

УДК 622.276.6

**Л.А. Магадова**, д.т.н., профессор, e-mail: magadova0108@himeko.ru; **М.С. Подзорова**, м.н.с., e-mail: podzorova22@yandex.ru; **В.Б. Губанов**, зав. лаб., к.т.н., с.н.с., e-mail: gubanow@mail333.com; **В.Р. Магадов**, зав. сек., e-mail: motivator@mail.ru, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОСТАВОВ ДЛЯ ASP-ЗАВОДНЕНИЯ

*Одним из способов разработки трудноизвлекаемых запасов нефти является ASP (щелочь-ПАВ-полимерное) заводнение. Важным компонентом состава ASP является поверхностно-активное вещество (ПАВ), которое при оптимальных параметрах образует микроэмульсию, что позволяет снизить межфазное натяжение до сверхнизких значений. В работе рассматриваются методики экспериментальной оценки активности ПАВ и адсорбции ПАВ на поверхности пористой среды в процессе фильтрации через нее раствора, содержащего ПАВ.*

**Ключевые слова:** поверхностно-активные вещества, щелочь-ПАВ-полимерное заводнение, активность ПАВ, микроэмульсия, адсорбция, пористая среда, метод капиллярных давлений.

В настоящее время актуальна задача адаптации и внедрения комплексных методов разработки трудноизвлекаемых запасов нефти. Одним из таких методов является ASP (щелочь-ПАВ-полимерное) заводнение.

Состав для ASP-заводнения включает три главных компонента: поверхностно-активное вещество (ПАВ), щелочной агент и полимер.

Поверхностно-активное вещество при оптимальных параметрах образует солюбилизированную систему (микроэмульсию). За счет этого величина межфазного натяжения достигает сверхнизких значений, что способствует снижению остаточной нефтенасыщенности при вытеснении.

Щелочной агент помогает защитить раствор ASP от двухвалентных ионов, снижает адсорбцию ПАВ на породе и образует при контакте с «активной» нефтью дополнительные поверхностно-активные компоненты, которые приводят к снижению межфазного натяжения (IFT). Он также изменяет смачиваемость породы и регулирует соленость. В качестве щелочного агента используются

гидроксид и карбонат натрия, силикат натрия, фосфат натрия, гидроксид аммония и т.д.

Полимер повышает эффективность вытеснения за счет увеличения вязкости раствора ASP. Используются два типа полимеров: полиакриламид, как правило, частично гидролизованый (НРАМ), и полисахарид – ксантановая смола. По сравнению с НРАМ ксантановая смола относительно нечувствительна к солености и жесткости, но подвергается бактериальному разложению при пластовых условиях.

Успешность применения технологии ASP-заводнения во многом зависит от оптимизации ASP-состава для условий конкретного месторождения. Эффект от такого комплексного воздействия будет достигнут, только если при контакте с нефтью в условиях пласта закачиваемый ASP-состав образует микроэмульсию тип III по Винзору, обладающую вязкостью менее 10 мПа•с, и это произойдет в достаточно короткие сроки. В связи с этим при разработке композиций ПАВ для ASP-заводнения необходимо учитывать, что микроэмульсии могут

находиться в равновесии с избытком нефти, воды или обоих компонентов (типы I, II и III по Винзору). Переходы между этими равновесиями зависят от значения гидрофильно-липофильного баланса (ГЛБ) и концентрации ПАВ, концентрации солей в закачиваемой системе, а также от состава нефти и температуры пласта. Все указанные параметры взаимно влияют друг на друга, а также на длительность образования и вязкость получаемых микроэмульсий. На начальной стадии разработки состава ASP для оценки активности ПАВ, входящего в состав ASP-раствора, проводят исследования на поведение фаз. При исследовании на поведение фаз раствор, состоящий из воды, ПАВ, щелочного агента (в данном исследовании полимер обычно не используется), смешивается с дегазированной нефтью в пробирке и помещается в термостат, поддерживающий температуру, соответствующую пластовой. Если в ASP-состав входит анионное ПАВ, то существенное влияние на достижение равновесия оказывает концентрация соли (минерализация воды), поэто-



Буровая установка  
арктического  
исполнения



Шаньдунское ООО «Кежуйнефтеоборуд»



Газовый компрессор



Мембранная азотная установка



Установка для ГРП на шасси



Цементировочная установка



Колтюбинговая установка

на правах рекламы



Бурильная труба

**Головной офис в Китае**

Адрес: КНР, пров.Шаньдун, г.Дуньин, ул.Наньэрлу, 233  
Тел: +86-546-8179682 8179683 Факс: +86-546-8179681

**Фиалиал в России**

Адрес: Россия, 119019, г. Москва, пр. Вернадского, д. 29  
тел: +7 (495) 363-09-55, 363-09-66 факс: +7(495) 363-09-66

му дополнительно может вводиться электролит, обычно хлорид натрия или калия. Если система ПАВ является активной и минерализация является оптимальной, то между нефтью и раствором воды образуется термодинамически устойчивая средняя фаза микроэмульсии (тип III по Винзору). Она содержит примерно одинаковые объемы воды и нефти, и величина межфазного натяжения на границе нефть–вода достигает сверхнизких значений (менее  $10^{-4}$  мН/м).

