

## Összefoglalás

Számos tapasztalat alapján jól ismert, hogy a kimerítéssel és vízbesajtolással művelt kőolajtelepek porózus tárlóközeteiben többnyire jelentős olajtelítettség marad vissza, aminek megszüntetése a csapdázódásért felelős határfelületi erők csökkentésével érhető el. A híg felületaktív oldatok felhasználása erre közvetlen lehetőséget kínál.

Az alkalmazhatóság általános feltételeit figyelembe véve kimutatható, hogy a „kémiai EOR módszer” csoportjába tartozó módszer mechanizmusában a kiszorító- és a gravitációs erő egyenértékű szerepet játszik. Ezért meglepő, hogy bár a folyamatot érintő különböző tényezőket részletesen vizsgálták a porózus közegben kialakuló gravitáció hatása csak kevéssé ismert. Emiatt a művelet tervezésénél többnyire figyelmen kívül hagyják. Valószínű, hogy az üzemi kísérletek ellentmondásos eredményeihez ez is hozzájárult.

Az alábbi fejezetek a Miskolci Egyetem Alkalmazott Kémiai Kutatóintézetében az OTKA támogatásával végzett laboratóriumi kísérletekből levont következtetések összefoglalását tartalmazzák. Hivatkozásai a kutatás eredményeit ismertető közleményekre korlátozódnak.

### 1. Szegregációs vizsgálatok

A szegregáció jellegzetességeinek megállapítására szolgáló elméleti modell, és a folyamat vizsgálatához kialakított eszközökkel, valamint módszerekkel laboratóriumi körülményeken végzett kísérletek célja a porózus közeg csatornáit a másodlagos művelés után kitöltő O/V típusú polidiszperz emulzió részecskéire ható gravitációs erő által előidézett folyamat jellegzetességeinek vizsgálata volt a határfelületi erők egyensúlyi állapotában.

Az elméleti modell a laboratóriumi kísérleteknél használt maradékolaj-telítettségű egyenes kapillárisok kötegéből épül fel. Ebben a kapillárisok magassága azonos, számuk és sugaruk pedig a figyelembe vett tárolóközet pórusméret-eloszlását tükrözi. A számítás azon a feltételezésen alapul, hogy a maradékolaj-telítettség minden kapillárisban egyforma és gömb alakú olyan részecskék halmazából áll, amelyek a pórusok sugarával azonos méretű- és a folytonos vízfázisban jelen lévő olajcseppek falhatástól és koaleszcenciájuktól mentes feláramlását a gravitációs erő szabja meg.

A Stokes-egyenleten alapuló számítások különböző áteresztőképességű két homokkő adatainak-, valamint a fázis-telítettség, a későbbi laboratóriumi kísérleteknél is használt olajkeverék, ill. felületaktív oldat 20 °C hőmérsékletre és légköri nyomásra vonatkozó ismert sűrűségének és viszkozitásának felhasználásával történtek.

Az eredmények szerint a különböző időpontban kitermelődő olaj (a rendszerben lévő összes olaj térfogatához viszonyított) relatív térfogata és az ezekhez tartozó idő közötti összefüggés vizsgálata alapján a szegregáció három szakaszban zajlik le. Az első szakasz állandósult sebességű olajtermelésében minden kapilláris részt vesz. Az ezt követő második szakaszt csökkenő sebességű kiáramlás jellemzi. Kialakulása akkor kezdődik el, amikor a legnagyobb sugarú kapillárisokból származó olajtermelés megszűnik. A harmadik szakaszban már csak a legkisebb sugarú kapillárisok működnek. A folyamat ezek teljes kiürülésével zárul. A közelálló kis sebességek és térfogatok miatt a harmadik szakaszra jellemző változás állandó sebességűnek tekinthető.

A két „rendszer” tapasztalt relatív térfogat vs. idő összefüggés változásának jellege azonos volt. Az eltérő pórusméret-eloszlás az első szakaszt jellemző kiáramlás állandósult

(látszólagos) sebességében fejeződött ki és a második szakasz „átmeneti” zónájának kezdetét is ez befolyásolja.

A laboratóriumi szegregációs kísérletek a használt olajkeverék, ill. n-oktán és felületaktív oldat azonos telítettségét tartalmazó, különböző szemcseméretű kvarchomok frakciókkal töltött függőleges üvegcsőben 20 °C közeli hőmérsékleten és légköri nyomáson történtek. A vizsgálatoknál használt olajkeverék és n-oktán sűrűsége és viszkozitása a kémiai EOR eljárás alkalmazhatóságának általánosan elfogadott tartományához igazodott. A 0,26 kg/kg felületaktív anyagot tartalmazó termékre vonatkoztatott 4 kg/m<sup>3</sup> koncentrációjú petroleum-szulfonát típusú tenzid NaCl és izopropil-alkohol segédanyagokat is tartalmazó vizes oldata 0,01 mN/m közeli határfelületi feszültséget biztosított a homokot 0,3 : 0,7 térfogatarányban telítető olaj/felületaktív oldat rendszerben. A fázisok homogén eloszlását és az egyensúlyi állapot kialakítását a betöltést közvetlenül megelőző keverés biztosította.

