

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НЕФТИ ИЗ СИЛЬНОГЛИНИСТЫХ ПЛАСТОВ

М.Т.Абасов, Р.А.Мусаев, А.И.Асадов, Р.Г.Аллахвердиева

*Институт геологии НАН Азербайджана
AZ 1143, Баку, просп. Г.Джавида, 29А*

В статье рассмотрено влияние постоянного и переменного электрического поля на физико-химические свойства различного типа вод, на объемную скорость фильтрации жидкостей из сильноглинистых пористых сред и на коэффициент вытеснения нефти водой. Была собрана специальная установка, позволяющая в зависимости от характера исследований создать постоянное или же переменное электрическое поле с учетом перепада давления. Модели пористой среды были созданы из породы Кирмакинской долины месторождения Балаханы.

Как известно, современный этап развития нефтяной промышленности характеризуется осложнениями, связанными как с существующей диспропорцией между подготовкой запасов нефти и их извлечением, так и увеличением доли трудноизвлекаемых запасов (ТИЗ). Подавляющая часть таких месторождений, находящихся на поздней стадии разработки, приурочена к коллекторам низкой проницаемости, характеризующимся сложным строением продуктивных пластов, значительными размерами водонефтяных зон и повышенной вязкостью нефти.

К подобной категории пластов относится и кирмакинская свита (КС) - один из основных объектов разработки продуктивной толщи Абшеронского полуострова, содержащая большие запасы неизвлеченной нефти. Так, несмотря на завершение буровых работ, все горизонты КС характеризуются низким коэффициентом извлечения нефтяных запасов, не превышающим 30%.

С целью интенсификации добычи нефти на упомянутых залежах, начиная еще с 1945 года, были осуществлены попытки применения традиционных технологий гидро- и газодинамического воздействия на пласт, которые оказывались малоэффективными по причине низкой проницаемости неоднородных по составу продуктивных коллекторов, содержащих высокодисперсные глинистые породы.

К настоящему времени в ряде работ, посвященных исследованию так называемых процессов вторичной миграции нефти в низкопроницаемых водонасыщенных коллекторах, отмечается практическое отсутствие фак-

торов напорной фильтрации и подчеркивается доминирование диффузионно-осмотического (Симкин, 1979; Большаков, 1995) и электрокинетического (Симкин, 1979) факторов при их протекании. Наличие электроосмотического передвижения нефти в различных дисперсных породах (песчано-алеуритах и глинах) под действием внешнего электрического поля было доказано экспериментально, а возможность вытеснения нефти фронтом водного раствора электролитов через пористые мембраны различной капиллярно-пористой природы обсуждалась в работе (Иванников, 1995). Влияние на фильтрацию флюидов преобладания электроосмотического давления над гидродинамическим при протекании электрического тока в пластовой системе отмечалось также и в работах (Кедровский и др. 1986; Батырбаев и др., 2000).

Известно, что зависимость численных значений фильтрационного потенциала (потенциала течения), возникающего при воздействии естественных электрических полей в водонасыщенных коллекторах нефти, и скорости электроосмоса от параметров поля, свойств пористой и жидкой сред описывается уравнением Гельмгольца-Смолуховского (Тихомолова, 1984), которое может быть представлено в виде:

$$\Delta U_T = \frac{\zeta \varepsilon \Delta P}{4 \pi \eta k} \quad (1)$$

и

$$v = \frac{S \zeta \varepsilon h}{4 \pi \eta} \quad (2)$$

где ζ - электрокинетический потенциал; ε - диэлектрическая проницаемость жидкой фазы; ΔP - гидравлическое давление (напор) жидкости; η - вязкость поровой жидкости; K - электропроводность поровой жидкости; S - суммарная площадь поперечного сечения капиллярных каналов пористой среды; $h = E/L$ – градиент электрокинетического потенциала; E – потенциал, приложенный к пористой среде длиной L .

Как видно, из уравнений (Симкин, 1979) и (Большаков, 1995) в параметрическую зависимость процесса переноса жидкости в пористой среде под действием электрического поля привнесены как характеристики самого поля, так и свойства фильтрующей среды и поровой жидкости.

