

УДК 550.34.016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ФИЛЬТРАЦИЮ СУСПЕНЗИЙ В ГОРНОЙ ПОРОДЕ

© 2020 г. Г.А. Соболев, А.В. Пономарев, С.М. Кирееенкова, З.-Ю.Я. Майбук

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Представлены результаты экспериментального изучения воздействия постоянного электрического тока на фильтрацию в образцах песчаника водных суспензий хлористого калия и хлористого натрия, лимонной кислоты и коллоидного раствора с наночастицами оксида алюминия (наножидкости).

Исследования выполнены на образцах кварц-полевошпатового песчаника с размером зерен 0.5–1.5 мм и пористостью 13–15 %, которая позволила проводить эксперименты при атмосферном давлении. Обжаты в термоусадочной трубке цилиндрические образцы диаметром 30 мм и длиной 60 мм закреплялись вертикально на кронштейне. На их торцах устанавливались платиновые сетчатые электроды, через которые подавался раствор. Большинство опытов выполнялось при последовательном ступенчатом возрастании напряжений от источника постоянного тока в диапазоне от 12 до 100 В. Предварительно каждый образец насыщался раствором заданного состава, при этом состояние насыщения поддерживалось в течение всего эксперимента. В ходе эксперимента измерялось время, за которое фиксированный объем раствора – одна, пять или десять капель – просачивался через образец при заданном напряжении. Затем напряжение снижалось до нуля, и цикл повторялся при более высоком напряжении. В процессе исследований использовались растворы, основу которых составляли дистиллированная и природная вода с добавлением различных компонентов в концентрации от 0.0025 до 0.02 %. В качестве добавок применялись лимонная кислота, наночастицы оксида алюминия размерами от 20 до 80 нм, хлористый калий, хлористый натрий.

Установлено, что общим результатом воздействия постоянного тока на образцы, насыщенные растворами разного состава, является пропорциональное увеличение скорости фильтрации с увеличением отношения силы тока к начальному току, причем эта закономерность не зависит от величины начального тока. Энергетические затраты на одинаковый прирост скорости фильтрации для воды, растворов лимонной кислоты и наножидкости были в несколько раз меньше, чем для суспензий хлористого калия и хлористого натрия.

Ключевые слова: лабораторное моделирование, фильтрация флюида, постоянный ток, электроосмос, наножидкости.

Введение

В недрах Земли существует природное электрическое поле, влияющее на происходящие внутри планеты физико-химические процессы, в том числе, на электрокинетические явления. Теоретический анализ этих процессов в пористых средах проведен в ряде работ, в которых объяснены некоторые электрокинетические и электрокапиллярные явления при фильтрации флюидов в горных породах (см., например, [Духин, 1975; Тихомолова, 1989; Злочевская, Королев, 1988; Комаров, 1994], и др.). Предложена модель эффективных физических свойств, включающая упругие свойства, электро-, теплопроводность и тепловой коэффициент линейного расширения, которые определяются одной и той же микроструктурой. Теоретическое обоснование возможности построения таких моделей и их практическая реализация представлены в работах [Amalokwu,

Spikes, Wolf, 2019; Bayuk, Popov, Parshin, 2011]. Для электрокинетических процессов, протекающих в горных породах, существенными являются параметры двойного электрического слоя на контакте минеральной фазы и насыщающего флюида. Именно ионы этого слоя ответственны за движение жидкости в электрическом поле. Двойной электрический слой, с одной стороны, определяет тип и степень смачиваемости минеральной фазы по отношению к насыщающему флюиду, с другой – степень подвижности флюида при его фильтрационном течении в поровых каналах. Строение и свойства двойного электрического слоя, электрокинетические явления в пористых средах исследовались как в лабораторных, так и в полевых экспериментах, проводимых и в прикладных целях [*Бувич, Зубарев, 1986; Комаров, 1994*].

В последние годы наблюдается рост интереса к использованию физических полей для управляемого воздействия на фильтрационные процессы в горных породах, в частности для повышения продуктивности нефтесодержащих коллекторов в условиях трудноизвлекаемых запасов. К таким воздействиям относятся электромагнитное, плазменно-импульсное, инфразвуковое, ультразвуковое, тепловое, а также их комбинации [*Сургучев, 1987*].

Теоретическое описание изменения электропроводности и коэффициента проницаемости среды при относительно небольших напряженностях электрического поля, приложенного к неоднородной среде, было представлено в работе [*Попов, Селяков, 1990*]. Позже в [*Bradford, Torkzaban, 2008*] были предложены теоретические модели переноса коллоидов в зоне аэрации в масштабе коллектора с учетом известных явлений на границах раздела фаз. Однако, как отмечают авторы этого обзора, способность точного моделирования транспортировки коллоидов в водоносных горизонтах ограничена неполным пониманием управляющих физических и химических процессов, контролирующих миграцию и удержание коллоидов в масштабе пор и влияющих на проницаемость геологической среды.

В этой связи большое значение приобретают эксперименты, нацеленные на обнаружение изменений физических свойств пород в условиях внешнего воздействия и прямую оценку фильтрующей способности (проницаемости) пористой горной породы. Так, сотрудниками Института геофизики СО РАН на Быстровском вибросейсмическом полигоне были проведены полевые испытания с целью обнаружения и исследования вызванных длительным воздействием постоянного электрического тока малой плотности вариаций физико-механического состояния пород в естественном залегании [*Манштейн и др., 1999*]. Изучались временные изменения скоростей упругих сейсмических волн в процессе пропускания электрического тока. Дополнительно на блоках горных пород были рассмотрены вариации скоростей продольных и поперечных волн в акустическом диапазоне частот. Опыты показали, что продолжительное воздействие постоянного электрического тока малой плотности на пористую и обводненную среду отражается в нелинейных зависимостях упругих волн от времени, что, по мнению авторов названной работы, обусловлено межфазными электрокинетическими и химическими взаимодействиями в многокомпонентной системе.

Известны исследования воздействия электрического поля на свойства минералов, горных пород и модельных материалов [*Балбачан, Томашевская, 1987; Зейгарник, Ключкин, Окунев, 2018*], результаты которых свидетельствовали о зависимости наблюдаемых эффектов от целого ряда факторов – минерального состава, влажности испытываемой среды, параметров и условий воздействия и т.д. Одну из первых лабораторных работ в этой области почти 60 лет назад в Институте горного дела им. А.А. Скочинского АН СССР провел М.С. Анцыферов, сообщивший о “новом геофизическом эффекте” –

возникновении упругих колебаний в увлажненном стержне горной породы при воздействии на него электрическим напряжением, приложенным к торцам образца через электроды [Анцыферов, 1962]. Этот эффект был назван электросейсмическим в предположении, что он является обратным ранее обнаруженному сейсмоэлектрическому эффекту второго рода [Иванов, 1939].

