Műszaki Földtudományi Közlemények, 85. kötet, 1. szám (2015), pp. 247–253.

METASTABILIS MIKROEMULZIÓK ÁRAMLÁSI SAJÁTSÁGAI POROZUS KÖZEGBEN

VADÁSZI MARIANNA–LAKATOS ISTVÁN
Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet
3515 Miskolc-Egyetemváros, Hungary
vadaszi@afki.hu, lakatos@afki.hu,

Absztrakt. A tárolótérben történő gélképződésen alapuló különféle kútkezelések rendkívül vonzó vízkizárási technológiának mutatkoznak, annak ellenére, hogy a mezőbeli kísérletek eredményei távol maradnak az elvárt eredményektől. A sikertelen kezelések oka nagy valószínűséggel az, hogy a beáramlást megakadályozó gát nem a megfelelő időben és tárolótérben jön létre „in-situ" körülmények között. Ezért a kutatási projekt elsődleges célját olyan kémiai eljárás kifejlesztése képezte, amely vízzel elegyedve képez nagy viszkozitású fázist, korlátozva, meggátolva ezzel a víz beáramlását a kútba. Ez az új mechanizmuson alapuló eljárás rutinszerűen alkalmazható, egyszerű és gazdaságos "reservoir conformance control" eljárás, amely alkalmas mind gáztelepekben, mind földalatti gáztárolókban a víztermelés korlátozására, kizárására.
A későbbi üzemi kísérletre való alkalmazhatóság céljából, a megfelelő összetételű kezelő oldat kiválasztásához természetes és mesterségesen konszolidált magokon történtek az áramlási vizsgálatok. Jelen tanulmány két különböző összetételű mikroemulzió besajtolása során fellépő memória effektust tanulmányozza, mely alapot képez a későbbi mezőbeli pilot tesztek végrehajtásához.
Kulcsszavak: *gázkút, vízkizárás, metastabilis mikroemulziós rendszerek, áramlástani kísérlet, memória effektus*

1. BEVEZETÉS

R. S. Schechter *Oil Well Stimulation* c. könyvében már 1992-ben az olaj- és gáztermelő kutak serkentésének gyakorlatáról, a tárolótér komplex természetéről és az áramlási jelenségek ismeretének növekvő jelentőségéről ír [1]. Érdemes megemlíteni Amaeful munkásságát, aki felhívta a figyelmünket arra a tényre, hogy a termelő- és besajtoló kutak környezetében a kedvezőtlen áramlási profil növekvő termelési/besajtolási költségeket eredményez, állandó fejfájást okozva ezzel a olaj- és gáztermelésben. Ezek a költségek egy aktív termelő/besajtoló kút estén akár 40–60%-os kiadást is jelenthetnek [2]. 1999-ben Bennion hívta fel a figyelmet a formáció-károsodásra mint láthatatlan és nehezen befolyásolható folyamatra, mely gyakran ellenőrizhetetlen jelenségekhez vezet [3]. A JPT folyóirat által rendszeresen közzétett adatok szerint a vízáttörés és a vízhányad nagysága elérheti 80%-ot olajmezők esetén, és ez a termelési probléma gáztermelés esetén is rendkívül rohamosan növekedik. Számszerűsítve, kb. 14–16 Mrd m^3 vizet termelnek globálisan évente, csak az olajtermelő kutak esetében. Ennélfogva, a nettó fluidumtérfogat fogalmába a többlet víztermelést is számításba kell venni, ami átlagosan már mai is 75–80%-os vízhányadot jelent [4]. Magától értetődően az elmúlt évtizedekben számos, különféle mechanizmuson alapuló eljárást dolgoztak ki a vízbeáramlás

