

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ПРОНИЦАЕМЫХ ПОРИСТЫХ ПЕСЧАНИКАХ ПО ДАННЫМ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В.Л. Барабанов
Институт проблем нефти и газа РАН
e-mail: vlbarabanov@mail.ru

1. Введение

Электрокинетические явления в проницаемых пористых средах (к коим относятся и горные породы) издавна привлекали внимание специалистов по механике проницаемых пористых сред, геофизиков и инженеров-нефтяников. Прежде всего, это относится к следующим задачам:

- управление однофазными и многофазными фильтрационными потоками (см., например, [1–4]);
- сейсмoeлектрические эффекты I и II рода (см., например, [5–8]);
- предсейсмические и постсейсмические электромагнитные явления, электромагнитные предвестники землетрясений (см., например, [9–10]).

Ключевыми характеристиками электрокинетических явлений в горных породах являются параметры двойного электрического слоя на контакте минеральной фазы и насыщающего флюида. Этот слой, с одной стороны, определяет тип и степень смачиваемости минеральной фазы по отношению к насыщающему флюиду, а с другой стороны, определяет степень подвижности флюида при его фильтрационном течении в тонких поровых каналах. К определяющим параметрам двойного электрического слоя относятся:

- коэффициент электроосмоса;
- коэффициент потенциала течения;
- величина ζ -потенциала;
- характерная ширина немобильной части двойного электрического слоя, или так называемая длина Дебая.

Именно определению этих электрокинетических параметров в лабораторных экспериментах и посвящена настоящая работа. Эксперименты проводились как в режиме однофазной фильтрации водного раствора, так и в режиме фильтрации двухфазной смеси вода-керосин в соотношении 50:50. К сожалению, в исследованиях не было учтено, что эти два режима реализовывались на разных моделях терригенного насыщенного пласта.

2. Модель электрокинетических эффектов в насыщенных пористых средах

Граница минеральный скелет–жидкость в пористых средах, в частности, в горных породах, является поверхностью контакта двух фаз разного химического состава и агрегатного состояния. Вследствие различия подвижности ионов в жидкой фазе и адсорбционной способности минерального скелета, на этой поверхности возникает поперечная разность электрического потенциала и формируется двойной электрический слой.

В упрощенном изложении физика формирования двойного электрического слоя состоит в следующем [11, 12]. Если молекулы жидкости представить в виде точечных силовых центров, обладающих дипольным или квадрупольным моментом, то на поверхности жидкости эти молекулы должны выстраиваться со строго определенной, преимущественно единой ориентацией, нарушаемой малыми тепловыми флуктуациями. Благодаря этому поверхность жидкости оказывается покрытой «жестким» слоем, толщина которого равна размеру одной молекулы. Если жидкость находится в контакте с твердой фазой, обладающей адсорбционным потенциалом, избирательным к ионам определенного заряда, то вне жесткого слоя формируется размытый диффузный слой, плотность зарядов в котором убывает с увеличением расстояния от поверхности раздела фаз. Знак и величина заряда на поверхности твердой фазы зависит от ряда факторов и, прежде всего, от условий ее образования и дальнейшей эволюции. К числу этих факторов относятся: температура, давление, рН насыщающей поры жидкости, равновесной (или неравновесной) с минеральной фазой. Плотность заряда в неподвижной части двойного слоя пропорциональна концентрации электролита. В диффузной части двойного слоя плотность заряда пропорциональна корню квадратному из значения концентрации электролита. Структура и характеристики двойного электрического слоя определяют степень смачиваемости поверхности порового пространства по отношению к заполняющим поры жидкостям.

В настоящее время получила широкое распространение так называемая трехслойная модель двойного электрического слоя [4]. В случае кварца взаимодействие минеральной поверхности с водным раствором заключается в захвате протона кремнеземной группой [13], что описывается следующими уравнениями:



где K_+ и K_- – константы равновесия. За счет этих реакций на поверхности минеральной фазы формируется поверхностная плотность зарядов Q_1 . Эта плотность зарядов зависит от концентрации ионов H^+ .

Модель усложняется тем обстоятельством, что и другие ионы из электролита также могут адсорбироваться на поверхности пор. В нашем случае можно рассмотреть следующие химические реакции соли NaCl:



Из-за конечного размера адсорбированных ионов Na^+ и Cl^- возникает плотность зарядов Q_2 , которая располагается на некотором расстоянии от плоскости с плотностью зарядов Q_1 . Эта плоскость зарядов Q_2 обычно обозначается как внешняя плоскость зарядов, а плоскость зарядов Q_1 – как внутренняя плоскость зарядов. Внешняя плоскость зарядов называется слоем Штерна, ее толщина составляет порядка размера одной молекулы. Далее – к свободному электролиту – расположена диффузная зона. На некотором расстоянии от слоя Штерна она приобретает подвижность. Величина потенциала на плоскости обретения поровой жидкости подвижности обозначается как ζ -потенциал. Такая структура и называется трехслойной моделью.