Следует отметить, что наличие внешнего электрического поля оказывает существенное влияние на результирующее значение водородного показателя (рН) и величины межфазного натяжения водных электролитов на границе с углеводородной фазой, чем способствует, по аналогии с реагентной обработкой нефтяных коллекторов, увеличению их проницаемости.

Отсутствие универсальности перечисленных характеристик обуславливает необходимость постановки задач их экспериментального исследования применительно к конкретным системам порода – нефть – вода и условиям их взаимодействия.

Данная работа посвящена исследованию влияния постоянного и знакопеременного электрического поля на водородный показатель и межфазное натяжение водных электролитов различной природы, а также на проницаемость пористой среды и коэффициент вытеснения нефти в условиях, моделирующих упомянутый выше пласт кирмакинской свиты.

Эксперименты проводились на специально сконструированной установке, позволяющей производить измерения как в посто-

янно, так и переменном электрическом поле, с учетом перепада давления. Корпус модели пласта был изготовлен из органического стекла в виде трубки с варьируемой длиной 0,3-0,7 м и диаметром 0,025 м с вмонтированными на входе и выходе электродами из нержавеющей стали. Пористая среда составлялась из породы поверхностных обнажений Кирмакинской долины месторождения Балаханы. В качестве вытесняющих нефть гидродинамических компонентов системы использовались водные электролиты, характеристика которых представлена в таблице.

Перед постановкой базовых экспериментов было изучено влияние постоянного электрического поля на значения рН и межфазное натяжение (σ) использованных водных электролитов на границе раздела с высокоочищенным керосином, что сопоставлялось с предварительно полученными результатами его оценки вне воздействия электрического поля.

Как вытекает из данных, приведенных на рис. 1а, при фиксированных значениях напряжения электрического поля (20В и 100В) с увеличением времени течения постоянного тока через образец щелочной воды наблюдается прирост величины водородного показателя различной интенсивности, зависящей от напряжения на электродах, который стабилизируется по истечении 30 минут от начала эксперимента. Так, при напряжении 20В по прошествии 30 мин. эксперимента прирост водородного показателя щелочной воды составляет 14,3%, а величина межфазного натяжения на границе ее с очищенным керосином снижается на 22,2% по отношению к таковой до воздействия электрического поля. Расход электроэнергии при этом составил $1,2 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч, что незначительно превышает энергозатраты в случае экспериментов с пластовой, жесткой и Куринской водой.

Таблица

Характеристика нагнетаемых в пластовую модель водных электролитов

Воды	Состав, мг.экв./л							
	Na ⁺ + K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻⁻	RCOO ⁻
Куринская	36,04	5,8	3,1	40,0	5,1	–	0,07	–
Морская	154,0	16,0	56,0	166,0	58,0	2,0	–	–
Жесткая	171,90	16,54	15,28	202,33	0,06	0,92	–	0,39
пластовая								
Щелочная	24,17	0,50	1,30	15,19	2,97	7,31	0,56	0,67
пластовая								

Аналогичная тенденция прироста водородного показателя и снижению поверхностного натяжения на границе раздела электролит – углеводород наблюдается исключительно при воздействии на морскую воду электрического поля напряженностью 20В (рис. 1б). При воздействии же поля напряженностью 100В водородный потенциал электролита возрастает, а поверхностное натяжение снижается только в начальном периоде протекания постоянного тока (~ 5мин.). С увеличением времени воздействия электрического поля наблюдается резкое снижение значения рН до величины 8,3, меньшей водородного показателя, не подверженного воздействию поля образца морской воды. Как следствие этого, в области экстремальных значений основности электролита поверхностное натяжение на границе раздела с очищенным керосином минимально.

Взаимосвязь значений водородного показателя водных электролитов и поверхностного натяжения на границе раздела с углеводородными жидкостями прослеживается также в экспериментах по воздействию электрического поля различной напряженности на морскую воду (рис.2). При этом установлено, что на результирующее значение рН электролита оказывают влияние как варьируемые параметры напряженности электрического поля, так и начальное приращение величины водородного показателя в процессе ионного обмена при контакте морской воды с пористой средой. Так, в результате фильтрации морской воды через сильноглинистую пористую среду и последующего воздействия внешнего электрического поля напряженностью 25, 50, 75 и 100В наблюдается увеличение рН электролита с 8,5 до 12,5, и, как следствие этого, снижение межфазного натяжения воды с 28 до 7мН/м. Расход электроэнергии для достижения этих показателей составил $78 \cdot 10^4$ кВт·ч.

