

A HATÁRFELÜLETI FESZÜLTSG ÉS A KISZORÍTÓ FLUIDUM VISZKOZITÁSÁNAK HATÁSA A FELÜLETAKTÍV ANYAGOS OLAJKISZORÍTÁS KISZORÍTÁSI HATÁSFOKÁRA

EFFECT OF INTERFACIAL TENSION AND VISCOSITY OF DISPLACING FLUID ON THE RECOVERY FACTOR OF TENSIDE FLOODING

TÓTH JÁNOS¹–BÓDI TIBOR²–PINTÉR ÁKOS³

Abstract: Tanulmányunkban elvi megfontolások után egy laboratóriumban végrehajtott felületaktív anyag és polimer vizes oldatát egy dugóban alkalmazó kiszorítási vizsgálat adatait megvizsgálva bemutatjuk a kiszorító fluidum határfelületi feszültségének és viszkozitásának hatását a kiszorítási folyamat hatékonyságára.

Kulcsszavak: EOR, felületaktív anyag, polimer, kihozatali tényező

Abstract: In our study, after considering theoretical aspects and by evaluating data of a laboratory displacement test with a water solution of surfactant (tenside) and polymer slug, we demonstrate the effects of interfacial tension and viscosity of the displacing fluid on the efficiency of the displacement process.

Keywords: EOR, tenside, polymer, recovery factor

1. Bevezetés

A vízkiszorítással részben vagy teljesen leművelt olajtelepek olajkihozatali tényezője kedvező esetekben 30–35%. A világ és a hazai olajigények is megkövetelik, hogy ne elégedjünk meg a mintegy egyharmadnyi olajkészlet kitermelésével, azaz a kétharmadnyi olajkészlet elvesztésével. E kétharmadnyi olajkészlet egy részének kitermelésére kutatták és dolgozták ki az olajipari szakemberek az EOR, az úgynevezett növelt hatékonyságú kőolajtermelő eljárásokat. Az EOR-eljárások közül egyik leghatásosabbnak ítélt művelési mód a FAA-os (tenzides) olajkiszorítás, melynek a fizikai, kémiai és áramlástan alapja, hogy a telepbeli olaj/víz határfelületi feszültségét az eredeti értékről lecsökkentjük két vagy három nagyságrenddel, ezáltal a vízkiszorítás után a tárolókőzet poruscsatornáiban a felületi erő (kapilláris erő) miatt visszamaradt olaj egy része mozgóképessé válik, és kitermelhető lesz.

¹ DR. TÓTH JÁNOS, tudományos főmunkatárs, toth@afki.hu

² DR. BÓDI TIBOR, igazgató, bodit@afki.hu

³ PINTÉR ÁKOS, tudományos segédmunkatárs, pinter@afki.hu

Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet
3515 Miskolc-Egyetemváros

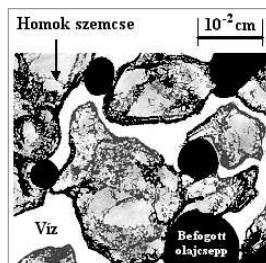
A szakirodalomban a szerző [1–12] foglalkozott a FAA-os olajkiszorítás elméletével és a gyakorlati, üzemi alkalmazások eredményeinek értékelésével, azonban a hazai alkalmazás előtt álló legnagyobb probléma, hogy az olajtelepeink hőmérséklete 30–50 °C-kal meghaladja azon olajtelepek hőmérsékletét, amelyeken eddig sikeresen alkalmazták a FAA-os olajkiszorítást. A nagy telephőmérsékletek miatt az olajkiszorításra legalkalmasabbnak tartott anionos tenzidek (kotenzidként nem-ionos tenzidekkel együtt), amelyek ilyen hőmérsékleten is hőstabilak, nem csökkentik megfelelő mértékben (kétfáram nagyságrenddel) az olaj/víz határfelületi feszültségét, ezért a megfelelően tartott olajkiszorítási hatásfok elérésére érdekében a vízkiszorítási művelésnél alkalmazott hidraulikus nyomásgradiensnél nagyobb nyomásgradienst célszerű létrehozni. Ezt legegyszerűbben nagy viszkozitású vízdoldható tenzid-polimer oldat besajtolásával lehet létrehozni.