korlátozására. Egyebek mellett a vízoldható polimerek térhálósításán gélek, az ún. „gél" technológiák rendívül népszerű és hatékony technológiáknak mutatkoztak, mind horizontális, mind vertikális olajtermelő kutak esetén [5, 6, 7]. Figyelembe véve azt az alapvető különbséget, hogy olaj/víz rendszerben a nagyobb mozgékonyságú fázis (víz) áramlását kell korlátozni, addig gáz/víz rendszerben ennek pontosan az ellenkezője a cél, azzal együtt, hogy itt is a víz áramlásával szemben kell gátat képezni. Ebből az elvi megfontolásból kiindulva az első sikeres mezőbeli műveletet az Szőreg-1 rétegben sziloxán-tartalmú mikroemulzió alkalmazásával hajtották végre az ME Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet és a Wacker Chemie AG (Németország) munkatársai. Az alapjaiban új módszer elméletileg és gyakorlatilag egyesítheti a szerves szilikon-vegyületek szelektív mozgékonyság-szabályozásra és az uralkodó kapilláris erőkre gyakorolt radikális hatást rétegviszonyok között [8]. Az eredeti folyamat kétirányú volt: hidrofóbizálás szilikon vegyülettel és mobilitás-szabályozás (a földtani formációval összhangba hozott) mikroemulzióval [9, 10, 11]. A kívánatos memória hatás magyarázata azonban további laboratóriumi kísérletek elvégzését igényelte, azaz a jelen kutatási tevékenységet a különböző metastabilis mikroemulziós rendszerek ipari alkalmazásának előkészítése előzte meg. Az ilyen metastabilis állapotú mikroemulziók a rétegben jelen lévő víz – és csakis a víz elegyedésekor képződnek – és mikroemulzió ⇨ makroemulzió átalakulása, az ún. fázisinverzió jelensége képezheti az eredményes vízhozam-csökkentést. A laboratóriumi kísérletek során az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet saját fejlesztésű szerves külső fázisú, könnyű szénhidrogén vivőfázisú mikroemulziós rétegkezelési technikát dolgozott ki az évek során. Az áramlástani kísérletek alátámasztották, hogy valamennyi metastabilis rendszer 80–90%-kal csökkenti a beáramló víz mennyiségét vízzel telített homokkő tároló rendszerekben. Végül megállapítást nyert, hogy a hatékonyság növelése és az alkalmazott vegyszer árának csökkentése érdekében a petróleum külső fázisú mikroemulziót célszerű továbbfejleszteni, és összetételét a környezetvédelmi előírásoknak megfelelően kell optimalizálni.

2. ALKALMAZOTT VEGYSZEREK

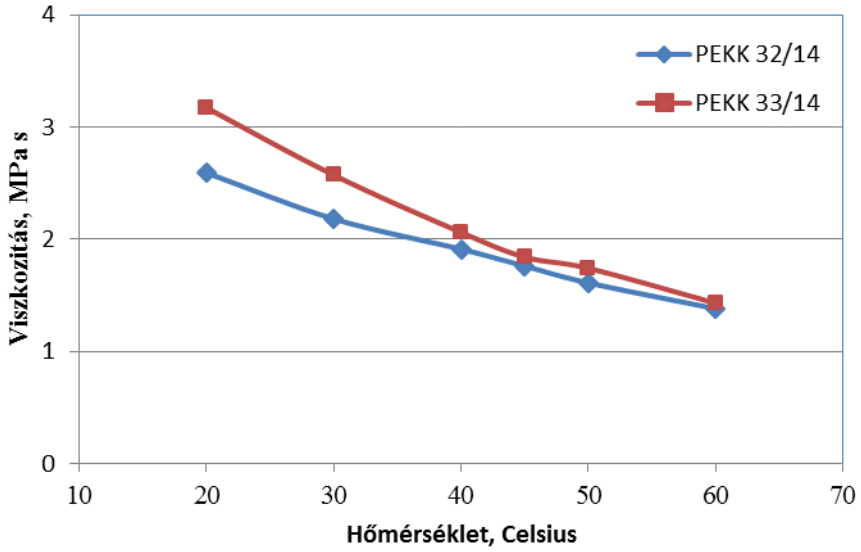
1. táblázat
A vizsgált mikroemulziók összetétele

Anyag jele	DBS, %	Zsírsav észter, %	Na-lauril szulfát, %	Petróleum, %
PEKK 32/14	–	17	3	80
PEKK 33/14	2	15	3	80

A ME AFKI munkatársai a 2005–2009-ig terjedő időszakban K+F tevékenység keretein belül számos metastabilis mikroemulzió ipari alkalmazását készítette elő, és 2010-ben a módszert virtuális kutakra adaptálta. A kutatótevékenység során szorosan együttműködött a Pannon Egyetem munkatársaival és számos originális összetételű, petróleum alapú mikroemulziót dolgozott ki és tesztelt laboratóriumi

körülmények között. Az alkalmazott vegyszerek összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

Mivel a mikroemulzió képzésére alkalmas anyagok besajtolhatósága, kezelhetősége a dinamikus viszkozitás és a felületi feszültség függvénye, ezért ezeket a jellemzőket mind laboratóriumi, mind telephőmérsékleten célszerű meghatározni. A hőmérséklettől függő viszkozitás változása az 1. ábrán látható. Mindenekelőtt utalni kell arra, hogy a petróleum alapú oldatok, különösen ha vizet is tartalmaznak, nem-newtoni folyási sajátsággal rendelkeznek. A mérési folyamat technikai okokból 60 °C-on és atmoszférikus körülmények között történt, azonban az Arrhenius-összefüggéssel az eredmények réteghőmérsékletre extrapolálhatók. Összességében kijelenthető, hogy mindkét oldat kedvezően kis viszkozitással rendelkezik, és reológiai szempontból megfelel a követelményeknek.