Если на границе раздела между подвижной и неподвижной фазами имеется двойной электрический слой, то внешнее электрическое поле может вызвать движение первой фазы относительно второй и, наоборот, если вызвать такое движение, то возникнет разность электрического потенциала.

В соответствии с термодинамикой неравновесных процессов электрокинетические явления можно представить в линейном приближении следующей системой уравнений [14, 15]:

$$\mathbf{j} = L_{11}\mathbf{E} + L_{12}\text{grad}p, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{v} = -L_{21}\mathbf{E} - L_{22}\text{grad}p, \quad (2.6)$$

где \mathbf{j} – плотность электрического тока, A/m^2 ; \mathbf{v} – скорость фильтрации жидкости, m/c ; \mathbf{E} – напряженность электрического поля, V/m ; $\text{grad}p$ – градиент давления, Pa/m ; L_{ij} – термодинамические постоянные, причем, согласно принципу Онзагера, $L_{12}=L_{21}$. Размерности термодинамических постоянных следующие: $[L_{11}] = (Om \cdot m)^{-1} \equiv A^2 \cdot c^3 / (kg \cdot m^3)$, $[L_{22}] = m^2 / (Pa \cdot c) \equiv m^3 \cdot c / kg$, $[L_{12}] = [L_{21}] = A / (Pa \cdot m) \equiv A \cdot c^2 / kg$. Первый член в правой части уравнения (2.5) соответствует закону Ома, а второй член в правой части уравнения (2.6) –

закону фильтрации Дарси. Другие члены уравнений (2.5) и (2.6) с коэффициентами L_{12} и L_{21} представляют электрокинетические явления. Коэффициенты L_{ij} для насыщенной пористой среды определяются формулами:

$$L_{11}=m\sigma, L_{12}=L_{21}=L=m\epsilon\epsilon_0\zeta/\mu, L_{22}=k/\mu, \quad (2.7)$$

где ζ – электрокинетический потенциал, В; m – пористость; k – проницаемость, м²; μ – динамическая вязкость флюида, Па·с; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость; $\epsilon_0=8.85 \cdot 10^{-12}$ Кл/(В·м) – электрическая постоянная; σ – удельная электропроводность, (Ом·м)⁻¹. Формула, связывающая перекрестные коэффициенты Онзагера L_{12} и L_{21} с ζ -потенциалом, называется уравнением Гельмгольца-Смолуховского и была выведена для системы капиллярных трубок. Поэтому к горным породам, обладающим значительно большей сложностью структуры порового пространства, она применима только приближенно.

По величинам перекрестных коэффициентов Онзагера L_{12} и L_{21} можно рассчитать коэффициент потенциала течения

$$K_S=E/\text{grad}p=L_{12}/\sigma \quad (2.8)$$

и коэффициент электроосмоса

$$K_E=\text{grad}p/E=L_{21}\mu/k. \quad (2.9)$$

3. Эксперименты с однофазной фильтрацией воды

В серии лабораторных экспериментов была проведена оценка электрокинетических коэффициентов \tilde{L} и ζ -потенциала вблизи поверхности пор песчаника, насыщенных водным раствором электролита.

Модель пласта была собрана из пяти образцов керна, представленного пористыми массивными песчаниками. Общая длина модели – 50 см, общий объем ~330 см³, площадь поперечного сечения ~6.6 см². В экспериментах по однофазной фильтрации измерялось поровое давление в четырех точках вдоль модели (т.е. на двух базах внутри модели). Длина первой базы составляла 0.205 м, длина второй базы – 0.068 м. Внутри первой базы проводилось электрическое зондирование на постоянном токе. Расстояние между соседними измерительными электродами составляло 0.02 м, расстояние между крайними электродами питания – 0.09 м. Общая схема модели пласта с указанием расположения датчиков давления и внутренних электродов показана на рис. 1 (см. Приложение).

Пористость модели, в целом, возрастала от входа к выходу и на разных интервалах варьировала от 0.103 до 0.160.

Для определения проницаемости в модель закачивался водный раствор NaCl с минерализацией 7.4–7.6 г/л. После прокачки с расходами 0.2, 0.3 и 0.4 см³/мин (при этом суммарный объем прокаченной жидкости составил 17 поровых объемов модели) проницаемость модели пласта на базе 1–2 составляла 25.0 мД, на базе 3–4 – 12.1 мД.

