

УДК 550.370

ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕСЧАНИКОВ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В РЕЖИМАХ ОДНОФАЗНОЙ И ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

© 2018 г. В.Л. Барабанов

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия

Эксперименты по оценке электрокинетических параметров пористых проницаемых горных пород проводились на образцах песчаника в двух режимах стационарной фильтрации – однофазной фильтрации водного раствора электролита и двухфазной фильтрации смеси вода–керосин в соотношении 50:50. Получены оценки величин ζ -потенциала двойного электрического слоя, а также коэффициентов потенциала течения и электроосмоса, которые в целом согласуются с известными оценками, выполненными традиционными методами.

При экспериментах в режиме двухфазной фильтрации с ростом градиента давления на модели зафиксировано монотонное снижение значений электрокинетических параметров, сопровождаемое сменой знака. Этот эффект объясняется специфической адсорбцией потенциалобразующих ионов и, возможно, частичной гидрофобизацией поверхности минеральной фазы.

Ключевые слова: горные породы, электрокинетика, потенциал течения, одно- и двухфазная фильтрация, двойной электрический слой, ζ -потенциал, лабораторные эксперименты.

Введение

Электрокинетические явления в проницаемых пористых средах, к коим относятся и горные породы, издавна привлекали внимание геофизиков, вызывая прежде всего интерес к следующим задачам:

– управление однофазными и многофазными фильтрационными потоками (см., например, [Геннадиник, 1990; Antraygues, Aubert, 1993; Хабибуллин, 1999; Panakhov, Mirzadjanov, 1999; Revil, Pezard, Glover, 1999; Bo, Choa, Zeng, 2001; Geindreal, Auriault, 2001; Моуне, Murad, 2002; Саяхов, Ковалева, Насыров, 2002; Фатыхов, 2004; Валова, 2006; Блохин, Семенко, 2007; Шелухин, Амира, 2008; Долгов, 2009; Khair, Squires, 2009; Jian, Yang, Liu, 2010; Roubinet et al., 2016]);

– сейсмoeлектрические эффекты I и II рода (см., например, [Long, Rivers, 1975; Черняк, 1976; Светов, Губатенко, 1990; Агеева и др., 1999; Багдоев, Шекоян, 2008; Kondrat, Tvardovska, 2009; Sava, Revil, 2012; Warden et al., 2012, 2013; Guan, Hu, Zheng, 2013; Jougnot et al., 2013; Matsushima et al., 2013; Guan et al., 2015; Fujinawa, Noda, 2016; Ren, Huang, Chen, 2016; Wang et al., 2016]);

– пред- и постсейсмические электромагнитные явления, электромагнитные предвестники землетрясений (см., например, [Соболев, Демин, 1980; Enomoto, 2012; Натяганов, Скибицкий, 2013; Kushwan et al., 2013; Du et al., 2014; Пантелеев, Гаврилов, 2015; Donner et al., 2015; Kachakhidze, Kachakhidze, Kaladze, 2015; Surkov, Pilipenko, 2015; Богомолов и др., 2016; Зейгарник и др., 2016]).

Ключевыми параметрами 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, определяет степень подвижности флюида при его фильтрационном течении в тонких поровых каналах. К определяющим параметрам двойного электрического слоя относятся коэффициенты электроосмоса и потенциала течения; величина ζ -потенциала; характерная ширина немобильной части двойного электрического слоя (так называемая длина Дебая).

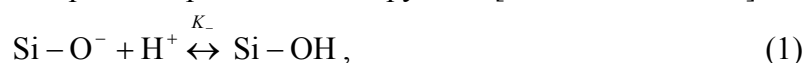
Определению именно этих электрокинетических параметров в лабораторных условиях и посвящена настоящая работа. Эксперименты проводились в двух режимах – в режиме однофазной фильтрации водного раствора и в режиме двухфазной фильтрации смеси вода–керосин в соотношении 50:50.

Модель электрокинетических эффектов в насыщенных пористых средах

Граница между минеральным скелетом и жидкостью в пористых средах, в частности, в горных породах, соответствует поверхности 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.

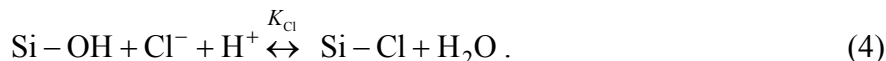
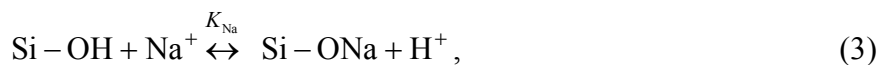
В упрощенном изложении физика формирования двойного электрического слоя состоит в следующем [Френкель, 1975; Нюссик, Комов, 1981]. Если молекулы жидкости представить в виде точечных силовых центров, обладающих дипольным или квадрупольным моментом, то на поверхности жидкости эти молекулы должны выстраиваться 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 зависят от ряда факторов и, прежде всего, от условий ее образования и дальнейшей эволюции. К числу этих факторов относятся также температура, давление, рН насыщающей поры жидкости, равновесной (или неравновесной) с минеральной фазой. В неподвижной части двойного слоя плотность заряда пропорциональна концентрации электролита; в диффузной части она пропорциональна квадратному корню из 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 [Davis, James, Leckie, 1978; Lorne, Frederic, Avouac, 1999]. В случае кварца взаимодействие минеральной поверхности с водным раствором заключается в захвате протона кремнеземной группой [Glover et al., 1994]:



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

Модель усложняется тем, 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^- возникнет плоскость с плотностью зарядов Q_2 , удаленная на некоторое расстояние от плоскости с плотностью зарядов Q_1 . Плоскость с плотностью зарядов Q_2 обычно обозначается как внешняя плоскость зарядов, а с плотностью Q_1 – как внутренняя. Внешняя плоскость зарядов называется слоем Штерна, толщина этого слоя близка к размеру одной молекулы. Далее по направлению к свободному электролиту расположена диффузная зона, приобретающая на некотором расстоянии от слоя Штерна подвижность. Величина потенциала на плоскости обретения подвижности поровой жидкостью обозначается как ζ -потенциал. Описанная структура и называется трехслойной моделью.