1. ábra
A vizsgált mikroemulziók viszkozitásának függése a hőmérséklettől

A mért adatok alapján meghatározhatók az eltérő pórusos rendszerben várható mozgékonyságok. A besajtolási folyamat során a kezelőfolyadék hőmérséklete a környezeti hőmérsékletről a tárolóban uralkodó hőmérsékleti viszonyoknak megfelelően emelkedik. A hőmérséklet emelkedése a viszkozitás és a mobilitás csökkenésével jár, ha a kezelőoldat nem tartalmaz vizet. Ezért az áramlási kísérletek során az alábbi peremfeltételek kerültek elvégzésre:

- A kőzetmag-áteresztőképesség állandó.
- A mozgékonyság csak a viszkozitástól függ.

A vízkizárás és gátképzés hatékonyságát a fent említett tényezőkön kívül számos egyéb tényező is befolyásolja. Így például, a petróleum alapú oldatokban radikális kolloidkémiai változás megy végbe a víztartalom növelésével. Gáztermelő kutak esetében az eredményes vízhozam csökkentés alapja a különböző víztartalmú

rendszerekhez tartozó fázisinverzió és emulgeálódás. A fázisinverzió már viszonylag kis, 10–40%-os víztartalom esetén megjelenik. A két vegyszer között eltérés figyelhető meg a kialakuló fázisinverzió tekintetében, azonban a viszkozitás-szakadás tartományában mindkét esetben létrejön a gátképzés feltételéhez szükséges, több nagyságrendű viszkozitás-növekedés, azaz az immobilis fázis.

3. A MIKROEMULZIÓK ÁRAMLÁSI JELENSÉGEI PÓRUSOS KÖZEGBEN

A különböző összetételű, kezelésre alkalmas, vizes közegben mikroemulziót képező oldatok mozgékonyságra gyakorolt hatásának meghatározása hidrodinamikai kísérletekkel történt. Az áramlási jelenségek során kapott eredmények összehasonlíthatósága érdekében azonos kísérleti körülmények biztosítása célszerű. Ezért a mérésekhez felhasznált kőzetmagok hasonló áteresztőképességgel bírtak, természetes tárolóból származtak, illetve természetes kőzetmintából mesterségesen konszolidált magok voltak. A kőzetmagok jellemzőit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat
A vizsgálatban szereplő kőzetmagok jellemzői

Jellemző	A/8-A/26-A/44	A/53-A/57-A/65	206/1-207/1-207/5
Átmérő, mm	37,65	37,73	37,83
Hosszúság, mm	209,02	209,35	208,95
Pórustérfogat, cm^3	36,2	41,71	69,68
Porozitás, %	15,16	17,59	24,08
Gázpermeabilitás, mD	180,15	288,88	221,19
Vízpermeabilitás, mD	80,74	181,04	165,55
Vegyszer	PEKK-32/14	PEKK-33/14	PEKK-32/14

Az áramlási vizsgálatok első lépése a magoknak 5 g/l-es TDS tartalmú szintetikus rétegvízzel történő telítése volt, amelyet 200 ml/h áramlási sebességgel az egyensúlyi állapot eléréséig 10 pórustérfogat (V_p) szintetikus rétegvíz besajtolása követett. A számítás alapját képező összehasonlítási állapot eléréséhez a rendszert telep hőmérsékletre kellett melegíteni, amit szintén 10 V_p víz besajtolása követett. A mérési protokoll következő fázisaiban azonos mennyiségű, azaz szintén 10 V_p petróleum külső fázisú mikroemulzió besajtolása szolgált, a 100%-os telítettségi állapot létrehozása érdekében. Utolsó lépésként került sor a 10 V_p mennyiségű szintetikus rétegvíz utóinjektálására, ami az ún. „memória effektus", azaz a maradék ellenállás-tényező kiszámítását szolgálta. A relatív mozgékonyságváltozás leírására a $\Delta P_p/\Delta P_{aw}$, illetve a $\Delta P_{pw}/\Delta P_{aw}$ összefüggéseket használtuk, ahol:

