



ВАРИАЦИИ СКОРОСТЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОРОДАХ ЕСТЕСТВЕННОГО ЗАЛЕГАНИЯ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

М.Ю. Подбережный^{1, 3}, В.А. Куликов^{1, 2}

¹Новосибирский государственный университет,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия, e-mail: mpodber@mail.ru

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: KulikovVA@uiggm.nsc.ru

³Бейкер Хьюз Инк.

Проведена серия натурных экспериментов с использованием аппаратно-программного комплекса “СЕЙСЗОНД”, представляющего собой скважинную аппаратуру для многоволнового вертикального сейсмического профилирования (ВСП), которые были направлены на изучение физических процессов вызванных прохождением постоянного электрического тока через водонасыщенные горные породы. Зарегистрированы изменения кинематических характеристик продольных волн, прошедших через эти породы, в зависимости от времени протекания постоянного электрического тока. Одним из основных процессов, который рассматривается в качестве источника изменения упругих свойств геологической среды, является электролиз жидкой фракции, насыщающей горные породы.

Продольные волны, вертикальное сейсмическое профилирование, электрический ток, электролиз

VARIATIONS IN VELOCITY OF COMPRESSIONAL WAVES PROPAGATING IN GEOLOGICAL FORMATION UNDER DC CURRENT ACTION

M.Yu. Podberzhnyy^{1, 3}, V.A. Kulikov^{1, 2}

¹Novosibirsk State University, Pirogova str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: mpodber@mail.ru

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Acad. Koptyuga prosp., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: KulikovVA@uiggm.nsc.ru

³Baker Hughes Incorporated

The measurements of cross electric and seismic effects were performed in the natural conditions using VSP tools (SEISZOND). We observed significant changes of seismic first break time versus time of DC electric passing through the media. It is concluded that electrolysis of ground water is a probable mechanism of these phenomena.

Compressional waves, vertical seismic profiling, electric current, electrolysis

ВВЕДЕНИЕ

В монографии [1] экспериментально показано, что в рамках сейсмических и электроразведочных методов повысить полноту геофизических данных возможно путем комплексного возмущения исходного состояния флюидонасыщенной среды упругими и электрическими полями. Констатируется факт, что протекание постоянного электрического тока в среде приводит к заметным изменениям кинематических и динамических параметров сейсмических волн. Однако заметные изменения скоростей распространения сейсмических волн возможны лишь при напряженности электрического поля выше 10^5 В/м.

В то же время экспериментальные данные, полученные в Институте геофизики СО РАН (ныне ИНГГ СО РАН), демонстрируют заметные изменения параметров сейсмического поля при сравнительно небольших величинах электрического тока и напряжения [2, 3].

Задачей скважинных исследований было определение зависимости между характеристиками внешне-го электрического поля и кинематическими парамет-

рами продольных волн сейсмического диапазона частот для водонасыщенных горных пород в условиях естественного залегания на глубинах порядка 40–70 м.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА

Эксперименты проводились на полигоне геофизического стационара Ключи Искитимского района Новосибирской области.

Подготовительные исследования были направлены на построение геолого-геофизического разреза участка полигона, где были пробурены с отбором керна три разведочные скважины – 1, 2, 3 (рис. 1), расположенные в вершинах равностороннего треугольника со сторонами 200 м, в которых проводились акустический каротаж, гальванический каротаж и ВСП.

По данным бурения и анализа керна материала был построен геологический разрез, характеризующийся субгоризонтальным залеганием осадков без значительных горизонтальных неоднородностей.

