

УДК 550.34.016; 537.868; 534-18

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО НАСЫЩЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПОЛЯРНЫМИ И НЕПОЛЯРНЫМИ ЖИДКОСТЯМИ НА ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ПРИ ВИБРОВОЗДЕЙСТВИИ

© 2019 г. И.Я. Чеботарева¹, А.Н. Камшилин²

¹ *Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Эксперименты по изучению особенностей сейсмоэлектрического эффекта второго рода при сильной латеральной неоднородности насыщения проводились с использованием кернов песчаника, насыщенного керосином или водными растворами NaCl. Жидкость добавлялась капельным путем через прокол защитной пленки и составляла 6 % от объема порового пространства, что создавало сильную латеральную неоднородность у бокового края цилиндрического образца керна. Все образцы предварительно длительное время просушивались при температуре 110 °С и покрывались защитной пленкой, но, тем не менее, в исходном состоянии содержали остаточную воду. Акустическое воздействие создавалось пьезоэлектрическим вибратором в виде линейно-модулированного по частоте сигнала в диапазоне частот 0.5–10 кГц. Для всех видов насыщения керна в спектрах электрических колебаний наблюдались интенсивные вторые гармоники. Одинаково сильное (до 10 дБ) увеличение среднего по спектру электрического отклика первой гармоники происходило как при капельном введении слабо концентрированного водного раствора NaCl, так и при введении в керн неполярной жидкости – керосина. Однако характер изменения спектра по частоте и временная динамика электрического отклика для полярной и неполярной жидкости различны. Амплитудный спектр отклика керна после добавления керосина сильно меняется во всем диапазоне частот с размахом вариаций более 30 дБ и остается стабильным по форме, но после длительного вибровоздействия уменьшается по амплитуде. Форма спектров электрического отклика после введения растворов NaCl хорошо сохраняется, за исключением узких интервалов сильных вариаций – 2.45–4.95 кГц для раствора NaCl с концентрацией 0.05 моль/л и 5.45–7.15 кГц для раствора NaCl с концентрацией 0.5 моль/л. После длительного вибровоздействия амплитуда спектра уменьшается и сильно изменяется по форме. Амплитуда вторых гармоник для керосина сначала возрастает после флюидизации, затем спадает после длительного вибровоздействия до уровня исходного состояния керна. Для раствора NaCl с концентрацией 0.05 моль/л амплитуда вторых гармоник возрастает после флюидизации и продолжает возрастать после вибровоздействия; при концентрации раствора 0.5 моль/л существенных изменений не наблюдается. Обнаруженные особенности сейсмоэлектрического эффекта второго рода, по-видимому, вызваны именно наличием сильной латеральной неоднородности по насыщению горной породы, что порождает сильно неоднородные электрическое и магнитное поля при распространении продольной волны вдоль оси керна.

Ключевые слова: сейсмоэлектрический эффект второго рода, горные породы, гетерогенные среды, тип флюидонасыщения, лабораторные исследования.

Введение

В данной работе анализируются результаты лабораторных экспериментов по изучению особенностей сейсмоэлектрического эффекта второго рода при сильной латеральной неоднородности насыщения образцов горной породы. Названный эффект, заключающийся в возбуждении электромагнитных колебаний при распространении акустических волн в насыщенных жидкостью пористых горных породах, был обнаружен

А.Г. Ивановым [1939] при синхронной регистрации сейсмических и электрических сигналов от близких слабых взрывов. Толчком к развитию теории сейсмоэлектрического эффекта послужили работы Я.И. Френкеля, М. Био и С. Прайда [Френкель, 1944; Biot, 1956; Pride, 1994; Pride, Haartsen, 1996]. Теоретически появление электрического сигнала при распространении акустических волн в пористых насыщенных флюидом горных породах объясняется механоэлектрическими преобразованиями энергии, возникающими при смещении проводящего флюида относительно твердого скелета. При прохождении плоской продольной акустической волны возникает электрическое поле, поляризованное в направлении ее распространения.

В представлении Я.И. Френкеля [1944] напряженность электрического поля описывается как $E_x \sim (\varepsilon \zeta / \eta \sigma) \omega^2 u_x$, где ε – диэлектрическая проницаемость жидкости; ζ – дзета-потенциал; η – динамическая вязкость; σ – электрическая проводимость жидкости; ω – частота колебаний; u_x – амплитуда смещения частиц породы в направлении распространения волны. Экспериментально надежно установлено, что с ростом концентрации электролита напряженность электрического поля уменьшается [Пархоменко, 1977; Симонян, 1987]. Однако авторами работы [Chen, Mu, 2005] было обнаружено, что при сейсмоэлектрическом эффекте с ростом концентрации электролита напряженность электрического поля может сначала возрастать до некоторой величины и только потом уменьшаться. В названной работе исследовался сейсмоэлектрический эффект при ультразвуковом воздействии на песочницу, заполненную кварцевым песком и растворами хлорида натрия с разными концентрациями. При некоторой концентрации электролита отмечалась максимальная амплитуда эффекта, а при более низкой и более высокой концентрации амплитуды эффекта были меньше. С ростом концентрации электролита эффект уменьшается, и выражение для напряженности электрического поля приобретает вид $E_x \sim \zeta \sim 1/\sqrt{C}$ [Волков, 2015; Черняк, 1987], где C – концентрация электролита.

Согласно теории и известным результатам физического моделирования, на сухих газонасыщенных образцах пород сейсмоэлектрический эффект отсутствует [Анциферов, 1958; Пархоменко, Чжао Цзе-Сань, 1964; Пархоменко, Гаскаров, 1971; Агеева и др., 1999]. Для водомасляных эмульсий величина сейсмоэлектрической передаточной функции уменьшается с ростом доли неполярной жидкости [Агеева, 2008] и “передаточная функция приблизительно одинаково реагирует на увеличение содержания в поровом пространстве пород газа и неполярной жидкости” [Агеева, 2008, с.18]. В соответствии с этим добавление в образец зерна неполярной жидкости не должно приводить к существенному росту амплитуды сейсмоэлектрического эффекта.

Теория сейсмоэлектрического эффекта второго рода разработана для предельно насыщенных высокопроницаемых пористых сред. Для реальных многофазных, неравномерно насыщенных горных пород сейсмоэлектрический эффект может иметь свои особенности. Если в однородно насыщенной среде при прохождении плоской продольной волны возбуждается электрическое поле только одного направления, то при распространении такой же волны в среде с латеральными петрофизическими неоднородностями в общем случае возбуждаются не только компоненты электрического поля, но и магнитное поле. Численное моделирование [Московский и др., 2015] показывает, что даже простая модель с одним латерально неоднородным влагонасыщенным слоем вызывает сильную, зависящую от параметров осцилляцию отношения модулей компонент электрического и акустического поля. Максимальное значение отношения модулей наблюдается вблизи скачка петрофизических свойств пород. При распространении акустических сигналов в условиях неоднородных электрических и магнитных полей сейсмоэлектрический эффект может значительно усиливаться; при этом возможно проявление

его нелинейности [Черняк, 1975, 1976, 1987; Тереньтьев, 1992; Нейштадт, Эпельбаум, 2012; Зейгарник, Ключкин, 2015].