На рисунке 1 представлен пример выбора оптимальной минерализации для ASP-состава на основе анионного ПАВ по результатам исследования на поведение фаз при контакте с керосином (красная рамка показывает оптимальное содержание электролита).

После оптимизации ASP-состава необходимо оценить адсорбцию ПАВ на поверхности породы, чтобы убедиться, что после закачки и продвижения в пласте количество ПАВ, входящего в ASP-состав, будет достаточным для образования микроэмульсии типа III по Винзору при контакте с нефтью.

В основе методики экспериментального определения количества ПАВ, адсорбирующегося на поверхности пористой среды в процессе фильтрации через нее раствора, содержащего ПАВ, заложены следующие предпосылки.

В процессе фильтрации через образец керна раствора ПАВ происходит адсорбция вещества на стенки фильтрующих поровых каналов, что приводит к их сужению и повышению фильтрационного сопротивления пористой среды образца керна.

При постоянном расходе раствора этот факт фиксируется как увеличение перепада давления. В свою очередь, изменение перепада давления обратно пропорционально изменению эффективного поперечного сечения поровых каналов или порового объема образца. При условии, что длина фильтрующих поровых каналов остается неизменной после адсорбции ПАВ при постоянной скорости фильтрации флюида через образец керна, увеличение перепада давления при наличии адсорбции будет в обратной пропорции соответствовать снижению величины порового объема. А разница между значением порового объема до закачки раствора, содержащего ПАВ, и величиной порового объема, рассчитанного по полученному после фильтрации раствора, содержащего ПАВ, стабильному значению перепада давления, будет представлять собой объем ПАВ, адсорбированного на поверхности пористой среды. Из этого значения можно вычислить удельный объем адсорбированного ПАВ, приходящийся на грамм пористой среды,

либо на площадь ( $\text{см}^2$ ) фильтрующей поверхности пористой среды.

Для прямого определения удельной фильтрующей поверхности поровых каналов образца керна продуктивного коллектора применим метод капиллярных давлений.

Отобранные в качестве объекта исследования образцы керна после их экстракции высушиваются до постоянного веса. Затем насыщенные под вакуумом пластовой водой образцы керна ставят на пористую керамическую мембрану, расположенную в полости капиллярметра и предварительно насыщенную той же пластовой водой. Капиллярметр герметично закрывается, в его полости создается избыточное давление посредством закачки технического азота. Мембрана не пропускает газ, но пропускает пластовую воду. Избыточное давление газа вытесняет воду из пор образца через мембрану в атмосферу. Чем большее давление газа создается в капиллярметре, тем большее количество воды вытесняется из образца. При малых избыточных давлениях вода вытесняется из крупных пор, при больших избыточных давлениях – из более мелких.

Поэтапно в капиллярметре увеличивается избыточное давление. В конце каждого этапа давление в капиллярметре сбрасывается, капиллярметр разбирается, и определяется масса каждого образца керна. По кривой потери веса строится кривая капиллярного давления. Конечное значение насыщенности образца керна соответствует остаточной водонасыщенности. Метод полупроницаемой мембраны позволяет построить распределение пор по радиусам и определить удельную поверхность фильтрации.

Расчет распределения пор по радиусам основан на использовании уравнения Лапласа:

$$P_k = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{R_k}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение на границе вода/газ,

$\theta$  – краевой угол смачивания;

$R_k$  – радиус капилляра, соответствующий данному капиллярному давлению  $P_k$ .