ΔP_{aw} – a kezdeti vízbesajtolás alatt mérhető átlagos nyomás, bar

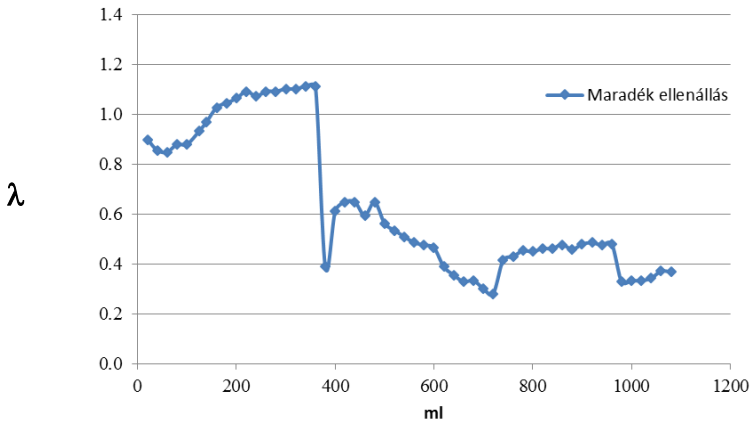
ΔP_p – a petróleum alapú kezelőoldat besajtolási nyomása, bar

ΔP_{pw} – az utólagos vízbesajtolás alatt mért nyomás, bar

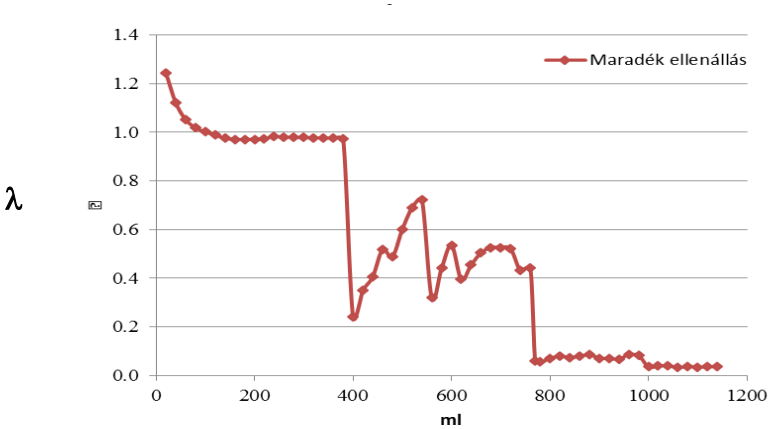
A nagyszámú adathalmaz miatt jelen cikkben csak azoknak a diagramoknak a bemutatására kerül sor, melyek a mobilitás-változás tekintetében reprezentatívak (2–4 ábra).

4. EREDMÉNYEK

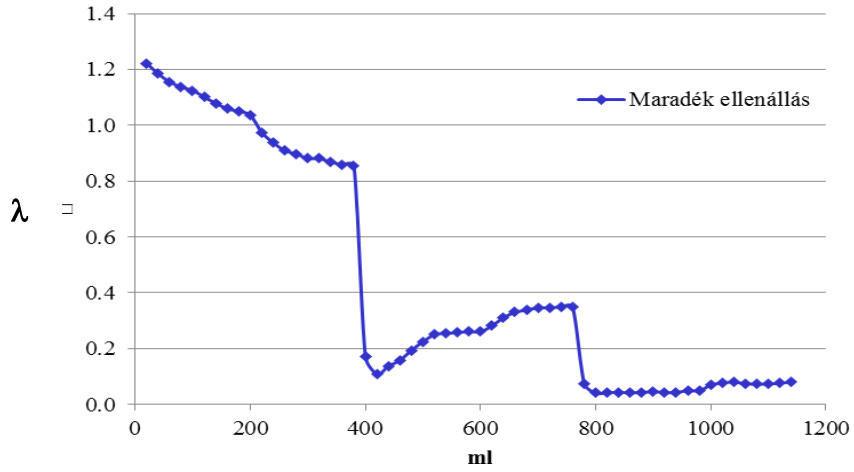
Mindkét tesztelt petróleum alapú oldat figyelemre méltó áramlási tulajdonságokkal rendelkezik porózus rendszerekben. Általában elmondható, hogy szignifikánsan lecsökkentik az áramló fluidum mobilitás értékét, amikor a mikroemulzió vízzel elegyedik. A csökkenés a tesztoldat viszkozitásának növekedése miatt következik be, ami akár 2–3 nagyságrenddel is nagyobb a beinjektált szintetikus rétegvíz viszkozitásánál. A mobilitás változásának folyamatában azonban nem ez az egyedül felelős tényező. Ettől függetlenül, a különleges memóriahatás az az egyedi és előnyös tulajdonság, amin alapulhat a vízkizárás elve gázkutak konformációs kezelése esetén.