Если на границе раздела между подвижной и неподвижной фазами существует 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 в линейном приближении могут быть представлены следующей системой уравнений [Мигунов, 1978; Николаевский, 1996]:

$$\mathbf{j} = L_{11}\mathbf{E} + L_{12}\nabla p, \quad (5)$$

$$\mathbf{v} = -L_{21}\mathbf{E} - L_{22}\nabla p, \quad (6)$$

где \mathbf{j} – плотность электрического тока, А/м^2 ; \mathbf{v} – скорость фильтрации жидкости, м/с ; \mathbf{E} – напряженность электрического поля, В/м ; ∇p – градиент давления, Па/м ; L_{ij} – термодинамические постоянные (согласно принципу Онзагера, $L_{12}=L_{21}$). Термодинамические постоянные имеют следующие размерности: $[L_{11}]=(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}\equiv\text{А}^2\cdot\text{с}^3/(\text{кг}\cdot\text{м}^3)$; $[L_{22}]=\text{м}^2/(\text{Па}\cdot\text{с})\equiv\text{м}^3\cdot\text{с}/\text{кг}$; $[L_{12}]=[L_{21}]=\text{А}/(\text{Па}\cdot\text{м})\equiv\text{А}\cdot\text{с}^2/\text{кг}$. Первый член в правой части уравнения (5) соответствует закону Ома, второй в правой части уравнения (6) – закону фильтрации Дарси. Другие члены уравнений (5) и (6) с коэффициентами L_{12} и L_{21} представляют электрокинетические явления.

Коэффициенты L_{ij} для насыщенной пористой среды определяются формулами

$$L_{11} = m\sigma, \quad L_{12} = L_{21} = \tilde{L} = \frac{m\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\mu}, \quad L_{22} = \frac{k}{\mu}, \quad (7)$$

где ζ – электрокинетический потенциал, В; m – пористость; k – проницаемость, м^2 ; μ – динамическая вязкость флюида, $\text{Па}\cdot\text{с}$; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; $\varepsilon_0=8.85\cdot 10^{-12}$ Кл/(В·м) – электрическая постоянная; σ – удельная электропроводность, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$.

Формула, связывающая перекрестные коэффициенты Онзагера L_{12} и L_{21} с ζ -потенциалом, называемая уравнением Гельмгольца–Смолуховского, была выведена для системы капиллярных трубок. Поэтому к горным породам, обладающим значительно более сложной структурой порового пространства, она может быть применима только приближенно.

По величинам перекрестных коэффициентов Онзагера L_{12} и L_{21} можно рассчитать коэффициент потенциала течения K_S и коэффициент электроосмоса K_E [Jiang et al., 1998]:

$$K_S = \frac{\mathbf{E}}{\nabla p} = \frac{L_{12}}{\sigma}, \quad (8)$$

$$K_E = \frac{\nabla p}{\mathbf{E}} = \frac{L_{21}\mu}{k}. \quad (9)$$

Эксперименты с однофазной фильтрацией водного раствора электролита

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

Модель пласта была составлена из пяти образцов керна, представленных пористыми массивными песчаниками. Общая длина модели – 50 см, общий объем – $\sim 330 \text{ см}^3$, площадь поперечного сечения – около 6.6 см^2 . Схема модели пласта с указанием расположения датчиков давления $P1-P4$ и внутренних электродов показана на рис. 1, *слева*. В экспериментах в режиме однофазной фильтрации измерялось поровое давление в четырех точках вдоль модели $P1-P4$, т.е. на двух базах внутри неё. Длина первой базы составляла 20.5 см, второй – 6.8 см. Внутри первой базы проводилось электрическое зондирование на постоянном токе. Расстояние между соседними измерительными электродами составляло 2 см, между крайними питающими – 9 см. Электроды питания и измерительные электроды были изолированы от корпуса кернодержателя, с которым контактировали только датчики измерения давления $P1-P4$ и вход модели. При фильтрации водного раствора в направлении сверху вниз в кернодержателе поровое давление регистрировалось в четырех внутренних точках $P1-P4$. Между точками $P1$ и $P2$ была смонтирована схема электрического зондирования, внешние электроды которой были питающими, внутренние – приемными. С учетом этого построена эквивалентная электрическая схема установки, показанная на рис. 1, *справа*. Сопротивлениями $R1-R7$ обозначены разные участки модели – сопротивление $R1$ соответствует интервалу $P1-P2$, сопротивление $R6$ – интервалу $P3-P4$; направление электрического тока на этих интервалах противоположное. Пористость модели 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 $\text{см}^3/\text{мин}$ (при этом суммарный объем прокаченной жидкости составил 17 поровых объемов модели) проницаемость модели пласта на базе $P1-P2$ составляла 25.0 мД, на базе $P3-P4$ – 12.1 мД. В последующих циклах однофазной фильтрации определялись электрокинетические коэффициенты насыщенного пористого песчаника. Сила тока питания составляла 125 или 375 мкА; измерения выполнялись с дискретностью 1 мин; после каждого измерения полярность тока менялась на обратную.

Согласно расчетам по эквивалентной электрической схеме модели пласта (см. рис. 1, *справа*), величина тока в интервале измерений порового давления $P1-P2$ при величине тока питания 125 мкА составляла 72.3 мкА, а при 375 мкА – 215.5 мкА; в интервале измерений порового давления $P3-P4$ – соответственно, –12.9 мкА и –38.8 мкА. Знак “минус” означает, что направление тока в интервале $P1-P2$ было противоположным направлению в интервале $P3-P4$, в соответствии с чем средние величины градиентов давления на этих базах имели разные знаки.

Пример графиков накопления перепадов давления при смене направления тока питания приведен на рис. 2.

Рис. 1. Принципиальная схема лабораторных экспериментов по оценке электрокинетических параметров образцов песчаников (слева) и эквивалентная электрическая схема модели пласта (справа)

Fig. 1. Principle scheme of the laboratory tests for the estimation of the electrokinetic parameters for sands (left) and the equivalent electric scheme of the reservoir model (right)

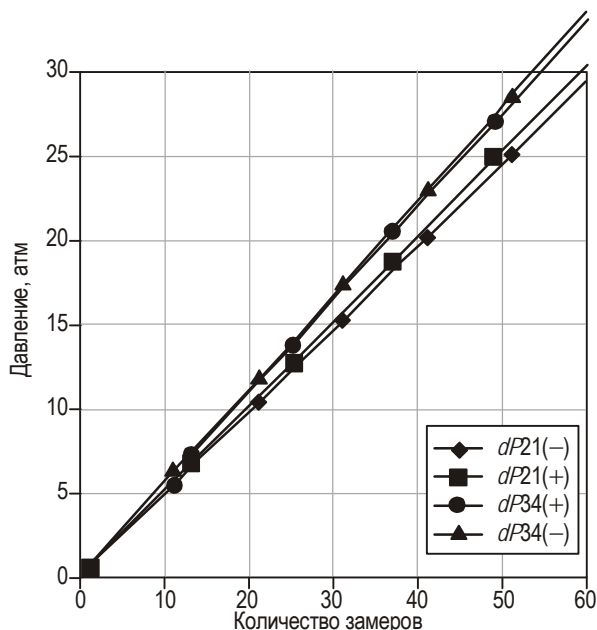
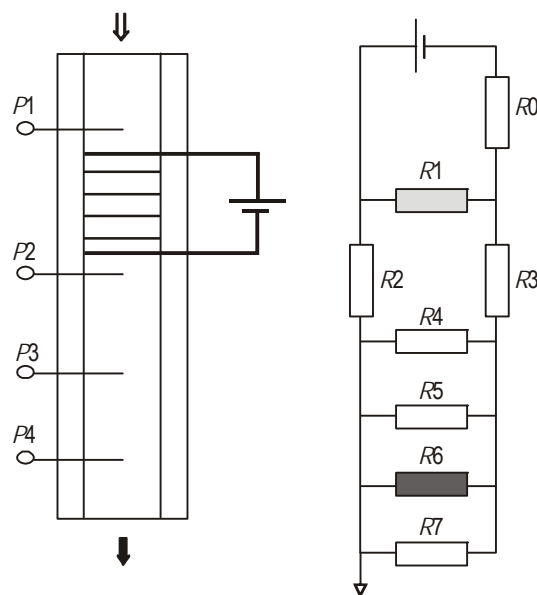