Közismert tény, hogy a tárolóközetek döntő többsége a vízkiszorítást követően is szabálytalan alakú, méretű pórusokból felépülő kapilláris csatornarendszerben tárolja az olajat. A kihozatali tényező növelése érdekében a megfelelően megválasztott kémiai anyagok besajtolása útján ebből a csatornarendszerekből kell kiszorítanunk az olajat. Ezért indokolt, hogy a FAA-os olajkiszorítás folyamatát először ilyen kapilláris csatornarendszerekben tanulmányozzuk. A tárolóban, a mikroméreteknél (póruscsatorna) lejátszódó folyamatok pontosabb megismerése után, a hatékonyabb művelési technológia kidolgozása érdekében, át kell lépni a makroméreteknél tartományába. A makroméreteknél ez esetben azokat a laboratóriumban alkalmazott közepes hosszúságú közetmodelleket értjük, amelyeken FAA-os olajkiszorítási vizsgálatokat végezzük.

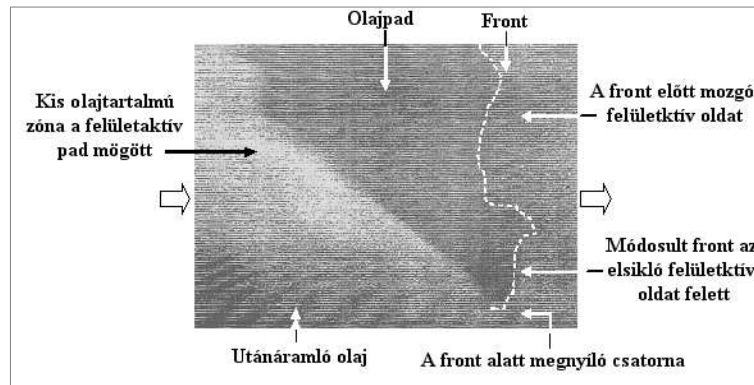
Biztosak vagyunk abban, hogy az itt bemutatott modell nem terjed ki minden olyan részletre, amely a FAA-os olajkiszorítás folyamatában szerepet játszik, de a folyamatra alapvetően befolyással bíró hatásokat – a feltételezések ellenére – világosan és egyértelműen igazolja, bemutatja.

2. Elvi megfontolások

A szokványos vízkiszorítás után – amikor megszűnik a legnagyobb méretű pórusok alkotta csatornarendszerben az áramlás – a kisebb méretű pórusokban, póruskötegekben maradt olajcseppekre, olajfonatokra csak a gravitációs erő és a felületi erő hat, ezek aránya szabja meg, hogy az egyensúly beálltáig lesz-e olajszegregáció (például *1. ábra*).



1. ábra. Vízkiszorítás után visszamaradt olajcseppek



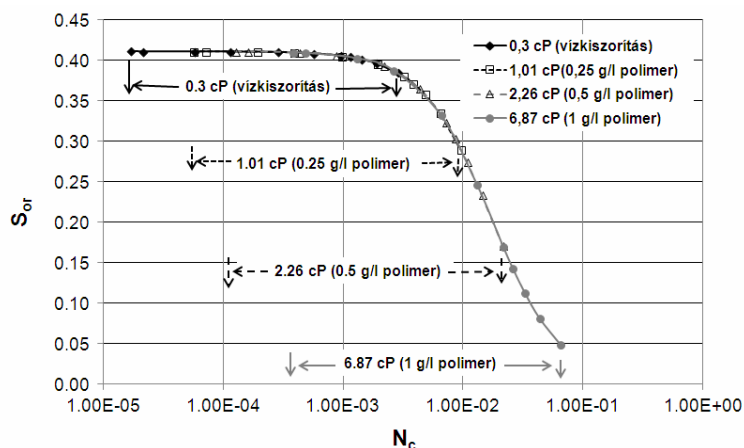
2. ábra. Előrehaladó olajpad és környezetének jellemzői

Ha a FAA-os kiszorítás során a kőzetben visszamaradt olajcseppekhez, olajfonatokhoz tenzidet juttattuk, akkor az olaj-víz határfelületi feszültsége lecsökken, és a kiszorítás helyi hidraulikus nyomás gradiense az olajcseppeket, olajfonatokat kimozdítja az eredeti helyéről. Az áramlóképesé váló olajcseppek, ha elegendően kicsi a határfelületi viszkozitásuk, akkor további olajcseppekkel, olajfonatokkal egyesülnek (koaleszcencia), ezek pedig tovább növekedve olajpaddá, „olajfelhővé” válnak (válhatnak) (lásd 2. ábra).