Опыты на крупном блоке песчаника объемом $2.3 \cdot 10^4 \text{ см}^3$ при насыщении солевыми растворами описаны в работах [Sobotka, 2009, 2019]. В этих опытах модель подвергалась воздействию постоянного электрического тока при постепенно растущем напряжении. Было показано, что при достижении определённого напряжения возникает акустическая эмиссия.

Эффект активизации процесса разрушения флюидонасыщенных нагруженных образцов песчаника Береа и модельных материалов при прохождении через них электрического тока обнаружен в недавних экспериментах [Лапшин и др., 2016]. Зафиксированы значительное увеличение акустической активности в периоды действия тока и ее уменьшение после его отключения. Обнаружено увеличение объема образца под действием тока, что позволяет связать выявленный эффект с разрушением образца вследствие теплового расширения флюида в порах и трещинах, что, по-видимому, должно сопровождаться увеличением проницаемости породы и изменением ее фильтрационно-емкостных свойств.

Эффект инициации акустической эмиссии электрическим током наблюдался при применении как постоянного, так и переменного тока. Варьирование разности электрических потенциалов, интервалов воздействия, концентрации и количества раствора хлористого натрия, характеризующих эффективное электрическое сопротивление образца, показало, что степень увеличения скорости акустической эмиссии определяется в основном мощностью тока, рассеиваемой в образце, и длительностью воздействия. Поскольку произведение названных параметров дает количество джоулеа тепла, это обстоятельство указывает на то, что механизм инициации акустической эмиссии (разрушения) электрическим током имеет термическую природу.

Обобщение результатов по совокупности экспериментов с использованием электрического тока позволяет сделать вывод, что ток увеличивает интенсивность образования микротрещин во флюидосодержащих образцах, стимулируя тем самым процесс разрушения материала. Эффект микроразрушений наблюдается как в свободных, ненагруженных образцах, так и в механически напряженных.

Важная особенность рассматриваемых экспериментов состоит в том, что флюид в пористой среде под влиянием внешнего электрического поля начинает перемещаться относительно матрицы, создавая электроосмотический поток. В ходе опытов было показано, что скорость электроосмотического движения пропорциональна градиенту электрического потенциала при прочих постоянных параметрах [Духин, Дерягин, 1976].

Заслуживают внимания уникальные свойства наночастиц, а именно их способность влиять и изменять физико-химические процессы в различных средах [Сергеев, 2003; Суздаев, 2009; Соболев и др., 2016]. В последние годы при разработке новых технологий в нефтедобыче используются наночастицы металлов с учетом их малых размеров, большой удельной поверхности и энергии, а также способности легко проникать в пористую структуру [Минаков и др., 2018].

В настоящей работе описаны выполненные с учетом вышеперечисленных представлений эксперименты, имеющие своей целью анализ изменения фильтрационной способности флюидонасыщенной пористой породы при воздействии на нее постоянного электрического тока и оценку параметров возможного эффекта.

Методика и аппаратура

При разработке методики исследований учитывался целый ряд факторов, предположительно влияющих на результаты экспериментов, среди которых выбор базовой жидкости, различные добавки и их концентрация, тип наночастиц, их размеры и форма.

В качестве базовых жидкостей использовались дистиллированная вода, очищенная путем двойной дистилляции, и природная (водопроводная) вода. Поскольку в природной воде присутствуют примеси, которые могут взаимодействовать с находящимися в растворе ионами и оказывать влияние на процесс фильтрации, основная часть опытов проводилась на дистиллированной воде, обладающей относительно большим удельным электросопротивлением (проводимость дистиллированной воды при 25 °С равна примерно $4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ [Каранетьянци, 1981]). Тем не менее, дистиллированная вода может проводить электрический ток за счет способности молекулы воды диссоциировать на ионы H^+ и OH^- . При воздействии на водные растворы постоянным электрическим током происходит электролиз раствора и возникает упорядоченное движение ионов [Тихомолова, 1989]. Выбор наночастиц оксида алюминия определялся тем, что оксид алюминия практически не вступает в реакцию с водой, солями и кислотами.

В качестве геологического материала использовался песчаник, сходный по своим свойствам с породами, характерными для коллекторов углеводородов. Основным породообразующим веществом песчаника является сцементированный глинистыми и железистыми минералами кварц; зернистость песчаника – 0.5–1.5 мм, пористость – 11–13 %. Исследования проводились на пятнадцати образцах цилиндрической формы, изготовленных из одного блока песчаника; диаметр цилиндров – 30 мм, высота – 60 мм.

Образец, обжатый в термоусадочной трубке марки RC (PBF), закреплялся вертикально на кронштейне. На торцах образца устанавливали платиновые сетчатые электроды (рис. 1), конструкция которых обеспечивала смачиваемость более 90 % площади торцов.

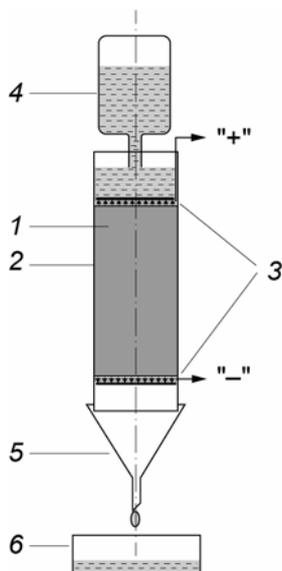


Рис. 1. Схема измерительного устройства

1 – образец песчаника; 2 – термоусадочная трубка; 3 – электроды; 4 – автодозатор раствора; 5 – каплесборник; 6 – ванночка сбора раствора

Fig. 1. Scheme of the measuring device

1 – sandstone sample; 2 – shrink jacket; 3 – electrodes; 4 – solution autodispenser; 5 – drip tray; 6 – solution collecting bath

В ходе эксперимента использовались суспензии разного состава и с разной концентрацией входящих в них компонентов. Основными компонентами суспензий были хлористый калий (KCl), хлористый натрий (NaCl) и наноразмерные частицы оксида алюминия (наножидкость Al_2O_3).

В ряде опытов в качестве стабилизатора наножидкости, препятствующего агломерации наночастиц, применялась трёхосновная карбоновая кислота $C_6H_8O_7$ (лимонная кислота). В экспериментах применялись также добавочные компоненты в небольшой концентрации – от 0.005 % до 0.01 %. В частности, использовались полученные плазмохимическим методом наночастицы Al_2O_3 размером от 20 до 80 нм, имеющие сферическую форму (рис. 2).