Рис. 2. Результат накопления разности порового давления в интервалах $P1-P2$ и $P3-P4$ при смене полярности тока питания в ходе эксперимента

Fig. 2. The results of the pore pressure different accumulation in intervals $P1-P2$ and $P3-P4$ under the changes of electric current polarity

Из уравнений (5)–(6) несложно получить следующую формулу для определения электрокинетического коэффициента \tilde{L} :

$$\tilde{L} = \frac{1}{2} \frac{k \sigma}{\mu j_e} (\nabla p^+ - \nabla p^-), \tag{10}$$

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 $(\nabla p^+ - \nabla p^-)$ для разных токов питания представлены в таблице.

Расчеты электрокинетических коэффициентов для разных токов питания

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	$8.60 \cdot 10^3$	$-11.53 \cdot 10^3$	$1.69 \cdot 10^{-9}$	$6.10 \cdot 10^{-9}$

Очевидно, что при вариациях тока питания ± 125 мкА электрокинетический эффект приводит к изменению скорости фильтрации водного раствора в песчанике на ± 0.6 %, а при вариациях тока питания ± 375 мкА это изменение приблизительно втрое больше.

Удельная электрическая проводимость σ в момент времени i с учетом последовательного изменения направления тока питания определялась по электрическому сопротивлению R на базе измерений как

$$R_i = \frac{U_{i-1} - 2U_i + U_{i+1}}{I_{i-1} - 2I_i + I_{i+1}}, \quad (11)$$

где U_i – разность потенциалов между электродами в момент времени i ; I_i – сила тока между электродами. Сразу после измерения этих параметров изменялось направление тока.

Величина удельной электрической проводимости определялась только на базе $P1-P2$ и составляла приблизительно 0.05 (Ом·м)⁻¹. Предполагалось, что на базе $P3-P4$ удельная электрическая проводимость такая же.

Результаты расчетов электрокинетических коэффициентов представлены в вышеприведенной таблице. Для дальнейших оценок можно использовать следующие приближенные величины: $\tilde{L}_{1-2} = (1.80 \pm 0.15) \cdot 10^{-9}$ А·с²/кг и $\tilde{L}_{3-4} = (6.25 \pm 0.15) \cdot 10^{-9}$ А·с²/кг.

Величина ζ -потенциала рассчитывалась по формуле

$$\zeta = \tilde{L} \frac{\mu}{m \epsilon \epsilon_0} \quad (12)$$

в предположении, что диэлектрическая проницаемость водного раствора ϵ равна 81, вязкость воды – 10^{-3} Па·с. В результате расчетов получены следующие оценки:

$$\zeta_{1-2} = -25 \pm 2 \text{ мВ}, \quad \zeta_{3-4} = -63 \pm 2 \text{ мВ}.$$

По порядку величин полученные значения ζ -потенциалов совпадают с их известными величинами для осадочных горных пород [Нюссик, Комов, 1981; Кузнецов, Симкин, 1990; Шелухун, Амира, 2008]. Более того, оказалось, 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 (12)) ζ -потенциал от проницаемости не зависит. Между тем, отмеченная зависимость экспериментально обнаруживалась и ранее [Lorne, Frederic, Avouac, 1999].

По полученным оценкам можно рассчитать коэффициент потенциала течения и коэффициент электроосмоса: для интервала $P1-P2$ получим $K_S = (3.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-8}$ м³/А·с, или ~ 3.6 мВ/атм; $K_E = 74 \pm 6$ А·с/м³, или ~ 0.074 атм/100 В. Интересно, что величина K_S почти точно совпадает с его оценкой, полученной в динамических электрокинетических испытаниях песчаника, насыщенным (0.1 М) водным раствором [Jiang et al., 1998], а величина K_E получилась на порядок выше. Отметим, что проницаемость песчаника, с которым проводились динамические электрокинетические эксперименты в ука-

занной выше работе, составляла приблизительно 1 Д, что намного выше, чем проницаемость модели пласта, использованной нами.

Полученные данные позволяют дополнительно рассчитать величину x_d – “длину Дебая”, представляющую собой характерную ширину диффузной части двойного электрического слоя [Revil, Darot, Pezard, 1996], –

$$x_d = \sqrt{\frac{\epsilon_f k_b T}{2e^2 C_f}}, \quad (13)$$

где ϵ_f – диэлектрическая константа электролита ($\epsilon_f = 80\epsilon_0$ 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}), связанная 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 $x_d \approx 0.815$ нм.

Эксперименты с двухфазной фильтрацией смеси вода–керосин

Модель пласта была составлена из трех образцов песчаников длиной от 10 до 25 см и диаметром 29 мм. Общая длина модели – 50 см, площадь поперечного сечения – $\sim 6.6 \text{ см}^2$, общий объем – $\sim 330 \text{ см}^3$. Равномерно по длине модели с шагом приблизительно 6.5 см были расположены семь кольцевых электродов. Внешние электроды – первый и последний (седьмой) – служили питающими, внутренние – со второго по шестой – измерительными. Наиболее достоверные измерения электрических параметров были сделаны на базах электродов “второй–третьей” и “пятой–шестой”, поскольку каждая из этих пар находится в пределах одного образца. Сила тока питания составляла 100 мкА, причем направление тока после каждого измерения, дискретность которых составляла 30 с, менялось на противоположное.

Предварительно была определена абсолютная газопроницаемость модели по гелию при температуре модели во время этого испытания ~ 18 °С. Средняя величина абсолютной газопроницаемости модели оказалась довольно большой и составила 3.9 Д, что неудивительно – для экспериментов специально отбирались крупнопористые и высокопроницаемые песчаники.

После определения газопроницаемости модель была заполнена водным раствором электролита, который затем вытеснялся смесью вода–керосин с плотностями фаз ~ 1.0 (вода) и ~ 0.8 (керосин) г/см³. Эксперименты проводились при комнатной температуре около 18 °С. Давление жидкости измерялось на входе и выходе модели. Эксперименты были поставлены таким образом, что на выходе модели создавалось противодавление, которое в течение четырех циклов фильтрации монотонно увеличивалось. При проведении всех четырех циклов экспериментов суммарный расход смеси вода–керосин поддерживался постоянным и составлял $0.8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3/\text{с}$. Скорость фильтрации при этом была $\sim 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ см}/\text{с}$ (или $\sim 0.73 \text{ мм}/\text{мин}$). Истинная скорость течения смеси с учетом пористости модели $0.18\text{--}0.21$ – $\sim 6.1 \cdot 10^{-3} \text{ см}/\text{с}$ (или $\sim 3.6 \text{ мм}/\text{мин}$).