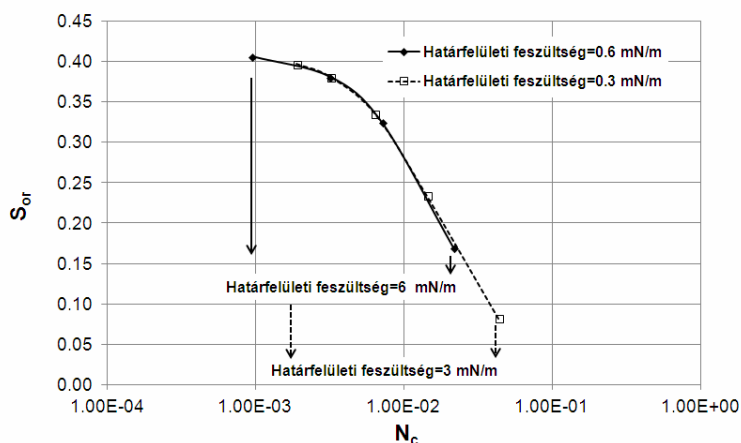
Tehát, ha az adott póruscsatornában (póruszűkületben) a helyi hidraulikus nyomás gradiens – amit a kiszorító fluidum viszkozitásának növelésével érhetünk el – nagyobb lesz, mint az adott póruszűkületben fellépő olaj-víz kapilláris nyomás gradiens, akkor az olajcsepp, olajfonat átlép a póruszűkületen (pórustorkon) a következő pórusba, és így tovább, végül kialakul az olajpad, mely a kilépő (termelő) hely felé áramlik. Így korábbi vízkiszorítás után visszamaradt olaj egy része kiszoríthatóvá válik.

Számos szerző [1–12] bemutatta, hogy a tárolókőzetekből meghatározott tulajdonságú (viszkozitású és határfelületi feszültségű) kiszorító fluidummal mekkora maradék olajteltettségig szorítható ki az olaj. A maradék olajteltettség, S_{or} értékét a hidraulikusnyomás gradiens, a kapilláris nyomás gradiens – hidraulikus erő-kapilláris erő – arányának függvényében adják meg. A gyakorlatilag horizontális irányú olajkiszorítási folyamatra jellemző ábrákon (3–4 ábrák) a maradék olajteltettséget $S_{or} = f(N_c)$ ábrázoltuk a hidraulikus erő-kapilláris erő arányát kifejező $N_c = (u_w \mu_w) / (\phi \sigma_{wo})$ kapilláris szám függvényében.

Ezen $S_{or} = f(N_c)$ összefüggések szerint (3–4. ábrák) növelve a kiszorító fluidum (polimeres víz) viszkozitását és csökkentve a kiszorító fluidum (tenzid-polimer oldat)/olaj határfelületi feszültségét – végeredményben N_c kapilláriszámot kell növelni – csökkenthető a kiszorítási folyamat végi maradék olajteltettség.



3. ábra. Maradék olajtelítettség (S_{or}) változása a kapilláriszám (N_c) függvényében és eltérő viszkozitású kiszorító fluidum viszkozitásoknál, ill. határfelületi feszültségeknél



4. ábra. Maradék olajtelítettség (S_{or}) változása a kapilláriszám (N_c) függvényében eltérő viszkozitású kiszorító fluidum viszkozitásoknál, ill. határfelületi feszültségeknél