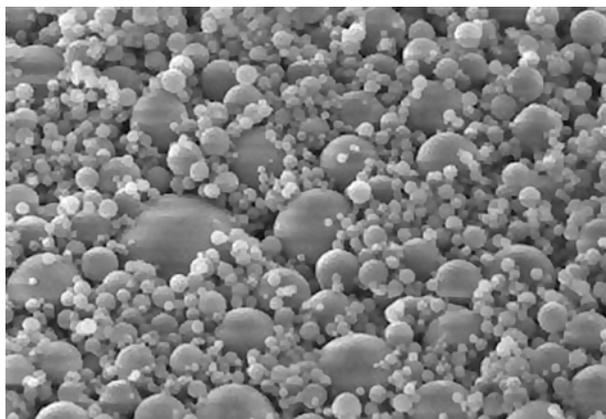


Рис. 2. Фото наночастиц оксида алюминия, использованных в экспериментах

Fig. 2. Photo of aluminum oxide nanopowder used in the experiments

До введения в образец приготовленные растворы с частицами оксида алюминия для предотвращения агломерации обрабатывались ультразвуком. Подготовленную суспензию в объеме 25 мл с верхнего торца образца вводили в термоусадочную трубку; объем суспензии по мере просачивания поддерживался постоянным с помощью автодозатора. На электроды ступенчато подавалось постоянное электрическое напряжение: 3, 6, 12, 24, 36, 48, 60 и 100 В.

Измерялось время, в течение которого фиксированный объем суспензии – одна, пять или десять капель – просачивался через образец при заданном напряжении. Перед подачей следующего напряжения образец переворачивался и промывался дистиллированной водой, которая поступала через нижний его торец в течение нескольких часов до достижения первоначальной скорости фильтрации в предыдущем цикле эксперимента (циклом эксперимента называется последовательность измерений с напряжением и без него). До и после каждого цикла измерялись времена протекания раствора (T , с), сила тока (I , мА), температура суспензии (t , °С). Диапазон вариаций температуры суспензии не превышал 5 °С, что не вносило закономерных изменений на уровне разброса данных.

В ходе предварительных опытов было установлено, что напряжения в 3 и 6 В незначительно меняли измеряемые характеристики. Поэтому приводимые ниже результаты включают только шесть циклов при $U=12, 24, 36, 48, 60$ и 100 В. На каждом из пятнадцати образцов выполнялось несколько экспериментов по шесть циклов. Заметим, что в представленных опытах направление разности приложенных напряжений и фильтрации совпадало, хотя в реальных земных условиях это может быть и не так.

Схемы последовательных измерений времени протекания через образец десяти капель раствора, состоящего из дистиллированной воды с добавлением хлористого натрия концентрацией $C=0.01$ % и наночастиц оксида алюминия концентрацией $C=0.01$ %, при различных значениях напряжения представлены на рис. 3.

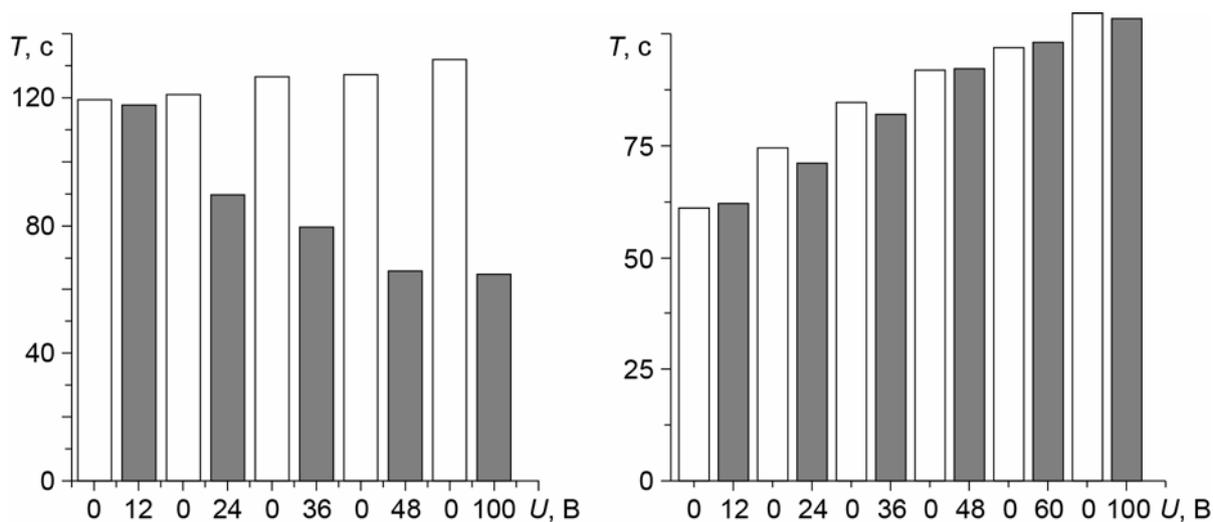


Рис. 3. Зависимость от напряжения времени протекания через образец десяти капель раствора. Слева – к верхнему электроду приложено положительное напряжение, справа – отрицательное. Светлые колонки – ток отключен, темные – ток включен

Fig. 3. Dependence of the flow time of the solution (ten drops) through the sample on voltage. Left – a positive voltage is applied to the upper electrode, right – a negative one. Light bars – current is off, dark bars – current is on

Высота светлых колонок соответствует времени протекания при отсутствии тока, темных – при соответствующем значении электрического напряжения. Результаты эксперимента, в котором к верхнему электроду приложено положительное напряжение, показаны на рис. 3, слева. Здесь четко видно уменьшение времени протекания при увеличении электрического воздействия. Если к верхнему электроду прикладывали отрицательное напряжение, то время протекания через образец в пределах разброса значений в каждом цикле не изменялось (рис. 3, справа).

Можно видеть, что по мере увеличения циклов эксперимента время протекания раствора через образец увеличивалось. Поэтому, при вычислении скорости фильтрации раствора dF при каждом значении приложенного напряжения бралось отношение времени протекания T_i в данном цикле не ко времени начала эксперимента T_0 , а ко времени протекания в предыдущем цикле, т.е. $dF=(T_i/T_{i-1})^{-1}$.

Результаты экспериментов

Зависимости скорости фильтрации от силы тока, полученные в ходе четырех экспериментов на насыщенных дистиллированной водой образцах №№ 1, 11, 12, приведены на рис. 4, слева. Поскольку все образцы изготовлены из одного и того же блока песчаника, то разброс измеренных значений указывает, возможно, на локальные различия их пористости. Значения силы тока I по оси абсцисс соответствуют последовательному ступенчатому увеличению приложенного к образцам электрического напряжения в диапазоне от 12 до 100 В (см. выше). Время пробега капли воды до подачи напряжения варьировалось от 21 до 24 с, что соответствовало скорости фильтрации ≈ 0.25 см/с. Величина начального тока I_0 при подаче начального напряжения $U=12$ В менялась в разных образцах от 0.79 до 0.88 мА. В первом приближении скорость фильтрации dF возрастала пропорционально силе тока I в соответствии с теорией электрокинетических явлений [Духин, 1975; Тихомолова, 1989].