В последующих циклах однофазной фильтрации проводилось определение электрокинетических коэффициентов насыщенного пористого песчаника. Сила тока питания составляла 125 или 375 мкА, причем полярность тока после каждого из измерений, дискретность которых была равна 1 мин., менялась на обратную. Согласно расчетам по принципиальной электрической схеме модели пласта (см. рис. 1, Б), величина тока в интервале измерений порового давления 1–2 составляла, соответственно, 72.3 мкА и 215.5 мкА, а в интервале измерений порового давления 3–4 – соответственно, -12.9 мкА и -38.8 мкА. Знак «минус» означает, что направление тока в интервалах 1–2 и 3–4 было противоположным. Соответственно и средние величины градиентов давления на этих базах имели разные знаки. Пример графиков накопления перепадов давления при смене полярности тока питания показан на рис. 2.

Из уравнений (2.5)–(2.6) несложно получить следующую формулу для определения электрокинетического коэффициента L :

$$L = (1/2) \cdot k\sigma(\text{grad}p^+ - \text{grad}p^-) / \mu j_e, \quad (3.1)$$

где j_e – плотность тока между точками 1–2 или 3–4, а верхние индексы градиентов давления означают полярность общего тока питания.

Полученные оценки величин $\text{grad}p^+ - \text{grad}p^-$ для разных токов питания приведены в табл. 1. Очевидно, что при величине тока 125 мкА электрокинетический эффект приводит к изменению скорости фильтрации водного раствора в песчанике при вариациях тока питания ± 125 мкА на ± 0.6 %, а при вариациях ± 375 мкА приблизительно втрое больше.

Таблица 1

Расчеты электрокинетических коэффициентов

| I_0 , мкА | I_{1-2} , мкА | I_{3-4} , мкА | $(\nabla p^+ - \nabla p^-)_{1-2}$, Па/м | $(\nabla p^+ - \nabla p^-)_{3-4}$, Па/м | \tilde{L}_{1-2} , А·с ² /кг | \tilde{L}_{3-4} , А·с ² /кг |
|-------------|-----------------|-----------------|--|--|--|--|
| 125 | 72.3 | -12.9 | $3.43 \cdot 10^3$ | $-4.01 \cdot 10^3$ | $2.01 \cdot 10^{-9}$ | $6.38 \cdot 10^{-9}$ |
| 375 | 215.5 | -38.8 | $8.60 \cdot 10^3$ | $-11.53 \cdot 10^3$ | $1.69 \cdot 10^{-9}$ | $6.10 \cdot 10^{-9}$ |

Удельная электрическая проводимость σ в момент времени i с учетом последовательной переполюсовки тока питания определялась по электрическому сопротивлению R на базе измерений

$$R_i = (U_{i-1} - 2U_i + U_{i+1}) / (I_{i-1} - 2I_i + I_{i+1}), \quad (3.2)$$

где U_i – разность потенциалов между электродами в момент времени i ; I_i – сила тока между электродами.

Величина удельной электрической проводимости определялась только на базе P1-P2 и составляла приблизительно $0.05 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$. Предполагалось, что на базе P3-P4 удельная электрическая проводимость имеет такую же величину.

Результаты расчетов электрокинетических коэффициентов представлены в табл. 1. Для дальнейших оценок можно использовать следующие приближенные величины:

$$\tilde{L}_{1-2} = (1.80 \pm 0.15) \cdot 10^{-9} \text{ А}\cdot\text{с}^2/\text{кг} \text{ и } \tilde{L}_{3-4} = (6.25 \pm 0.15) \cdot 10^{-9} \text{ А}\cdot\text{с}^2/\text{кг}.$$

Величина ζ -потенциала рассчитывалась по формуле:

$$\zeta = L\mu / m\epsilon\epsilon_0. \quad (3.3)$$

Величина диэлектрической проницаемости водного раствора предполагалась равной $\epsilon = 81$, вязкость воды $\mu = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. В результате получены следующие оценки: $\zeta_{1-2} = -25 \pm 2 \text{ мВ}$, $\zeta_{3-4} = -63 \pm 2 \text{ мВ}$.

Полученные оценки ζ -потенциалов совпадают по порядку величин с известными величинами для осадочных горных пород [4, 12, 16]. Более того, получилось, что чем ниже проницаемость, тем больше величина ζ -потенциала, поскольку проницаемость на базе P1-P2 составляла 25.0 мД , а на базе P3-P4 – 12.1 мД , хотя формально (см. формулу 3.3) ζ -потенциал не зависит от проницаемости. Между тем, такая зависимость была экспериментально обнаружена и ранее [17, 18].