Особенности сейсмоэлектрического эффекта при сильной латеральной неоднородности по насыщенности полярными и неполярными жидкостями еще недостаточно исследованы. Авторы постарались получить эмпирические результаты, которые могут быть полезны для понимания сейсмоэлектрических процессов в гетерогенном, структурно неоднородном природном массиве.

Схема эксперимента и методика обработки данных

Экспериментальные исследования проводились на образцах керна песчаника *Berea Grey*. Этот вид осадочных пород с известными и стабильными физико-химическими свойствами широко используется при физическом моделировании процессов, протекающих в горных породах. В песчанике *Berea Grey*, относящемся к высокопористым и высокопроницаемым породам, зерна представлены кварцевым песком и скреплены между собой кремнеземом. В наших опытах использовались цилиндрические образцы диаметром 30 мм и длиной 60 мм; коэффициент пористости – 20 %; скорость упругих продольных волн – 2.24 км/с. Все образцы предварительно просушивались в течение четырех часов при температуре 110 °С, после чего для герметизации боковой поверхности они заключались в термоусадочную пленку. Однако, как показали результаты экспериментов, полностью просушить образцы не удавалось – все они содержали остаточную воду, в связи с чем далее будем называть состояние образцов перед началом опытов условно сухим.

В экспериментах применялась подробно описанная в [Kamshilin et al., 2004; Камшилин, Казначеев, 2015] лабораторная установка, схема которой изображена на рис. 1.

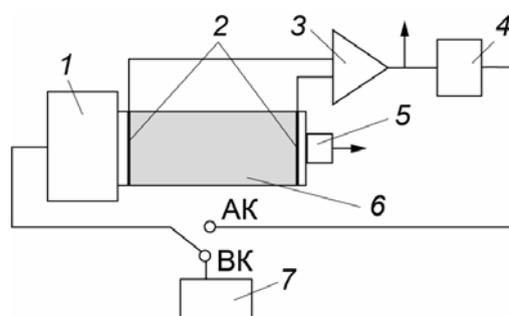


Рис. 1. Лабораторная установка: 1 – акустический пьезопреобразователь-вибратор, 2 – электроды, 3 – селективный усилитель, 4 – фазовращатель, 5 – акустический приемник, 6 – исследуемый образец, 7 – генератор свип-сигналов, АК – положение переключателя в режиме автоколебаний, ВК – положение переключателя в режиме вынужденных колебаний; стрелки – выходы для регистрации акустических и электрических сигналов

Fig. 1. Laboratory setup: 1 – acoustic piezoelectric transducer-vibrator; 2 – electrodes; 3 – selective amplifier; 4 – phase shifter; 5 – acoustic receiver; 6 – sample; 7 – sweep-signal generator, arrows show outputs for recording acoustic and electrical signals. AK and BK show position of the switch in the mode of self-oscillations and forced oscillations, respectively. Arrows show outputs for recording acoustic and electrical signals

В зависимости от положения переключателя установка может попеременно работать в двух режимах – вынужденных колебаний (ВК) и автоколебаний (АК). В режиме вынужденных колебаний (ВК) на вход пьезопреобразователя-вибратора 1 подавался

постоянный по амплитуде сигнал от генератора свип-сигналов 7. Частота колебаний менялась в диапазоне 0.5–10 кГц с заданным шагом по времени и частоте.

В режиме автоколебаний (АК) генератор отключался; замыкалась цепь обратной связи с выхода фазовращателя 4 на вход вибратора 1. Путем регулировки коэффициента усиления электрического сигнала и фазового сдвига в полученном замкнутом контуре достигался баланс амплитуд и баланс фаз, образование положительной обратной связи и, как следствие, возникновение автоколебаний, основанных на механоэлектрических преобразованиях в образце. Сдвиг фаз производился с помощью фазовращателя 4. Исследуемый образец 6 закреплялся таким образом, что на одном его торце возбуждались ультразвуковые колебания с продольными смещениями вдоль оси цилиндра, а на другом регистрировался акустический сигнал. Регистрация акустических колебаний осуществлялась с использованием пьезоэлектрического преобразователя П113-(06–1.0); коэффициент преобразования по напряжению составлял 18 ± 0.8 мВ·с²/м [Пилипенко, Дякун, 2012]. Электрический сигнал (разность потенциалов) снимался с электродов, закрепленных на торцах образца.

Эксперименты проводились с насыщением образцов полярными и неполярными жидкостями. Первые были представлены водными растворами NaCl разной концентрации, вторые – керосином. Концентрация слабоминерализованного раствора NaCl составляла 0.05 моль/л, сильноминерализованного – 0.5 моль/л. Керосин, являющийся смесью жидких углеводородов, может иметь разный состав, но в основном состоит из алканов и циклоалканов – насыщенных углеводородов с нулевым дипольным моментом молекул, низкой полярностью, поляризуемостью и химической активностью.

В начале эксперимента для каждого изначально условно сухого образца выполнялся опыт в режиме ВК с регистрацией электрического и акустического сигналов при вибровоздействии свип-сигналом. Во всех опытах на вход излучателя продольных акустических колебаний подавался одинаковый по амплитуде сигнал от генератора ультразвуковых колебаний, частота которого ступенчато увеличивалась на заданную величину с заданным шагом по времени. После проведения опыта в режиме ВК установка запускалась в режиме АК и работала некоторое время с контролем частоты колебаний. Затем пленка на боковой поверхности образца прокалывалась, и с помощью пипетки под пленку вводилась жидкость. Количество жидкости не превышало 0.5 мл, т.е. составляло не более 1.2 % от объема образца и менее 6 % от объема его порового пространства. Автоколебания продолжались до резкого изменения частоты, что расценивалось как индикатор момента проникновения жидкости в образец на глубину, достаточную для того, чтобы отразиться на особенностях проявления сейсмoeлектрического эффекта. Время от момента введения жидкости до момента изменения частоты автоколебаний для всех использованных жидкостей оказалось равным ~60–80 мин. Затем установка снова переключалась в режим ВК, и уже для насыщенных образцов регистрировались электрический и акустический сигналы при воздействии свип-сигналом. Последний опыт повторялся через сутки с предварительной 6-часовой вибрацией в режиме АК.

Частотно-временной анализ записей электрических и акустических сигналов показал их сложную структуру. Помимо сигнала с частотой генератора, экспериментальные записи содержат гармоники, а также помехи с постоянной или медленно меняющейся частотой. Пример частотно-временного представления электрического сигнала при латерально неоднородном насыщении образца керосином показан на рис. 2, где хорошо видны его первая, вторая и третья гармоники. Для очистки записей и получения зависимостей амплитуды основной частоты отклика и ее гармоник от частоты акустического воздействия записи дополнительно обрабатывались по схеме, кратко описываемой ниже (подробное описание схемы см. в [Чеботарева, Камшилин, 2018]).

