikom primjene takvih procesa. Primjenom simulacijskih programa može se opisati višefazno protjecanje fluida u dvije ili tri dimenzije. Može se simulirati ponašanje većeg

dijela ili čitavog ležišta ugljikovodika s većim brojem bušotina, i ponašanje tih bušotina može biti simulacijom realistično opisano kao što je njihovo stvarno ponašanje. To znači da se, kao i u stvarnosti, bušotine mogu pustiti u proizvodnju, napustiti (zatvoriti), otvoriti u različitim intervalima uz istovremenu simulaciju mjerenih tlakova i mjerenih proizvodnji različitih fluida. Osim toga, prednost je što se u okviru modela ležišta može opisati prostorna heterogenost kolektorske stijene i može se ispitivati utjecaj promjena lokacija hipotetskih bušotina na efikasnost crpljenja pojedinih dijelova ležišta tijekom procesa istiskivanja. Na taj način, nakon što se usklađenjem proizvodnog historijata i ležišnog tlaka određeni model ležišta verificira, mogu se locirati nove bušotine s kojima se s određenim stupnjem pouzdanosti može predvidjeti dodatni iscrpak ugljikovodika. Naravno, ukoliko model verificiran na taj način potvrdi postojanje područja u ležištu s dovoljno visokim preostalim zasićenjima ugljikovodicima i s dovoljno velikim rasprostiranjem takvih zasićenja u smislu isplativosti bušenja novih bušotina i postizanja dodatnog iscrpka.

Više od tri četvrtine svih procesa u različitim ležištima može se simulirati s klasičnim, tzv. „black-oil“, matematičkim modelom. Takav model, međutim, ne zadovoljava kad je potrebno simulirati procese istiskivanja u uvjetima miješanja dva fluida sa znatnijim razlikama u svojstvima, istiskivanja nafte fluidima podatljivim ili uvjetno podatljivim miješanju i druge specijalne procese.<sup>9</sup> Kad je riječ o simulaciji procesa istiskivanja fluidima podatljivim miješanju, iz praktičnih razloga se ne primjenjuje uvjetno nazvan 'općeniti' matematički model, odnosno simulacijski program koji bi uključivao sve efekte potencijalno ili stvarno prisutne kod takvih procesa. Nepraktičnost istovremene simulacije svih efekata koje uključuju takvi procesi podrazumijeva dugotrajnost simulacije, potrebu za iznimno velikim memorijskim kapacitetom kompjutera koji služi za simulaciju, kao i iznimno visoku cijenu simulacije koja bi se radila na taj način. Zbog toga se primjenjuju metode simulacije koje uključuju samo odabrane efekte prisutne prilikom izvođenja takvih procesa. Kao jedan primjer za to korisno može poslužiti korištenje varijacijskih metoda za simulaciju protiskivanja u uvjetima miješanja malih čepova otapala s uključenim efektom disperzije manjeg opsega.<sup>16</sup> Iz primjene u praksi proizašlo je da se simulacije procesa istiskivanja nafte u uvjetima miješanja uglavnom mogu svesti u jednu od dviju slijedećih kategorija:<sup>19</sup> korištenje modificiranog „black-oil“ simulatora ili simulatora sastava fluida (compositional simulator). Kratak opis praktične primjene svakog od ovih tipova numeričkih simulatora, odnosno simulacijskih programa, dat je u nastavku teksta.

## 2.1. MODIFICIRANI „BLACK-OIL“ SIMULATORI

Nekoliko metoda se spominje za simulaciju procesa u uvjetima miješanja uz pomoć modificiranih „black-oil“ matematičkih modela, ali najčešće nisu primjenjivi za veće projekte zbog numeričke disperzije<sup>9</sup> koja znatno nadmašuje fizikalnu disperziju čiji bi efekt simulacijom trebao biti realno opisan.<sup>19</sup> Od svih vrsta modificiranih

