

УДК 550.83:553.98:556.3

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА ХОЛЛА ПРИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ МЕТОДОМ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Е.В. Гусева, С.А. Корчагин, Ю.В. Трошенков, В.Е. Чемоданов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Отмечено, что искривление траектории движущегося в магнитном поле носителя тока может влиять на скорость и степень объемного разделения зарядов, происходящего в порах горной породы при ее поляризации проходящим током. При этом повышение извилистости траектории носителя тока, происходящее из-за действия эффекта Холла и отражения носителя от стенок порового капилляра, приводит к увеличению удельного электрического сопротивления породы. Это ведет к уменьшению силы диффузионных токов, сопровождающих процесс релаксации, и, как следствие, увеличению характерного времени релаксации образовавшихся при поляризации локальных объемных зарядов. Приведена оценка величины изменения извилистости траектории носителя тока по сравнению с извилистостью порового капилляра. Показано также, что величины необходимых для исследований магнитных полей вполне достижимы в настоящее время. Обоснована перспективность исследования электрохимических свойств горных пород с использованием магнитного поля для уточнения теории эффекта вызванной поляризации и скважинных исследований.

Ключевые слова: *вызванная поляризация, индукция магнитного поля, эффект Холла, удельное электрическое сопротивление, электрическая извилистость.*

Свойство горных пород (ГП) изменять распределение зарядов при протекании постоянного тока и восстанавливать существовавшее равновесное распределение после его выключения известно уже давно и лежит в основе геофизического метода, известного как метод вызванной поляризации (ВП). Его использование началось с тридцатых годов прошлого века, а пик изучения явления ВП приходится, по-видимому, на 1950-1960 годы.

Из-за многообразия и сложности зависящих от многих факторов явлений, возникающих в ГП при прохождении через нее постоянного тока, в настоящее время используется феноменологическая теория, в которой полагается, что релаксация вызванной поляризации происходит по экспоненциальной или гиперболической зависимости от времени для любых пород, независимо от вида их проводимости (электронная, дырочная, ионная).

Это позволяет разделять породы по величинам параметров упомянутых зависимостей, подбираемых по наилучшему согласию с данными измерений, и оказывается достаточным для практики использования метода ВП при геофизических исследованиях в скважинах [1-3].

Екатерина Владимировна Гусева, ассистент кафедры геологии и геофизики.

Степан Алексеевич Корчагин, ст. преподаватель кафедры геологии и геофизики.

Юрий Владимирович Трошенков, инженер.

Владимир Евгеньевич Чемоданов, доцент кафедры геологии и геофизики.

Общим для вызванной поляризации пород разного типа является также и то, что с возрастанием плотности поляризующего тока потенциалы вызванной поляризации (induced polarization) U_{IP} сначала быстро возрастают, выходя на медленное возрастание и насыщение с дальнейшим повышением плотности тока.

При выключении поляризующего тока происходит быстрое, а затем более медленное убывание U_{IP} со временем. В зависимости от минералогического состава и сопротивления среды время релаксации составляет от нескольких минут до часов. На практике при измерениях обычно используется интервал зарядки длительностью десятки миллисекунд, релаксации (разрядки) – сотни миллисекунд.

Вследствие отмеченного выше при увеличении, а затем при уменьшении плотности тока J_{IP} в интервале $[-J_{MAX}, J_{MAX}]$ наблюдается гистерезисный ход кривой $U_{IP} = f(J)$.

При проведении работ методом ВП регистрируется параметр, характеризующий способность породы к созданию вызванных потенциалов, – вызванная электрохимическая активность

$$A_I = U_{IP} / U_{PC},$$

где U_{PC} – напряжение, создаваемое проходящим поляризующим током; в породах, содержащих электронно-проводящие включения, оно достигает 0,5.

Однако механизмы возникновения потенциалов вызванной поляризации у пород с разным типом проводимости различаются [1-3]. Кратко опишем основные из них.