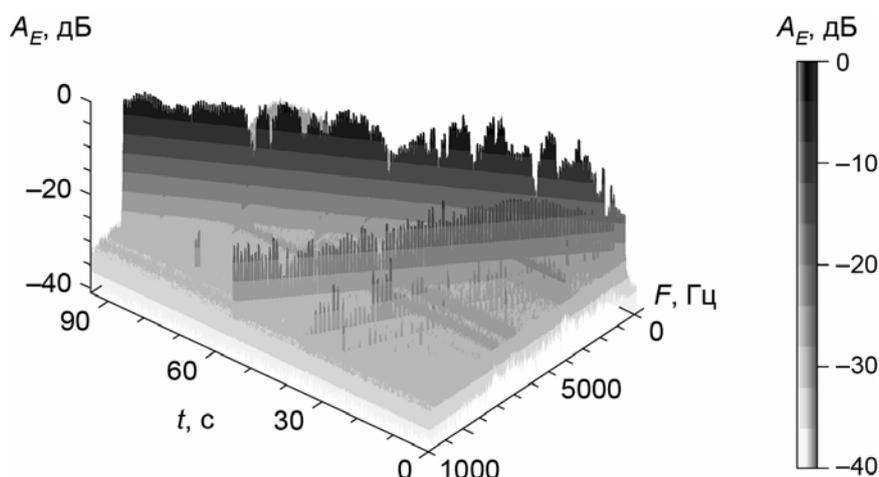


Рис. 2. Частотно-временной спектр электрического сигнала E при латерально неоднородном насыщении керосином условно сухого образца

Fig. 2. The time-frequency spectrum of the electrical signal E with a laterally inhomogeneous kerosene saturation of a conditionally dry sample

По получаемым записям электрических и акустических сигналов с помощью преобразования Фурье в скользящем временном окне рассчитывались их частотно-временные представления. Затем выделялись ветви экстремумов основной частоты и ее наиболее интенсивных гармоник с помощью оригинального алгоритма с ранжированием [Чеботарева, Камшилин, 2018], учитывающего случайные аппаратные флуктуации шагов свип-сигнала по времени и частоте.

Используемый алгоритм учитывал также возможность пересечения с экстремумами высокоамплитудных помех и наличие соизмеримых амплитуд разных гармоник. В результате, вместо временных зависимостей получались амплитудные зависимости от частоты воздействия для наборов гармоник акустических и электрических сигналов.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Анализ экспериментальных записей показал, что в реальной обстановке при наличии помех на частотно-временных спектрах устойчиво выделяются сигналы в диапазоне 40 дБ от максимума основной гармоники. В этот диапазон попадают основная гармоника акустических сигналов, а также основная и вторая гармоники электрических сигналов, которые и подвергались дальнейшему анализу.

При сравнительном анализе результатов для разных образцов использовалась нормировка частотно-временных спектров акустических и электрических сигналов на максимумы соответствующих значений для условно сухих образцов. В описываемых экспериментах коэффициенты остаточной водонасыщенности не определялись. Однако в связи с тем, что все образцы подвергались одной и той же предобработке и для всех условно сухих кернов максимальные амплитуды акустических и электрических спектров были примерно одинаковы, можно полагать, что значения петрофизических параметров исследуемых образцов близки между собой. Это позволяет сравнивать результаты, полученные в ходе экспериментов для разных образцов.

Зависимости от частоты вибровоздействия спектральных амплитуд синхронных электрических и акустических сигналов при использовании керосина и водных растворов NaCl с разной концентрацией показаны на рис. 3, 4.

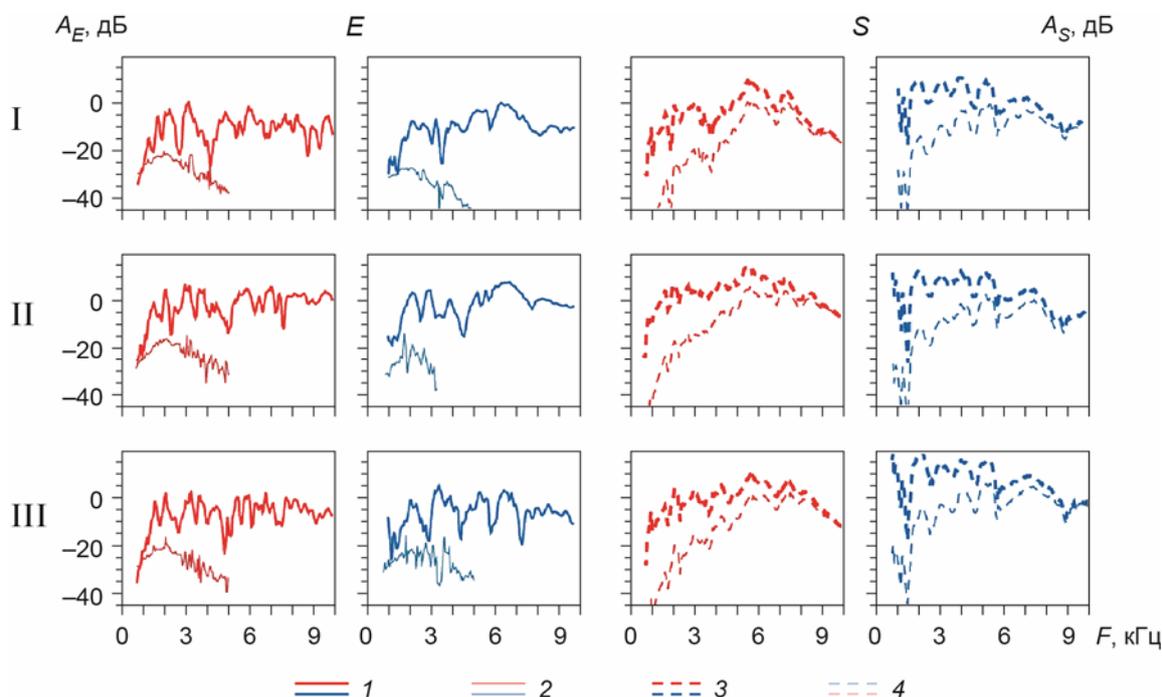


Рис. 3. Зависимости от частоты вибровоздействия спектральных амплитуд синхронных электрических E и акустических S сигналов при использовании керосина (красные кривые) и водного раствора NaCl с концентрацией 0.05 моль/л (синие кривые). Для сигнала E здесь и на рис. 4 показаны амплитуды первой (1) и второй (2) гармоник; для сигнала S – ускорения (3) и смещения (4) сигнала. Ряд I – графики для условно сухого образца; ряд II – после введения жидкости; ряд III – через сутки после введения жидкости и 6-часовой вибрации в режиме АК. Нормировка по максимуму условно сухого зерна. Шкала амплитуд единая для всех графиков

Fig. 3. Vibration frequency dependences of the spectral amplitudes of synchronous of electrical E and acoustic S signals for kerosene (red curves) and for NaCl water solution with concentration of 0.05 mol/l (blue curves). The amplitudes of the first (1) and second (2) harmonics are shown for signal E here and in Fig. 4; acceleration (3) and displacement (4) are shown for signal S . I – graphs obtained for conditionally dry core; II – graphs obtained after addition of weak salt solution; III – graphs obtained a day after adding the solution and prolonged vibration for 6 hours in the mode of self-oscillations. Normalization to the maximum of conditionally dry core. The amplitude scale is the same for different signals

Для акустических сигналов на рис. 3, 4 приведены графики измеренных в эксперименте ускорений (\ddot{u}) и смещений (u), пересчитанных по формуле $u = \ddot{u} / \omega^2$, где ω – частота колебаний. При сравнении спектров акустических колебаний видно, что для разных образцов формы спектров несколько различны, хотя на вход генератора колебаний подавался сигнал одной и той же амплитуды. Можно полагать, что разный отклик на одинаковое торцевое воздействие связан с особенностями строения порового пространства и наличием трещин в природном материале. Значения максимальных амплитуд акустических спектров для всех образцов примерно одинаковы, без anomalously больших пиков, что позволяет проводить совместный анализ электрических откликов. Из сравнения графиков следует, что форма спектра акустического сигнала после увлажнения образцов существенно не меняется.