A szegregációs folyamat jellemzésére a tetőn kialakuló olajöv időben változó relatív magasságának, ill. térfogatának mérése szolgált. Ezeket a vizsgálatokat néhány tárolóközetből fúrt rövid magon végzett mérés egészítette ki. Az utóbbi célra kidolgozott eszköz és módszer alkalmasságát homokágyakban végzett összehasonlító vizsgálatok igazolták.

A kísérletek- és az ideális modellre vonatkozó számítások eredményei szerint az első szakaszban feláramló pszeudofázis az összes mozgásképes olaj mintegy 85%-át érintő poldiszperz rendszer. A porózus oszlop tetejét elérő részecskékből közel állandó sebességgel növekvő térfogatú olajöv alakul ki, amíg a folyamatban minden pórus részt vesz. Az ezt követő második pszeudofázis megjelenése a frakcionálódás során lemaradt egyre kisebb méretű részecskék lassabb feláramlásának következménye. A pad térfogatának további változását a harmadik pszeudofázis időben elnyúló szegregációja zárja, ami az összes olaj kis hányadaként visszamaradt frakció teljes elkülönülésével fejeződik be. Ezek a tapasztalatok az elméleti modellel megegyeznek, ugyanakkor a kísérletek megfigyelései arra utaltak, hogy a kialakult padban összegyűlt olaj nem feltétlenül homogén fázis, hanem ezt kondenzált olaj- és alatta elhelyezkedő olyan O/V típusú emulzió alkotja, amelynek megjelenéséért a harmadik pszeudofázis kis sebességű szegregációja a felelős.

A mért adatok felhasználásával szerkesztett általánosított szegregációs diagram a kialakult olajöv térfogatának, ill. a porózus közegben mért magasságának a végállapothoz viszonyított változását a redukált idő függvényében fejezi ki, ahol a redukáló idő az első pszeudofázis egységnyi relatív térfogatához tartozó időnek felel meg. Az összefüggés szerint a szegregáció egyensúlyi folyamatát az első pszeudofázis elkülönülése uralja, ez szabja meg a második pszeudofázis rövid átmeneti szakaszát, amitől a folyamatot záró harmadik pszeudofázisra jellemző utánáramlási szakasz kis változása ettől közelítőleg függetlenek tekinthető. Emiatt a szegregáció az első és utolsó szakasz leírásával közelíthető. A folyamat leírását szolgáló egyenletek ezen a közelítésen alapulnak.

A laboratóriumi eredmények szerint a vizsgált homokágyakban egymást követő (I, II és III) pszeudofázisok feláramlásának falhatást is tartalmazó  $u_I > u_{II} > u_{III}$  átlagos sebességéhez a Stokes-egyenlettel számított  $r_I > r_{II} > r_{III}$  ekvivalens sugarak tartoznak. Tapasztalat szerint ezek a porózus oszlop magasságának növekedésével mintegy 50 cm-ig rohamosan, ezt meghaladón pedig már jóval kisebb mértékben csökkennek. A változás a porózus közegek szerkezetének a rendszer áramlási sajátosságaira gyakorolt hatására hívja fel a figyelmet. Az eredmények arra utalnak, hogy a kialakuló különböző sebességek a pórusok bővületeiben kialakuló koaleszcencia és a szűkületekben a kis határfelületi feszültség által elősegített diszpergálódás, továbbá a polidiszperz jellegből adódó frakcionálódás hatására vezethető vissza. Közülük a koaleszcencia és diszpergálódás az

áramlási útvonal hosszával növekvő valószínűségű és véletlenszerű gyakorisággal ismétlődő folyamat, ami a diszperzitásfok kiegyenlítésére törekszik. Ehhez a felületaktív oldat és a pórusfelszín közötti kölcsönhatás is hozzájárul.

A laboratóriumi kísérleteknél használt kvarchomok, desztillált víz, sósvíz és felületaktív oldat felhasználásával végzett kiegészítő vizsgálatok azt bizonyították, hogy az *üledéktérfogat* növekedése tenzid jelenlétében a vízhez és sósvízhez képest nagyobb. A homokágyak ugyanezen vizes oldatokkal mért effektív áteresztőképességének csökkenése szintén arra utalt, hogy a tapadóvíz vastagsága az átáramlott felületaktív oldat térfogatával, ill. a pórusfelszínnel érintkező tenzid mennyiségével nő, és a változás a Langmuir-féle adszorpciós izoterma jellegét követi. A vizes fázis tapadó rétegének növekedése tehát a szűkületek sugarának csökkenésével, vagyis a porózus közeg diszpergáló hatásának növekedésével, továbbá a fal érdessége által okozott súrlódási veszteség csökkenésével jár együtt. Az utóbbiban szerepet játszik a diszperzolaj-részecskék körüli (diffúz) védőréteg is, ami a felületaktív oldat felé a folytonos átmenetet biztosítja.