Общие результаты экспериментов показаны на рис. 3, где графики в верхнем ряду I отображают рост давления на входе (кружки) и выходе (треугольники) модели в течение последовательных четырех циклов фильтрации. Можно видеть, что противодавление на выходе модели постепенно увеличивалось и слегка понижалось в перерывах между циклами экспериментов.

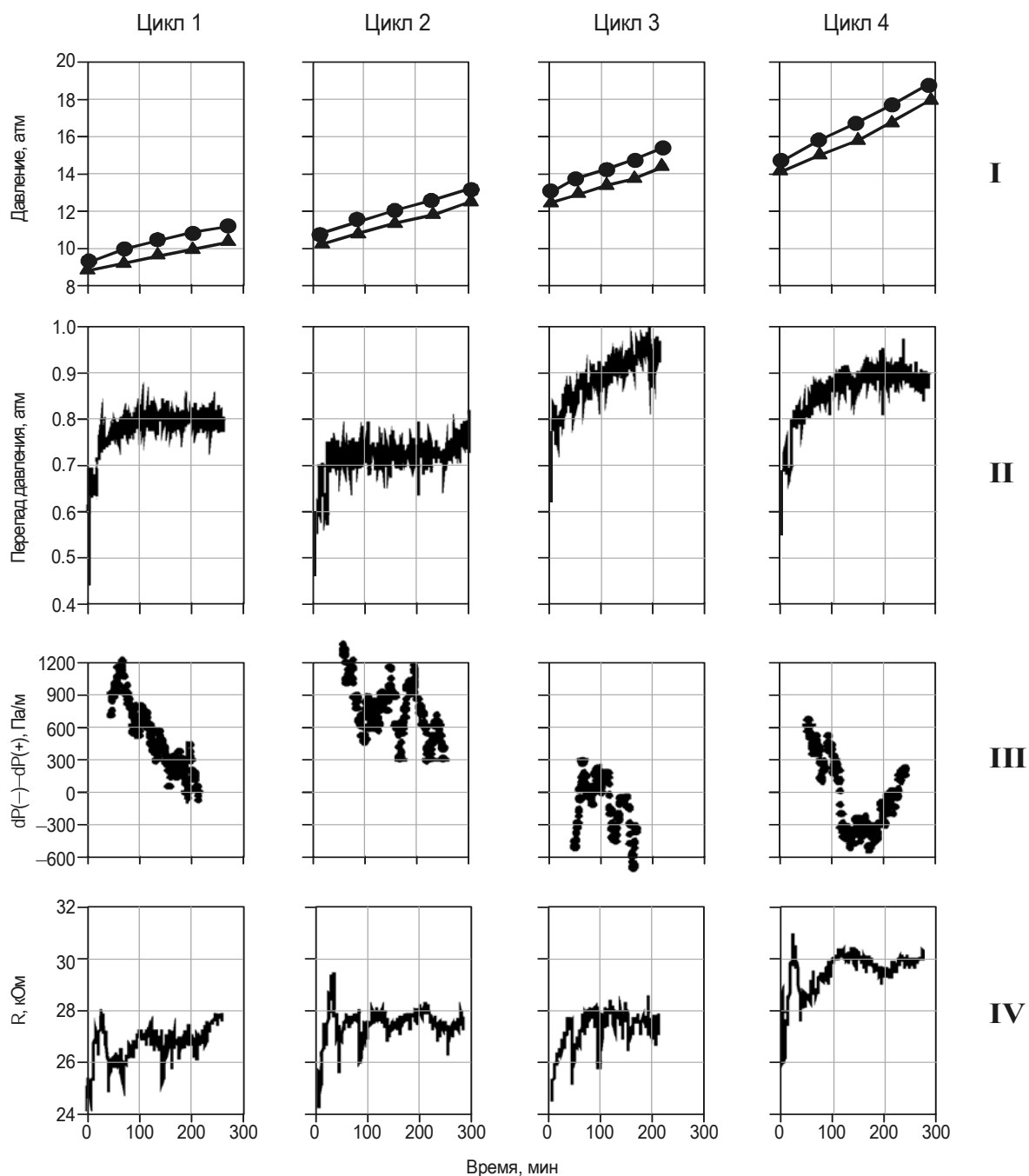


Рис. 3. Результаты эксперимента по несмешивающемуся вытеснению воды из образца песчаного коллектора водонефтяной смесью для четырех циклов фильтрации 1–4. Ряд I – рост порового давления на входе (кружки) и выходе (треугольники) модели коллектора; ряд II – перепад порового давления внутри модели пласта; ряд III – изменение градиента порового давления при разном направлении электрического тока; ряд IV – электрическое сопротивление внутри модели пласта

Fig. 3. The experimental results of immiscible displacement water by water-kerosene mixture from sand for fourth flow stages: I – increase of pore pressure on input (circles) and on output (triangles) of reservoir model; II – the different of pore pressure inside the model; III – the changes of pore pressure gradient under difference direction of electric current; IV – the electric resistance inside the reservoir model

Графики, расположенные в ряду II, показывают вариации перепада давления на модели (база 500 мм). Очевидно, что перепад давления прямо не коррелирует с ростом противодействия: если в цикле 1 он быстро стабилизировался на уровне ~ 0.80 атм, то в цикле 2 понизился до ~ 0.72 атм, а в циклах 3, 4 наблюдался затухающий по скорости рост перепада давления – в цикле 3 – от ~ 0.80 до ~ 0.95 атм, в цикле 4 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.

Графики, расположенные в ряду III, представляют собой оценки вариаций разности градиентов давлений, соответствующих двум полярным направлениям электрического тока. При проведении этих оценок использовались различные процедуры усреднения и сглаживания, тем не менее, наблюдается резкое отличие поведения анализируемого параметра в первых двух и во вторых двух циклах: если в первых двух циклах указанный параметр положителен (что соответствует отрицательной величине ζ -потенциала), то во вторых двух он варьирует около 0, имея тенденцию принимать даже отрицательное значение.

И, наконец, графики в ряду IV отображают 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 общего перепада давления и разности его градиентов.

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.