Во Введении отмечено, что согласно теоретическим представлениям о механизме сейсмoeлектрического эффекта второго рода, в сухих породах электрический отклик на вибровоздействие отсутствует. Наблюдаемый в представленных экспериментах отклик

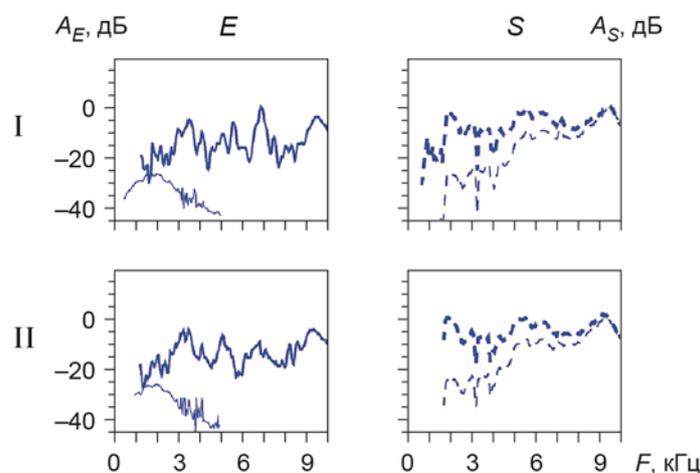


Рис. 4. Зависимость от частоты вибровоздействия F спектральных амплитуд синхронных электрических E и акустических S сигналов при использовании водного раствора NaCl с концентрацией 0.5 моль/л. Ряд I – графики для условно сухого керна, ряд II – после введения раствора NaCl. Нормировка по максимуму условно сухого керна. Условные обозначения см. на рис. 3

Fig. 4. Vibration frequency dependences of the spectral amplitudes of synchronous electrical E and acoustic S signals when using NaCl water solution concentration of 0.5 mol/l. I – graphs obtained for conditionally dry core; II – after the injection of NaCl solution. Normalization to the maximum of conditionally dry core. Notations see in Fig. 3

условно сухого песчаника можно объяснить наличием остаточной воды в образцах. Хотя, как упоминалось выше, образцы просушивались длительное время при высокой температуре и их боковая поверхность покрывалась защитной пленкой, вода могла остаться в виде пленок на поверхности пор, трещин и в узких капиллярах.

Для всех условно сухих и насыщенных образцов прослежено наличие вторых гармоник. После введения керосина на частотно-временных спектрах четко проявилась и третья гармоника с амплитудой, лежащей в диапазоне от -35 дБ до -40 дБ (см. рис. 2).

Необходимо уточнить, что на рис. 3, 4 спектры показаны как функции амплитуды вибровоздействия, т.е. для акустического сигнала и первой гармоники электрического сигнала частота сигнала и частота воздействия совпадают. Для второй гармоники электрического сигнала частота воздействия составляет половину частоты сигнала, определяемой по частотно-временному представлению.

Появление вторых гармоник наблюдалось ранее и другими авторами в экспериментах с наложением дополнительного внешнего электрического поля (см., например, [Черняк, 1987; Тереньтьев, 1992; Зейгарник, Ключкин, 2015]). Однако в нашем случае внешнее электрическое поле не накладывалось, при этом наблюдались одновременно и вторая, и первая гармоники. Первая гармоника преобладает по амплитуде на всех частотах, вторая сравнима с ней в низкочастотном диапазоне и превышает -40 дБ в остальном диапазоне частот.

Амплитуда гармоник разным образом зависит от частоты воздействия, что отмечалось и авторами названных выше работ.

Результаты сравнения особенностей электрического отклика при разных типах насыщения иллюстрируют рис. 5, 6 и статистические оценки, приведенные в табл. 1, 2. Спектры электрического отклика имеют резонансную форму с высокоамплитудными осцилляциями.

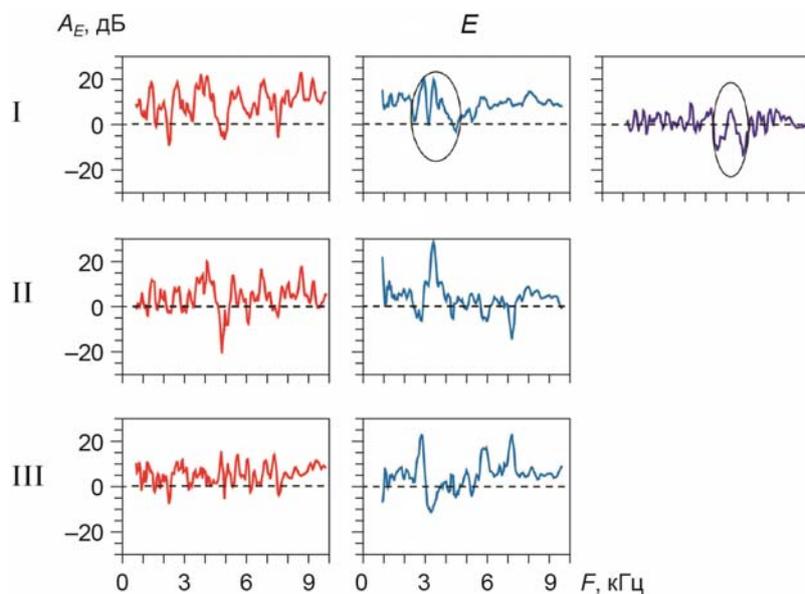


Рис. 5. Приращение спектральных амплитуд первых гармоник электрических сигналов при насыщении образцов керосином (красные кривые) и водным раствором NaCl разной концентрации (0.05 моль/л – синие кривые, 0.5 моль/л – фиолетовые). Ряд I – разности между спектрами насыщенных и условно сухих образцов; ряд II – разности между спектрами насыщенных образцов после длительной вибрации и условно сухих образцов; ряд III – разности между спектрами насыщенных образцов до и после длительной вибрации. Овалами помечены anomalously большие вариации спектра

Fig. 5. The increment of the spectral amplitudes of the first harmonics of electrical signals when samples are saturated with kerosene (red curves) and NaCl water solution of different concentration (0.05 mol/l – blue curves, 0.5 mol/l – purple). I – differences between the spectra of saturated and conditionally dry samples; II – differences between the spectra of saturated samples after prolonged vibration and conditionally dry samples; III – are differences between the spectra of saturated samples before and after prolonged vibration. Ovals indicate the anomalously large variations of the spectrum

Вид статистических распределений спектральных амплитуд специально не исследовался, поэтому при изучении статистики электрических откликов использованы робастные оценки, не зависящие от вида распределения исходных временных рядов – медианное значение, размах вариации, коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

После введения в образцы керосина и слабоминерализованного (0.05 моль/л) водного раствора NaCl величина электрического отклика сильно возрастает и для первой, и для второй гармоник. Для первой среднее по спектру приращение амплитуды составляет около 10 дБ для керосина и около 9 дБ для водного раствора (см. рис. 5).