A fentiekben vázolt hatások a pszeudofázisok tapasztalt megjelenésében és a bennük feláramló olaj sebességében együtt jelennek meg. Nyilvánvaló, hogy a folyamat sebességét a legkisebb mozgékonyaságú fázis szabja meg. Jól ismert az is, hogy az igen kis határfelületi feszültségű rendszerben az olaj mikrocseppjeinek deformációjához szükséges energia is kicsi. Emiatt szegregációjuk lényegében akadálymentes. Mivel az olaj és a vizes fázis ellentétes irányú áramlásának sebessége szükségszerűen azonos, várható, hogy a gravitációs erő által előidézett elkülönülés sebességét döntően a leáramló folytonos fázis, vagyis a porózus közeg felületaktív oldatra vonatkozó függőleges irányú áteresztőképessége befolyásolja.

A kísérleteknél tapasztalt változások szerint a szegregációt bármely adott állapotban jól megfigyelhető határfelülettel elkülönülő olaj- és vízöv kialakulása jellemzi. A térfogatok állandósága miatt az egymástól függő változásuk a végállapot eléréséig tart.

Az elkülönülő övek egyike sem homogén. Az olajövben a felületaktív oldat döntően a pórusfelszín nedvesítő tapadó réteggént van jelen. A tapadó- és mozgásképes felületaktív oldatot tartalmazó vízövben a pórushálózat szerkezetére visszavezethető okok miatt csapdázódott olaj marad vissza. A periodikus kapillárisokban végzett vizsgálatok és más tapasztalatok szerint a csapdázódás felül zárt pórustestek boltozatában akkor következhet be, ha a bennük felhalmozódott és oda belépő mikrocseppek között nem jön létre koaleszcencia és ha az összegyűlt diszperz olaj térfogata a kiboltozódás térfogatát nem éri el. Igen valószínű, hogy a vízöv maradékolaj-telítettsége a szegregáció ehhez kedvező feltételt biztosító utolsó szakaszában alakul ki.

Az olaj- és vízöv alárendelt fázisainak számítására kidolgozott térfogatmérleg szerint a szegregációs kísérletek egyensúlyi végállapotában elkülönült olajövet 18% átlagos tapadóvíz telítettség, a vízövet pedig a csapdázódott olaj (más tapasztalatokkal összehangban álló) mintegy 6% telítettsége jellemezte. A csapdázódás a felülről zárt pórusok bővületeiben következik be és a kiboltozódások térfogatát nem haladhatja meg. Létrejöttének főként a nagy diszperzitásfokú olaj kis sebességű feláramlása kedvez.

A diszperz olaj szegregációja bármely porózus közeget tartalmazó oszlopban elvileg az egymás felett elhelyezkedő hipotetikus elemek között kialakuló olyan fáziscseréként fogható fel, ami a köztes telítettség-változások sorozatán át a végállapot eléréséig tart. A vízöv átlagos maradékolaj-telítettségét figyelembe véve, a végállapot elérésekor kedvező esetben is csak az összes olaj kb. 94%-a különülhet el, aminek 85%-a az első pszeudofázis szegregációjából származó olajpadként, a többi pedig stabilis emulzióként van jelen az oszlop tetején kialakult olajövben. A fáziscsere leírására kidolgozott modell segítségével végzett számítások eredményéből az adódik, hogy az első pszeudofázis

diszperz részecskéinek feláramlásakor a belőlük képződő fázis (olajpad) egyenletes sebességű növekedése akkor jön létre, ha a kezdeti telítettséget képviselő diszperz olaj eloszlása a homogén porózus közegben egyenletes. Amennyiben az oszlopon belül a maradékolaj-telítettség változik, vagy a porózus közeg különböző pórustérfogatú elemből épül fel, az olajpad térfogatának növekedése a szegregáció első szakaszában akkor sem állandó sebességű, ha az elemek kezdeti maradékolaj-telítettsége egyébként azonos volt.

## 2. Kiszorítási kísérletek

A vízelárasztás végállapotában kialakult maradékolajat tartalmazó porózus közegekben a felületaktív oldattal történő kiszorításnál fellépő külső erő az egyidejűleg működő gravitációs erő miatt a feláramló diszperzolaj-részecskék makroszkópos irányát megváltoztatja. Az ezzel kapcsolatos vizsgálatok célja a két erő egyidejű működésének és az eredményt befolyásoló közetfizikai heterogenitás szerepének vizsgálata volt.

A szegregációs vizsgálatoknál használt anyagok felhasználásával a kvarchomok töltetet tartalmazó rész- és csőmodellben 20 °C körüli hőmérsékleten, valamint a légköri nyomást kissé meghaladó nyomáson végzett vízszintes irányú kiszorítási kísérletek, a tapadóvíz és a vízelárasztás maradékolaj-telítettségének létrehozását követően, felületaktív oldat folyamatos- és sósvízzel hajtott dugós besajtolásával történtek. A résmodellek használata a változások közvetlen megfigyelését és videokamerás rögzítését tette lehetővé. A csőmodellben kialakuló folyamatok követésére a palást mentén elhelyezett nyomásmérők adatai, ill. az ezekből számított differenciális nyomások szolgáltak. Az eredmények azt bizonyították, hogy a külső (kiszorító) erő hatása a szegregáció jellegzetességeit nem érinti.