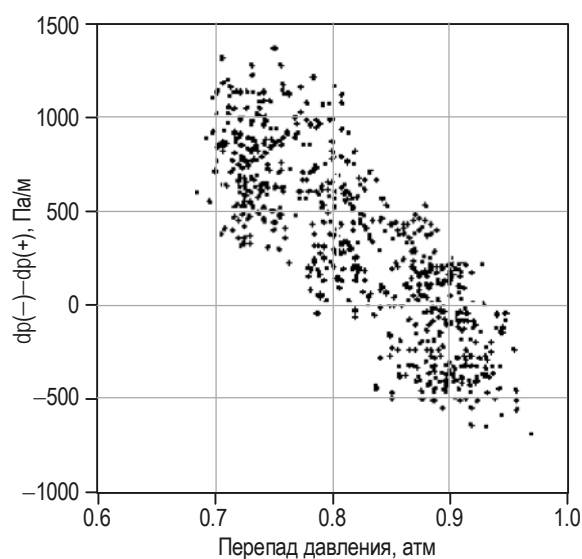


Рис. 4. Зависимость от перепада давления его разностей при смене полярности тока. Двухфазная фильтрация смеси вода–керосин в соотношении 50:50

Fig. 4. The dependence of pore pressure gradients differences under changes of electric current polarity for average pore pressure gradient. Two-phase flow of water–kerosene mixture 50:50

Простейшая интерпретация наблюдаемой зависимости такова – с ростом фильтрационного сопротивления величина электрокинетического коэффициента \tilde{L} снижается, сопровождаясь сменой знака. С учетом базы, на которой определялся перепад давления (500 мм), коэффициент наклона графика на рис. 4 составляет приблизительно $-0.71 \cdot 10^{-2}$.

Обсуждение результатов экспериментов

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

При проведении оценки электрокинетических коэффициентов необходимо обязательно 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 своей природе преимущественно является электронной проводимостью.

2. Электрическая проводимость водного раствора, заполняющего связные поры и поровые каналы, которая по своей природе является ионной проводимостью. Свободные ионы в растворе движутся по направлению к питающим электродам в зависимости от знака заряда, т.е., что 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, по определению состоящая из ионов одного знака заряда. Именно этот тип проводимости преобладающе влияет на коэффициент массопереноса.

4. Электрическая проводимость неподвижной части двойного электрического слоя, также состоящая из ионов одного знака заряда, трансляционное движение которых друг относительно друга определяет проводимость.

Среди результатов экспериментов по двухфазной фильтрации наиболее важными представляются два. Во-первых, это резкое снижение величины электрокинетического коэффициента Онзагера при переходе от режима однофазной фильтрации к двухфазной. Во-вторых, смена знака этого коэффициента, обусловленная, вероятно, сменой знака ζ -потенциала.

Первый эффект – резкое снижение величины электрокинетического коэффициента Онзагера при замене режима водонасыщенности режимом нефтенасыщенности – является твердо установленным экспериментальным фактом. В частности, согласно работе [Jiang et al., 1998], снижение величины электрокинетического коэффициента для песчаника, изначально насыщенного водным раствором, а затем нефтью, может достигать трех порядков.

Второй эффект – смена знака электрокинетического коэффициента – также наблюдался в экспериментах, в частности, при изменении концентрации раствора электролита. Было отмечено, что с увеличением концентрации фонового электролита (индифферентного, электронейтрального) ζ -потенциал уменьшается вследствие сжатия диффузной зоны двойного электрического слоя. Зависимость ζ -потенциала от концентрации электролитов, насыщенных потенциалопределяющими ионами, 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

[Алтунина, Кувшинов, 1995]. Такой вид зависимости объясняется двояким влиянием потенциалопределяющих 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, когда происходит двухфазная фильтрация смеси вода–керосин через изначально гидрофильную пористую среду, водный электролит, с одной стороны, взаимодействует с поверхностью минеральной фазы, а с другой, – 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.

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 горных пород того же типа другими (независимыми) методами. Полученные значения могут быть использованы для интерпретации натуральных электрокинетических экспериментов.

В ходе экспериментов по двухфазной фильтрации смеси вода–керосин через образцы изначально гидрофильного песчаника обнаружено постепенное уменьшение абсолютной величины ζ -потенциала со снижением фазовой проницаемости по воде и соответствующим ростом градиента давления. Зафиксирован момент изменения знака ζ -потенциала с отрицательного на положительный 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.

Литература

- Агеева О.А., Светов Б.С., Шерман Г.Х., Шипулин С.В. Сейсмоэлектрический эффект второго рода в горных породах (по данным лабораторных экспериментов) // Геология и геофизика. 1990. Т. 40, № 8. С.1251–1257.
- Алтунина Л.К., Кувшинов В.А. Увеличение нефтеотдачи пластов композициями ПАВ. М.: Наука, 1995. 198 с.
- Багдоев А.Г., Шекоян А.В. Нелинейные акустоэлектрические волны в пористых средах, заполненных электропроводящей жидкостью // Нелинейный мир. 2008. Т. 6, № 5/6. С.314–323.
- Блохин А.М., Семенко Р.Е. Гидродинамика водонефтяных слоистых систем в присутствии электрического тока // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: 6 Всероссий. конф. молодых ученых, Новосибирск, 6–8 февр. 2007 г. Новосибирск, 2007. С.50.
- Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Закупин А.С., Мубассарова В.А., Паровышиный В.А. Электрофизические проявления процесса разрушения по данным лабораторных экспериментов и геофизических наблюдений // 10 Межд. школа-семинар “Физические основы прогнозирования разрушения горных пород”, Апатиты, 13–17 июня 2016 г. Апатиты, 2016. С.19.