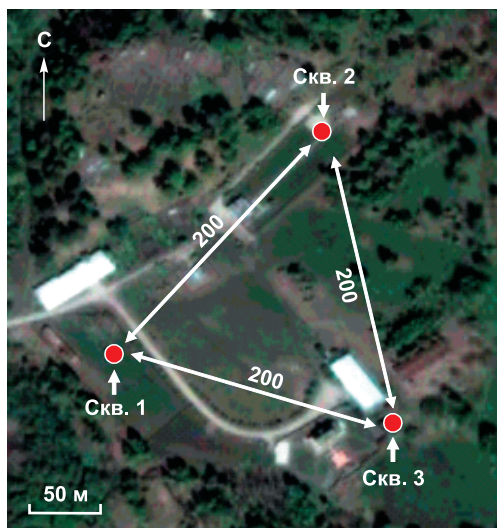


Рис. 1. Карта района.

Геологические породы представлены: суглинками, прослоями разномерного песка, трещиноватыми сланцами – разрушенными породами фундамента. Если соотнести скважинные данные со стратиграфической колонкой, то возраст верхней части разреза до фундамента соответствует Q_2-Q_3 , которая лежит на породах D_3-C_1 [4].

В качестве каротажных приборов использовались: акустический зонд АВАК-5, многоэлектродный гальванический зонд и скважинный измерительный аппаратно-программный комплекс ВСП «СЕЙСЗОНД», состоящий из двух приборов.

Акустический каротаж в скв. 1 выполнен с использованием наземного комплекса каротажа АНКМ с модулем акустического каротажа АВАК-5 (формула

зонда 1.7П2_0.4_П1_1.2_И). Регистрация проводилась с шагом квантования записи 5 мкс, длине записи 1024 отсчета на канал и накоплении сигнала, равном 16.

Цифровая обработка волновых полей осуществлялась в программе Picking. В результате обработки зарегистрированных данных получены скорости продольных и поперечных волн. Скв. 1 обсажена до глубины 27 м, акустический каротаж проводился в открытом стволе обсадки. По скоростям продольных волн разрез можно разделить на четыре достаточно мощных слоя (м): 27–40; 40–60; 60–80; 80–100 с соответствующими скоростями (км/с): 4,3; 5,6; 4,6 и 5,2.

Поперечная волна прослеживается не везде, а лишь на интервалах, которые можно интерпретировать как наиболее консолидированные участки разреза. Выше 55 м поперечная волна отсутствует. Поскольку скорости продольной волны (V_P) по всему разрезу достаточно высокие (выше 4,5 км/с), то условия образования поперечной волны принципиально присутствуют, так как скорости поперечной волны (V_S) повсеместно выше скорости в скважинной жидкости. Видимое отсутствие поперечных волн можно объяснить большой раздробленностью околоскважинного пространства с наличием трещиноватости субгоризонтального направления, при которой поперечная волна, горизонтально поляризованная, имеет аномальное затухание. Этот вывод подтверждается данными бурения, выявленный интервал приурочен к глинистым сланцам, характеризующимся горизонтальной трещиноватостью. Ниже 55 м поведение скорости поперечной волны повторяет поведение продольной.

Гальванический каротаж был выполнен в необсаженной скв. 3. Регистрация проводилась 12-электродным зондом и аппаратурой АНЧ-5, предназначенными для выполнения электроразведочных работ методом сопротивлений на переменном токе (рабочая