По полученным оценкам можно рассчитать также коэффициент потенциала течения и коэффициент электроосмоса. Соответственно, для интервала 1–2 получим $K_S = (3.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{А}\cdot\text{с}$, или $\sim 3.6 \text{ мВ/атм}$; $K_E = 74 \pm 6 \text{ А}\cdot\text{с}/\text{м}^3$ (или Па/В), или $\sim 0.074 \text{ атм}/100 \text{ В}$. Интересно, что величина коэффициента K_S почти точно совпадает с оценкой этого коэффициента, полученной в динамических электрокинетических испытаниях песчаника, насыщенного 0.1 М водным раствором [19], а величина K_E оказалась на порядок выше. Отметим, что проницаемость песчаника, с которым проводились динамические электрокинетические эксперименты в указанной выше работе, составляла приблизительно 1 Д , что намного выше, чем проницаемость использованной нами модели пласта.

Дополнительно из полученных данных можно рассчитать величину x_d – «длину Дебая», которая представляет собой характерную ширину диффузной части двойного электрического слоя [4]

$$x_d = (\epsilon_f k_b T / 2 e^2 C_f)^{1/2}, \quad (3.4)$$

где ϵ_f – диэлектрическая константа электролита ($\epsilon_f = 80 \cdot \epsilon_0$ для воды, $\epsilon_0 = 8.84 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); k_b – постоянная Больцмана ($1.381 \cdot 10^{-23}$ Дж/°К); T – температура (по Кельвину); e – элементарный заряд электрона ($1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл); C_f – соленость (м^{-3}). Соленость связана с молярной концентрацией ионов M формулой $C_f = 10^3 M \cdot N$, где N – число Авогадро. Для концентрации используемого в экспериментах водного раствора электролита NaCl ~ 0.13 моль/л получим оценку длины Дебая $x_d \approx 0.815$ нм.

4. Эксперименты с двухфазной фильтрацией смеси вода-нефть

Модель пласта была собрана из трех образцов песчаников длиной от 10 до 25 см и диаметром 29 мм. Общая длина модели составляла 50 см, площадь поперечного сечения ~ 6.6 см², общий объем ~ 330 см³. Равномерно по длине модели с шагом приблизительно 6.5 см были расположены семь кольцевых электродов. Внешние два электрода 1 и 7 были использованы как питающие, внутренние электроды 2–6 – как измерительные. Наиболее достоверные измерения электрических параметров были сделаны на базах электродов 2–3 и 5–6, поскольку обе указанных пары принадлежали единым образцам керн. Между этими образцами находился еще один образец, на котором был смонтирован электрод 4. Сила тока питания составляла 100 мкА, причем направление тока после каждого из измерений, дискретность которых была равна 30 с, менялось на противоположное.

Предварительно была определена абсолютная газопроницаемость модели по гелию. Температура модели во время этого испытания – ~ 18 °С. Средняя величина абсолютной газопроницаемости модели составила 3.9 Д. Такая большая величина не удивительна – для экспериментов были специально отобраны крупнопористые и высокопроницаемые песчаники.

После определения газопроницаемости модель была заполнена водой, а затем проводилось вытеснение воды смесью вода-керосин. В качестве рабочей вытесняющей жидкости использовалась смесь вода-керосин с плотностями фаз, соответственно, ~ 1.0 и ~ 0.8 г/см³. Давление жидкости измерялось на входе и выходе модели. Эксперименты были поставлены таким образом, что на выходе модели создавалось противодавление, которое за четыре проведенных цикла фильтрации монотонно увеличивалось. Суммарный расход

смеси вода-керосин, равный $0.8 \cdot 10^{-2}$ см³/с, поддерживался постоянным при проведении всех четырех циклов экспериментов. Скорость фильтрации при этом составляла $\sim 1.2 \cdot 10^{-3}$ см/с или ~ 0.73 мм/мин. Истинная скорость течения смеси с учетом пористости модели 0.18–0.21 соответственно – $\sim 6.1 \cdot 10^{-3}$ см/с или ~ 3.6 мм/мин.

Общие результаты экспериментов показаны на рис. 3. Верхние четыре графика показывают рост давления на входе и выходе модели в течение последовательных четырех циклов фильтрации. Как видно, противодействие на выходе модели постепенно увеличивалось и слегка понижалось в перерывах между циклами экспериментов.

Следующие четыре графика, расположенные ниже, показывают вариации перепада давления на модели (база 500 мм). Очевидно, что перепад давления прямо не коррелирует с ростом противодействия: если в первом цикле он быстро стабилизировался на уровне ~ 0.80 атм, то в следующем цикле понизился до ~ 0.72 атм, а в третьем и четвертом циклах наблюдался затухающий по скорости рост перепада давления, причем если в 3-ем цикле – от ~ 0.80 до ~ 0.95 атм, то в 4-ом цикле – ниже – от ~ 0.75 до ~ 0.90 атм. Трудно однозначно указать причину такого «необычного» поведения перепада давления на модели, поскольку режим нагнетания смеси вода-керосин сохранялся неизменным. Можно лишь предположить, что из-за общего роста порового давления и постепенного снижения водонасыщенности структура двухфазного фильтрационного потока менялась, т.е. менялось соотношение застойных и проточных зон и каналов фильтрации воды и керосина. Такое предположение, несмотря на явную гипотетичность, все же не противоречит общей феноменологии двухфазных фильтрационных течений в проницаемых пористых средах.