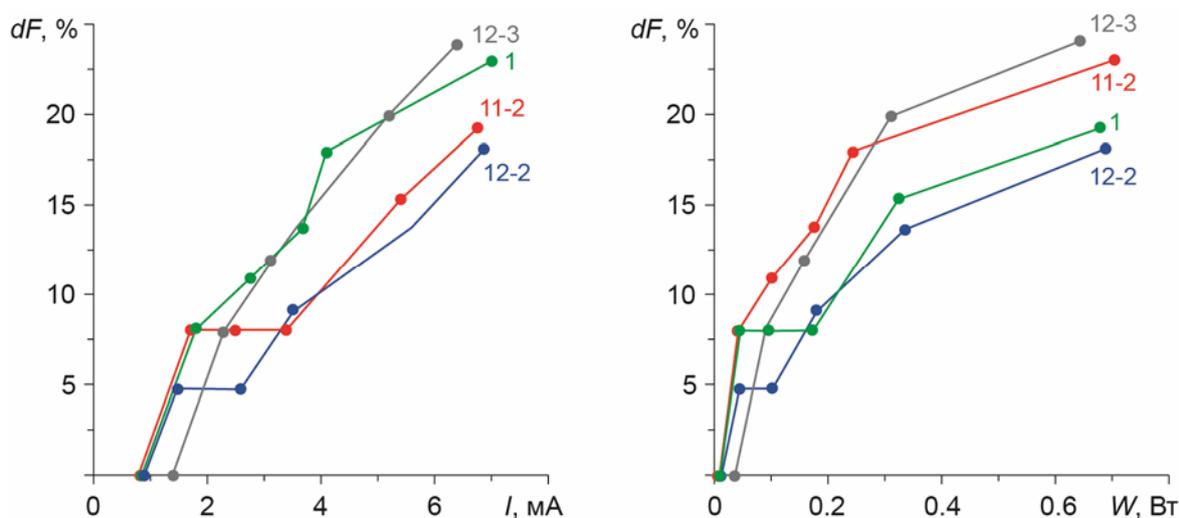


Рис. 4. Зависимость скорости фильтрации dF от силы тока I (слева) и электрической мощности W (справа) в насыщенных дистиллированной водой образцах №№ 1, 11, 12. Кружки соответствуют измерениям в шести циклах при напряжениях от 12 до 100 В; цифры – номера образцов и порядковые номера экспериментов на них

Fig. 4. Dependence of the filtration rate dF on the current I (left) and electric power W (right) in samples No. 1, 11, 12 saturated with distilled water. Circles correspond to measurements in six cycles at voltages from 12 to 100 V; digits – numbers of samples and serial numbers of experiments on them

Если результаты тех же экспериментов представить в виде зависимости изменения скорости фильтрации dF от электрической мощности $W=UI$ (рис. 4, справа), то можно видеть, что при $W > 0.3$ Вт скорость роста dF уменьшается.

Так как при построении графиков на рис. 4 использовались измерения dF , выполненные при одних и тех же значениях напряжения, то изменение наклона графиков связано с нарушением пропорциональности между приложенным к образцу электрическим напряжением и силой тока. Это может быть вызвано постепенным засорением открытых пор и разбуханием имеющихся в породе глинистых минералов. Заметим, что результаты экспериментов с водопроводной водой в пределах допустимого разброса не отличались от результатов экспериментов с дистиллированной водой.

Для уменьшения различий между получаемыми значениями скорости фильтрации от разной величины начального тока I_0 целесообразно провести нормировку I_i/I_0 , где I_i – сила тока при заданном напряжении. Графики изменения dF от I_i/I_0 при использовании дистиллированной воды представлены на рис. 5, слева. В скобках после номеров образцов и экспериментов указана величина начального тока I_0 . Зависимость dF от величины начального тока не прослеживается. Для сравнения на одном из графиков отображены измерения, при которых к дистиллированной воде были добавлены наночастицы оксида алюминия (Al_2O_3) в концентрации $C=0.01$ % (кружки без заливки). Этот график не выпадает из общей тенденции увеличения dF .

Аналогично на рис. 5, справа показаны результаты наблюдений на образцах, насыщенных раствором, состоящим из дистиллированной воды и лимонной кислоты в концентрации $C=0.01$ % (квадраты с заливкой). Здесь для сравнения приведены результаты экспериментов с тем же раствором, содержащим наночастицы оксида алюминия (квадраты без заливки) в концентрации $C=0.01$ %, а также с дистиллированной водой (кружки). Зависимости dF от величины начального тока также не выявлено.

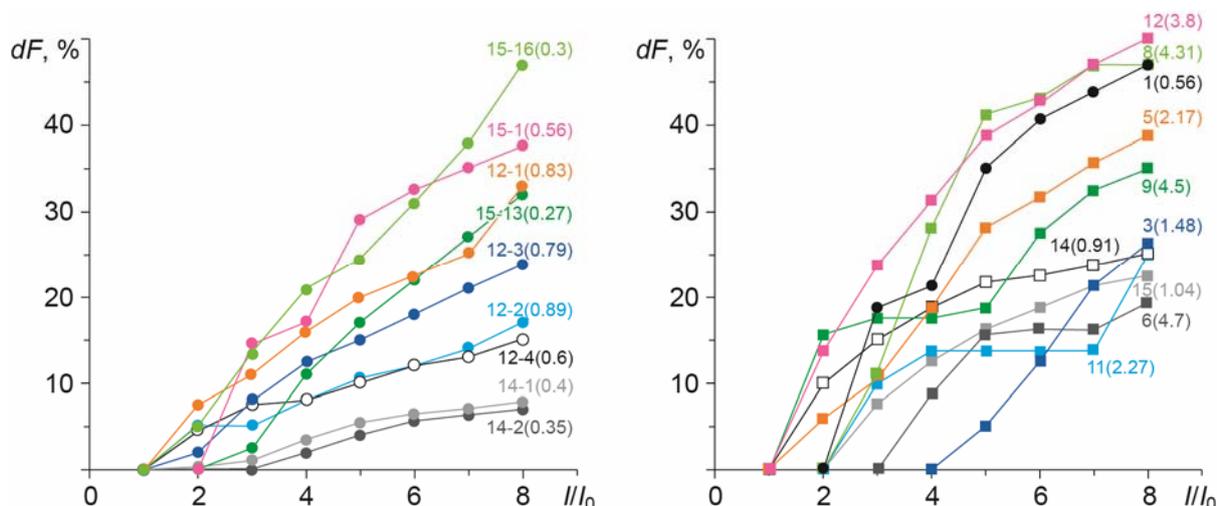


Рис. 5. Слева: зависимость скорости фильтрации dF от нормированной силы тока III_0 в экспериментах с дистиллированной водой (залитые кружки). Кружки без заливки – эксперимент с добавлением наножидкости. Цифры в скобках после номера образца – величина начального тока I_0 , мА. Справа: то же для раствора дистиллированной воды с лимонной кислотой (квадраты с заливкой) и с добавлением наножидкости (квадраты без заливки). Кружки – эксперимент с дистиллированной водой, приведенный для сравнения