„black-oil“ matematičkih modela kao najpodesniji za primjene kod većih simulacijskih studija spominje se matematički model Todda i Longstaffa.<sup>19,21</sup> Ovi autori su predložili svoj model da se poboljša simulacija efekta ispiranja i vezano s time proračun iscrpka nafte kod procesa istiskivanja gdje u ležištu prevladavaju uvjeti formiranja viskoznih prstiju (viscous fingering). Kod tog modela pretpostavljeno je djelomično miješanje kod izračunavanja viskoznosti otapala (kao plinovite faze) i nafte. Autori su preporučili modifikaciju relativnih propusnosti za plin i naftu kod klasičnih „black-oil“ modela prema slijedećim jednadžbama:

$$k_{ro} = \frac{S_o}{S_n} \cdot k_m \quad (10)$$

$$k_{rg} = \frac{S_g}{S_n} \cdot k_m \quad (11)$$

gdje je:

$$S_n = S_o + S_g \quad (12)$$

Oni su također preporučili izračunavanje efektivnih viskoznosti za naftu i plin prema slijedećim jednadžbama:

$$\mu_{oe} = \mu_o^{1-w} \cdot \mu_m^w \quad (13)$$

$$\mu_{ge} = \mu_g^{1-w} \cdot \mu_m^w \quad (14)$$

Vrijednost parametra miješanja  $w = 1$  odnosi se na uvjete potpunog miješanja unutar jednog simulacijskog elementa u modelu ležišta, dok se vrijednost  $w = 0$  odnosi na uvjete pri kojima je miješanje zanemarivo. Kad  $w$  ima vrijednost manju od 1, efektivna viskoznost komponente otapala u zadanom elementu je manja od efektivne viskoznosti naftne komponente. U tom će slučaju otapalo istjecati iz tog elementa pri većoj brzini od nafte, te će na taj način biti simuliran efekt formiranja viskoznih prstiju. Ova metoda simulacije, nazvana i metodom parametra miješanja,<sup>19</sup> ne uzima u proračun strukturu viskoznih prstiju. Umjesto toga, ona služi za aproksimaciju utjecaja formiranja viskoznih prstiju na efikasnost ispiranja, t.j. veličinu koeficijenta obuhvata, i veličinu iscrpka kod modela ležišta opisanih s relativno krupnim simulacijskim elementima. Na taj se način, kroz simulaciju procesa gdje je realno pretpostaviti formiranje viskoznih prstiju, može procijeniti parametar miješanja  $w$ . Taj parametar, ako se njegovim podešavanjem postigne simulacija koja realno opisuje ponašanje određenog ležišta, može poslužiti kao mjera veličine miješanja koje vlada pri procesu istiskivanja u nekom ležištu.

Potrebno je napomenuti još jedno ograničenje kod primjene modificiranih „black-oil“ simulatora za predviđanje ponašanja tih procesa. A to je da značajan efekt transfera mase među fazama, koji se događa blizu i ispod tlaka miješanja, uopće nije u simulaciji predstavljen. Pretpostavka je da se otapalo i nafta miješaju pri prvom kontaktu, te je mehanizam više kontakata među različitim komponentama plinovite i tekuće faze, koji se događa u dinamičkim uvjetima miješanja, zanemaren. Premda to može u mnogim slučajevima biti zadovoljavajuće, još ozbiljnije ograničenje

sastoji se u nemogućnosti da se na zadovoljavajući način simulira proces istiskivanja u područjima gdje ležišni tlak može pasti ispod minimalnog za postizanje uvjeta miješanja, ali je još dovoljno visok da poboljša efikasnost istiskivanja djelovanjem drugih efekata, kao što su npr. bubrenje nafte i smanjenje viskoznosti.

Primjena modificiranih „black-oil“ matematičkih modela za simulacije procesa u uvjetima miješanja zahtjeva brze kompjutere velikog kapaciteta, većeg nego kod primjene klasičnih „black-oil“ modela. Ipak su i kao takvi znatno jednostavniji za korištenje i zahtijevaju manje kompjuterske memorije i vremena u odnosu na matematičke modele sastava fluida (compositional simulators), koji su objašnjeni u slijedećem potpoglavlju.