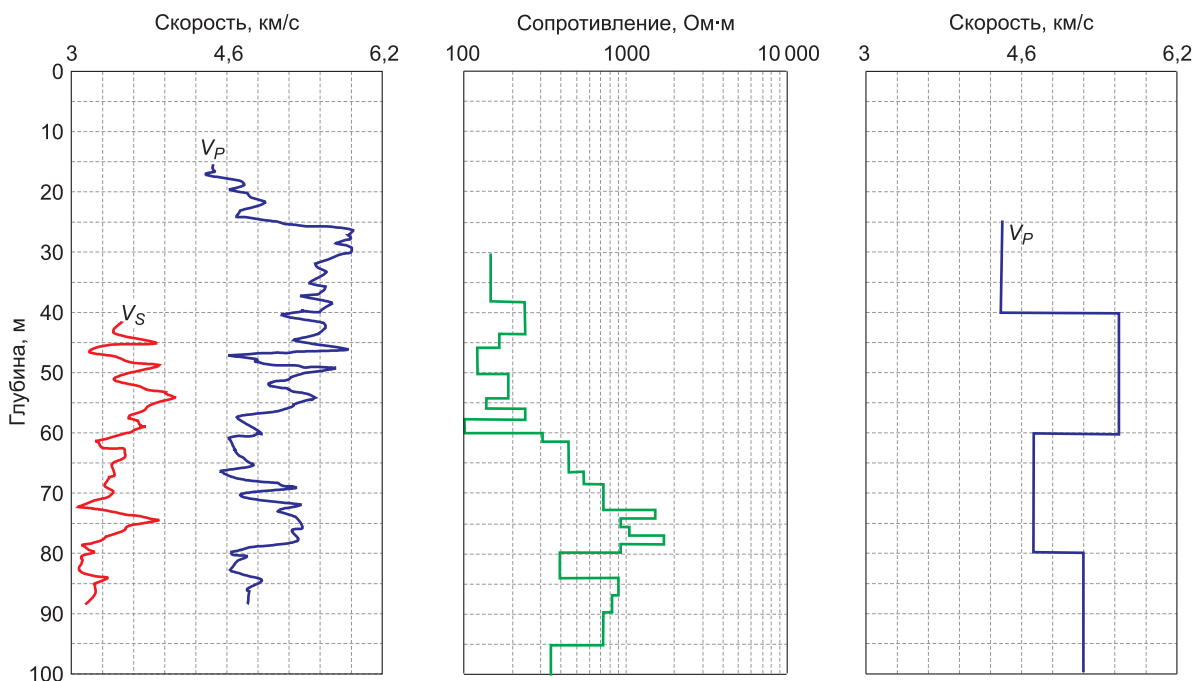


Рис. 2. Результаты акустического, гальванического каротажа и ВСП.

частота – 4,88 Гц). В состав аппаратуры входят измеритель напряжений и генератор питающего тока, позволяющие раздельно измерять разность потенциалов на приемных электродах (MN) и ток в питающей линии (AB). Electroды 1 и 11 – А и В, а электроды 5 и 8 – М и N. Замеры произведены через 1 м при спуске зонда до глубины 100 м. Методика обработки данных заключалась в решении обратной задачи для каждого зондирования в программном пакете “СОНЕТ”. Кажущееся сопротивление рассчитывалось по однородному пространству, значение сопротивления приписывалось центру зонда, на расстояние 3 м от оси скважины.

Анализируя распределение сопротивления по стволу скважины, можно утверждать, что до глубины 60 м залегают обводненные породы ($\rho = 100\text{--}200\text{ Ом}\cdot\text{м}$), ниже находятся высокоомные породы фундамента ($\rho = 850\text{--}1200\text{ Ом}\cdot\text{м}$). Данные акустического, гальванического каротажа и материалы бурения показали хорошую корреляцию и подтвердили субгоризонтальное залегание слоев.

На интервале 55–60 м по данным акустического и гальванического каротажа выделяется пласт (рис. 2), который характеризуется низким сопротивлением 100 Ом·м и пониженными значениями скорости продольной (4,6 км/с) и поперечной (3,2 км/с) волн в разрезе. По данным бурения этот пласт соответствует хорошо проницаемому водоносному горизонту с притоком воды 3 м³/ч.

Еще одним методом решения задачи построения геолого-геофизического разреза района работ было ВСП. В качестве регистрирующей аппаратуры использовали двухприборный комплект скважинного измерительного аппаратно-программного комплекса “СЕЙСЗОНД”.

Было выполнено вертикальное профилирование скважины 1 с шагом 2 м. Пункт возбуждения (ПВ 0) размещался на расстоянии 10 м от скв. 1. Источник возбуждения – механический удар пороховыми газами по забойку дополнительных скважин глубиной 1 м, пробуренных в пункте возбуждения. Данные ВСП обрабатывались с помощью программного пакета VSPlab.