3. FAA-os olajkiszorítási kísérletek vizsgálata

A laboratóriumi FAA-os olajkiszorítási kísérletek célja, hogy megtaláljuk egy adott olajtelep pórusszerkezetéhez legjobban illeszkedő tenzid (nevezzük **TM**-nek)-polimer (nevezzük **P₁**-nek) olajkiszorítási rendszert, azaz megtaláljuk az adott tároló közetszerkezetéhez legjobban illeszkedő FAA-polimer vegyszer kombinációt. Itt nem részletezett művelési megfontolások (alapvetően a tenziddel mozgóképessé tett olajcsepp mozgatása

biztosabb, ha helyileg a hidraulikus nyomás gradienst is növeljük) azt indokolják, hogy a besajtolás során a tenzid-polimer vegyszerkeveréket egy dugóban sajtoljuk be. A szakirodalomban is számos közlemény igazolja, hogy egyre elterjedtebben alkalmazzák tenzid-polimer egy dugóban való besajtolását, mint a szétválasztott tenzid-dugó és a követő polimer-dugó besajtolást, mert ez a megoldás a felületaktív anyag, az elvártnál kisebb felületi feszültségcsökkentő hatása mellett is növelheti a többlet olajkihozatalt.

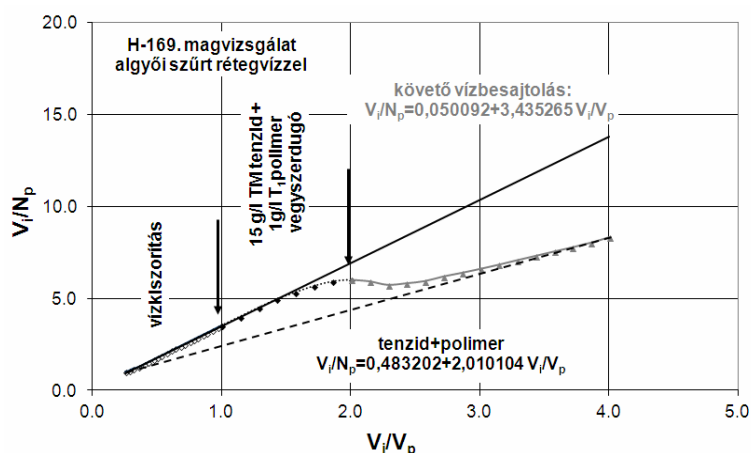
A **TM** tenzid (FAA) híg vizes oldata és a rétegolaj határfelületi feszültségének mérése – a hazai telepviszonyoknak megfelelő állapotban – technikai okok miatt nehézségbe ütközik. Általában csak a határfelületi feszültség nagyságrendjét (néhány tized mN/m) tudjuk becsülni. Ez eddigi tapasztalatink szerint a **TM** tenzid az olaj-rétegvíz határfelületi feszültségét mintegy két nagyságrenddel csökkenti, ez azonban nem elegendő az olajkihozatali tényező megfelelő nagyságú növeléséhez.

Így még inkább indokolt, hogy a tenzid oldattal együtt olyan **P₁** polimert sajtoljunk be, amellyel csökkenthetjük a tenzid-polimer hatódugó mozgékonyosságát, vagy adott besajtolási sebesség mellett növeljük a hidraulikus nyomás gradienst. E vegyszerkeverék alkotóelemei és a közet közötti összetett fizikai kémiai kölcsönhatásokat itt nem elemizzük, a kérdést csak áramlástanai szempontból vizsgáljuk.

Mindezek után vizsgáljuk meg a következő paraméterekkel végrehajtott tenzid-polimeres dugós olajkiszorítási kísérletet a maradék olajtelítettség szempontjából.