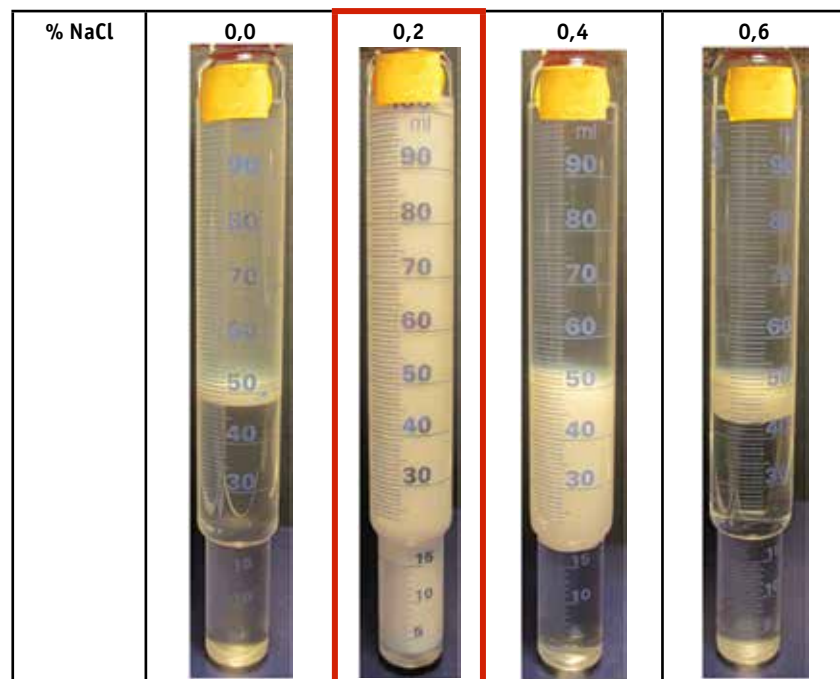


Рис. 1. Результаты исследования на поведения фаз





## Убедительное многообразие и безукоризненное исполнение

Повсеместно заказчики доверяют нашим интеллектуальным решениям для инженерных сетей зданий. В системах кондиционирования хорошо зарекомендовал себя комплексный пакет оборудования: насос типа «в линию» со смонтированным на двигателе преобразователем частоты Etaline PumpDrive, регулирующий и измерительный клапан BOA®-Control IMS и дисковый затвор BOAX-S, гарантирующие бесперебойную работу. Убедитесь в многообразии нашей продукции: [www.ksb.ru](http://www.ksb.ru)

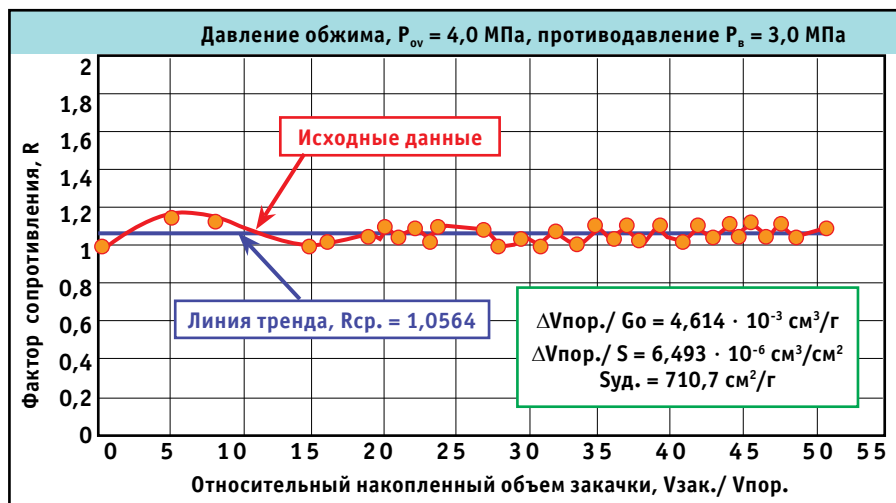


Рис. 2. Результаты экспериментального исследования адсорбции ПАВ на фильтрующей поверхности пористой среды

При этом образец зерна представляется как набор капилляров различного радиуса и длины. Длина отдельного капилляра рассчитывается по известному значению объема воды, вытесненной на данном этапе эксперимента из этого капилляра, и значения радиуса, полученного из уравнения Лапласа.

На основании данных, полученных для всех этапов эксперимента, строится дифференциальное распределение пор по радиусам. Следует отметить, что речь идет только о порах, участвующих в фильтрации.

Расчет удельной поверхности пор является продолжением расчета распределения пор по радиусам. Зная количество жидкости,  $V$ , вытесненной газом на определенном этапе эксперимента, и средний радиус пор  $R$ , из которых произошло вытеснение, можно найти длину капилляра  $L$  по следующей формуле:

$$L = \frac{V}{\pi \cdot R^2}, \quad (2)$$

Далее рассчитывается поверхность фильтрации  $S$  на данном этапе. Для расчета используется формула:

$$S = 2\pi \cdot R \cdot L, \quad (3)$$

Сумма значений  $S$ , полученных для разных этапов, разделенных на вес сухого образца зерна, является общей удельной поверхностью фильтрации образца. Далее донасыщенный водой образец зерна с известными значениями удельной поверхности фильтрации порового объема и коэффициента открытой пористости закладывается в кернодержатель. После нагрева до температуры эксперимента определяется исходное значение коэффициента проницаемости по воде. Затем в процессе фильтрации раствора ПАВ проводится сравнение значения перепада давления при закачке раствора без ПАВ и текущие значения перепада давления при закачке раствора, содержащего ПАВ.