Для вторых гармоник приращение в обоих случаях примерно одинаково и составляет около 5 дБ (см. рис. 6). При насыщении керосином для первой гармоники отмечаются высокоамплитудные осцилляции во всем диапазоне частот при размахе вариации более 30 дБ, т.е. форма спектра электрического отклика после капельного добавления керосина очень сильно меняется по спектру – происходит смещение всех экстремумов.

Через сутки после насыщения и 6-часового вибровоздействия в режиме автоколебаний амплитуда основной гармоники электрического отклика уменьшается и для керосина, и для слабоминерализованного (0.05 моль/л) водного раствора. Среднее по спектру приращение по сравнению с условно сухим образцом для основной гармоники через сутки уменьшается до 5 дБ (см. рис. 5 и табл. 2).

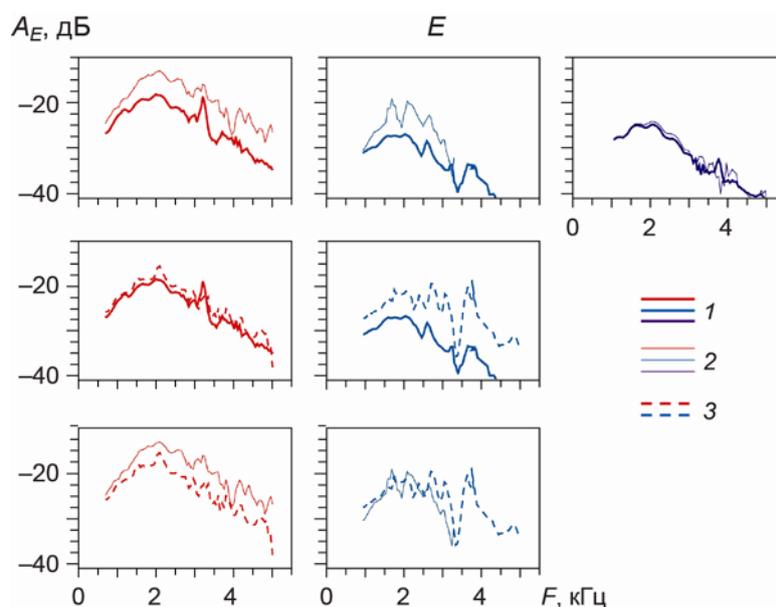


Рис. 6. Сравнение амплитуд вторых гармоник электрического сигнала в зависимости от частоты вибровоздействия для условно сухих и насыщенных образцов при разных типах насыщения. Красные кривые – насыщение керосином; синие – водным раствором NaCl с концентрацией 0.05 моль/л; фиолетовые – водным раствором NaCl с концентрацией 0.5 моль/л. Нормировка по максимальному сигналу первой гармоники для условно сухого керна. 1 – графики для условно сухих образцов; 2 – для насыщенных образцов после смены частоты автоколебаний; 3 – для насыщенных образцов через сутки после 6-часовой вибрации в режиме автоколебаний

Fig. 6. Comparison of the amplitudes of the second harmonics of the electric signal for conditionally dry and saturated samples depending on the vibration frequency at different types of saturation. Red curves – kerosene saturation; blue – NaCl water solution with concentration of 0.05 mol/l; purple – NaCl water solution with concentration of 0.5 mol/l. Normalization to the maximum signal of the first harmonic for conditionally dry core. 1 – graphs for conditional dry samples, 2 – for saturated samples after changing the frequency of self-oscillations, 3 – for saturated samples a day after a 6-hour vibration in the mode of self-oscillations

Таблица 1. Статистические параметры приращения спектральных амплитуд ΔA_E основной гармоники электрического отклика до и после флюидизации образцов

Расчетная статистика	Керосин	NaCl, 0.05 моль/л	NaCl, 0.5 моль/л
Узкий аномальный частотный диапазон с высокоамплитудными вариациями спектра сигнала, кГц		2450–4950	5450–7150
Размах вариации в аномальном частотном диапазоне, $R_1 = (\Delta A_{\max} - \Delta A_{\min})$, дБ		23.7	22.3
Размах вариации за пределами аномального частотного диапазона, $R_2 = (\Delta A_{\max} - \Delta A_{\min})$, дБ	31.3	13.5	11.4
Медианное значение за пределами аномального частотного диапазона, $M = \text{median}(\Delta A)$, дБ	9.7	9.2	1.2
Коэффициент осцилляции за пределами аномального частотного диапазона, $\rho = R_2/M$	12.03	1.64	3.24
Медианное значение во всем диапазоне частот, дБ	9.7	8.8	1.08

Таблица 2. Статистические параметры приращения спектральных амплитуд ΔA_E основной гармоники электрического отклика насыщенных кернов до и после продолжительного вибровоздействия

Расчетная статистика	Керосин	NaCl, 0.05 моль/л
Коэффициент ранговой корреляции Спирмена	0.7	0.3
Размах вариации, $R=(\Delta A_{\max}-\Delta A_{\min})$, дБ	20.1	33.4
Медианное значение, $M=median(\Delta A)$, дБ	5.3	4.9
Коэффициент осцилляции вариаций, $\rho=R/M$	5.5	26.6

При этом форма спектра для образца, насыщенного керосином, после длительной вибрации почти не изменяется, а спектр электрического отклика для слабоминерализованного водного раствора (0.05 моль/л) претерпевает сильные изменения. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена спектров до и после продолжительного вибровоздействия составляет 0.7 для керосина и 0.3 для водного раствора с концентрацией 0.05 моль/л.

Характер изменения спектров вторых гармоник иной. Для керосина после продолжительной вибрации амплитуда второй гармоники спадает до уровня отклика условно сухого керна, а для слабоминерализованного раствора амплитуда второй гармоники, наоборот, даже несколько возрастает (см. рис. 6).

При использовании сильноминерализованного (0.5 моль/л) водного раствора NaCl как для первой, так и для второй гармоники увеличение среднего уровня спектра электрического отклика практически не наблюдается. Для первой гармоники медианное среднее приращение по сравнению с условно сухим керном равно 1.2 дБ. Существенные изменения спектра произошли только в узком диапазоне частот 5.45–7.15 кГц (см. рис. 5), где размах вариаций спектра составил 22 дБ; в остальном диапазоне частот медианное абсолютное отклонение значений <1.8 дБ.

При увлажнении концентрированным раствором соли повторно автоколебания воспроизвести не удалось. Электрический отклик, измеренный через 24 ч без предварительной продолжительной вибрации, оказался сильно ослабленным по амплитуде (на приведенных рисунках он не показан).