Fig. 5. Left: the dependence of the filtration rate dF on the normalized current III_0 in experiments with distilled water (filled circles). Circles without filling – the experiment with addition of nanofluid. The numbers in brackets after the sample number – the value of the initial current I_0 , mA. Right: the same for a solution of distilled water with citric acid (squares with filling) and with the addition of nanofluid (squares without filling). Circles – experiment with distilled water, given for comparison

Результаты наблюдений, в которых для насыщения образца использовались суспензии из дистиллированной воды и хлористого калия или хлористого натрия в концентрации $C=0.01\%$, показаны на рис. 6. Отличием от описанных выше экспериментов (см. рис. 5) является более высокая, иногда на порядок, сила начального тока I_0 .

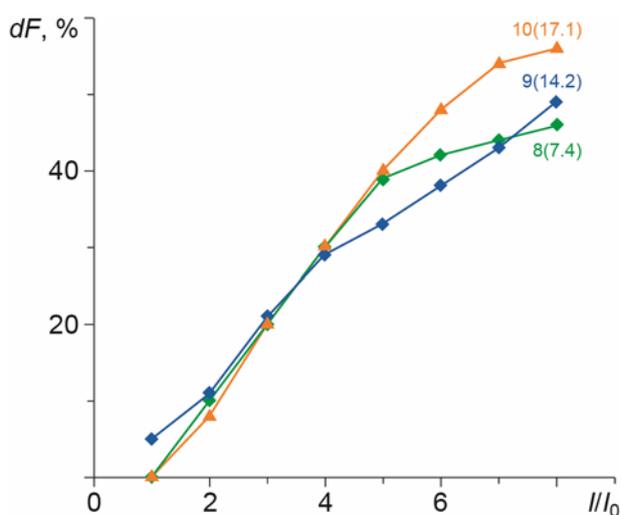


Рис. 6. То же, что на рис. 5 для суспензии из дистиллированной воды с добавлением NaCl (треугольники, оранжевый график) и KCl (ромбы, зеленый и синий графики)

Fig. 6. Same as in Fig. 5 for a suspension of distilled water with the addition of NaCl (triangles, orange plot) and KCl (rhombuses, green and blue plots)

Как упоминалось выше, основная схема проведения экспериментов включала в себя последовательное увеличение приложенных напряжений от 12 до 100 В и нельзя было исключить накапливающееся влияние предыдущих ступеней на замедление

скорости фильтрации dF . С учетом этого были выполнены эксперименты двух типов: при подаче напряжений от большего к меньшему – “обратный ход”, а затем наоборот – “прямой ход”.

Ниже представлены результаты двух таких экспериментов, в которых образец № 9 в первом случае насыщался раствором дистиллированной воды с примесью лимонной кислоты концентрацией $C=0.005\%$ (рис. 7, *слева*), во втором – с примесью лимонной кислоты концентрацией $C=0.01\%$ (рис. 7, *справа*). При этом сначала проводился “обратный ход” (от 100 до 12 В), после этого – “прямой” (от 12 до 100 В). На приводимых графиках не наблюдается какого-либо закономерного изменения, что свидетельствует, видимо, о достаточно эффективной промывке образцов после каждого цикла.

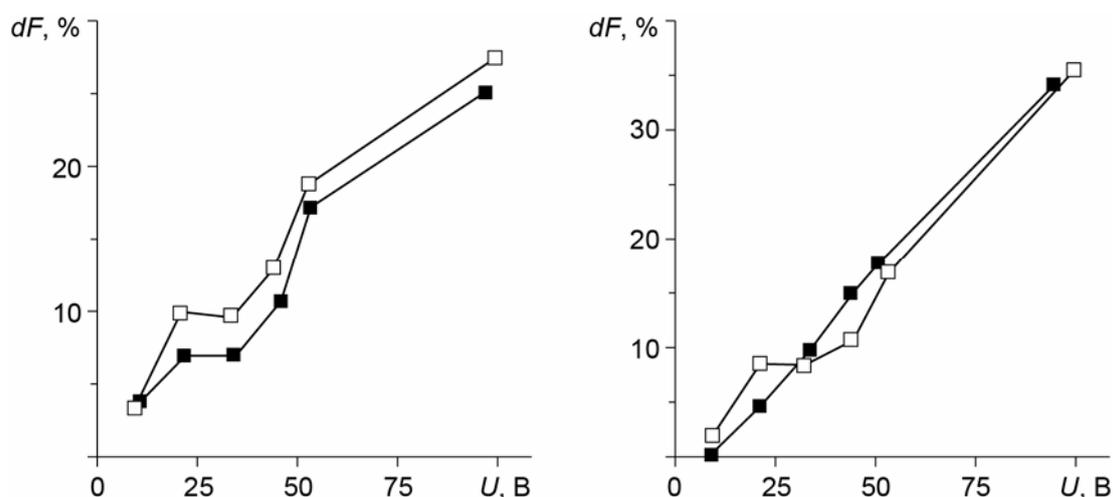


Рис. 7. Зависимость скорости фильтрации dF от напряжения, подаваемого “обратным” (квадраты) и “прямым” (квадраты без заливки) ходом в образце № 9, насыщенном раствором дистиллированной воды с лимонной кислотой концентрацией 0.005 % (*слева*), 0.01 % (*справа*)

Fig. 7. Dependence of the filtration rate on the voltage applied by the “reverse” (squares) and “direct” (squares without filling) path in sample No. 9 saturated with a solution of distilled water with citric acid concentration of 0.005 % (*left*), 0.01 % (*right*)

Для получения общей закономерности изменения скорости фильтрации dF при увеличении силы тока были выполнены следующие расчеты.

В каждом эксперименте, представленном на рис. 5, 6, величина начального тока была принята за единицу. Затем по этим графикам вычислялась скорость фильтрации при величинах тока $I_i=2I_0$, $3I_0$, ... и при линейной аппроксимации между реальными точками измерений. В единичных случаях, когда последняя точка I_i/I_0 была больше семи, но меньше восьми, для получения значений при $I_i=8I_0$ также использовалась линейная аппроксимация. Таким образом, во всех случаях шкала абсцисс включала восемь точек, в каждой из которых dF были определены при одних и тех же значениях. Это дало возможность просуммировать dF в разных экспериментах и найти ее среднее значение (рис. 8). Экспериментальные точки, обозначающие средние значения по восьми экспериментам с дистиллированной водой на рис. 8 показаны серыми кружками; квадратами с заливкой отмечены средние значения dF по восьми экспериментам с раствором дистиллированной воды с лимонной кислотой; квадратами без заливки – средние значения dF по двум экспериментам с раствором дистиллированной воды с лимонной кислотой и добавлением наножидкости.