Elméleti megfontolások szerint az áramlás sebességének nagyságát és irányát megszabó erők eredőjét a dimenzió nélküli Bond-szám és kapilláris szám hányadosa, az u.n. gravitációs szám fejezi ki. Makroszkópos értéke az általánosított Darcy-egyenletek felhasználásával számítható. Mivel, a három pszeudofázis átlagos méretű részecskéinek mérete és ezért szegregációs sebessége is különböző, a felületaktív oldattal végzett állandó ütemű kiszorítást változó gravitációs szám jellemzi.

A felületaktív oldat közel állandó térfogati sebességű besajtolásával végzett kiszorítás a szegregáció olyan sajátos eseteként fogható fel, ami az előrehaladó kiszorító közeg hatására, a tenzid megoszlási egyensúlyának kialakulását követően jön létre a pórustér egymás alatt és mellett elhelyezkedő hipotetikus elemei között ismétlődő fáziscsere során. Az egyszerűsített folyamat szerint a felületaktív oldattal érintett oszlopban azonnal mozgásképesé váló maradékolaj-telítettség az egymás feletti elemek között a szegregációs modellnek megfelelően átrendeződik. Ezt követően az így kialakult rendszer a kiszorító erő hatására akadálytalanul a szomszédos oszlopba lép, ahol az olajtelítettséget megnöveli, a felületaktív oldat pedig az eredetileg ott lévő olajat mobilizálja. A gravitációs- és külső erő együttes szerepe a vázolt folyamatok sorozataként vizsgálható.

A fenti elven alapuló számítások eredményei arra utalnak, hogy a kiszorítás során az egymással érintkező oszlopok tetején- és az alatta elhelyezkedő elemekben olyan növekvő olajtelítettség jön létre, ami a front előrehaladása során egyre több oszlopba terjed ki és mindig felületaktív oldat jelenlétével párosul. Emiatt várható, hogy a porózus közegben képződő pad diszperz olajból épül fel. Ez a következtetés az üzemi kísérlet és a laboratóriumi szegregációs vizsgálatok tapasztalataival összhangban áll. A diszperz rendszer áramlástanai tulajdonságait az olajcseppek számának változása befolyásolja.

Az egyszerűsített modell szerint a gravitációs erő hatására kialakuló „olajpad” elülső frontja a vizsgált kiszorítás vízszintes irányára merőleges, míg a hátsó frontja „hátra

hajlik”, alján pedig a szegráció miatt összegyűlő olyan víz mozog, ami az átoldódás miatt felületaktív anyagot tartalmaz. A kezdeti olajtelítettség heterogenitásának hatását hasonlóan számítva kimutatható, hogy a folyamat a termelvény olajhányadának ingadozását idézi elő.

A fenti megállapítások természetesen csak közelítő érvényűek. A további laboratóriumi kísérletek a mechanizmusra levont következtetések ellenőrzésére, és a modellenél figyelmen kívül hagyott kőzetfizikai heterogenitás-, valamint az áramló fázisok mozgékonyságának alakulására és szerepére kívántak választ adni. Erre a célra a rés-, ill. csőmodell kvarchomok tölteteiben a szokásos módszerrel végzett vízszintes irányú kiszorítás közvetlen megfigyelése és a folyamatot kísérő videó-felvételek elemzése, továbbá a modell hossza mentén mért differenciális nyomások adatainak értelmezése szolgált.

A közel homogén és izotróp homokágyban a felületaktív oldat folyamatos besajtolásával végzett olajkiszorítás tapasztalatai azt igazolták, hogy a felületaktív oldattal érintkező maradékolaj késleltetve válik mozgásképpessé. Megfigyelhető volt, hogy az áramlás iránya a póruscsatornák tekervényessége miatt különböző és a hálózaton belül lokálisan akár a kiszorítás irányával ellentétes is lehet. A kiszorítási kísérlet azt igazolta, hogy a felületaktív oldat a közel függőleges fronttal mozgó- és növekvő diszperzolaj-tartalmú olajpadon át előresiet, a pad vége hátrahajlik, mögötte és alatta pedig olajban elszegényedett fázis halad. A vázolt tapasztalatok arra utalnak, hogy kis határfelületi feszültségű rendszerben az áramló olajrészecskékből a porózus közeg diszpergáló hatásának érvényesülése miatt nem jöhet létre homogén olajfázis.