По материалам ВСП и акустического каротажа построен закон распределения скоростей продольных волн по разрезу скв. 1 (см. рис. 2).

Анализируя распределение скоростей по разрезу, можно заключить, что с выносных ПВ возможна регистрация в скважине головных продольных и поперечных (обменных) волн, преломленных на всех границах.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Определив геолого-геофизическое строение полигона Ключи, было решено для натурального моделирования воздействия постоянного электрического тока на упругие параметры горных пород в качестве регистрирующей аппаратуры использовать двухприборный аппаратно-программный комплекс ВСП “СЕЙСЗОНД”. Приборы были размещены в скв. 1 на глубинах 50 и 65 м таким образом, чтобы проницаемый обводненный пласт находился между приборами. Источник постоянного электрического тока представлял собой полевой вариант выпрямителя переменного сетевого напряжения 220 В со ступенчатой коммутацией силы тока от 1 до 10 А. Направление электрического тока было задано размещением питающих электро-

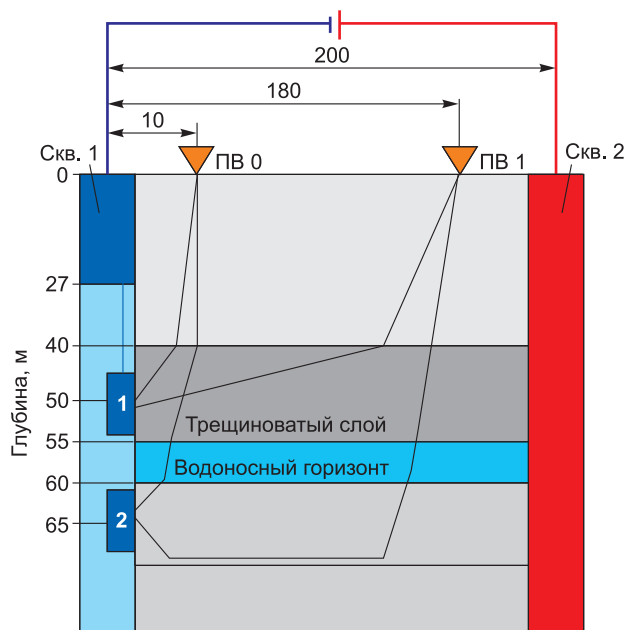


Рис. 3. Схема эксперимента.

дов на обсадных колоннах скважин 1 (отрицательный электрод) и 2 (положительный электрод) (рис. 3).

Глубина забоя скважин 135 и 100 м, длина обсадной колонны – 27 и 100 м соответственно. Пункты возбуждения размещаются на линии, соединяющей скважины 1 и 2, на расстоянии 10 и 180 м от скв. 1.

Источник возбуждения – механический удар пороховыми газами в скважинах глубиной 1 м, пробуренных в пунктах возбуждения. При этом в среде реализуются два пути движения упругих волн. Первый из них – ортогонально направлению линий напряженности электрического поля в породе (фактически вдоль ствола скв. 1). Второй – комплексный, движение волн как перпендикулярно, так и вдоль линий электрического поля. С выносного ПВ можно ожидать регистрацию головной волны, распространяющейся по подошве второго анизотропного слоя, в первых вступлениях на нижнем приборе раньше, чем на верхнем. Методически эксперимент представлял собой последовательную регистрацию волновой картины двумя скважинными приборами, отстоящими друг от друга на расстояние 10 м в течение длительного времени (3,5 ч). Серии таких наблюдений проводились через 20 мин: сначала без включения электрического тока, затем при воздействии электрическим полем на геологический разрез напряженностью 0,15 В/м. При этом сила тока составила 5,5 А. После проведения серии наблюдений с действием электрического тока то же самое повторялось при выключенном электрическом токе. Глубинные координаты скважинных приборов не изменялись в процессе регистрации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обнаружено изменение времен первопробытия упругих волн на базе 10 м при пропускании электрического тока в течение 3,5 ч по сравнению с теми же временами, которые были зарегистрированы при отсутствии электрического поля. Описанные изменения различны для разных пунктов возбуждения (рис. 4).