- Валова О.В. Математическая модель задачи тепло-массообмена в горных породах при электроосмотической фильтрации // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2006. № 1. С.70–77.
- Геннадиев Б.И. Потенциалы фильтрации в гетерогенной среде // *Физика Земли*. 1990. № 7. С.102–106.
- Долгов Д.В. Физические явления, протекающие в нефтяных пластах на микроуровне в зоне действия электрического поля // *Теория и практика применения методов увеличения нефтеотдачи пластов: Материалы 2-го Межд. научн. симп. 15–16 сент. 2009 г. Т. 2. М.: ВНИИ-нефть, 2009. С.26–32.*
- Зейгарник В.А., Новиков В.А., Окунев В.И., Ключкин В.Н. Сейсмический триггерный потенциал электрического тока, протекающего через разлом // 10 Межд. школа-семинар “Физические основы прогнозирования разрушения горных пород”, Апатиты, 13–17 июня 2016 г. Апатиты, 2016. С.21–22.
- Кузнецов О.Л., Симкин Э.М. Преобразование и взаимодействие геофизических полей в литосфере. М.: Недра, 1990. 260 с.
- Мигунов Н.И. Влияние электрокинетических свойств горных пород на скорость распространения сейсмoeлектрических сигналов // *Физика Земли*. 1978. № 5. С.52–56.
- Натяганов В.Л., Скибицкий А.Н. Гидроэлектромагнитные механизмы образования световых предвестников землетрясений // 4 Межд. школа молодых ученых “Волны и вихри в сложных средах”, Москва, 26–29 нояб. 2013 г. М., 2013. С.116–118.
- Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 448 с.
- Нюссик Я.М., Комов И.Л. Электрохимия в геологии. Л.: Наука, 1981. 240 с.
- Пантелеев И.А., Гаврилов В.А. Численное моделирование эволюции электрокинетического тока при подготовке тектонического землетрясения на основе данных скважинных геоакустических измерений // XII Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20–24 авг. 2015 г. Казань, 2015. С.217.
- 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.
- 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.
- Соболев Г.А., Демин В.М. Механоэлектрические явления в Земле. М.: Наука, 1980. 215 с.
- Фатыхов М.А. Фильтрация высоковязкой нефти в электромагнитном поле // *Инженерно-физический журнал*. 2004. Т. 77, № 2. С.13–16.
- Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 592 с.
- Хабибуллин И.Л. Особенности фильтрации вязких жидкостей в поле электромагнитного излучения // *Вестник Башкирского университета* 1999. № 2. С.15–16.
- Черняк Г.Я. О физической природе сейсмoeлектрического эффекта горных пород // *Физика Земли*. 1976. № 2. С.108–112.
- Шелухин В.В., Амира Ю.В. О течении электролитов в пористой среде // *Прикладная механика и теоретическая физика*. 2008. Т. 49, № 4. С.162–173.
- Antraygues P., Aubert M. Self-potential generated by two-phase flow in a porous medium: experimental study and volcanological applications // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P.22273–22281.
- Bo M.W., Choa V., Zeng X.Q. Laboratory investigation on electro-osmosis properties of singapore marine clay // *Soils and Foundations*. 2001. V. 41, N 5. P.15–23.
- Davis J., James R., Leckie J. Surface ionization and complexation at the oxide interface // *J. Colloid. Interface Sci.* 1978. V. 63. P.480–499.
- Donner R.V., Potirakis S.M., Balasis G., Eftaxias K., Kurths J. Temporal correlation pattern in pre-seismic electromagnetic emissions reveal distinct complexity profiles prior to major earthquakes // *Phys. and Chem. Earth. Pts A.B.C.* 2015. V. 85/86. P.44–55.

- Du Q., Li J., Li X., Zeng Z.* Precursory abnormal characteristics of geoelectric field: a case study of seismostation in 625 Research Institute of aviation industry corporation of China // *Earth Science – J. China Univ. Geosciences*. 2014. V. 39, N 12. P.1851–1852.
- Enomoto Y.* Coupled interaction of earthquake nucleation with deep Earth gases: a possible mechanism for seismo-electromagnetic phenomena // *Geophys. J. Inter.* 2012. V. 191. P.1210–1214.
- Fujinawa Y., Noda Y.* Characteristics of seismoelectric waves fields associated with natural micro-cracks // *Pure Appl. Geophys.* 2016. V. 173, N 1. P.255–268.
- Geindreau C., Auriault J.-L.* Magnetohydrodynamic flow through porous media // *C. R. Acad. Sci. Paris*. 2001. V. 329, Serie IIb. P.445–450.
- Glover P., Meredith P., Sammonds P., Murell S.* Ionic surface conductivity in sandstone // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P.21635–21650.
- Guan W., Hu H., Zheng X.* Theoretical simulation of the multipole seismoelectric logging while drilling // *Geophys. J. Inter.* 2013. V. 195, N 2. P.1239–1250.
- Guan W., Yin C., Wang J., Cui, Hu H., Wang Z.* Theoretical study on the amplitude ratio of the seismoelectric field to the Stoneley wave and the formation tortuosity estimation from seismoelectric logs // *Geophys. J. Inter.* 2015. V. 203, N 3. P.2277–2286.
- Jian Y., Yang L., Liu Q.* Time periodic electro-osmotic flow through a microannulus // *Physics of Fluids*. 2010. V. 22, N 4. P.042001-9.
- 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. V. 25, N 10. P.1581–1584.
- Jougnot D., Rubino J., Carbajal M., Linde N., Holliger K.* Seismoelectric effects due to mesoscopic heterogeneities // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40, N 10. P.2033–2037.
- Kachakhidze M.K., Kachakhidze N.K., Kaladze T.D.* A model of the generation of electromagnetic emissions detected prior to earthquakes // *Phys. and Chem. Earth. Pts A.B.C.* 2015. V. 85/86. P.78–81.
- Khair A.S., Squires T.M.* The influence of hydrodynamic slip on the electroforetic mobility of a spherical colloidal particle // *Physics of Fluids*. 2009. V. 21, N 4. P.042001.
- Kondrat V., Tvardovska S.* The influence of external electric field on parameters of seismic frequency mechanical waves in porous saturated media // *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2009. Вып. 10. С.56–65.
- Kushwan V., Tiwari R., Gaur M., Tiwari R.K.* Initial results of bio-potential (seismic electric signal) related to seismic activities // *Acta Geophys.* 2013. V. 61, N 4. P.935–949.
- Long L., Rivers W.* Field measurement of electroseismic response // *Geophysics*. 1975. V. 40, N 2. P.233–245.
- Lorne B., Frederic P., Avouac J.-Ph.* Streaming potential measurements. 1. Properties of the electrical double layer from crushed rock samples // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N B8. P.17857–17877.
- Lorne B., Frederic P., Avouac J.-Ph.* Streaming potential measurements. 2. Relationship between electric and hydraulic flow patterns from rock samples during deformation // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N B8. P.17879–17896.
- Matsushima M., Honkura Y., Kuriki M., Ogawa Y.* Circular polarized electric fields associated with seismic waves generated by blasting // *Geophys. J. Inter.* 2013. V. 194. P.200–211.
- Moyne C., Murad M.A.* Electro-chemo-mechanical couplings in swelling clays derived from a micro/macro-homogenization procedure // *Inter. J. Solids and Structures*. 2002. V. 39. P.6159–6190.
- Panakhov G.M., Mirzadjanov R.R.* Electro-rheological features of flow of complicate systems // *Proc. of IMM of Azerbaijan*. 1999. V. X, N XVIII. P.249–256.
- Ren H., Huang Q., Chen X.* Existence of evanescent electromagnetic waves resulting from seismoelectric conversion at a solid-porous interface // *Geophys. J. Inter.* 2016. V. 204, N 1. P.147–166.
- Revil A., Darot M., Pezard P.A.* From surface electrical properties to spontaneous potential on porous media // *Surveys in Geophysics*. 1996. V. 17. P.331–346.
- Revil A., Pezard P.A., Glover E.* Streaming potential in porous media. 1. Theory of the zeta potential // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P.20021–20031.