Следующие четыре графика, расположенные в третьем ряду сверху, показывают оценки вариаций разности градиентов давлений, соответствующих двум полярным направлениям электрического тока. При проведении этих оценок использовались различные процедуры усреднения и сглаживания, тем не менее, наблюдалось резкое отличие поведения указанного параметра в первых двух и во вторых двух циклах: если в первых двух циклах указанный параметр имел положительную величину (что соответствовало отрицательной величине ζ -потенциала), то во вторых двух циклах этот параметр варьировал около 0, имея тенденцию принимать даже отрицательное значение.

И, наконец, четыре графика в самом нижнем ряду рис. 3 показывают вариации электрического сопротивления на измерительной базе 260 мм. Здесь общая тенденция

более простая: наблюдается монотонный рост сопротивления. Самым логичным объяснением этой тенденции является постепенное снижение доли воды в поровом пространстве за счет насыщения пор керосином. Тем не менее, это не совсем увязывается с тенденциями по общему перепаду давления и разности градиентов давления.

Один из самых главных и необычных результатов анализируемых экспериментов состоит в следующем. Наблюдается четкая обратная зависимость между разностью градиентов порового давления при разном направлении электрического тока и общим перепадом давления на входе и выходе модели. Эта зависимость показана на рис. 4. Простейшая интерпретация этой зависимости такова: с ростом фильтрационного сопротивления величина электрокинетического коэффициента \tilde{L} снижается, причем со сменой знака. С учетом базы, на которой определялся перепад давления, равной 500 мм, наклон графика на рис. 4 составляет $\sim -0.71 \cdot 10^{-2}$.

5. Обсуждение результатов экспериментов

Полученные в экспериментах с однофазной фильтрацией водного раствора оценки ζ -потенциалов необходимо рассматривать как очень приблизительные, что связано со следующими причинами.

При проведении оценки электрокинетических коэффициентов обязательно необходимо учитывать сложный характер электрической проводимости насыщенной пористой среды. В первом приближении общая электрическая проводимость складывается из следующих четырех составляющих.

1) Электрическая проводимость твердой кристаллической матрицы. Как правило, эта составляющая, по природе своей, является преимущественно электронной проводимостью.

2) Электрическая проводимость водного раствора, заполняющего связные поры и поровые каналы. Как правило, эта составляющая, по природе своей, является ионной проводимостью. Свободные ионы в растворе движутся в направлении к питающим электродам в зависимости от знака заряда, т.е., очевидно, навстречу друг другу. Если предположить, что элементарный объем разнозаряженных ионов приблизительно одинаков, то вклад этого типа проводимости в массоперенос нулевой.

3) Электрическая проводимость подвижной части двойного электрического слоя. Эта подвижная часть двойного слоя, по определению, состоит из ионов одного знака

заряда, поэтому именно этот тип проводимости преобладающе влияет на коэффициент массопереноса.

4) Электрическая проводимость неподвижной части двойного электрического слоя. Эта часть слоя также состоит из ионов одного знака заряда, и проводимость определяется трансляционным движением этих ионов относительно друг друга.

В экспериментах по двухфазной фильтрации наиболее важными представляются два результата. Во-первых, это резкое снижение величины электрокинетического коэффициента Онзагера при замене режима фильтрации от однофазной к двухфазной. Во-вторых, это смена знака этого коэффициента, обусловленное, вероятно, сменой знака ζ -потенциала.

Первый эффект, т.е. резкое снижение величины электрокинетического коэффициента Онзагера при замене режима от водонасыщенности к нефтенасыщенности является твердо установленным экспериментальным фактом. В частности, согласно работе [19], снижение величины электрокинетического коэффициента для песчаника, начально насыщенного водным раствором, а затем нефтью, может достигать трех порядков.

Второй эффект, т.е. смена знака электрокинетического коэффициента, также наблюдался в экспериментах, в частности, при изменении концентрации раствора электролита. Было отмечено, что с увеличением концентрации фонового (индифферентного, электронейтрального) электролита ζ -потенциал уменьшается вследствие сжатия диффузной зоны двойного электрического слоя. Зависимость ζ -потенциала от концентрации электролитов, насыщенных потенциал-определяющих ионов сложнее. Как правило, при ее увеличении ζ -потенциал по абсолютной величине сначала уменьшается и, проходя через ноль, возрастает до некоторого значения, после чего вновь убывает [20]. Такой вид зависимости объясняют двояким влиянием потенциал-определяющих ионов на двойной электрический слой. С одной стороны, вследствие их специфической адсорбции изменяется заряд неподвижной части двойного электрического слоя как по величине, так и по знаку. Общий заряд ионов в неподвижном слое может оказаться больше заряда поверхности минеральной фазы. С другой стороны, эти ионы могут также оказывать влияние на заряд диффузной зоны двойного электрического слоя.