Фильтрация раствора, содержащего ПАВ, как правило, показывает колебательный характер поведения текущих

значений перепада давления, связанного, очевидно, с адсорбцией и десорбцией ПАВ. Поэтому фильтрация раствора должна продолжаться до момента, когда линия тренда на графике зависимости перепада давления от относительного накопленного объема закачки раствора, содержащего ПАВ, превратится в горизонтальную.

На представленном графике (рис. 2) показан типичный результат фильтрационного эксперимента. Текущие значения перепада давления отнесены к значению перепада давления при закачке раствора без ПАВ. Эти относительные значения принято называть фактором сопротивления.

Из полученного среднего значения фактора сопротивления рассчитывается удельный объем адсорбированного ПАВ, приходящийся на грамм пористой среды или на площадь ( $\text{см}^2$ ) фильтрующей поверхности пористой среды.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Lake L.W. Enhanced Oil Recovery. New York: Prentice Hall, 1996.
2. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг, Б. Йенссон, Б. Кронберг, Б. Линдман; Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 528 с.
3. Mummel K. Мицеллообразование, сольubilизация и микроэмульсии. – М.: Мир, 1980. – 600 с.
4. Проект компании «Салым» (Salym) по химическим методам повышения нефтеотдачи (проект EOR) – успех может быть достигнут только интеграцией / SPE 136238.
5. Разработка композиций ПАВ с целью создания микроэмульсий в пластах с трудноизвлекаемыми запасами для повышения нефтеотдачи / М.А. Силин, Г.С. Хузина, М.С. Подзорова // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции «Нефтепромысловая химия». – Москва, 2012.

## Enhanced Oil Recovery

L.A. Magadova, Doctor of Sc., professor, e-mail: magadova0108@himeko.ru; M.S. Podzorova, junior researcher, e-mail: podzorova22@yandex.ru; V.B. Gubanov, Candidate of Science, senior researcher, lab chief, e-mail: gubanov@mail333.com; V.R. Magadov, research sector chief, e-mail: motivator@mail.ru, Gubkin Russian State University of Oil and Gas

## Methodical basics of ASP flood compounds lab testing

One of the tight oil development methods is ASP-flooding. Important component of ASP-composition is surfactants, which under the optimal conditions form microemulsion, capable of getting the ultralow IFT values. In present work, experimental evaluation methods of surfactant activity and adsorption on porous media during surfactant solution filtration are given.

Keywords: surfactants, ASP-flooding, surfactant activity, microemulsions, adsorption, porous media, saturated core desaturation method.

## References:

1. Lake L.W. Enhanced Oil Recovery. New York: Prentice Hall, 1996.
2. Poverkhnosnto-aktivnyye veshchestva i polimery v vodnykh rastvorakh (Surfactants and polymers in aqueous solutions) / K. Holmberg, B. Jönsson, B. Kronberg, B. Lindman; Translated from English – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 528 p.
3. Mittel K. Mitselloobrazovanie, solubilizatsiya i mikroemul'sii (Micellization, solubilisation, and microemulsions). – М.: Мир, 1980. – 600 p.
4. Proekt kompanii "Salym" po khimicheskim metodam povysheniya nefteotdachi (proekt EOR) – uspekhn mozhet byt' dostignut tol'ko integratsiei (Salym company project on chemical methods of enhanced oil recovery (EOR project) – success can be achieved only by the integration) / SPE 136238.
5. Razrabotka kompozitsiy PAV s tsel'yu sozdaniya mikroemul'siy v plastakh s trudnoizvlekaemyimi zapasami dlya povysheniya nefteotdachi (The development of the surfactant compounds for a microemulsion formation in the layers with reserves difficult to recover for enhanced oil recovery) / M.A. Silin, G.S. Khuzina, M.S. Podzorova // Proceedings of the VII All-Russian scientific-practical conference "Oilfield Chemistry". – Moscow, 2012.





## ЗОРЯ-МАШПРОЕКТ

Государственное предприятие  
Научно-производственный  
комплекс газотурбостроения



**УКРОБОРОНПРОМ**  
Государственный концерн



- газотурбогенераторы
- приводы ГПА
- морские установки



42А, проспект Октябрьский,  
Николаев, 54018

[spe@mashproekt.nikolaev.ua](mailto:spe@mashproekt.nikolaev.ua)  
[marketing@zorya.com.ua](mailto:marketing@zorya.com.ua)  
[www.zmturbines.com](http://www.zmturbines.com)