Для пород с электронной проводимостью, содержащих сульфиды, окислы железа, самородные металлы, каменные угли с заметным содержанием графита, характерна электродная (или электролитическая) поляризация [1].

Выделяющиеся при прохождении тока через насыщающие породу растворы-электролиты продукты электролиза (газы), концентрируясь вблизи поверхности минералов с электронной проводимостью, образуют гальванические микроэлементы с газовыми электродами. При этом знаки заряда на поверхности микроучастка с электронной проводимостью различны: на участке входа тока знак положительный (концентрируется катион водорода), а на участке выхода тока знак отрицательный (концентрируются анионы хлора, кислорода и др.).

Другим основным механизмом ВП является так называемая объемная поляризация, характерная для ГП с ионной проводимостью.

Возникновение поляризации здесь связано с деформацией двойного электрического слоя под действием проходящего поляризующего тока, а также с образованием микроскопических объемов с различной концентрацией заряда (ионов) вследствие влияния тока на числа переноса ионов в порах разных сечений. Эта концентрационная неоднородность развивается за доли секунды, спад же ее длится несколько секунд.

Электрохимическая активность для таких пород, не содержащих электронно-проводящих включений (это в основном породы с повышенной глинистостью, а также с порами трещинного и межкристаллического типа), составляет первые проценты. При этом чистые незаглинизированные пески и песчаники имеют низкую активность, как и чистые глины.

В ионопроводящих ГП ток течет только в жидкой фазе, то есть вектор напряженности электрического поля направлен параллельно (а не «поперек») двойному электрическому слою (возникающему из-за адсорбции ионов поровой поверхностью), вследствие чего явление ВП проявляется слабее, чем в случае

электролитической поляризации, когда ток может течь и поперек двойных электрических слоев.

Далее обсудим возможность применения эффекта Холла в постоянном магнитном поле, с помощью которого можно управлять направлением движения ионов в процессе прохождения тока.

Возможности дополнительного управления процессами образования и разрядки вызванной поляризации с помощью эффекта Холла

Эффект Холла [5] – это возникновение в объеме с током плотностью \vec{J} , помещенном в магнитное поле с индукцией \vec{B} , электрического поля в направлении, перпендикулярном векторам \vec{J} и \vec{B} . Он обусловлен тем, что на носители тока (ионы в ионопроводящих ГП) в магнитном поле действует сила Лоренца \vec{F} , задаваемая формулой $\vec{F} = Q[\vec{v}\vec{B}]$, где \vec{v} – скорость иона. Вследствие этого в первоначально нейтральном объеме в направлении вектора \vec{F} возникает повышенная концентрация положительных ионов, а в противоположном направлении – отрицательных.

Как упоминалось, направленное движение ионов при прохождении тока происходит по поровым капиллярам, представляющих собой линейные цепочки связанных между собой пор разного поперечного размера (т. е. диаметр порового капилляра переменный). Эта цепочка-капилляр состоит из пор, находящихся наиболее близко к линии тока поля вектора \vec{J} .

Вследствие эффекта Холла в таком капилляре происходит искривление траектории движения иона, тем большее, чем больше скорость иона и индукция магнитного поля \vec{B} .

К настоящему времени наиболее обоснована диффузионная модель образования вызванной поляризации [3], предложенная А.Ф. Постельниковым и развитая Д.А. Фридрихсбергом и М.П. Сидоровой. Согласно этой модели, в цепочке из цилиндрических капилляров переменного сечения, в местах изменения сечения возникают локальные неоднородности концентрации ионов определенного знака. Это обусловлено различием подвижностей в узких (активных) и широких (пассивных) капиллярах, что приводит к образованию локальных заряженных участков вблизи мест сопряжения узких и широких капилляров при прохождении через ГП электрического тока (т. е. наличии направленного движения ионов).

Эффект тем больше, чем больше сила тока и чем больше разница в сечениях граничащих участков в капилляре.