Характер поведения первой гармоники при сильно неоднородном насыщении керна водными растворами соли достаточно хорошо соответствует поведению электрического отклика на акустическое воздействие равномерно насыщенных кернов. Известно, что при больших концентрациях электролитов электрический отклик спадает с ростом концентрации. Графики, приведенные в работе [Агеева и др., 1999], позволяют оценить отличия амплитуд электрического отклика для раствора поваренной соли при изменении концентрации от 0.05 моль/л до 0.5 моль/л, что соответствует изменению концентрации от 2.9 г/л до 29 г/л в названной работе. В случае равномерного насыщения образцов песчаника отклик уменьшается в 4 раза для частоты воздействия 20 кГц и в 20 раз для частоты воздействия 400 Гц [Агеева и др., 1999]. В нашем случае неоднородного насыщения образцов в среднем по диапазону 0.5–10 кГц электрический отклик уменьшился примерно в 3 раза (см. табл. 1). Однако если учесть, что существуют диапазоны сильной вариации приращений амплитуд отклика (см. рис. 5), эти отличия на произвольно выбранной частоте могут составлять и более 20 раз.

В описанных опытах, как уже упоминалось, обнаружено ожидаемое уменьшение амплитуды электрического отклика с течением времени, чему способствует несколько факторов. За счет фильтрации жидкости вглубь керна контрастность по насыщению

уменьшается. Происходит также перераспределение заряженных ионов, компенсирующее электрическое поле в направлении, ортогональном оси акустического воздействия. Противоионы частично адсорбируются поверхностью твердой фазы. В случае высококонцентрированного электролита дополнительное уменьшение электрического отклика происходит за счет увеличения концентрации остаточной поровой воды, присутствующей в условно сухих кернах.

Выявленный при проведении экспериментов факт сильного увеличения электрического отклика при добавлении в керна неполярной жидкости контрастирует с известными результатами физического моделирования в случае равномерного насыщения кернов. Как упоминалось во Введении, в экспериментах с равномерным насыщением [Агеева, 2008] электрический отклик одинаковым образом реагирует на наличие в поровом пространстве газовой компоненты и неполярной жидкости, а насыщение порового пространства смесью полярной и неполярной жидкостей приводит к уменьшению передаточной функции с ростом доли неполярной жидкости. Однако в экспериментах с латерально неоднородным слабым насыщением наблюдается противоположный эффект. При добавлении керосина средний по спектру уровень возрастает даже больше, чем для электролита, а за счет сильной варибельности спектра на многих частотах это превышение становится весьма значительным (см. рис. 5).

Мы полагаем, что обнаруженные особенности сейсмoeлектрического эффекта связаны именно с сильной латеральной неоднородностью по насыщению, в окрестностях которой формируется сильно неоднородное поле электромагнитного отклика. В зависимости от технологии производства керосин может содержать различные присадки, небольшое количество воды, примеси сернистых, азотистых или кислородных соединений. При фильтрации керосина в кернах песчаника в него попадают механические примеси в виде частиц кварца, кремнезема, глины. Остаточная вода в порах кернов, химические и механические примеси в условиях акустической вибрации способствуют образованию устойчивых водно-керосиновых эмульсий и формированию слоистых и пространственных структур дисперсной фазы [Евдокимов, 2012]. Из-за наличия воздуха при фильтрации в поровом пространстве вероятно образование даже сложных трехфазных воздушно-водно-керосиновых эмульсий. Распределение капель по размерам в таких эмульсиях является достаточно широким. С одной стороны, крупные капли дисперсной фазы способны “запирать” потоки жидкости, способствуя стабилизации формы и положения неоднородности по насыщению керна керосином. Этим объясняется долговременная стабильность формы спектра электрического сигнала.

С другой стороны, мелкие капли работают на генерацию электрического отклика. Каждая дисперсная частица имеет свой двойной электрический слой. В отсутствии внешнего электрического поля каждая частица имеет внешний заряд, знак которого зависит от природы центрального ядра. При наличии внешнего электрического поля происходит поляризация зарядов дисперсных капель. При достаточно большом числе капель дисперсной жидкости за счет ориентации по полю образуются линейные и пленочные структуры повышенной проводимости за счет “прыжковых” механизмов переноса ионов между контактирующими каплями [Евдокимов, 2012]. Движение заряженных, поляризованных частиц и деформации дисперсных структур при акустическом воздействии будут вносить свой вклад в формирование стороннего электрического поля. В свою очередь, переменное неоднородное электромагнитное поле, наиболее сильное и вблизи границ резкой смены типа насыщения, будет вызывать возмущение деформаций дисперсных структур. Такое самосогласованное взаимодействие способно вызвать параметрические резонансные явления и усиление сейсмoeлектрического эффекта во внешнем неоднородном электромагнитном поле.

Обнаруженные в данных экспериментах эффекты должны наблюдаться и в природном массиве при фильтрации под воздействием сейсмических волн в области водонефтяных контактов, а также в зоне подготовки очага землетрясения при внедрении флюида в образующиеся и растущие трещины.

Выводы

Как показали эксперименты по физическому моделированию, при неоднородности петрофизических параметров природного массива, в частности, неоднородности по насыщению, могут проявляться особенности сейсмоэлектрического эффекта второго рода, которые не наблюдаются при предельном насыщении пород. Поскольку все результаты получены с использованием трех образцов керна песчаника, для подтверждения полученных результатов необходимо проведение дальнейших исследований на более представительной выборке кернов и для разных горных пород.

Приведенные в статье предварительные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. В описанной серии экспериментов сильное увеличение электрического отклика на вибровоздействие отмечено не только для электролита, но и для керосина, являющегося неполярной жидкостью. Среднее по частотному диапазону приращение спектральной амплитуды первой гармоники относительно условно сухого керна составляет 10 дБ, размах вариации составляет более 30 дБ. Различные химические и механические добавки в керосине, остаточная вода и поровый газ в условиях акустической вибрации и фильтрации жидкости в пористой породе способствуют образованию сложных воздушно-водно-керосиновых эмульсий и даже формированию слоистых и пространственных структур дисперсной фазы. Возникновение электрического отклика при неоднородном насыщении керна керосином авторы связывают с движением заряженных, поляризованных дисперсных частиц и деформацией дисперсных структур. Пространственная неоднородность по насыщению способствует созданию сильного неоднородного электромагнитного поля и усиливает сейсмоэлектрический эффект второго рода. Аналогичные явления должны наблюдаться и в природном массиве в области водонефтяных контактов и при слабом неоднородном насыщении пород любым типом флюида.

2. Сейсмоэлектрический эффект второго рода, при добавлении в керн керосина и раствора соли имеет отличительные особенности. После добавления слабого электролита, форма спектра электрического отклика повторяет форму спектра отклика условно сухого керна, что подтверждает предположение о том, что электрический отклик условно сухого керна на вибровоздействие в данной серии опытов обусловлен наличием остаточной воды. При длительной вибрации в течение нескольких часов форма спектра сильно изменяется и амплитуда отклика падает. Последнее связано с фильтрацией раствора соли в керне и с “размазыванием” неоднородности по насыщению.