A közetmodell adatai: hossz $l = 20,964$ cm, átmérő $d = 3,782$ cm, térfogat $V = 235,55$ cm³, pórustérfogat, $V_p = 70,0$ cm³, átlagos porozitás, $\phi = 29,72\%$, átlagos gázpermeabilitás, $k_g = 408,63$ mD, átlagos vízpermeabilitás telepállapotban, $k_{wt} = 136,17$ mD, *Víz-kiszorítás adatai:* besajtolási ütem, $q_i = 23$ cm³/h, besajtott vízmennyiség $V_i = 1 V_p$, kezdeti víztelítettség $S_{wi} = 44,29\%$, kezdeti olajkészlet $N = 39,0$ cm³, vízkiszorítás határfoka, $E_{Rw} = 51,28$, víztelítettség vízkiszorítás után $S_w = 72,86\%$, víz viszkozitása telep állapotban, $\mu_w = 0,3$ mPa s, *Tenzid polimer besajtolás:* besajtolási ütem, besajtolási ütem $q_i = 23$ cm³/h, besajtott fluidum mennyiség $V_i = 1 V_p$, kiszorítási határfok növekedés, $\Delta E_R = 34,75\%$, víztelítettség besajtolás után $S_w = 92,21\%$, oldat viszkozitása telep állapotban $\mu = 6,87$ mPa s. *Követő vízbesajtolás:* besajtott vízmennyiség $V_i = 2 V_p$, tényleges maradék olajtelítettség $S_{or} = 7,79\%$, vízkiszorítással elérhető minimális maradék olajtelítettség, $S_{orwmin} = 30,44\%$, tenzid+polimerrel elérhető minimális olajtelítettség, $S_{orFAAmin} = 5,96\%$, összes kiszorítási határfok $E_R = 61,74\%$, víz-olaj határfelületi feszültség, $\sigma_{wo} = 0,3$ mN/m, kapilláris szám $N_c = 4,340 \cdot 10^{-2}$ A 4. ábráról leolvasott maradék olajtelítettség $S_{or} = 8,19\%$.

A kísérletek időben regisztrált adataiból a kiszorítási egyenletet az 5. ábra mutatja. Az ábrán a besajtott fluidum (vízkiszorítás+tenzid+polimer dugó+követővíz) egységnyi kitermelt olajra eső mennyiségét (V_i/N_p) láthatjuk a besajtott fluidum pórus-térfogat hányadának (V_i/V_p) függvényében. Az ábrán feltüntetettük a vízkiszorítás extrapolált egyenesét (folytonos vonal) feltételezve, hogy a vízkiszorítást, a vízkiszorítást követően besajtott fluidumok (tenzid+polimer dugó+követővíz) térfogatnak megfelelő mennyiségű víz besajtolásáig folytattuk volna. A kiszorítási egyenlet alapján a kiszorítás annál hatékonyabb, minél jobban eltér a mért görbe a vízkiszorítás extrapolált egyenesétől. A tenzid+polimer-dugó besajtolását követő vízbesajtolás adataira fektetett egyenes (pontvonal) azt mutatja, hogy ha kezdettől tenzid+polimer oldattal szorítottuk volna ki az olajat, akkor ezen egyenes lenne érvényes a kiszorítási folyamatra.



5. ábra. Kiszorítási egyenlet

4. Összefoglalás és következtetések

A FAA-os olajkiszorítás, mint az egyik legígéretesebb EOR-eljárás komplex mechanizmusának kutatása számos kérdésben még tisztázásra, megoldásra vár. A bemutatott kiszorítási kísérletek példáján keresztül, megkíséreltük a tárolóközet szerepét analizálhatóbbá tenni, és megteremti annak a lehetőségét, hogy meghatározzuk, hogyan kell a szokványos víz mozgékonyosságához viszonyítva a hatódugóval együtt besajtolandó polimerrel, a tenzid-polimer keverék mozgékonyosságát beállítani. Így elkerülhető a felesleges, többlet besajtolási (hidraulikus) túlnyomás, ami kisebb energiafelhasználáshoz vezet, továbbá a kúttalpi besajtolhatóságot is megkönnyíti.

Úgy véljük, hogy a cikkben tárgyalt felfogásban eddig nem vizsgálták a tenzid-polimer dugós olajkiszorítás áramlási sajátságait. Megtettük az első lépéseket arra, hogy a tárolóközetek pórusszerkezetének speciális tulajdonságaira is tekintettel lehetünk a tenzid/polimeres olajkiszorítások tanulmányozása során, sőt, hogy a gyakorlat számára szükséges laboratóriumi vizsgálatokat itt felmerülő aspektusban is elemezzük, vagy megtervezzük.

A bemutatott két laboratóriumi kísérletet nagy hőmérsékletű (98 °C) és nyomású (170 bar) telep állapoton végeztük, ami a fluidumok szükséges paramétereinek mérését e viszonyokon nem tette lehetővé, de a várható értékintervallumok kijelölését lehetővé tette kisebb hőmérsékleteken és nyomásokon mért adatok extrapolálásával.

A kiszorítási kísérletek eredményeinek feldolgozása világosan mutatja, hogy célszerű a tenzid-polimer dugók besajtolását fokozatosan növekvő viszkozitás mellett végezni a maximálisan megengedhető értékig, mert ekkor a kisebb pórusméretekben lévő olajcseppek is megmozdíthatók.