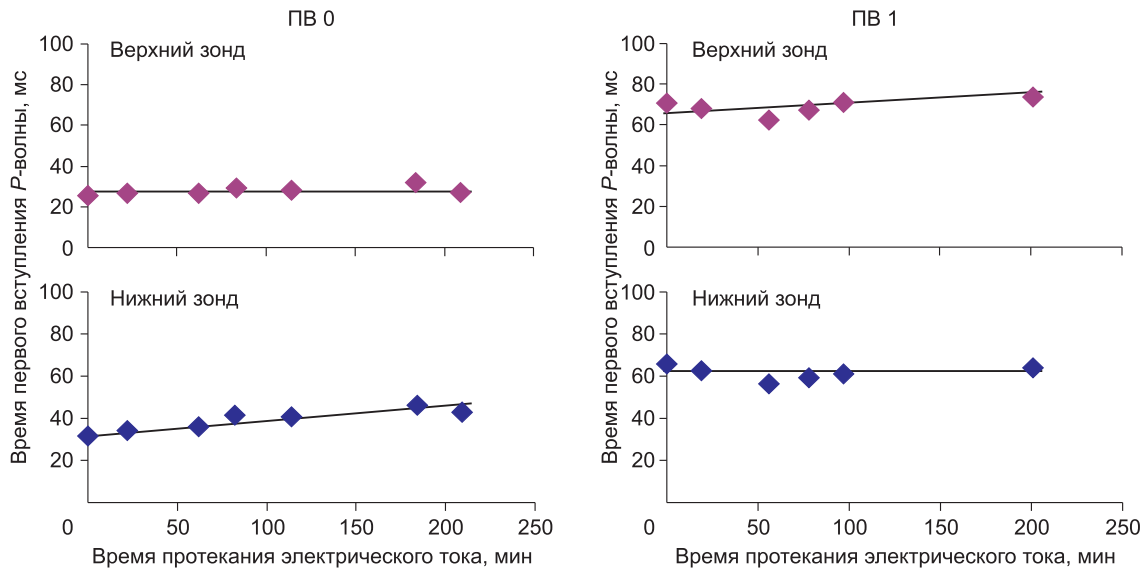


Рис. 4. Изменение времен регистрации первого вступления продольной волны для различных пунктов возбуждения.

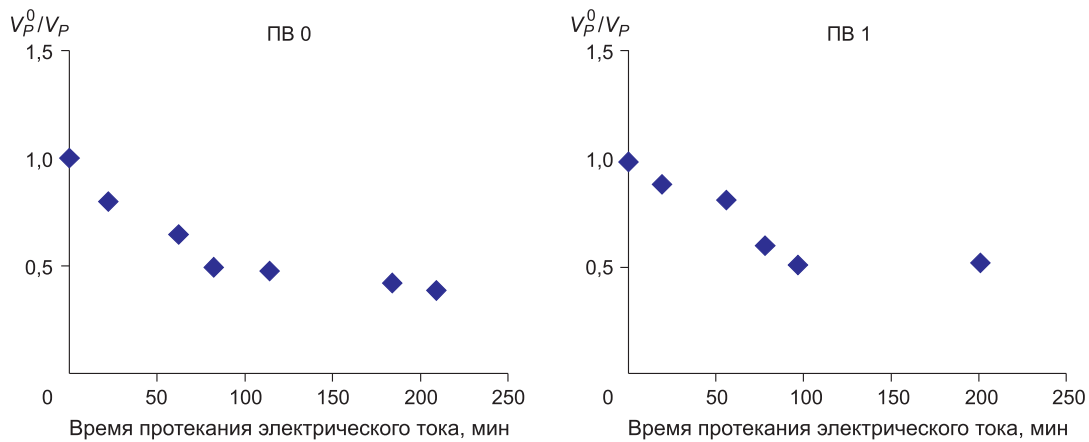


Рис. 5. Зависимость относительных изменений скоростей продольных волн от величины электрического заряда, прошедшего через водонасыщенную геологическую среду для различных ПВ.