Az is megfigyelhető volt, hogy a homogénnek tekintető homokágyban szinte függőleges fronttal haladó felületaktív oldat a padot kissé megelőzi, és a pad kialakulása, valamint térfogatának növekedése a felületaktív oldattal elárasztott pórustér növekedésével nő. A pad frontjának alakja és előrehaladás során egyenletes növekedése arra utal, hogy ekkor az előrehaladó felületaktív oldat hatására a porózus közeg általa érintett függőleges metszetén át azonos átlagos térfogatú és sebességű olaj kiáramlása kezdődik el. Ebből adódik, hogy a hátoldal visszahajlása annak is a következménye, hogy bár ebben a tartományban a padot kialakító szegregációs folyamatból származó olaj feláramlásának sebessége nem változik, egyre kisebb térfogatot képvisel, mert a fenntartásához szükséges utánpótlást a mögötte lévő pórustérből a kisebb sebességgel kilépő olaj már nem képes biztosítani.

A kiszorítás során kialakuló olajöv a kiindulási rendszer egyensúlyi körülményein végzett szegregációs kísérletekhez képest módosul. A külső erő által előidézett dinamikus hatást a csőmodell hossza mentén elhelyezkedő érzékelőknél mért nyomások alakulása tükrözi. A résmodellben végzett vizsgálathoz hasonlóan, a közel homogén kvarchomok töltetben lezajló folyamatot a tenzid adszorpcióján kívül egyéb kölcsönhatások nem befolyásolják. Az egységnyi-, vagy kisebb pórustérfogatú felületaktív oldat besajtolásánál a tapadóvíz kissé megnövekedő telítettsége az előrehaladó olajövben állandónak tekinthető. Ezért a szomszédos mérőhelyek között kialakuló  $\Delta p$  értékekben az öv diszperzolaj-tartalmától függő mozgékonyság-változás fejeződik ki. Jellegét maximummal bíró görbe írja le, ami a kialakult diszperz rendszer viszkozitásának, ill. mozgékonyságának alakulásával arányos.

A közel homogén porózus közegben végzett vízszintes irányú kiszorítási kísérleteknél tapasztalt változásokhoz szintén három olyan zóna rendelhető, amelyek között az átmenet folyamatos. Ezek a szegregációs kísérletek pszeudofázisainak jellegzetességeit tükrözik.

A vízelárasztás után visszamaradt olaj állandósult sebességű elmozdulása miatt az olajövben a mozgékonyság a felületaktív oldattal érintett pórustérfogattal arányosan csökken. A benne kialakuló minimális mozgékonyság is ettől függ. Közvetlenül a

felületaktív oldat frontja mögötti zónában a szegregációs kísérletek első pszeudofázisának feláramlására visszavezethető nem-lineáris változást a vízelárasztás során csapdázódott olaj fokozatosan bekövetkező mobilizálódása, feldúsulása, valamint a létrejövő diszperz rendszer viszkozitását befolyásoló hatása idézi elő. A zóna minimális mobilitású szakasza az érintett pórusterfogatban kialakuló legnagyobb olajtelítettségű padnak tekinthető.

Az első zóna ott végződik, ahol az első pszeudofázist jellemző állandósult sebességű szegregáció fenntartásához szükséges utánpótlás megszűnik. Ez a pad hátrahajló vége alatt és mögött a második zóna megjelenésére vezethető vissza, ahol az egyre kisebb olajtartalmú rendszerben a cseppek mérete és feláramlásuk sebessége fokozatosan csökken. Ezért a zónát alkotó rendszer a szegregációs kísérletek második pszeudofázisával azonosítható. A folyamatos változás jellegéből fakad, hogy ez a mozgékony nem-lineáris növekedésével jár együtt, amit a szegregációnál megfigyelt utolsó szakasz harmadik zónaként megjelenő tartománya követ. Az olajjöv végét a diszperz olaj feláramlásának megszűnése jellemzi.

A kísérletek eredményei szerint a felületaktív oldattal végzett kiszorításnál az olajjövben mindig diszperzolaj-tartalmú rendszer mozog. A homogén olajfázis létrejöttét az együttáramló tenzid jelenléte és a pórusszerkezet diszpergáló hatása akadályozza meg. Az olajpadra jellemző legkisebb mozgékony zóna a felületaktív oldat folyamatos besajtolásával érintett póruster növekedésével csökken, ami a kiszoruló diszperzolaj-tartalom növekedése miatt következik be. Vagyis, a várható kihozatal a kívánt feltételeket kielégítő felületaktív rendszer besajtoló térfogatának növekedésével nő. A vizsgált  $\Delta p$  eloszlását jellemző „harang”-alakú görbék alapján nyilvánvaló, hogy az összes mozgásképes olaj legnagyobb elérhető térfogatának kitermelése csak az egységnyi pórusterfogatot meghaladó felületaktív oldat besajtolásával érhető el, ha a porózus közeg homogén és a kiszorítást egyéb kölcsönhatások nem befolyásolják. A „harmadlagos” csapdázódás miatt azonban a kihozatal ekkor sem lehet ~94%-nál nagyobb, amit a kiszűrődésre hajlamos Pickering-típusú emulzió kialakulása tovább csökkenthet. A fentiek alapján nyilvánvaló, hogy ez a felületaktív oldat kisebb térfogató dugójának alkalmazásával nem közelíthető meg.