Для расширения представлений о влиянии природы водных электролитов в процессе их фильтрации на степень активации во внешнем электрическом поле были проведены эксперименты по оценке скорости фильтрации смесей пластовой щелочной и пресной воды. Пористая среда при этом составлялась из выборки сильноглинистой породы кирманкской свиты.

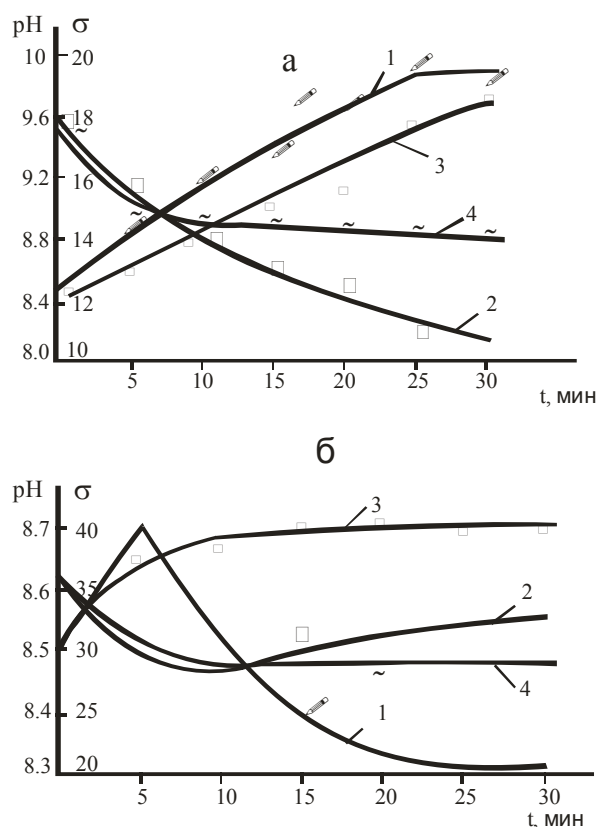


Рис. 1. Зависимость изменения величины рН и σ от продолжительности обработки током пластово-щелочной (а) и морской (б) вод. Величины рН и σ при напряжениях 100 В (1,2) и 20 В (3,4).

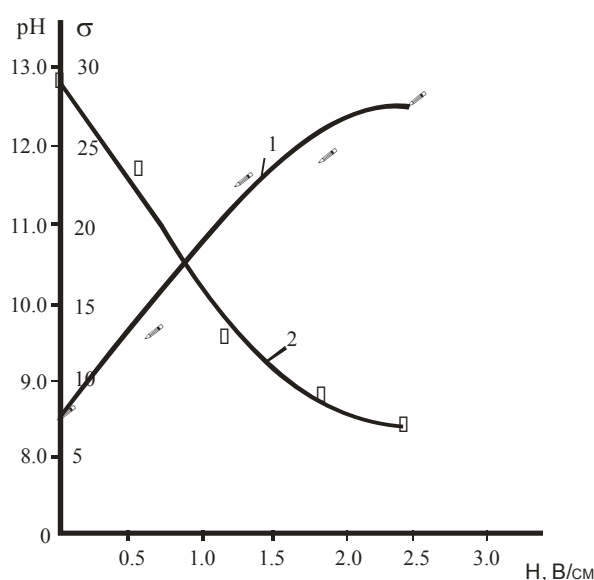


Рис. 2. Зависимость изменения величины рН (1) и σ (2) от плотности напряжения тока при фильтрации морской воды