Поведение кривых изменения времен первых вступлений носит инверсный характер для ближнего ПВ 0 и дальнего ПВ 1.

При возбуждении волн с ПВ 0 времена вступлений на верхнем зонде остаются практически постоянными, а изменяются только времена сигналов, зарегистрированных нижним зондом. При возбуждении волн с ПВ 1 верхний прибор в скважине в первых вступлениях регистрирует головную волну, пересекающую аналогичный объем среды два раза в отличие от нижнего зонда. Однако время вступлений, зарегистрированное нижним зондом, в меньшей степени реагирует на воздействие электрического тока на среду. Можно утверждать, что за изменения времен прихода ответствен объем геологической среды, находящийся между зондами в непосредственной близости от скв. 1.

Используя времена первых вступлений, вычислялись скорости продольных волн, а затем относительные изменения скоростей P-волн (рис. 5) в зависимости от электрического заряда, прошедшего через геологическую среду (V_p^0 – скорость продольной волны в среде, не возмущенной прохождением электричес-

кого тока, V_p – скорость продольной волны в среде, подверженной воздействию электрического тока). Для обоих пунктов возбуждения протекание электрического тока вызывает уменьшение скоростей продольных волн в два раза.

Выключение внешнего электрического поля между скважинами 1 и 3 приводит к релаксации среды, которая восстанавливает первоначальные упругие свойства в течение 4 ч.

Аналогичные результаты получены и при проведении на следующий день повторного эксперимента.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Анализируя результаты экспериментов, можно заключить, что за кинематические изменения скоростей продольных волн ответствен объем геологической среды, находящийся между двумя зондами (55–65 м). По результатам гальванического каротажа интервал (60–63 м) характеризуется низким сопротивлением, по акустическому каротажу – более высокими скоростями, чем соседние, по данным бурения – это водоносный горизонт с высокой водоотдачей. Можно

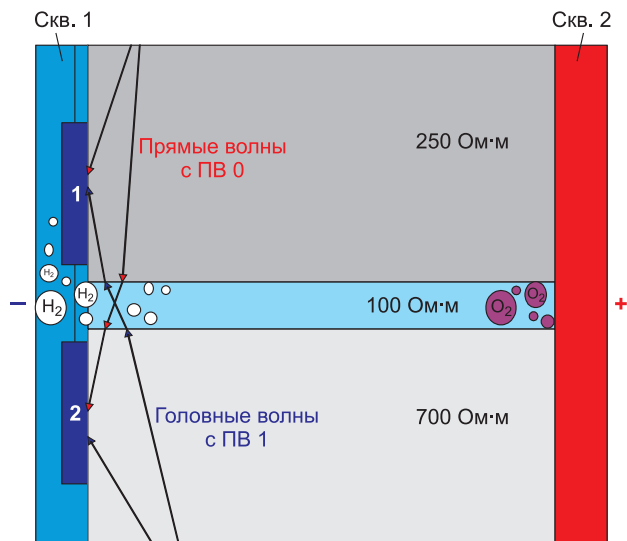


Рис. 6. Интерпретация результатов.

предположить, что протекание постоянного электрического тока по водонасыщенной породе вследствие выполнения закона Фарадея обуславливает электролитическое разложение порового флюида и насыщение порового пространства газовыми компонентами. Причем количество выделившегося газа прямо пропорционально времени протекания электрического тока через геологическую среду. При возбуждении упругой волны на ПВ 1 верхним зондом в первых вступлениях регистрируется головная волна, два раза прошедшая водоносный горизонт, который постепенно насыщается газом. На нижнем зонде регистрируется головная волна, прошедшая водоносный горизонт один раз (рис. 6). Таким образом, это объясняет зависимость времен первых вступлений, зарегистрированных обоими приборами от времени протекания через породу электрического тока.