A zavartalan áramlás feltételein az olajpad függőlegesnek tekinthető fronttal halad előre, fennmaradását pedig a front előtt és mögött haladó diszperz rendszer folyamatosan növekvő mozgékony zónája biztosítja.

A kis szemcseméretű homokfrakcióval mesterségesen kialakított lokális heterogenitást tartalmazó résmodellben végzett kiszorítási kísérletek arra hívják fel a figyelmet, hogy azok hatása a kis áteresztőképességű póruster méretétől és helyétől függ. Ha a heterogenitás a porózus közeg belsejében a csupán kis kiterjedésű, ez csupán torzítja a pad alakját. Ha azonban nagyobb összefüggő térre terjed ki, az olajpad folytonosságának megszűnését idézheti elő, ami azzal jár, hogy a minimális mozgékony zóna szakadását követően az előrehaladó rendszerben kisebb méretű padok egymástól elkülönülten áramló sorozat jön létre. A tető kiboltozódását létrehozó heterogenitás az oda belépő diszperz olaj csapdázódását segíti elő. Ez az elérhető kihozatalt csökkenti, és a priodikus üvegkapillárisban is megfigyelt hatása igen jelentős is lehet. Hasonló szerkezet a talpon a gravitációs feláramlás miatt sem a pad stabilitását, sem a kihozatalt nem befolyásolja.

## Megállapítások

1. A kőolajtelepek vízzel elárasztott porózus közeteiben csapdázódott olaj különböző méretű mikrocseppeinek és rövid szálainak kellően kis határfelületi feszültséget biztosító környezetben megvalósuló szegregációja a feláramló polidiszperz olajból a tetőn összegyűlő „olajöv” és a talpon képződő „vízöv” térfogatának a folyamat végéig tartó növekedésével jár együtt, ahol

az olajöv uralkodó fázisa a szegregálódott olaj, ami a koaleszcencia lehetőségétől függően olajrészecskék sűrű halmazából álló emulziót is tartalmazhat, alárendelt fázisa pedig az a felületaktív oldat, ami a Langmuir-típusú adszorpció miatt a pórusok felszínét borító tapadó réteggé- és az elkülönült emulzióban kis térfogatú zárványként van jelen;

1.2. a vízöv uralkodó fázisa a póruscsatornák felszínén kötött- és a pórustérfogat döntő hányadát kitöltő mozgásképes felületaktív oldat, alárendelt fázisa pedig a pórusok bővületeinek felülről zárt dómjaiban a feláramlás során csapdázódott olaj döntően polidiszperz mikrocseppekből álló sűrű halmaza.

2. Az övek térfogatának a szegregáció során kialakuló változása szükségszerűen azonos és a folyamat jellegzetességeit tükrözi, ezért

2.1. a felületaktív híg vizes oldatának használatán alapuló EOR módszert befolyásoló gravitációs elkülönülés alapjelensége egyéb kölcsönhatásoktól mentes vizsgálata inhomogén pórusméret-eloszlású indifferens porózus közeg oszlopában akkor végezhető el, ha az oszlop pórustérfogatát az olaj és felületaktív oldat  $\sigma \leq 0,01$  egyensúlyi határfelületi feszültséget biztosító olyan keveréke telíti, aminél stabilis mikroemulzió nem alakul ki és az ezzel azonos arányú olaj/víz rendszerben elkülönülés nem következik be;

2.2. az olaj bármely  $t$  időpontban kialakuló szegregációját ekkor célszerűen az olajöv magasságának, ill. térfogatának a folyamat végállapotára vonatkoztatott ( $h_{rel}$ , ill.  $v_{rel}$ ) relatív értékei jellemzik.

3. Porózus közeg/cseppfolyós szénhidrogén/felületaktív oldat egyensúlyi rendszerében az olajöv magasságának változásában játszott szerepük alapján három részfolyamat különböztethető meg, amelyekhez csökkenő átlagos méretű olajrészecskéket tartalmazó „pszeudofázisok” rendelhetők:

3.1. a mozgásképes olaj döntő hányadát tartalmazó első pszeudofázis  $t = 0$  időpontban kezdődő állandó  $u_1$  sebességű feláramlása az összes működő kapillárisból egyidejűleg bekövetkező szegregáció következménye;

3.2. a második pszeudofázis olyan „átmeneti” diszperz rendszer, amelyből az egyre kisebb olajcseppek elkülönülése az övek térfogatának viszonylag rövid ideig tartó olyan növekedését okozza, ami a folyamatos változás miatt  $u_2 < u_1$  sebességgel közelíthető;

3.3. a visszamaradt legkisebb olajcseppeket tartalmazó harmadik pszeudofázisból származó lassú szegregáció „utánáramlási” szakasza az olajövben okozott kis térfogatváltozás miatt egyetlen  $u_3 < u_2$  átlagos sebességgel jellemezhető.