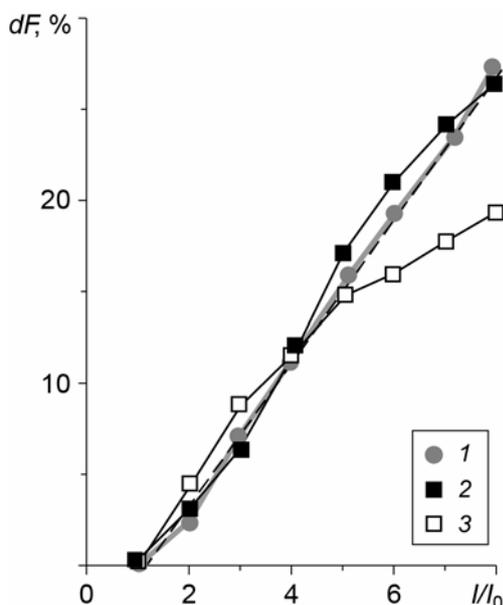


Рис. 8. Зависимость скорости фильтрации dF от нормированной силы тока I/I_0 . Каждый значок отображает средние значения в нескольких экспериментах с разным составом раствора: 1 – дистиллированная вода; 2 – дистиллированная вода с лимонной кислотой; 3 – раствор 2 с добавлением наножидкости

Fig. 8. Dependence of the filtration rate dF on the normalized current I/I_0 . Each mark displays average values in several experiments with different composition of the solution: 1 – distilled water; 2 – distilled water with citric acid; 3 – solution 2 with the addition of nanofluid

Штриховой линией обозначен линейный закон $dF=3.95 \cdot I_i/I_0-4.35$ для опытов с водой, рассчитанный методом наименьших квадратов. Он соответствует экспериментальным данным с высокой точностью – коэффициент детерминации $R^2=0.99$.

Поскольку в экспериментах для каждого значения dF_i известны величина напряжения U , сила тока I и время протекания одной капли флюида через образец T , то можно вычислить затраты энергии $J=U \cdot I \cdot T$, Дж для получения конкретной величины скорости фильтрации. Результаты соответствующей обработки при увеличении dF на 10 и 20 % представлены ниже на рис. 9.

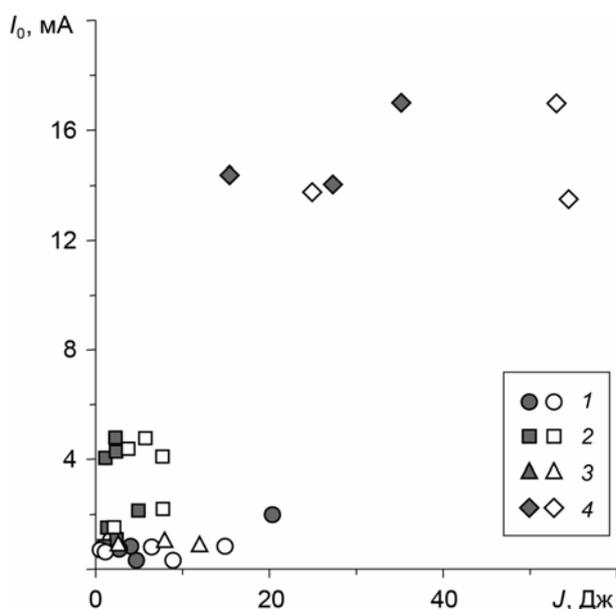


Рис. 9. Затраты энергии для увеличения dF на 10 % (серые значки) или 20 % (значки без заливки) в экспериментах с разным составом раствора: 1 – дистиллированная вода; 2 – дистиллированная вода с лимонной кислотой; 3 – раствор 2 с добавлением наножидкости; 4 – суспензии с KCl и NaCl

Fig. 9. Energy expenditure to increase dF by 10 % (gray marks) or 20 % (marks without filling) in experiments with different composition of the solution: 1 – distilled water; 2 – distilled water with citric acid; 3 – solution 2 with the addition of nanofluid; 4 – suspensions with KCl and NaCl

Можно видеть, что затраты энергии для получения одинаковой степени роста скорости фильтрации в экспериментах с дистиллированной водой, с раствором дистиллированной воды с лимонной кислотой, с раствором дистиллированной воды с лимонной кислотой с добавлением наножидкости примерно одинаковы и находятся в области $J < 20$ Дж (см. рис. 9). При этом в некоторых опытах с использованием раствора

дистиллированной воды с лимонной кислотой была отмечена повышенная величина начального тока I_0 , что не сказалось на затратах энергии. В то же время при применении суспензий с хлористым калием и хлористым натрием потребовались большие затраты энергии для тех же изменений скоростей фильтрации.

Обсуждение результатов

В первую очередь рассмотрим, как воздействие постоянного тока влияет на скорость фильтрации дистиллированной воды (см. рис. 4, 5, 8). Можно видеть, что скорость фильтрации в экспериментах с дистиллированной водой практически не отличается от скорости фильтрации в экспериментах с растворами – вариации скорости связаны с разной пористостью образцов.

Изменение формы графиков вызвано разной степенью заполнения открытых пор глинистыми компонентами, разбухающими при взаимодействии со слабоминерализованным раствором, что отмечалось нами при регистрации электрического сопротивления. Одна из причин изменения электросопротивления обусловлена тем, что электропроводность в порах отличается от электропроводности в свободном растворе на величину поверхностной проводимости [Злочевская, Королев, 1988].

Некоторые из экспериментов с использованием лимонной кислоты представлены на рис. 5 *справа*. В водном растворе лимонная кислота подвергается трехступенчатой диссоциации [Справочник . . ., 1971], в результате чего в раствор переходят одно-, двух- и трёхзарядные ионы водорода, приводя к появлению дополнительного количества ионов. При повышении концентрации ионов возрастает их активность и, как следствие, увеличивается скорость прохождения растворов через образец [Комаров, 1994].

Влияние электролитов при добавлении их в дистиллированную воду отчетливо прослеживается на рис. 6 – проводимость суспензий с хлористым калием и хлористым натрием увеличивается в десятки раз, что вызывает рост силы тока и увеличение скорости фильтрации [Мирдель, 1972].

В целом, эксперименты не выявили существенного и закономерного влияния наночастиц на изменение скорости фильтрации. Возможно, это связано с довольно большим (до 80 нм) размером использованных наночастиц по сравнению с размерами движущихся в электрическом поле ионов (доли нанометров), которые относительно свободно мигрируют в поровом пространстве и, предположительно, увлекают молекулы воды. Заторможенное движение более крупных наночастиц слабо влияет на общую закономерность.