С этой целью после достижения постоянной величины проницаемости пористой среды ($0,33 \text{ мкм}^2$) при фильтрации пластовой щелочной воды под гидродинамическим перепадом давления $0,04 \text{ МПа}$ последняя замещалась пресной, Куринской. Как и следовало ожидать, при нагнетании пресной воды происходит резкое снижение проницаемости пористой среды (рис.3а), что вероятно связано с перераспределением равновесного состояния неорганических ионов при смешении электролитов и изменением параметров так называемого двойного электрического слоя на границе раздела порода – жидкость. Примечательным является тот факт, что последовательное воздействие постоянного тока с напряжением 100 В и переменного тока с напряжением $100, 150$ и 200 В на модель пласта кирмакинской свиты, характеризующегося неоднородностью минералогического состава, приводит к релаксации высокой фильтрационной способности смешанного электролита. Учитывая, что скорость протекания электрокинетических процессов обратно пропорциональна сопротивлению токопроводящей среды, представлялось целесообразным исследование зависимости электрического сопротивления системы пористая среда – электролит от параметров прилагаемого электрического поля. Как видно из данных рис. 3а и 3б, водопроницаемость пористой среды антибатна величине электрического сопротивления системы в целом и пропорциональна силе тока, проходящего через модель пласта. Следовательно, в случае реализации одностороннего потока зарядов и водной фазы за счет одновременного воздействия перепада давления и внешнего электрополя возможен синергизм этих двух составляющих, проявляющийся в возрастании фильтрационных свойств. Полученные результаты свидетельствуют также о возможности избирательно регулировать фильтрационную способность системы за счет варьирования природы электролита и параметров прилагаемого электрического поля.

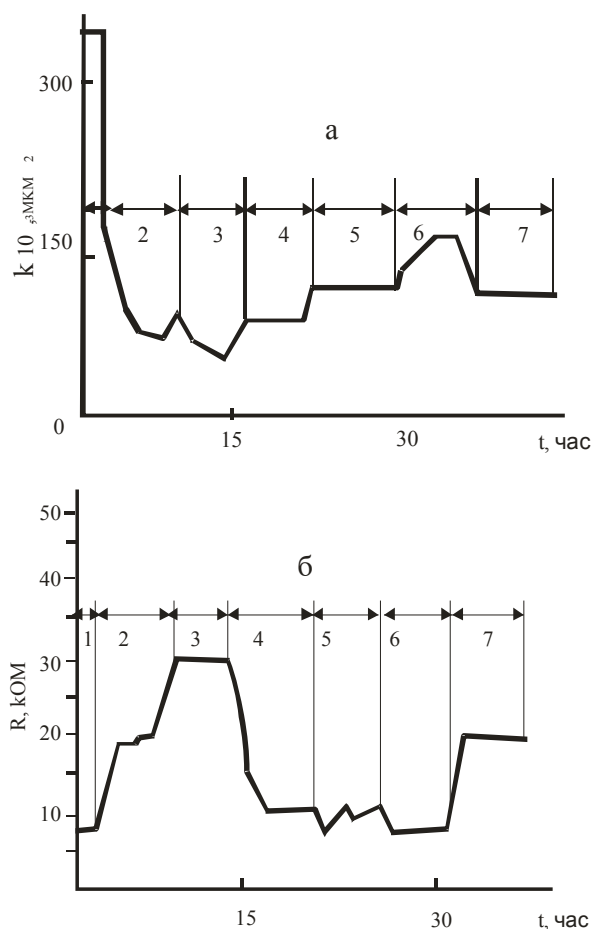


Рис. 3. Изменение проницаемости (а) и сопротивления модели пласта (б) в различных условиях. Фильтрация пластовой (1) и Куринской воды (2,7) без воздействия тока; Куринской воды при напряжении постоянного тока 100 В (3), при напряжениях переменного тока 100 В (4), 150 В (5) и 200 В (6).

Естественно предположить, что влияние электрического поля на фильтрационные характеристики исследуемой модельной системы пористая среда – водный электролит может распространяться и на показатели вытеснения нефти из порового пространства пласта. Для экспериментальной проверки этого предположения была реализована модель пласта, составленная из песка кирмакинской свиты с практически идентичной пористостью ($26\text{--}27\%$), проницаемостью ($0,3 \text{ мкм}^2$) и удельной поверхностью ($17 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{м}^3$). Емкость с породой подвергалась вакуумной обработке и насыщалась пластовой щелочной водой горизонта кирмакинской свиты. После замещения воды нефтью одноименного месторождения нефтенасыщенность породы составляла $73,5\%$.