Из-за этого в каждой из элементарных ячеек, объединяющих узкий и широкий капилляр, создается вторичная диффузионная электродвижущая сила (ЭДС), возникающая из-за разности в подвижностях ионов и зависящая от диаметров поровых капилляров [3].

После выключения тока разделившиеся указанным образом заряды возвращаются в исходное состояние, и возникшая разность потенциалов, спадая во времени, создает ток вызванной поляризации. Этот релаксационный ток связан с электропроводностью среды. Экспериментальные наблюдения свидетельствуют, что поляризуемость пород одного и того же литологического состава возрастает с ростом удельного сопротивления, так как при этом замедляется процесс диффузии зарядов, увеличивая тем самым время спада вызванной поляризации [2].

Как ранее указывалось, при действии на ток, создаваемый движением ионов, постоянного магнитного поля происходит искривление траекторий движения ионов. Тем самым повышается характеристика электрической извилистости поровых капилляров породы во столько же раз, во сколько длина траектории извилистого движения превосходит длину кривой, проведенной параллельно стенкам капилляра, вдоль его центральной оси. Повышение извилистости уже приводит к увеличению удельного сопротивления породы, что, в свою очередь, ведет к увеличению времени спада ВП.

Удельное сопротивление увеличивается также из-за отражений ионов от стенок порового капилляра, когда ион, двигаясь по искривленной траектории, подходит к стенке (то есть мы предполагаем, что траектория иона в капилляре состоит из кривых, представляющих собой дуги спиралей, последовательно соединенных в точках отражения). Частота таких отражений зависит от величины магнитного поля и от диаметра капилляра. Эти взаимодействия со стенками капилляра создают дополнительное, тормозящее ион действие.

Описанный механизм действия магнитного поля должен сильнее проявляться в тонких капиллярах (характерных для глин).

В этой связи отметим, что согласно модели Постельникова – Фридрихсберга – Сидоровой, основанной на представлении капилляра как цепочки связанных пор разного диаметра, и экспериментальным данным в чистых глинах из-за малых вариаций диаметра капилляра эффект вызванной поляризации мал. Применение магнитного поля, возможно, позволит, варьируя сопротивление чистых глин магнитным полем, отличать пропластки чистых глин от плотных, малопористых и неглинистых пород, которые плохо разделяются обычным методом ВП.

Аналогичные соображения о действии магнитного поля на становление и релаксацию вызванной поляризации можно использовать и для трещиноватых участков.

Особенность эффекта Холла в трещинах – существование выделенного направления магнитного поля, которым обеспечивается «заворачивание» траектории иона таким образом, что движение его происходит преимущественно в плоскости, лежащей параллельно плоскости трещины. Возможно, эта особенность позволит выделять трещиноватые зоны в породе и более детально судить о них.

Отдельного рассмотрения требует случай влияния магнитного поля на вызванную поляризацию в породах с электронной проводимостью.

Если целик породы имеет чисто электронную проводимость, то электродные пары будут сосредоточены на поверхности целика, причем положительные заряды концентрируются на участках входа трубок тока в целик, а отрицательные – на их выходе. Разрядка этих элементов будет происходить как через объем целика, так и через окружающую его внешнюю, вероятнее всего ионопроводящую (пористую) среду, где применимы приведенные выше рассуждения о повышении удельного сопротивления в магнитном поле.

Для разрядки ВП через целик можно представить описываемый ниже механизм.

В магнитном поле может возникнуть искажение конфигурации трубок тока, имевшей место в случае отсутствия магнитного поля (МП). Вероятнее всего, такое искажение приведет к возрастанию удельного сопротивления целика, если исходить из того, что пространственное распределение трубок тока в отсутствие МП соответствует принципу минимума действия.

Таким образом, с помощью магнитного поля можно, изменяя сопротивление горной породы, управлять процессом становления и разрядки вызванной поляризации.