После добавления в керн керосина, в отличие от электролита, форма спектра электрического отклика сильно изменяется по сравнению с формой спектра отклика условно сухого керна. Однако при длительной вибрации электрический отклик хоть и уменьшается по амплитуде, но практически не изменяется по форме. Это связано, видимо, со стабилизацией неоднородности по насыщению за счет “запирания” потоков фильтрации в порах крупными каплями дисперсной фазы.

3. В данной серии опытов наблюдается нелинейность электрического отклика кернов на вибровоздействие, что проявляется в наличии интенсивных гармоник. На низких частотах вторая гармоника сравнима по амплитуде с первой, а на остальных частотах ее уровень более –40 дБ. Высшие гармоники и ранее наблюдались другими

авторами в опытах по физическому моделированию сейсмoeлектрического эффекта второго рода, но при наложении дополнительного ортогонального электрического поля. В представленных экспериментах дополнительное внешнее электромагнитное воздействие не производилось. Однако латеральная неоднородность по насыщению формирует электрический отклик в виде пространственно неоднородного электрического и магнитного поля даже при акустическом воздействии плоской продольной волной. Это неоднородное поле может рассматриваться как самосогласованное поле, дополнительно действующее на движущиеся заряды и диполи.

4. Для неполярной жидкости при наличии петрофизической латеральной неоднородности по насыщению изменение электрического отклика на близких частотах существенно отличается. Этот факт надо учитывать при развитии методов полевых геофизических исследований. То есть, для получения достоверных результатов при вибровоздействии необходимо использовать не одну частоту или сильно прореженный набор частот, а линейно модулированный по частоте сигнал с широким диапазоном частот воздействия.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственных заданий Института проблем нефти и газа РАН и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

Литература

- Агеева О.А.* Использование сейсмoeлектрических преобразований в породах для прогнозирования характера насыщения порового пространства // *Геофизика*. 2008. № 1. С.16–21.
- Агеева О.А., Светов Б.С., Шерман Г.Х., Шипулин С.В.* Сейсмoeлектрический эффект второго рода в горных породах // *Геология и геофизика*. 1999. Т. 40, № 8. С.51–57.
- Анциферов М.С.* Лабораторное воспроизведение сейсмoeлектрического эффекта второго рода // *Докл. АН СССР*. 1958. Т. 121, № 5. С.827–829.
- Волков В.А.* Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы. СПб.: Лань, 2015. 672 с.
- Евдокимов Е.Н.* Структурные характеристики промысловых водонефтяных эмульсий. М.: РГУ нефти и газа им. Губкина, 2012. 477 с.
- Зейгарник В.А., Ключкин В.Н.* Физическое моделирование электросейсмического эффекта в горных породах // *Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна*. М.: ГЕОС, 2015. С.252–258.
- Иванов А.Г.* Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн // *Докл. АН СССР*. 1939. № 1. С.41–43.
- Камшилин А.Н., Казначеев П.А.* Флюиды как управляющий параметр механоэлектрических колебаний // *Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна*. М.: ГЕОС, 2015. С.273–278.
- Московский И.Г., Балабан О.М., Федорова О.С., Кочетков А.В.* Математическое моделирование сейсмoeлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах // *Науковедение*. 2015. Т. 7, № 1. <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN115.pdf>
- Нейштадт Н.М., Эпельбаум Л.В.* Применение пьезоэлектрических и сейсмoeлектрических явлений в разведочной геофизике // *Российский геофизический журнал*. 2012. № 51–52. С.63–80.
- Пархоменко Э.И.* Основные закономерности сейсмoeлектрического эффекта осадочных пород и пути его использования в геофизике // *Физические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах / Ред. Е.А. Любимова*. М.: Наука, 1977. С.201–208.
- Пархоменко Э.И., Гаскаров И.В.* Скважинные и лабораторные исследования сейсмoeлектрического эффекта второго рода в горных породах // *Физика Земли*. 1971. № 9. С.88–92.
- Пархоменко Э.И., Чжао Цзе-Сань.* Исследование влияния влажности на величину сейсмoeлектрического эффекта осадочных пород // *Изв. АН СССР. Геофизика*. 1964. № 2. С.68–73.

- Пилипенко Ю.Н., Дякун Р.А. Геофизический контроль трещинообразования при разрушении флюидонасыщенного угля и горных пород // Геотехническая механика: межведомственный сборник научных трудов. Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2012. Вып. 104. С.69–81.
- Симолян С.С. Зависимость сейсмоэлектрического эффекта от одноосного давления при насыщении образцов растворами поваренной соли // Известия АН АрмССР. Науки о Земле. 1987. V. XL, № 3. С.56–59.
- Терентьев В.Г. Исследования сейсмоэлектрического эффекта второго рода в лабораторных условиях // Записки Горного института. 1992. Т. 130. С.13–17.
- Френкель Я.И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР, Сер. геогр. и геофиз. 1944. Т. 8, № 4. С.134–149.
- Чеботарева И.Я., Камшилин А.Н. Исследование механоэлектрических преобразований в горных породах с малой степенью флюидонасыщения // Радиопромышленность. 2018. № 1. С.18–26.
- Черняк Г.Я. О прямом и обратном сейсмоэлектрических эффектах в осадочных породах при синусоидальном возбуждении // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1975. № 7. С.117–121.
- Черняк Г.Я. О физической природе сейсмоэлектрического эффекта горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. № 2. С.108–112.
- Черняк Г.Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1987. 214 с.
- Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids // J. Acoust. Soc. Amer. 1956. V. 28. P.168–186.
- Chen B., Mu Y. Experimental studies of seismoelectric effects in fluid-saturated porous media // Journal of Geophysics and Engineering. 2005. V. 2, N 3. P.222–230.
- Kamshilin A.N., Volkova E.N., Kuzichkin O.R., Sokolnikov M.A. Self-oscillations in rocks, results of laboratory experiments // Annals of Geophysics. 2004. V. 47, N 1. P.93–100.
- Pride S.R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media // Phys. Rev. 1994. V. 50. P.15678–15696.
- Pride S.R., Haartsen M.W. Electrostatic wave properties // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 100. P.1301–1315.

Сведения об авторах

ЧЕБОТАРЕВА Ирина Яковлевна – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН. 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Тел.: +7(917) 585-81-13. E-mail: irinache@inbox.ru

КАМШИЛИН Анатолий Николаевич – 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(963) 615-28-81. E-mail: kamshilin@ifz.ru

THE EFFECT OF THE INHOMOGENEITY OF SATURATION OF ROCKS SAMPLE BY POLAR AND NON-POLAR LIQUIDS ON THEIR ELECTRIC RESPONSE UNDER VIBRATION