На рис. 4 представлены результаты исследования зависимости коэффициента вытеснения нефти от пропущенного объема морской воды при одинаковом перепаде давления (0,1 МПа) как в отсутствии, так и при наличии воздействия постоянного электрического тока. Видно, что для безводной части фильтрата значение коэффициента вытеснения равно 0,37. При протоке через модель морской воды в количестве, равном 4-х кратному объему порового пространства (так называемый водный период фильтрации), усредненное значение коэффициента вытеснения нефти составило 0,27, что в совокупности с безводным периодом фильтрации достигает практически приемлемой величины – 0,64.

После появления в фильтрате воды, модель пласта с определенным временным интервалом подвергалась воздействию постоянного, а затем переменного тока с напряжением 100В. Сопоставление результатов, иллюстрируемых кривыми 1 и 2 (рис.4), свидетельствует о более интенсивном росте значений коэффициента вытеснения нефти морской водой под воздействием электрического поля в начальной стадии процесса фильтрации. Дальнейшая закачка воды не приводит к ощутимому приращению величины коэффициента вытеснения нефти, который принимает стационарное значение после закачки воды в количестве, равном трехкратному объему порового пространства модели пласта.

Таким образом, на основании совокупности приведенных результатов можно прийти к важному с практической точки зрения заключению, а именно: когда традиционные методы извлечения нефти из низкопродуктивных пластов оказываются малоэффективными, путем направленного воздействия внешнего электрического поля с регламентированными параметрами напряженности на вторичный процесс извлечения нефти водными электролитами можно существенно увеличить значение коэффициента вытеснения труднопроницаемых коллекторов, в частности высокоглинистых коллекторов кирмакинской свиты.

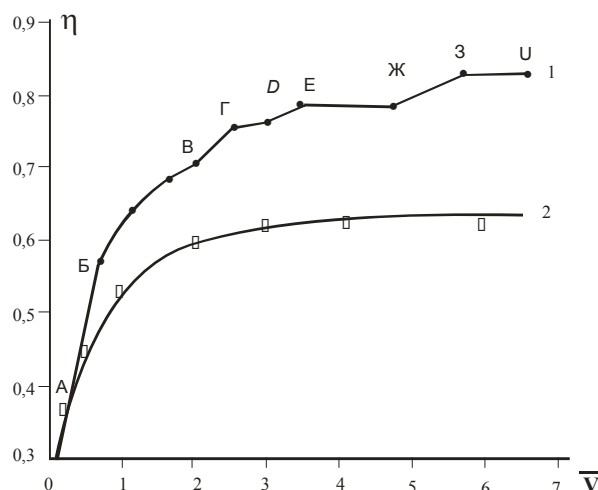


Рис. 4. Влияние электрического поля на коэффициент вытеснения нефти водой. Вытеснение морской водой: ОА; БВ, ГД, ЕЖ, и ЗИ. Вытеснение морской водой при напряжении тока 100 В: АБ, ВГ, ДЕ и ЖЗ.

ЛИТЕРАТУРА

- СИМКИН, Э.М. 1979. Роль электрокинетических явлений в процессах фильтрации. *Нефтяное Хозяйство*, 3, 53-56.
- БОЛЬШАКОВ, Ю.Я. 1995. Теория капиллярности нефтегазонакопления. Наука, Новосибирск.
- ИВАННИКОВ, В.И. 1995. Возможный механизм миграции и аккумуляции нефти и газа в породах-коллекторах и ловушках. *Геология нефти и газа*, 6, 19-22.
- КЕДРОВСКИЙ, О.Л., ЛЫКИН, М.С., МУСИНОВ, В.И., СИМКИН, Э.М. 1986. Исследование влияния электрического поля на фильтрацию нефти в низкопроницаемых пластах. *Нефтяное Хозяйство*, 12, 45-48.
- БАТЫРБАЕВ, М.Д., БУЛАВИН, В.Д., МАРДАНОВ, И.А., РЫБАКОВ, А.Д., СЕЛЯКОВ, В.И. 2000. Результаты применения технологии электровоздействия на месторождениях «КАЗАХОЙЛЭМБА». *Нефтяное Хозяйство*, 10, 65-68.
- ТИХОМОЛОВА, К.П. 1984. Электроосмос. Химия, Ленинград, 200.