В нашем случае – случае двухфазной фильтрации смеси вода-керосин через начально гидрофильную пористую среду – водный электролит, с одной стороны

взаимодействует с поверхностью минеральной фазы, а с другой стороны, – с поверхностью керосина. Рост перепада давления указывает на постепенное снижение фазовой проницаемости по воде. Не исключено также, что при таком режиме двухфазной фильтрации происходит частичная гидрофобизация поверхности минеральной фазы с резким изменением ее адсорбционных свойств. Этот эффект, в частности, детально обсуждается в работе [21].

6. Заключение и выводы

В серии лабораторных экспериментов по однофазной фильтрации водного раствора электролита через образцы песчаников получены оценки ζ -потенциала двойного электрического слоя и коэффициентов потенциала течения и электроосмоса. Эти оценки совпадают по величине с известными аналогичными оценками, полученными для того же типа горных пород другими независимыми методами. Полученные величины могут быть использованы для интерпретации натуральных электрокинетических экспериментов.

В серии лабораторных экспериментов по двухфазной фильтрации смеси вода-керосин через образцы начально гидрофильного песчаника обнаружено постепенное снижение абсолютной величины ζ -потенциала со снижением фазовой проницаемости по воде и соответствующем росте градиента давления. Зафиксирован момент смены знака ζ -потенциала – от отрицательного к положительному при достижении критического градиента порового давления. Этот эффект также наблюдался в известных независимых экспериментах и объясняется специфической адсорбцией ионов электролита, а также, возможно, частичной гидрофобизацией поверхности минеральной фазы.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Исследование термодинамических свойств углеводородных смесей в околокритической области и моделирование гидротермодинамических, физико-химических и геомеханических процессов в геосредах с целью повышения эффективности разработки трудноизвлекаемых запасов нефти и газа», № АААА-А16-116030110081-2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Геннадиник Б.И. Потенциалы фильтрации в гетерогенной среде // Физика Земли. 1990. № 7. С. 102–106.
2. Саяхов Ф.Л., Ковалева Л.А., Насыров Н.М. Тепломассоперенос в системе скважина-пласт при электромагнитном воздействии на массивные нефтяные залежи // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75, № 1. С. 95–99.

3. *Фатыхов М.А.* Фильтрация высоковязкой нефти в электромагнитном поле // Инженерно-физический журнал. 2004. Т. 77, № 2. С. 13–16.
4. *Шелухин В.В., Амира Ю.В.* О течении электролитов в пористой среде // Прикладная механика и теоретическая физика. 2008. Т. 49, № 4. С. 162–173.
5. *Черняк Г.Я.* О физической природе сейсмoeлектрического эффекта горных пород // Физика Земли. 1976. № 2. С. 108–112.
6. *Светов Б.С., Губатенко В.П.* Электромагнитное поле механо-электрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. I. Постановка задачи // Физика Земли. 1990. № 10. С. 67–73.
7. *Агеева О.А., Светов Б.С., Шерман Г.Х., Шипулин С.В.* Сейсмoeлектрический эффект второго рода в горных породах (по данным лабораторных экспериментов) // Геология и геофизика. 1990. Т. 40, № 8. С. 1251–1257.
8. *Багдоев А.Г., Шекоян А.В.* Нелинейные акустoeлектрические волны в пористых средах, заполненных электропроводящей жидкостью // Нелинейный мир. 2008. Т. 6, № 5–6. С. 314–323.
9. *Соболев Г.А., Демин В.М.* Механоэлектрические явления в Земле. М.: Наука. 1980. 215 с.
10. *Surkov V.V., Pilipenko V.A.* Estimate of ULF electromagnetic noise caused by fluid flow during seismic or volcano activity // Annals of Geophysics. 2015. Vol. 58, № 6. S0655.
11. *Френкель Я.И.* Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука. 1975. 592 с.
12. *Нюссик Я.М., Комов И.Л.* Электрохимия в геологии. Л.: Наука. 1981. 240 с.
13. *Glover P., Meredith P., Sammonds P., Murell S.* Ionic surface conductivity in sandstone // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. P. 21635–21650.
14. *Мигунов Н.И.* Влияние электрокинетических свойств горных пород на скорость распространения сейсмoeлектрических сигналов // Физика Земли. 1978. № 5. С. 52–56.
15. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра. 1996. 448 с.
16. *Кузнецов О.Л., Симкин Э.М.* Преобразование и взаимодействие геофизических полей в литосфере. М.: Недра. 1990. 260 с.
17. *Lorne B., Frederic P., Avouac J.-Ph.* Streaming potential measurements. 1. Properties of the electrical double layer from crushed rock samples // Jour. Geophys. Res. 1999. Vol. 104, № B8. P. 17857–17877.