## 2.2. SIMULATORI SASTAVA FLUIDA

Simulatori ili matematički modeli sastava fluida najčešće se koriste za simulaciju ponašanja plinsko-kondenzatnih ležišta i naftnih ležišta s laganim, lako hlapljivim naftama. Tekuća i plinovita faza predstavljene su kao višekomponentne mješavine i to je osnovna razlika u odnosu na „black-oil“ simulatore gdje su ugljikovodici predstavljeni u obliku jedno ili dvokomponentnog sistema. Uobičajeno je kod modela sastava fluida da jednadžbe koje opisuju protjecanje pojedinih komponenti ne sadrže član koji uključuje fizikalnu disperziju.<sup>19</sup> Ravnotežni sastavi višekomponentnih faza, koje istodobno mogu postojati unutar svakog bloka u simulacijskoj mreži, određuju se ili iz tzv. „flash“ proračuna korištenjem korelacija s *K*-vrijednostima plinovito-tekućih omjera pojedinih komponenti, ili rješavanjem različitih jednadžbi stanja pri ravnotežnom uvjetu jednakog fugaliteta za zadanu komponentu prisutnu u svakoj fazi.<sup>9,19,22</sup> U skladu s time, svojstva faza (gustoće, viskoznosti) računaju se ili iz korelacija ili primjenom jednadžbi stanja. Na taj način utjecaj faznog ponašanja na stvaranje uvjeta miješanja i na efikasnost istiskivanja može se uzeti u obzir kod primjene simulatora sastava fluida.

Simulacija sastava fluida bi, u principu, trebala biti korisna gdje god su efekti sastava fluida važni. Modeli sastava fluida imaju znatnu prednost u odnosu na modificirane „black-oil“ modele kad je u pitanju simulacija procesa u uvjetima miješanja, ili blizu tih uvjeta. Kod simulacije takvih procesa može se istovremeno uzeti u obzir veći broj različitih efekata koji se zbivaju u ležištu. To su fizikalni mehanizmi zavisni od sastava fluida kao, na primjer, ponašanje faza (isparavanje i kondenzacija), miješanje u dinamičkim uvjetima (višekontaktno miješanje), svojstva faza ovisno o njihovom sastavu, itd. Što je osobito važno, u simulaciji se uzimaju u obzir efekti sastava koji poboljšavaju efikasnost istiskivanja u dijelovima ležišta koji su blizu, ali su ipak ispod uvjeta miješanja (bubrenje nafte, promjena viskoznosti i gustoće fluida).

Nekoliko je razloga koji u izvjesnoj mjeri ipak ograničavaju primjene ovog tipa simulatora. Proračun ponašanja faza je znatno teži kad su u pitanju simulacije procesa u uvjetima miješanja u usporedbi s procesima isto zavisnim o sastavu faza ali ne u uvjetima miješanja, kao što su procesi u plinsko-kondenzatnim ležištima ili u ležištima s laganim naftama. Razlog za to je što se

procesu u uvjetima miješanja odvijaju pri temperaturama i tlakovima koji zahtijevaju proračune sastava i svojstva faza u blizini kritične točke u čijem području su ti proračuni manje precizni. Kao rezultat toga može doći do pogrešnog proračuna sastava fluida i pogrešnog minimalnog tlaka pri kojem se postižu uvjeti miješanja, te se na kraju može dobiti netočna prognoza efikasnosti istiskivanja. Poseban problem pri tome može biti i nestabilnost simulacije takvih procesa. U namjeri da se postignu pouzdaniji i kvalitetniji rezultati simulacije ležišta potrebno je prije toga, osim obaveznih testova sa statičkim PVT ćelijama, praviti pokuse i s protiskivanjem u laboratorijskim uvjetima kroz dugačke tanke cijevi napunjene s gusto pakiranim pijeskom (tzv. „slim-tube“ testove), te provjeriti sa simulatorom sposobnost da simulira te laboratorijske procese u uvjetima miješanja.<sup>24</sup> Zadnjih godina intenzivno se radi na poboljšanju simulacija laboratorijskih pokusa istiskivanja nafte s čepom otapala u uvjetima bliskim kritičnoj točki i tu su postignuti značajni rezultati, čak i s CO<sub>2</sub> kao otapalom.<sup>18,19</sup>

Postoji još nekoliko razloga koji sadašnje modele sastava fluida čine ograničenim kod simulacije procesa u uvjetima miješanja. To su:

- velik broj komponenti koji može biti potreban za precizno računanje složenog faznog ponašanja,
- netočnost proračuna uzrokovana numeričkom disperzijom,<sup>9</sup> i
- pogreška u proračunu uzrokovana nemogućnošću da se na dovoljno kvalitetan način simulira formiranje viskoznih prstiju.