Пропускание тока силой 5 А в течение 100 мин приведет к выделению порядка 5000 см³ водорода.

Согласно теории Герца-Вингера, изменение скорости продольной волны в трехкомпонентной системе может уменьшиться на 50 % (в 2 раза) при объемном содержании газа в породе порядка 10 %. В лабораторных экспериментах [3] по замещению воды газом в пористых песчаниках также зафиксировано уменьшение скоростей распространения продольных волн при увеличении объемного содержания газа (рис. 7).

В лабораторных экспериментах, проведенных авторами [4, 6], обнаружено, что при включении тока уже в несколько десятков миллиампер (напряженность 5 В/м) в пористой водонасыщенной породе происходит выделение пузырьков газа. Появление этого газа в поровой жидкости приводит к увеличению времен регистрации *P*-волн. Сравнение результатов натурного моделирования с данными физического

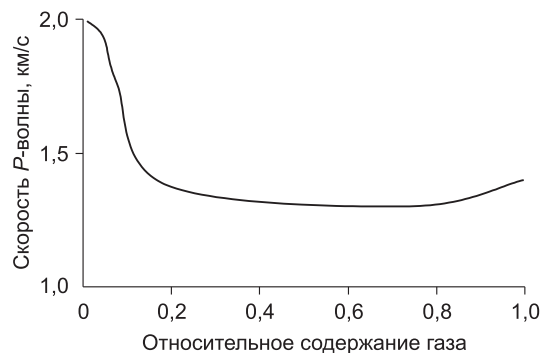


Рис. 7. Зависимость скорости продольной волны в песчаниках (атмосферные условия) при замещении воды газом [3, 5].

эксперимента на образцах горных пород показывает, что закономерности изменения кинематических параметров не противоречат друг другу, это подтверждает одинаковую физическую природу явления, вызванного действием постоянного электрического тока, в основе которого лежат законы электролиза.

ВЫВОДЫ

Протекание электрического тока в водонасыщенной среде вызывает изменение скоростей продольных волн. Данные изменения в среде накапливаются пропорционально времени протекания электрического тока. Протекание тока силой 5,5 А в течение 200 мин привели к изменению скоростей *P*-волн на 50 %. Наибольшие изменения упругих параметров среды происходят в окрестностях электродов (в нашем случае у катода). Основным механизмом уменьшения скорости продольных волн является электролиз жидкости, насыщающей среду.

Литература

1. Потапов О.А., Лизун С.А., Кондрат В.Ф. Основы сейсмoeлектроразведки. М.: Недра, 1995. 268 с.
2. Манштейн А.К., Куликов В.А., Нефедкин Ю.А., Эпов М.И. Изменение скоростей сейсмических волн в поле постоянного электрического тока // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С. 454–461.
3. Куликов В.А., Манштейн А.К., Нефедкин Ю.А., Подбережный М.Ю., Сибиряков Е.Б. Электросейсмическая активность рыхлых пористых горных пород // Физика нефтяного пласта: Тр. школы-семинара. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 95–101.
4. Куликов В.М., Куликов В.А., Подбережный М.Ю. Полевая геофизическая практика: Метод. пособие. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2006. 52 с.
5. Ивакин Б.И., Карус Е.В., Кузнецов О.Л. Акустический метод исследования скважин. М.: Недра, 1978. 317 с.
6. Подбережный М.Ю., Нефедкин Ю.А. Электросейсмические явления в флюидонасыщенных горных породах // Рос. геофиз. журн. 2006. № 43–44. С. 103–108.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ПОДБЕРЕЖНЫЙ Максим Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета, научный сотрудник компании Бейкер Хьюз. E-mail: mpodber@mail.ru

КУЛИКОВ Вячеслав Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, доцент геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета. E-mail: KulikovVA@ipgg.nsc.ru