4. A pszeudofázisokban a feláramlás során egyidejűleg jelentkező hatások a poldiszperz részecskék méret-eloszlásának és diszperzításfokának változását idézik elő;
- a különböző méret miatt eltérő sebességgel szegregálódó részecskéknek a porózus közeg magasságával arányos frakcionálódása jön létre,
- 4.2. a pórusok bővületeiben mozgó cseppek között koaleszcencia, a szűkületeken át bekövetkező áramlásuk során pedig a kis határfelületi feszültség és a pórustorkok mérete által szabályozott diszpergálódás következhet be, ami a diszperzításfokot a pórusszerkezet véletlenszerű eloszlása, a porózus közeg magassága és a feláramlás útvonala mentén ismétlődő folyamat gyakorisága által megszabott határig növeli.
5. A pszeudofázisok kialakulása nem független egymástól és jellegzetes kapcsolatokat a  $h_{rel}$  vs.  $t$  szegregációs diagram írja le, ahol
- 5.1.  $h_{rel}$  az összes olajnak a vízöbven visszamaradó hányadával ( $S_{om}$ ) csökkentett- és az olajöv pórusainak felszínéhez tapadó felületaktív oldat telítettsége ( $S_{wm}$ ) által megnövelt térfogatra vonatkozó redukált adat, amiből
- 5.2. a kísérleti eredményeken alapuló térfogatmérleg-egyenlettel az olaj- és a vízöv alárendelt fázisainak telítettsége- és a szegregálódó mozgásképes fázisok térfogata kiszámítható, vagy a laza homokokra nyert  $S_{om} \approx 0,05$  és  $S_{wm} \approx 0,17$  adatok felhasználásával becsülhető.
6. Az olajöv időben növekedő térfogata az adott rendszerben létrejövő szegregációt befolyásoló tényezők együttes eredményét tükrözi,
- 6.1. a  $t = 0$  időpontnál  $h_{rel} = 0$  értéktől kezdődő függvény diszkontinuitásai közötti folyamatokra visszavezethető  $tg \alpha_1 > tg \alpha_2 > tg \alpha_3$  irányszögű három szakasz különböztethető meg, amelyek az olajöv térfogatának változása alapján a három pszeudofázisból történő különböző sebességű feláramlást jellemzik,
- 6.2. a pszeudofázisok közötti kapcsolatot a  $t = 0$  időpontnál kezdődő állandósult sebességű szakasz lineáris extrapolációjából a  $h_{rel} = 1$  értékhez tartozó idő ( $t^*$ ) fejezi ki, ami
- 6.3. a viszonylag homogén és kémiaiilag indifferens porózus közegek  $H$  magasságával arányosnak tekinthető frakcionálódás, valamint és az ismétlődő diszpergálódás hatását is tartalmazza, az ezt leíró  $t^* \approx f(H)$  összefüggés megállapítása azonban a véletlenszerű eloszlású mikroszkópos szerkezet miatt az adott porózus közeg különböző magasságú oszlopaira vonatkozó kísérleti adatok használatát igényli.
7. Indifferens porózus közeg/polidiszperz olaj/felületaktív oldat különböző egyensúlyi rendszereiben az olajöv gravitációs erő hatására kialakuló változását a  $h_{red}$  vs.  $t_{red}$  alakú redukált összefüggés írja le, ahol  $h_{red} = h_{rel}$ , és a kísérleti eredmények szerint
- 7.1. az első szakaszban elkülönülő olaj  $\sim 85\%$ -ának állandósult feláramlása  $t^*$  sebességgel következik be, vagyis ez a szakasz szabja meg az olaj főtömegének szegregációját,
- a folyamat a végállapotot  $t_{red} \sim 5,0$  értéknél éri el, az ehhez szükséges időt a második (átmeneti) és harmadik (utánáramlási) szakasz átlagos sebessége döntően befolyásolja, ezért



7.3. a kísérleti adatok felhasználásával szerkesztett redukált szegregációs diagram által kifejezett kapcsolat az első szakaszra:

$$(h_{red})_1 \approx \sum_{t_{red}}^{0,85} t_{red} ,$$

a második és harmadik szakaszt együtt kifejező átlagos változásra pedig a:

$$(h_{rel})_{2,3} \sim 0,85 + \sum_{t_{red}=0,85}^{5,0} 0,031 t_{red}$$

egyenlettel becsülhető, ahol a porózus oszlop H magasságának hatását az

$$\frac{1}{t^*} = 0,0045 + \frac{0,775}{H}$$

közelítő összefüggés írja le, ahol  $t^*$  és H egysége óra és cm.