Некоторые численные оценки влияния эффекта Холла на вызванную поляризацию

Проведем простые оценки влияния магнитного поля на извилистость траектории иона в капилляре. Известно [4], что ион, вошедший с постоянной скоростью v в магнитное поле с индукцией B , движется по винтовой линии, радиус R и шаг L которой задаются соотношениями

$$R = \frac{M}{Q} \frac{v}{B} \sin \alpha; \quad L = 2\pi \frac{M}{Q} \frac{v}{B} \cos \alpha, \quad (1)$$

где Q – заряд иона; M – его масса; α – угол между векторами v и B .

Из (1) видно, что извилистость определяется величинами R и L . Кроме того, она зависит от длины участка винтовой линии от отражения до следующего отражения, то есть от радиуса капилляра r и числа таких отражений на длине капилляра l . Как показывают расчеты, если полагать, что r не сильно отличается от R , и считать отражения от стенок капилляра упругими, то за счет только факторов геометрического характера извилистость траектории иона в магнитном поле может быть больше извилистости порового капилляра в 1,5–2,5 раза. Со-

гласно соотношению $\rho_{W.R.} = \frac{T_{EL}^2}{K_P} \rho_W$ для удельного электрического сопротив-

ления (УЭС) горной породы [2] (здесь $\rho_{W.R.}$ – УЭС водонасыщенной породы, ρ_W – УЭС минерализованной поровой воды, K_P – пористость породы, T_{EL} – ее электрическая извилистость) это может привести к увеличению УЭС породы в 2,5–5 раз. Последнее может заметно сказаться на времени релаксации ВП.

УЭС породы также может увеличиваться из-за потерь энергии ионом при неупругих отражениях от стенок или пристеночного двойного слоя.

Кроме того, распределение по скоростям теплового движения ионов зависит от их концентрации C_W в объеме капилляра. От этих скоростей и от величины магнитной индукции зависит электрическая извилистость, а следовательно, и увеличение УЭС.

Из приведенных соображений следует, что изменение УЭС тонкодисперсных глин (имеющих относительно малые r и большие C_W) под действием магнитного поля может отличаться от соответствующего изменения в чистых пористых песчаниках. Это, возможно, позволит лучше отделять чистые глины от чистых песчаников, что затруднено [1] при исследованиях обычным методом ВП.

Более точные оценки приведенных возможностей делать трудно, так как существующая феноменологическая теория включает множество сложно оцениваемых факторов, к тому же ионы в пластовых водах обычно гидратированы и пока нет удовлетворительной теории их диффузии и адсорбции в порах горных пород [2]. Поэтому следует особо отметить возможность получить более адекватную теорию при лабораторных исследованиях электрохимических процессов в горных породах, управляя характеристиками этих процессов с помощью магнитного поля.

Оценим пределы изменения напряженности нужного для проведения экспериментов магнитного поля H .

Оценим сначала индукцию поля, необходимую для того, чтобы радиус винтовой линии был порядка радиуса капилляра, то есть $R=r$. Подставляя в (1) массу и заряд иона натрия, полагая $\alpha = 45^\circ$, $r = 10^{-5}$ м, $v = 500$ м/сек (скорость теплового иона), получим индукцию B порядка нескольких Тесла (Тл). Нужно указать, что оценка скорости ионов 500 м/сек является оценкой сверху, полученной для ионов натрия исходя из значения 0,025 эв, принятого для энергии тепловых нейтронов, замедлившихся в горной породе [1, 2]. Для более тяжелых ионов хлора эта скорость будет несколько ниже, а для еще более тяжелых, гидратированных ионов скорость может быть ниже в несколько раз.

Индукция в несколько Тесла (и более высокая) может быть достигнута, если поместить образец породы в зазор мощного электромагнита [5] весом в сотню и более килограммов, то есть только в лабораторных условиях.