Причина прослеженной разной скорости фильтрации при подаче на верхний электрод положительного и отрицательного напряжений пока остается неясной.

На данном этапе исследований удалось выявить ряд новых экспериментальных фактов зависимости от постоянного электрического тока скорости фильтрации разных жидкостей. Для определения механизмов полученных закономерностей потребуются опыты на образцах разных горных пород и материалов.

Выводы

Общим результатом воздействия постоянного тока на образцы песчаника, насыщенные растворами разного состава, является пропорциональное увеличение скорости фильтрации с увеличением силы тока, возникающее в соответствии с законом электроосмоса.

Градиент роста скорости фильтрации во всех разновидностях растворов не зависит от начального тока и величины силы тока, а определяется отношением прироста силы тока к предыдущему уровню.

Энергетические затраты на одинаковое увеличение скорости фильтрации растворов на основе дистиллированной воды с добавлением лимонной кислоты и наножидкости ниже, чем для суспензий с хлористым калием и хлористым натрием.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук.

Литература

- Анцыферов М.С.* Электросейсмический эффект // Доклады АН СССР. 1962. Т. 144, № 6. С.1295–1297.
- Балбачан М.Я., Томашевская И.С.* Эффект изменения прочности горных пород в результате механоэлектризации // Доклады АН СССР. 1987. Т. 296, № 5. С.1085–1089.
- Бувевич Ю.А., Зубарев А.Ю.* О двойных электрических слоях в концентрированной коллоидной системе // Коллоидный журнал. 1986. Т. 48, № 6. С.1119–1125.
- Духин С.С.* Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. Киев: Наукова думка, 1975. 246 с.
- Духин С.С., Дерягин Б.В.* Электрофорез. М.: Наука, 1976. 332 с.
- Зейгарник В.А., Ключкин В.Н., Окунев В.И.* Влияние электрического тока на акустический отклик механически нагруженных образцов искусственного песчаника // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6, № 3. С.199–208.
- Злочевская Р.И., Королев В.А.* Электроповерхностные явления в глинистых породах. М.: Изд-во МГУ, 1988. 177 с.
- Иванов А.Г.* Эффект электризации пластов Земли при прохождении через них упругих волн // Доклады АН СССР. 1939. Т. 24, № 1. С.41–43.
- Комаров В.А.* Геоэлектрохимия. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1994. 136 с.
- Карапетьяну М.Х.* Введение в теорию химических процессов. М.: Высшая школа, 1981. 333 с.
- Лапшин В.Б., Патонин А.В., Пономарев А.В., Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Строганова С.М.* Инициация акустической эмиссии в обводнённых образцах песчаника // Доклады Академии наук. 2016. Т. 469, № 1. С.97–101.
- Маништейн А.К., Куликов В.А., Эпов М.И., Нефедкин Ю.А.* Изменение сейсмических скоростей в поле постоянного электрического тока // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С.465–473.
- Минаков А.В., Михиенкова Е.И., Неверов А.Л., Бурюкин Ф.А.* Экспериментальное исследование влияния добавки наночастиц на реологические свойства суспензий // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, № 9. С.3–11.
- Мирдель Г.* Электрофизика. М.: Мир, 1972. 608 с.
- Попов Е.А., Селяков В.И.* Изменение проводимости неоднородной среды при пропускании через нее электрического тока // Доклады АН СССР. 1990. Т. 310, № 3. С.83–86.
- Сергеев Г.Б.* Нанохимия. М.: Изд-во МГУ, 2003. 288 с.
- Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Киреевкова С.М., Кулик В.Б., Мамалимов Р.И., Морозов В.А., Смольская А.И., Щербаков И.П.* Нанокристаллы в горных породах. М.: ГЕОС, 2016. 102 с.
- Справочник химика. Том 2. Основные свойства неорганических и органических соединений / Под ред. Б.П. Никольского. Л.: Химия, 1971. 1168 с.
- Суздаев И.П.* Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. Изд. 2-е, испр. М.: Либроком, 2009. 592 с.

- Сургучев Л.М. Применение методов повышения нефтеотдачи и перспективы их применения за рубежом // Нефтяное хозяйство. 1987. № 5. С.72–76.
- Тихомолова К.П. Электроосмос. Л.: Химия, 1989. 248 с.
- Amalokwu K., Spikes K., Wolf K. A simple effective medium approach for the bulk electrical and elastic properties of organic-rich shales // Journal of Applied Geophysics. 2019. V. 169. P.98–108.
- Bayuk I., Popov Y., Parshin A. A new powerful tool for interpreting and predicting in reservoir geophysics: theoretical modeling as applied to laboratory measurements of thermal properties // Proceedings of the International Symposium of the Society of Core Analysts, Austin, Texas, USA. 2011. N 39. P.1–12.
- Bradford S.A., Torkzaban S. Colloid Transport and Retention in Unsaturated Porous Media: A Review of Interface-, Collector-, and Pore-Scale Processes and Models // Vadose Zone J. 2008. V. 7, N 2. P.667–681. doi: 10.2136/vzj2007.0092
- Sobotka J. DC-induced acoustic emission in saturated sand models of sedimentary rock // Acta Geophys. 2009. V. 58, N 1. P.163–172. DOI: 10.2478/s11600-009-0046-1
- Sobotka J. Reservoir Rock Diagnostics for Water or Hydrocarbon Exploration. Acoustic and Electric Fields Interaction Phenomena in Geophysical Research (Seismoelectric & Electroseismic Effect). Springer Nature Switzerland AG, 2019. 115 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31049-3>

Сведения об авторах

СОБОЛЕВ Геннадий Александрович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-24-78. E-mail: sobolev@ifz.ru.

ПОНОМАРЕВ Александр Вениаминович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-88-41. E-mail: avp@ifz.ru

КИРЕЕНКОВА Светлана Михайловна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-88-41. E-mail: ksm@ifz.ru

МАЙБУК Зиновий-Юрий Ярославович – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-40. E-mail: rim@ifz.ru

THE INFLUENCE OF DIRECT CURRENT ON FILTRATION OF SUSPENSIONS IN ROCK: EXPERIMENTAL STUDY

G.A. Sobolev, A.V. Ponomarev, S.M. Kireenkova, Z-Yu.Ya. Maybuk

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The influence of direct current in sandstone samples on the filtration of aqueous suspensions of NaCl, KCl, citric acid, and colloidal solution with aluminum oxide nanoparticles (nanofluids) was experimentally studied in this paper.