- Roubinet D., Linde N., Jougnot D., Irving J. Streaming potential modeling in fractured rock: insights into the identification of hydraulically active fractures // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, N 10. P.4937–4944.
- Sava P., Revil A. Virtual electrode current injection using seismic focusing and seismoelectric conversion // *Geophys. J. Inter.* 2012. V. 191. P.1205–1209.
- Surkov V.V., Pilipenko V.A. Estimate of ULF electromagnetic noise caused by fluid flow during seismic or volcano activity // *Ann. Geophys.* 2015. V. 58, N 6. S0655. doi: 10.4401/ag-6767
- Wang J., Guan W., Hu H.-S., Zhu Z. Electrokinetic experimental studies in borehole model: localized and radiated seismoelectric field // *Chinese Journal of Geophysics.* 2016. V. 59, N 1. P.381–390.
- Warden S., Garambois S., Jouniaux L., Brito D., Sailhac P., Bordes C. Seismoelectric wave propagation numerical modeling in partially saturated materials // *Geophys. J. Inter.* 2013. V. 194, N 3. P.1498–1513.
- Warden S., Garambois S., Sailhac P., Jouniaux L., Bano M. Curvelet-based seismoelectric data processing // *Geophys. J. Inter.* 2012. V. 190, N 3. P.1533–1550.

Сведения об авторе

БАРАБАНОВ Вячеслав Леонидович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН. 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Тел.: +7(915) 215-64-39. E-mail: vlbarabanov@mail.ru

ELECTROKINETICS PROPERTIES OF SANDSTONES BY THE ONE- AND TWO-FLOWS LABORATORY TESTS

V.L. Barabanov

Institute of Oil and Gas Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Experiments for the estimation of electrokinetic parameters porous sand rocks were carried out by stationary single-flow of water and stationary water-oil mixes. The values of ζ -potentials of double electric layer, streaming potential and electroosmotic coefficient were determined. These estimations agree with other known experimental works. Monotonic decreasing of electrokinetic parameters during the increasing of pressure gradient was fixed by two-phase flow experiments with the change of sign. This effect account for specific absorption potential-formed ions and partial hydrofobization of the mineral surface.

Keywords: rocks, electrokinetics, streaming potential, water flow, two-phase flow, ζ -potential, laboratory experiments.

References

- Ageeva O.A., Svetov B.S., Sherman G.Kh., Shipulin S.V. Seismoelectric effect II type on rocks (by the laboratory tests). *Geology and Geophysics*, 1990, vol. 40, no. 8, pp. 1251-1257.
- Altunina L.K., Kuvshinov V.A. *Uvelichenie neftejdachi plastov kompozitsiymi PAV* (Oil discovery enhancement by PAV-composes). Moscow, Nauka, 1995.
- Antraygues P., Aubert M. Self-potential generated by two-phase flow in a porous medium: experimental study and volcanological applications, *J. Geophys. Res.*, 1993, vol. 98, pp. 22273-22281.
- Bagdov A.G., Shekoy A.V. Non-linear acoustic-electric waves in porous media saturated by electroconductivity liquids. *Non-linear World*, 2008, vol. 6, no. 5-6, pp. 314-323.
- Blokhin A.M., Semenko R.E. The hydrodynamics of water-oil layered systems under electric currents, in *Problemy mekhaniki: teoria, experiment i novye tekhnologii* (Problems of mechanics: theory, experiment and new technologies), Novosibirsk, 2007, p. 50.
- Bo M.W., Choa V., Zeng X.Q. Laboratory investigation on electro-osmosis properties of singapore marine clay, *Soils and Foundations*, 2001, vol. 41, no. 5, pp. 15-23.

- Bogomolov L.M., Sychev V.N., Zakupin A.S., Mubassarova V.A., Harovyshnoy V.A. Electro-physics field of damage process using laboratory tests and geophysics observations, in *Fizicheskie osnovy prognozirovaniya razpusheniya gornykh porod* (Physical base for the prediction of rock damage), Apatity, 2016, p. 19.
- Chernyak G.Ya. On physical origin of seismoelectric effects in rocks. *Izv. Phys. Solid Earth*, 1976, no. 2, pp. 108-112.
- Davis J., James R., Leckie J. Surface ionization and complexation at the oxide interface, *J. Colloid. Interface Sci.*, 1978, vol. 63, pp. 480-499.
- Dolgov D.V. Physics phenomena in oil layers on micro-scale under action of electric current, in *Teoria i praktika primeneniya metodov uvelicheniya nefteotdachi plastov* (Theory and practices of methods for oil recovery), vol. 2, Moscow: VNIIneft, 2009, pp. 26-32.
- Donner R.V., Potirakis S.M., Balasis G., Eftaxias K., Kurths J. Temporal correlation pattern in pre-seismic electromagnetic emissions reveal distinct complexity profiles prior to major earthquakes, *Phys. and Chem. Earth. Pts A.B.C.*, 2015, vol. 85-86, pp. 44-55.
- Du Q., Li J., Li X., Zeng Z. Precursory abnormal characteristics of geoelectric field: a case study of seismostation in 625 Research Institute of aviation industry corporation of China, *Earth Science – J. of China Univ. of Geosciences*, 2014, vol. 39, no. 12, pp. 1851-1852.
- Enomoto Y. Coupled interaction of earthquake nucleation with deep Earth gases: a possible mechanism for seismo-electromagnetic phenomena, *Geophys. Jour. Inter.*, 2012, vol. 19, pp. 1210-1214.
- Fatykhov M.A. Flow of high viscosity oil by electromagnetic fields. *Engineering and Physical Journal*, 2004, vol. 77, no. 2, pp. 13-16.
- Frenkel Ya.I. *Kineticheskaya teoriya zhidkostey* (Kinetics theory of liquids), St. Peter.: Nauka, 1975.
- Fujinawa Y., Noda Y. Characteristics of seismoelectric waves fields associated with natural microcracks, *Pure and Appl. Geophys.*, 2016, vol. 173, no 1, pp. 255-268.
- Geindreau C., Auriault J.-L. Magnetohydrodynamic flow through porous media, *C. R. Acad. Sci. Paris.*, 2001, vol. 329, Serie IIB, pp. 445-450.
- Gennadinik B.I. Stream potentials in heterogeneous medium. *Izv. Phys. Solid Earth*, 1990, no. 7, pp. 102-106.
- Glover P., Meredith P., Sammonds P., Murell S. Ionic surface conductivity in sandstone, *J. Geophys. Res.*, 1994, vol. 99, pp. 21635-21650.
- Guan W., Hu H., Zheng X. Theoretical simulation of the multipole seismoelectric logging while drilling, *Geophys. J. Int.*, 2013, vol. 195, no. 2, pp. 1239-1250.
- Guan W., Yin C., Wang J., Cui, Hu H., Wang Z. Theoretical study on the amplitude ratio of the seismoelectric field to the Stoneley wave and the formation tortuosity estimation from seismoelectric logs, *Geophys. J. Int.*, 2015, vol. 203, no. 3, pp. 2277-2286.
- Jian Y., Yang L., Liu Q. Time periodic electro-osmotic flow through a microannulus, *Physics of Fluids*, 2010, vol. 22, no. 4, pp. 042001-1-9.
- 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, no. 10, pp. 1581-1584.
- Jougnot D., Rubino J., Carbajal M., Linde N., Holliger K. Seismoelectric effects due to mesoscopic heterogeneities, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, no. 10, pp. 2033-2037.
- Kachakhidze M.K., Kachakhidze N.K., Kaladze T.D. A model of the generation of electromagnetic emissions detected prior to earthquakes, *Phys. and Chem. Earth. Pts A.B.C.*, 2015, vol. 85-86, pp. 78-81.
- Khabibulin I.L. Specific properties of viscosity liquids flows under electromagnetic action. Works of Bashkir's University, 1999, no. 2, pp. 15-16.
- Khair A.S., Squires T.M. The influence of hydrodynamic slip on the electroforetic mobility of a spherical colloidal particle, *Physics of Fluids*, 2009, vol. 21, no. 4, pp. 042001-1-14.
- Kondrat V., Tvardovska S. The influence of external electric field on parameters of seismic frequency mechanical waves in porous saturated media, *Physical and Mathematical modeling and information technology*, 2009, no. 10, pp. 56-65.
- Kushwan V., Tiwari R., Gaur M., Tiwari R.K. Initial results of bio-potential (seismic electric signal) related to seismic activities, *Acta Geophys.*, 2013, vol. 61, no. 4, pp. 935-949.
- Kuznetsov O.L., Simkin A.M. *Preobrazovanie i vzaimodeystvie geofizicheskikh poley v litosfere* (Transformation and interaction of geophysical fields in lithosphere), Moscow: Nedra, 1990.
- Long L., Rivers W. Field measurement of electroseismic response, *Geophysics*, 1975, vol. 40, no. 2, pp. 233-245.
- Lorne B., Frederic P., Avouac J.-Ph. Streaming potential measurements. 1. Properties of the electrical double layer from crushed rock samples, *J. Geophys. Res.*, 1999, vol. 104, no. B8, pp. 17857-17877.