Согласно [5], в соленоидах, если не применять специальных мер по их охлаждению, достигается напряженность магнитного поля 200–400 эрстед. Это при минимальной магнитной восприимчивости для глин и песчаников около трех единиц [2] соответствует десятой доле Тл. Помещающиеся в скважинный прибор катушки будут способны создавать на один-два порядка меньшие напряженности, то есть увеличивать извилистость заметно менее чем в полтора раза. Однако если при оценке использовать наиболее вероятные значения магнитной восприимчивости 12,5–125 единиц [2], то получится заметное увеличение извилистости, порядка упомянутых полутора раз.

Если воспользоваться для оценки времени релаксации τ соотношением $\tau = (RC)^{1/2}$, где R и C – соответственно сопротивление и емкость породы, то такое увеличение извилистости приведет к увеличению τ в те же полтора раза.

Для получения более обоснованных оценок и уточнения механизма влияния магнитного поля на явление ВП необходимы как лабораторные, так и скважинные исследования.

Заключение

Явление вызванной поляризации может зависеть не только от величины поляризующего тока, но и от величины создаваемого в породе магнитного поля.

В таком случае параметрами процессов при ВП можно управлять, меняя как электрическое, так и магнитное поле.

Использование магнитного поля открывает дополнительные возможности для лабораторного изучения процессов диффузии и адсорбции ионов, сопровождающих явление вызванной поляризации, их зависимости от температуры (скоростей ионов) и давления.

Современное состояние техники позволяет использовать магнитное поле в скважинных приборах. Для этого можно как добавлять источники переменного поля к существующим приборам ВП, проводя измерения при наличии и отсутствии магнитного поля, так и дооснащать существующие приборы каротажа методом ЯМР электродами, применяемыми в методе ВП, и работать с постоянным магнитным полем, меняя только величину поляризующего тока.

Таким образом, применение магнитного поля перспективно и для лабораторного изучения электрохимических процессов, и для скважинных исследований методом вызванной поляризации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дахнов В.Н. Промысловая геофизика. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1959. – 697 с.
2. Петрофизика (Физика горных пород) / В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. – М.: Изд-во «Нефть и Газ» РГУ нефти и газа, 2004. – 368 с.
3. Геннадиник Б.И. Теория явления вызванной поляризации. – Новосибирск: Наука, 1985. – 280 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество. – М.: Наука, 1970. – 431 с.
5. Лекции по магнетизму / Боровик Е.С., Еременко В.В., Мильнер А.С. – М.: Физматлит, 2005. – 512 с.

Статья поступила в редакцию 3 марта 2016 г.

THE POSSIBILITY OF APPLYING THE HALL EFFECT IN GEOPHYSICAL RESEARCH USING THE INDUCED POLARIZATION METHOD

E.V. Guseva, S.A. Korchagin, Y.V. Troshenkov, V.E. Chemodanov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

It is noted that the path curving of the electric current carrier moving in the magnetic field, is capable influencing the speed and degree of volumetric charge separation in rock formation pores while its being under polarization by passing current. In this case, the increase of path tortuosity of the current carrier taking place due to the Hall effect and the carrier's pulling out from the pore capillary walls results in the increasing of specific resistance of the rock. It leads to the reduction of diffusion currents accompanying relaxation process and, consequently, to the relaxation time scale increase of local volume charges formed as a result of polarization. The estimation of the amount of change in the current carrier path curving compared to pore capillary tortuosity is described. It's pointed out that the values for magnetic fields research are quite achievable nowadays. The perspective of the investigation of rock formation electrochemical behavior by means of the magnetic field for more precise definition of induced polarization effect theory and its application in borehole surveying is substantiated.

Keywords: *induced polarization, magnetic field induction, Hall effect, specific resistance, electrical tortuosity.*

Ekaterina V. Guseva, Assistant.

Stepan A. Korchagin (Ph.D. (Phys.& Math.)), Senior Lecture.

Yury V. Troshenkov, Engeneer.

Vladimir E. Chemodanov (Ph. D. Geology &Mineralogy), Associate Professor.