18. *Lorne B., Frederic P., Avouac J.-Ph.* Streaming potential measurements. 2. Relationship between electric and hydraulic flow patterns from rock samples during deformation // *Jour. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, № B8. P. 17879–17896.

19. *Jiang Y., Shan F., Jin H., Zhou L., Sheng P.* A method for measuring electrokinetic coefficients of porous media and its potential application in hydrocarbon exploration // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25, № 10. P. 1581–1584.

20. *Алтунина Л.К., Кувшинов В.А.* Увеличение нефтеотдачи пластов композициями ПАВ. М.: Наука. 1995. 198 с.

21. *Jackson M.D., Vinogradov J.* Characterisation of surface electrical charge and wettability in carbonates with application to controlled salinity waterflooding // AAPG Hedberg Conference, Fundamental Controls on Flow in Carbonates, July 8–13, 2012, Saint-Cyr Sur Mer. Provence, France, AAPG©2012.

ПРИЛОЖЕНИЕ

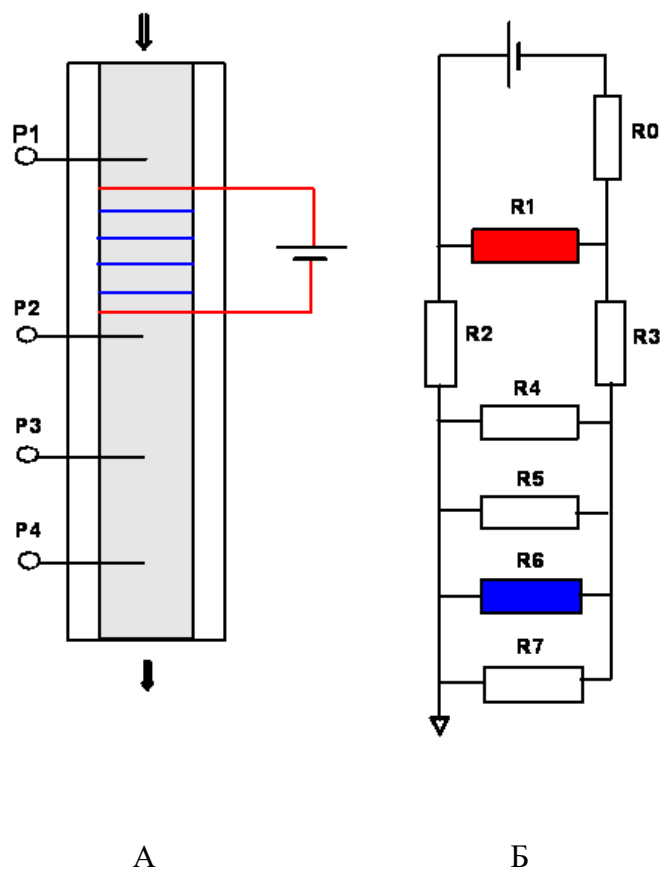


Рис. 1. Общая схема модели пласта: А – принципиальная схема лабораторных экспериментов по оценке электрокинетических параметров образцов песчаников (в кернодержателе, поровое давление при фильтрации водного раствора сверху вниз регистрировалось в четырех внутренних точках P1-P4, между точками P1 и P2 была смонтирована схема электрического зондирования, внешние электроды – питающие, внутренние электроды – приемные); Б – принципиальная электрическая схема модели пласта (сопротивлениями R1-R7 обозначены разные участки модели, в частности, сопротивление R1 соответствует интервалу P1-P2, сопротивление R6 – интервалу P3-P4, направление электрического тока на этих интервалах противоположное)