The studies were performed using cores of quartz-feldspar sandstone (diameter 30, length 60 mm), porosity 13–15 %, grain size 0.5–1.5 mm. High porosity allowed the solution filtration at atmospheric pressure. Sandstone samples in a heat shrink tube were fixed vertically on the bracket. Platinum mesh electrodes were installed

at the ends of the cores, through which a solution was passed through the sample. Most of the experiments were carried out with sequential stepwise increase in voltages in the range of 12–100 V. Each sample was preliminarily saturated with a solution of a given composition, and the saturation was constant throughout the whole experiment. Further, time during which a fixed solution volume – one, five and ten drops – filtered through the sample at a given voltage was measured. Then the voltage was reduced to zero, and the cycle was repeated at a higher voltage. We used various fluid compositions (suspensions) with different concentration of components from 0.0025 to 0.02 %. The main solvents were distilled and natural water, to which citric acid, nanosized Al_2O_3 particles ranging from 20 to 80 nm, KCl and NaCl were added.

It was established that a general effect of direct current influence on samples with different compositions of suspensions is a proportional increase of the filtration rate with an increase in the ratio of present direct current to initial one. This regularity does not depend on the value of the initial current. The energy expenditure for the same increase in the filtration rate for water, suspensions of citric acid and nanofluids was several times lower than for suspensions with KCl and NaCl.

Keywords: laboratory modeling, fluid filtration, direct current, electroosmosis, nanofluids.

References

- Antsyferov M.S., The electro-seismic effect, *Dokl. Akad. Nauk*, 1962, vol. 144, no. 6, pp. 1295-1297. [in Russian].
- Amalokwu K., Spikes K., Wolf K., A simple effective medium approach for the bulk electrical and elastic properties of organic-rich shales, *Journal of Applied Geophysics*, 2019, vol. 169, pp. 98-108.
- Balbachan M.Ya., Tomashevskaya I.S., Durability change effect as a result of frictional electrification of rocks, *Dokl. Akad. Nauk*, 1987, vol. 296, no. 5, pp. 1085-1089. [in Russian].
- Bayuk I., Popov Y., Parshin A., A new powerful tool for interpreting and predicting in reservoir geophysics: theoretical modeling as applied to laboratory measurements of thermal properties, *Proceedings of the International Symposium of the Society of Core Analysts*, Austin, Texas, USA, 2011, no. 39, pp. 1-12
- Bradford S.A., Torkzaban S., Colloid Transport and Retention in Unsaturated Porous Media: A Review of Interface-, Collector-, and Pore-Scale Processes and Models, *Vadose Zone J.*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 667-681. doi: 10.2136/vzj2007.0092
- Buevich Yu.A., Zubarev A.Yu., About double electric layers in a concentrated colloidal system, *Colloidal journal*, 1986, vol. 48, issue 6, pp. 1119-1125.
- Dukhin S.S., Deryagin B.V., *Elektroforez* (Electrophoresis), Moscow: Nauka, 1976, 332 p. [in Russian].
- Dukhin S.S., *Elektroprovodnost' i elektrokineticheskie svoystva dispersnykh system* (Electrical conductivity and electrokinetic properties of disperse systems), Kiev, Naukova Dumka, 1975, 246 p. [in Russian].
- Ivanov A.G., Electrification effect of the Earth's layers when elastic waves pass through them, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1939, vol. 24, no. 1, pp. 41-43. [in Russian].
- Karapet'yants M.Kh., *Vvedenie v teoriyu khimicheskikh protsessov* (Introduction to the theory of chemical processes), Moscow: Vysshaya shkola, 1981, 333 p. [in Russian].
- Komarov V.A., *Geoelektrokhimiya* (Geo-electrochemistry), St. Petersburg: Izdatel'stvo SPbGU, 1994, 136 p. [in Russian].
- Lapshin V.B., Patonin A.V., Ponomarev A.V., Potanina M.G., Smirnov V.B., Stroganova S.M., Initiation of acoustic emission in fluid-saturated sandstone samples, *Doklady Akademii nauk*, 2016, vol. 469, no. 1, pp. 97-101. [in Russian].
- Manshtein A.K., Kulikov V.A., Epov M.I., Nefedkin Yu.A., Change of seismic velocities in the field of direct electric current, *Geologiya i geofizika* (Geology and Geophysics), 1999, vol. 40, no. 3, pp. 465-473. [in Russian].
- Mierdel G., *Elektrophysik*, Berlin: VEB Verlag Technik, 1970, 607 p.
- Minakov A.V., An Experimental Study of the Effect of Nanoparticle Additives on the Rheological Properties of a Suspension, *Technical Physics Letters*, 2018, vol. 44, issue 9, pp. 3-11.
- Popov E.A., Selyakov V.I., Change in the conductivity of an inhomogeneous medium when electric current passes through it, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1990, vol. 310, no. 1, pp. 83-86. [in Russian].
- Sergeev G.B., *Nanokhimiya* (Nanotechnology), Moscow: Publishing House of MGU, 2003, 288 p. [in Russian].
- Sobolev G.A., Vettegren' V.I., Kireenkova S.M., Kulik V.B., Mamalimov R.I., Morozov V.A., Smul'skaya A.I., Shcherbakov I.P., *Nanokristally v gornyykh porodakh* (Nanocrystals in rocks), Moscow: GEOS, 2016, 102 p. [in Russian].
- Sobotka J., DC-induced acoustic emission in saturated sand models of sedimentary rock, *Acta Geophys.*, 2009, vol. 58, no. 1, pp. 163-172. DOI: 10.2478/s11600-009-0046-1

- Sobotka J., *Reservoir Rock Diagnostics for Water or Hydrocarbon Exploration. Acoustic and Electric Fields Interaction Phenomena in Geophysical Research (Seismoelectric & Electro seismic Effect)*, Springer Nature Switzerland AG, 2019, 115 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31049-3>
- Spravochnik khimika. Tom 2.* (Handbook of a chemist. Vol. 2), Leningrad: Khimiya, 1971, 1168 p. [in Russian].
- Surguchev L.M., Application of enhanced oil recovery methods and prospects for their use abroad, *Neftyanoe khozyaistvo* (Oil industry), 1987, no. 5, pp. 72-76. [in Russian].
- Suzdalev I.P., *Nanotekhnologiya. Fiziko-khimiya nanoklasterov, nanostruktur i nanomaterialov* (Nanotechnology. Physical-chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials.), Moscow: Librokom, 2009, 592 p. [in Russian].
- Tikhomolova K.P., *Elektroosmos* (Electroosmosis), Leningrad: Khimiya, 1989, 248 p. [in Russian].
- Zeigarnik V.A., Klyuchkin V.N., Okunev V.I., Influence of an electrical current on the acoustic response of stressed artificial sandstone samples, *Advances in Applied Physics*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 199-208.
- Zlochevskaya R.I., Korolev V.A., *Elektropoverkhnostnye yavleniya v glinistyykh porodakh* (Electrosurface phenomena in clay rocks), Moscow: Publishing House of MGU, 1988, 177 p. [in Russian].