Amennyiben ismerjük a telep állapotú olaj/adott összetételű tenzid-polimer hatódugók határfelületi feszültségét, úgy a tárolóközet pórusszerkezetéhez legjobban illeszthető

összetétel, illetve viszkozitás optimalizálható, és netalántán programozott besajtolási variánsok is előírhatók.

Telepállapotú kiszorítási vizsgálatok alapján optimalizálható a FAA-os kiszorítás gyakorlati kivitelezése az adott olajtelep közzettípusára.

Telep állapotú besajtolhatósági vizsgálatokkal ellenőrizhető, hogy az optimalizált rendszer ténylegesen megvalósítható.

És nem utolsósorban ellenőrzött rétegmegnyitási és gyűjtőterületi viszonyok mellett elvégzett pilot-teszt elvégzése, annak korrekt értékelése lehet biztosíték a FAA-os olajkiszorítás sikerességére.

Köszönetnyilvánítás

„Az elméleti tanulmány és a hozzá kapcsolt hazai adatok feldolgozása a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.” A laboratóriumi kísérletek a MOL Nyrt. által finanszírozott K+F projekt keretében valósultak meg.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Shah, D. O.: *Fundamental aspects of surfactant-polymer flooding process*. Proc. of the third European Symp. on Enhanced Oil Recovery, Bournemouth, U.K. Sept. 21–23., 1981.
- [2] Novosad, J.: *Experimental study and interpretation of surfactant retention in porous media*. Proc. of the third European Symp. on Enhanced Oil Recovery, Bournemouth, U.K. Sept. 21–23., 1981.
- [3] Handy, L.: *Behavior of surfactants in EOR applications at high temperatures*. Proc. of the third European Symp. on Enhanced Oil Recovery, Bournemouth, U.K. Sept. 21–23., 1981.
- [4] Shauveteau, G.–Zaitoun, A.: *Basic rheological behavior of xanthan polysaccharide solutions in porous media: effects of pore size and polymer concentration*. Proc. of the third European Symp. on Enhanced Oil Recovery, Bournemouth, U.K. Sept. 21–23., 1981.
- [5] Bradley, H. B. (ed.): *Petroleum engineering handbook*. SPE, 1987.
- [6] Gesztesi, Gy.: *Micromodel study on gravity effect in low IFT displacement of oil*. 3rd Symp. on Mining Chemistry, Siófok, 1990. okt. 15–18.
- [7] Gesztesi, G.–Bodola, M.–Török, J.–Tóth, J.–Mating, B.: *Laboratory and field studies on gravitational effects in low-tension waterflooding*. Proc. 9th Symp. on Improved Oil Recovery, Paper No. 049 (Hága, Hollandia, 1997. Okt. 20–22.)
- [8] Lakatos, I.–Török, J.–Gesztesi, Gy.: *The effect of porous media on the dynamic stability of buffer zones in mobility controlled low-tension waterflooding*. Proc. International Symp. on Flow through Porous Media. 160–163. (Moszkva, 1992. szept. 21–28.)
- [9] Tóth J.–Török J.–Gesztesi Gy.: *Felületaktív anyagok olajkiszorítás áramlástanai jellegzetességei*. OMBKE XXVI. Nemzetközi Olaj- és Gázipari Konferencia, Kiállítás (CD kiadvány), Tihany, 2005. szept. 21–24. (a)
- [10] Shen, P.–Zhu, B.–Li, X.–B.–Wu, Y.–S.: *An Experimental study of the influence of interfacial tension on water-oil two-phase relative permeability*. Transp. Porous Med. (2010) 85:505-520
- [11] Vargo, J.–Turner, J.–Vergnani, B.–Pitts, M. J.–Wyatt, K.–Surkalo, H.–Patterson, D.: *Alkaline-surfactant-polymer flooding of the Cambridge Minnelusa field*. SPE Res. Eval. & Eng., Dec. 2000.
- [12] Srivastava, M.–Shang, Z.–Nguyen, Q. P.–Pope, G. A.: *A systematic study of alkaline-surfactant-gas injection as an EOR*. SPE 124752, 2009.