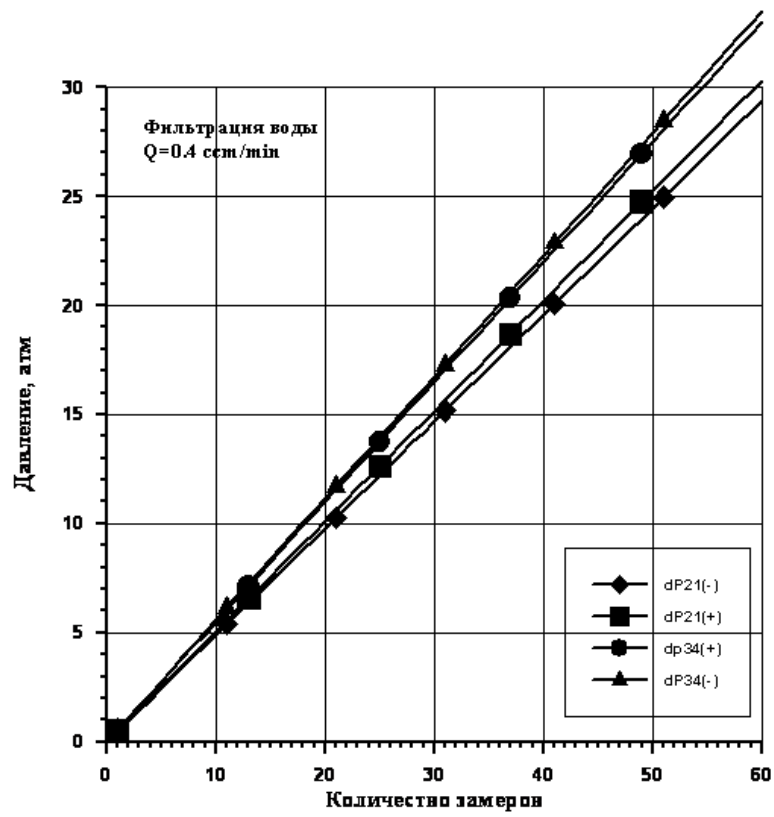


Рис. 2. Результат накопления разности порового давления в интервалах P1-P2 и P3-P4 при смене полярности тока питания в течение эксперимента

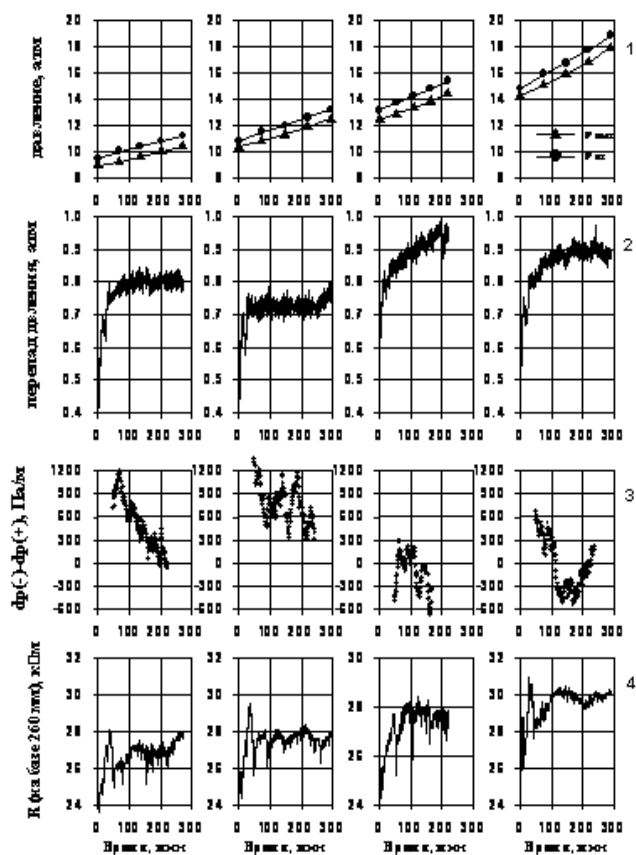


Рис. 3. Результаты эксперимента по несмешивающемуся вытеснению из образца песчаного коллектора воды водонефтяной смесью: 1 – рост порового давления на входе и выходе модели коллектора; 2 – перепад порового давления внутри модели пласта; 3 – изменение градиента порового давления при разном направлении электрического тока; 4 – электрическое сопротивление внутри модели пласта

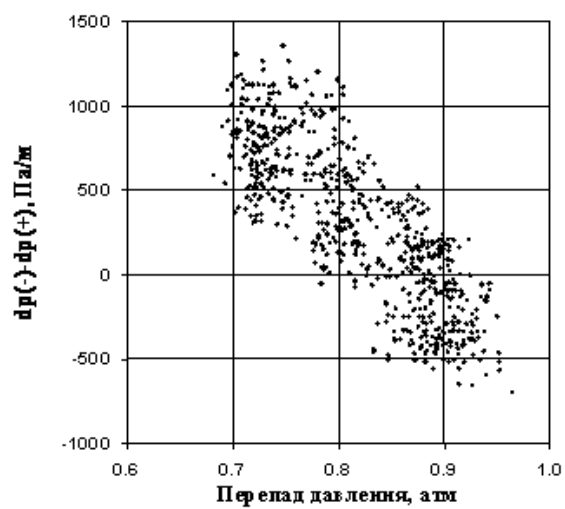


Рис. 4. Двухфазная фильтрация смеси вода–керосин в соотношении 50:50. Зависимость разностей перепада давления при смене полярности тока от среднего перепада давления