8. Bár a vízbesajtolás utáni maradékolaj-telítettséget tartalmazó porózus közegekben híg felületaktív oldattal végzett kiszorítás a mobilizált olaj feláramlásának makroszkópos irányát megváltoztatja, ez az olajöv jellegzetességeit nem befolyásolja;

- 8.1. a diszperzolaj-részecskék mozgásának makroszkópos irányát a gravitációs erő és a kiszorítást előidéző külső erő eredője szabja meg, amitől a póruscatornák tekervényessége miatt a tényleges áramlás mikroszkópos méretekben lokálisan változó irányú számottevő mértékben is eltérhet,
- 8.2. a szűkületek diszpergáló hatása pedig az önállóan áramló olajfázis kialakulását megakadályozza, vagyis
- 8.3. a zavartalan feláramlás során képződő olajöv olyan diszperz rendszer, aminek előrehaladásakor az olajtelítettség addig nő, amíg a benne mozgó felületaktív oldat az érintett pórústérfogat maradékolaj-tartalmának mobilizálásához szükséges kis határfelületi feszültséget biztosítani képes, ezért
- 8.4. amíg a tenzid mennyisége a kis határfelületi feszültséget biztosítani képes, az elérhető kihozatal a felületaktív oldat besajtolt térfogatával arányosan nő és emiatt
- 8.5. a legnagyobb kihozatal az egységnyi pórústérfogatot meghaladó felületaktív oldat folyamatos besajtolásával érhető el.

9. A tenzides kiszorítás körülményén a zavartalanul előrehaladó olajöv szerkezetében és áramlástani sajátágaiban a híg felületaktív oldat alkalmazásán alapuló EOR eljárás mechanizmusa fejeződik ki;

- 9.1. az olajöv első zónájának elején haladó híg felületaktív oldat a mozgásképes vizet dugattyúszerűen szorítja ki, a vele érintkező olajat mobilizálja, miközben a tenzid adszorpciója, és átoldódása által okozott veszteségét a szabad póruscatornákön át előresiető felületaktív oldat pótolja, ezért
- 9.2. a felületaktív oldat frontja mögött folyamatosan növekvő diszperzolaj-tartalmú rendszer alakul ki, amelyben a viszkozitás nem-lineáris növekedése a maradékolaj hozzáférhetőségétől függő késleltetett mobilizálódás és az érintett pórústérfogattal arányosan növekvő számú diszperzolaj-részecskék viszonylag gyors feláramlása miatt jön létre, vagyis

- 9.3. az első zóna kialakulását a szegregációs kísérletek első pszeudofázisának megfelelő feláramlás jellemzi, ami az elárasztott térfogattól függő legnagyobb diszperzolaj-tartalmú rendszer eléréséig tart, ahol
- 9.4. a megjelenő második zóna állandósult sebességű feláramlásában a porózus közeg teljes magassága mentén viszonylag egyenletes eloszlással kilépő olajrészecskék vesznek részt, ezért a zónát a kiszorítás irányára merőleges front, végét pedig az első pszeudofázisból történő feláramlás fokozatos megszűnése- és a korlátozott utánpótlás miatt hátrahajló oldal határolja, közöttük pedig az olajöv legkisebb mozgékonyaságú zónája helyezkedik el, ami tulajdonságai alapján „olajpadnak” tekinthető,
- 9.5. a pad hátoldala mögötti olajban elszegényedő harmadik zónában a szegregáció második-, majd harmadik pszeudofázisából származó csökkenő méretű és egyre kisebb olajhánnyal párosuló diszperzolaj-részecskék különülnek el, a zóna végét pedig a szegregáció megszűnése jelzi, vagyis
- 9.6. az előrehaladó olajöv viszkozitása harang-görbe szerint csökken, áramlását az olajpad mozgékonyasága szabja meg, ami az érintett pórusterfogattal növekedésével folyamatosan csökken, amíg az öv mögött felületaktív oldat halad, a harmadik zóna csökkenő viszkozitása pedig mozgékonyaság-szabályzó hatást fejt ki.
10. A porózus közeg szerkezete az olajöv stabilitását, a termelvény jellegét, valamint az elérhető kihozatalt érinti és hatásuk a mechanizmus érvényesülésében jut kifejezésre;
- 10.1. a porózus közeg mikroszkópos bővületeinek felülről zárt dómjaiban a diszperz olaj feláramlása során bekövetkező csapdázódása miatt a felületaktív oldat folyamatos besajtolásával elérhető legkedvezőbb kihozatal sem haladhatja meg a kb. 95%-ot;
- 10.2. a laza szerkezetű porózus közegekben végzett kiszorításnál mozgásképpé váló szemcsék a diszperzolaj-részecskék védőrétegébe épülhetnek és a határfelületi viszkozitást növelő hatásuk miatt a képződött Pickering-emulzió kiszűrődését gátolják, ami a kihozatal csökkenésével jár együtt;
- 10.3. a porózus közeg belsejében kis foltként megjelenő áramlástani heterogenitás csak az előrehaladó olajöv zónáinak frontját torzítja, de együttáramlásuk jellegét és a kihozatalt nem befolyásolja;
- 10.4. a számottevő összefüggő pórusterre kiterjedő kis átteresztőképességű betelepülést felül és alul megkerülő áramlás az olajöv felszakadását-, és az egységes rendszer helyreállításának kis valószínűsége miatt a termelés jellegét befolyásoló két, vagy több egymást követő pad megjelenését okozza;
- 10.5. a porózus közeg tetején a váltakozó kis- és nagy átteresztőképességű betelepülések olyan szakaszokat hoznak létre, amelyekben az oda feláramló olajrészecskék csapdázódnak, ami kihozatal csökkenését idézi elő.