Nastojanja da se simulacijom postignu dovoljno točni proračuni zahtijevaju izradu modela ležišta s većim brojem komponenti i još daleko većim brojem simulacijskih elemenata. U tom slučaju trajanje simulacije može postati predugo da bi se isplatilo dovoljno precizno simulirati takve procese.

Poseban problem predstavlja pokušaj da se u primjeni na velike modele ležišta s većim brojem bušotina, tzv. „full-scale“ modele, realno simulira postizavanje dinamičkih uvjeta miješanja. U takvim modelima između pojedinih parova utisno-proizvodnih bušotina ima samo nekoliko simulacijskih elemenata. Ako je, npr., prosječna veličina elemenata 70 m, onda se efekt miješanja u simulaciji može postići tek dalje od 70 m od utisne bušotine, dok su „slim tube“ pokusi pokazali da se efekt miješanja postiže na puno manjoj udaljenosti, oko 1 do 2 m. Iako se u ležištu dinamički uvjeti miješanja mogu početi događati na većim udaljenostima u odnosu na „slim tube“ pokuse, to je još uvijek znatno manje od 70 m, kao što je izloženo u ovom primjeru.

Bez obzira na sve nabrojene nedostatke navedenih matematičkih modela, simulacijski pristup za proračun i za dobivanje različitih prognoza procesa u uvjetima miješanja se isplati jer se zadnjih godina u različitim znanstvenim ustanovama u svijetu ti nedostaci intenzivno proučavaju<sup>4,5</sup> i rješavaju<sup>1,11,12</sup> i grade se nove verzije poboljšanih simulatora.<sup>10,17</sup> Osim toga, sve naprednija kompjuterska oprema omogućuje rad s većim brojem ugljikovodičnih komponenti i s vrlo

velikim brojem simulacijskih elemenata s čime se postiže precizan opis takvih procesa.

## ZAKLJUČAK

Za pravilan izbor procesa povećanja iscrpka nafte istiskivanjem u uvjetima miješanja potrebno je temeljito proučiti sve pokazatelje ležišne stijene i ležišnih fluida. Osim toga, bitno je pažljivo isplanirati vrste, sastave i količine utisnih fluida gdje se predviđeni proces namjerava izvesti. Pri tome je nužno uzeti u obzir do kakvih bi fizikalno-kemijskih efekata, bilo povoljnih ili nepovoljnih, moglo u ležištu doći između istiskivanog i istiskujućeg fluida tijekom planiranih procesa. Od tih efekata najznačajniji su difuzija i disperzija koji se zbivaju u uvjetima miješanja, pri čemu je naročito potrebno voditi računa o faznom ponašanju fluida uključenih u razmatrani proces. Također je nužno proučiti ekonomičnost primjene i raspoloživost resursa koji su neophodni za izvođenje takvog procesa.

Na osnovi više numeričkih simulacija primijenjenih na isti model ležišta, uz pretpostavke primjene različitih procesa povećanja iscrpka nafte, dobivaju se prognozni scenariji s različitim vrijednostima dodatnog iscrpka nafte koje valja usporediti radi odabira optimalne varijante. Osnovni je cilj korištenja simulacije, prije početka ili tijekom primjene na nekom projektu, procijeniti rizike ukupnog ulaganja ili nastavka ulaganja i donijeti ispravnu odluku o isplativosti takvog projekta. Pri tome numerička simulacija takvih procesa može imati dodatnu pozitivnu ulogu, uzevši u obzir sadašnje znatno povećane mogućnosti osobnih računala i sadašnju mogućnost daleko preciznijeg opisa ležišta ugljikovodika s kvalitetno izrađenim modelom ležišta pomoću znatno poboljšanih suvremenih simulacijskih programa.



Autor:

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

UDK: 553.98 : 622.24.063 : 622.276/.279 : 502.7

553.98 ležišta nafte i plina  
622.24.63 rudarstvo, bušotine, iscrpljivanja  
622.276/.279 pridobivanje nafte i plina  
502.7 iscrpljivanja bušotina