- Lorne B., Frederic P., Avouac J.-Ph. Streaming potential measurements. 2. Relationship between electric and hydraulic flow patterns from rock samples during deformation, *J. Geophys. Res.*, 1999, vol. 104, no. B8, pp. 17879-17896.
- Matsushima M., Honkura Y., Kuriki M., Ogawa Y. Circular polarized electric fields associated with seismic waves generated by blasting, *Geophys. J. Inter.*, 2013, vol. 194, pp. 200-211.
- Migunov N.I. The influence of rocks electrokinetic properties on the velocity of seismoelectric signals. *Izv. Phys. Solid Earth*, 1978, no. 5, pp. 52-56.
- Moyné C., Murad M.A. Electro-chemo-mechanical couplings in swelling clays derived from a micro/macro-homogenization procedure, *Inter. J. Solids and Structures*, 2002, vol. 39, pp. 6159-6190.
- Natiyganov V.L., Skibitskiy A.N. Hydroelectromagnetic mechanisms for forming of light precursors of earthquakes, in *Volny i vikhri v slozhnykh sredakh* (Waves and whirls in coupled media), Moscow, 2013, pp. 116-118.
- Nikolaevsky V.N. *Geomekhanika i fluidodinamika* (Geomechanics and fluidodynamics), Moscow: Nedra, 1996.
- Nyussik Ya.M., Komov I.L. *Elektrokhimia v geologii* (Electrochemistry in geology), St. Petersburg: Nauka, 1981.
- Panakhov G.M., Mirzadjanov R.R. Electro-rheological features of flow of complicate systems, Proc. of IMM of Azerbaijan, 1999, vol. X (XVIII), pp. 249-256.
- Pantellev I.A., Gavrilov V.A. Numerical modeling of the behavior of electric-kinetic current under forming of tectonic earthquake by borehole geoacoustic measurements, in *XII Conference for fundamental problems of theoretic and applied mechanics*, Kazan, 2015, p. 217.
- Ren H., Huang Q., Chen X. Existence of evanescent electromagnetic waves resulting from seismoelectric conversion at a solid-porous interface, *Geophys. J. Int.*, 2016, vol. 204, no. 1, pp. 147-166.
- Revil A., Darot M., Pezard P.A. From surface electrical properties to spontaneous potential on porous media, *Surveys in Geophysics*, 1996, vol. 17, pp. 331-346.
- Revil A., Pezard P.A., Glover E. Streaming potential in porous media. 1. Theory of the zeta potential, *J. Geophys. Res.*, 1999, vol. 104, pp. 20021-20031.
- Roubinet D., Linde N., Jougnot D., Irving J. Streaming potential modeling in fractured rock: insights into the identification of hydraulically active fractures, *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, no. 10, pp. 4937-4944.
- Saiykhov F.L., Kovaleva L.A., Nasyrov N.M. Thermo- and mass-transfer in the system of borehole-layer under electromagnetic action of mass oil fields, *Engineering and Physical J.*, 2002, vol. 75, no. 1, pp. 95-99.
- Sava P., Revil A. Virtual electrode current injection using seismic focusing and seismoelectric conversion, *Geophys. J. Inter.*, 2012, vol. 191, pp. 1205-1209.
- Shelukhin V.V., Amira Yu.V. On flow of electrolytes through porous medium. *Applied Mechanics and Theoretical Physics*, 2008, vol. 49, no. 4, pp. 162-173.
- Sobolev G.A., Demin V.M. *Mekhanoelektricheskie yavleniya v Zemle* (Mechanic-electrical phenomena in the Earth), Moscow: Nauka, 1980.
- 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, no. 6, S0655; doi: 10.4401/ag-6767
- Svetov B.S., Gubatenko V.P. Electromagnetic field by mechanoelectric origin in porous water-saturated rocks. I. The formulation of problem. *Izv. Phys. Solid Earth*, 1990, no. 10, pp. 67-73.
- Valova O.V. Mathematical model of thermo-mass transfer in rocks by electro-osmotic flow, *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2001, no. 1, pp. 70-77.
- Wang J., Guan W., Hu H.-S., Zhu Z. Electrokinetic experimental studies in borehole model: localized and radiated seismoelectric field, *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 381-390.
- Warden S., Garambois S., Jouniaux L., Brito D., Sailhac P., Bordes C. Seismoelectric wave propagation numerical modeling in partially saturated materials, *Geophys. J. Int.*, 2013, vol. 194, no 3, pp. 1498-1513.
- Warden S., Garambois S., Sailhac P., Jouniaux L., Bano M. Curvelet-based seismoelectric data processing, *Geophys. J. Int.*, 2012, vol. 190, no. 3, pp. 1533-1550.
- Zeygarnic V.A., Novikov V.A., Okunev V.I., Klyuchkin V.N. Seismic triggered potential of electric current through earth fault, in *Fizicheskie osnovy prognozirovania razpusheniya gornyykh porod* (Physical base for the prediction of rock damage), Apatity, 2016, pp. 21-22.