2. ábra
A maradék ellenállás alakulása mesterségesen konszolidált algyői kőzetmagban PEKK 32/14 jelű mikroemulzió besajtolásakor



3. ábra
A maradék ellenállás alakulása mesterségesen konszolidált | algyői kőzetmagban PEKK 33/14 jelű mikroemulzió besajtolásakor



4. ábra
Maradék ellenállás alakulása természetes algyői kőzetmagban PEKK 33/14 jelű mikroemulzió besajtolásakor

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A víz utóbesajtolása a várakozásoknak megfelelően alakult. Mindhárom esetben a besajtolási nyomás lényegesen nagyobb, a relatív mozgékonyság lényegesen kisebb volt, mint a kezdeti érték. Ez a tapasztalat egyértelműen bizonyítja, hogy mind a PEKK-32/14, mind a PEKK 33/14 jelű minta besajtolásakor jelentős áramlási ellenállás, gáthatás lépett fel a víz áramlásával szemben porózus rendszerben. Megállapítást nyert, hogy az új fejlesztésű petróleum vivőfázisú oldatok viselkedése a korábbi tapasztalatokhoz nagy hasonlóságot mutat. Megállapítható, hogy a PEKK 32/14 és PEKK 33/14 alkalmas gáztermelő kutak serkentésére.

A kutatómunka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő „Fenntartható Természeti Erőforrás Gazdálkodás Kiválósági Központ” kutatási programjának keretében valósult meg.

IRODALOM

[1] SCHECHTER, R.S.: *Oil Well Stimulation*. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ, USA (1992).
[2] AMAEFUL, J. A. et al.: *Advances in Formation Damage Assessment and Control Strategies*. Paper 88-39-65 presented at the 39th Annual Meeting of the Petroleum Engineering Society, Calgary, Canada (1988).
[3] BENNINION, B.: Formation Damage – The Impairment of the Invisible by the Inevitable and Uncontrollable, Resulting in an Indeterminate Reduction of the Unquantifiable, Can. *JPT*, 38 (1999), 11–16.
[4] SYDANSK, R. D.–ROMERO-ZENOM, L.: *Reservoir Conformance Improvement*. Society of Petroleum Engineers (SPE), Richardson, USA, 2011.

[5] WASSMUTH, F. R.–GREEN, K.–HODGINS, L.: *Water Shutoff in Gas Wells: Proper Placement is a Key to Success.* SPE Paper 89403 presented at the SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery held in Tulsa, USA, 2004.

[6] ZAITOUN, A.–TABARY, R.–ROUSSEAU, D.–PICHERY, T.–NOUYOUX, S.–MALLO, P.–BRAUN, S.: *Using Microgels to Shut Off Water in a Gas Well*. SPE Paper 106042 presented at the International Symposium on Oilfield Chemistry held in Houston, USA, 2007.

[7] AL-MUNTASHERI, G. A.–SIERRA, L.–LYNN, J. D.–GIZQUIERDO, G.: *Water Shut-off with Polymer Gels in a High Temperature Horizontal Gas Well: A Story.* SPE Paper 129848 presented at the SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, USA, 2010.

[8] PUSCH, G.–MEYN, R.–BURGER, W.–GECK, M.: *Method for Stabilizing the Gas Flow in Water-Bearing Natural Gas Deposits or Reservoirs*. US Patent 6,206,102 B1, 2001.

[9] LAKATOS, I.–TÓTH J.–LAKATOS-SZABÓ, J.–KOSZTIN, B.–PALÁSHY, GY.–WÖLTJE, H.: *Application of Silicone Microemulsion for Restriction of Water Production in Gas Wells.*, SPE Techn. Paper 78307 presented at the 13th European Petroleum Conference held in Aberdeen, UK, 2002.

[10] LAKATOS, I.TÓTH J.–LAKATOS-SZABÓ, J.KOSZTIN, B.–PALÁSHY, GY.–WÖLTJE, H.: *Comparative study of Different Silicone as Candidates for Restriction of Water Production in Gas Wells*. SPE Techn. Paper 80204 presented at the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in Houston, USA, 2003.

[11] LAKATOS, I.–LAKATOS-SZABÓ, J.–BÓDI, T.–VÁGÓ, Á.: *New Alternatives of Water Shutoff Treatments: Application of Water Sensitive Metastable Systems*. SPE Paper 112403 presented at the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control held in Lafayette, USA, 2008.