I.Ya. Chebotareva¹, A.N. Kamshilin²

¹ Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Experiments on studying the characteristics of the seismoelectric effect of electrokinetic origin were carried out using sandstone cores with strong lateral nonuniform saturation with kerosene or NaCl solutions. The liquid was added drop wise through the puncture of the protective film and was 6 % of the volume of the pore

space, which created a strong lateral heterogeneity at the side edge of the cylindrical core. All core samples were pre-dried for a long time at 110 °C and covered with a protective film. Nevertheless, in the initial state they contained residual water. The acoustic impact was created by a piezoelectric vibrator in the form of a signal linearly modulated in frequency in the range 0.5–10 kHz. For all types of core saturation high amplitude second harmonics were observed in the spectra of electrical oscillations. An equal strong increase in the first harmonic of electric response spectrum, up to 10 dB, occurred both with the injection of a weakly concentrated NaCl solution and with the injection of a non-polar liquid – kerosene into the core. However, the character of the change in frequency spectrum and the temporal dynamics of the electric response for the polar and non-polar fluids are different. The amplitude spectrum of the core response after injection of kerosene varies greatly over the entire frequency range with a range of deviation more than 30 dB and remains stable in shape, but decreases in amplitude after long vibration. The shape of the electrical response spectra after injection of NaCl solutions is well preserved, except for narrow intervals of strong variations: 2.45–4.95 kHz for NaCl solution of 0.05 mol/l and 5.45–7.15 kHz for NaCl solution of 0.5 mol/l. After a long vibration, the amplitude of the spectrum decreases and varies greatly in shape. The amplitude of the second harmonics for kerosene first increases after injection, then decreases after a long vibration to the level of the initial state of the core. For NaCl solution of 0.05 mol/l, the amplitude of the spectrum of the second harmonics increases after injection and continues to increase after vibration. For solution of 0.5 mol/l no significant changes are observed. The detected features of the seismoelectric effect of electrokinetic origin are apparently caused precisely by the presence of strong lateral heterogeneity in the saturation of the rock, which generates a very non-uniform electric and magnetic field during the passage of a longitudinal wave along the core axis.

Keywords: seismoelectric effect, rocks, type of fluid saturation, heterogeneous media, laboratory tests.

References

- Ageeva O.A., Use of seismoelectric transformations in rocks to predict the nature of saturation of pore space, *Geofizika*, 2008, no. 1, pp. 16-21.
- Ageeva, O.A., Svetov, B.S., Sherman, G.Kh., and Shipulin, S.V., Seismoelectric effect of the second kind in rocks, *Geology and Geophysics*, 1999, vol. 4, no. 8, pp.1251-1257.
- Antsiferov M.S., Laboratory reproduction of a second-kind seismo-electric effect, *Doklady AN SSSR*, 1958, vol. 121, no. 5, pp. 827-829.
- Biot M.A., Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1956, vol. 28, pp. 168-186.
- Chebotareva I.Ya., Kamshilin A.N., Investigation of mechanoelectric transformations in rocks with a small degree of fluid saturation, *Radioindustry*, 2018, no. 1, pp. 18-26.
- Chen B., Mu Y., Experimental studies of seismoelectric effects in fluid- saturated porous media, *Journal of Geophysics and Engineering*, 2005, vol. 2, no. 3, pp. 222-230.
- Chernyak G.Ya., On direct and reverse seismoelectric effects in sedimentary rocks with sinusoidal excitation, *Fizika Zemli*, 1975, no. 7, pp. 117-121.
- Chernyak G.Ya., On the physical nature of the seismoelectric effect of rocks, *Fizika Zemli*, 1976, no. 2, pp. 108-112.
- Chernyak G.Ya., *Jelektromagnitnye metody v gidrogeologii i inzhenernoj geologii* (Electromagnetic methods in hydrogeology and engineering geology), Moscow: Nedra, 1987, 214 p.
- Evdokimov E.N., Strukturnye harakteristiki promyslovyh vodonefnyanyh emul'sij (Structural characteristics of field oil-water emulsions), Moscow: RSU of oil and gas, 2012, 477 p.
- Frenkel Ya.I. To the theory of seismic and seismoelectric phenomena in moist soil, *Izvestiya AN SSSR. Geografiya i geofizika*, 1944, vol. 8, no. 4, pp. 134-149.
- Ivanov A.G., Effect of earth strata electrization by electric waves passing through them, *Doklady AN SSSR*, 1939, no. 1, pp. 41-43.
- Kamshilin A.N., Kaznacheev P.A., Fluids as a control parameter of mechanoelectric oscillations, in *Triggernye efekty v geosistemah*. Materialy tret'ego Vserossijskogo seminar-soveshchaniya (Trigger effects in geosystems. Materials of the third All-Russian seminar-meeting), Moscow: GEOS, 2015, pp. 273-278.
- Kamshilin A.N., Volkova E.N., Kuzichkin O.R., Sokolnikov M.A., Self-oscillations in rocks, results of laboratory experiments, *Annals of Geophysics*, 2004, vol. 47, no. 1, pp. 93-100.
- Moskovsky I.G., Balaban O.M., Fedorova O.S., Kochetkov A.V., Mathematical modeling of the second kind of seismoelectric effect generated by plane elastic waves in porous moisture saturated media, Internet-journal “*Naukovedenie*”, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 1-15, URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN115.pdf>

- Neishtadt N.M., Eppelbaum L.V., The use of piezoelectric and seismoelectric phenomena in exploration geophysics, *Russian Geophysical Journal*, 2012, no. 51-52, pp. 63-80.
- Parkhomenko E.I., Gaskarov I.V., Well and laboratory studies of the second-kind seismoelectric effect in rocks, *Fizika Zemli*, 1971, no. 9, pp. 88-92.
- Parkhomenko E.I., Zhao Tse-San, Study of the effect of humidity on the magnitude of the seismoelectric effect of sedimentary rocks, *Izv. Academy of Sciences of the USSR, Geophysics*, 1964, no. 2, pp. 68-73.
- Parkhomenko E.I., The basic laws of the seismoelectric effect of sedimentary rocks and the ways of its use in geophysics, in *Fizicheskie svoystva gornah porod pri vysokih davleniyah i temperaturah* (Physical properties of rock formations at high pressures and temperatures), Moscow: Science, 1977, pp. 201-208.
- Pilipenko Yu.N., Dyakun R., Geophysical control of crack formation upon destruction of fluid-saturated coal and rocks, in *Geotekhnicheskaya mekhanika: mezhdromstvennyy sbornik nauchnyh trudov* (Geotechnical mechanics: an interdepartmental collection of scientific papers), Dnepropetrovsk: IGTM NASU, 2012, vyp. 104, pp. 69-81.
- Pride S.R., Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media, *Phys. Rev.*, B, 1994, vol. 50, pp. 15678-15696.
- Pride S.R., Haartsen M.W., Electro seismic wave properties, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1996, vol. 100, pp. 1301-1315.
- Simonyan S.S., Dependence of the seismoelectric effect on the uniaxial pressure when the samples are saturated with sodium chloride solutions, *Izvestiya AN ArmSSR*, 1987, vol. XL, no. 3, pp. 56-59.
- Terentiev V.G., Studies of the second-kind seismoelectric effect in laboratory conditions, *Zapiski Mining Institute*, 1992, vol. 130, pp. 13-17.
- Volkov V.A., *Kolloidnaya himiya. Poverhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy*. (Colloid chemistry. Surface Phenomena and Disperse Systems), St. Petersburg: Lan, 2015, 672 p.
- Zeigarnik V.A., Klyuchkin V.N., Physical modeling of the electro seismic effect in rocks, in *Triggernye efekty v geosistemah*, Materialy tret'ego Vserossiyskogo seminar-soveshchaniya (Trigger effects in geosystems, Materials of the third All-Russian seminar-meeting), Moscow: GEOS, 2015, pp. 252-258.