

Изучение вызванной поляризации в широком диапазоне времен (ВП-Ш)

Агеев В. В., Светов Б. С., Амиантов А. С., Центр геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН, г. Москва

При изучении реальной геологической среды геофизическими методами представляет интерес получить не только ее усредненные физические параметры (например, электропроводность), но и петрофизическую характеристику (например, сведения о пористости, проницаемости, флюидонасыщенности и др.). Такую возможность предоставляют методы, изучающие поля, возникающие непосредственно в горных породах в результате происходящих в их поровом пространстве различных физических и физико-химических процессов. К таким методам, в частности, относятся методы вызванной поляризации (ВП) и сейсмoeлектрики (СЭ). Вторичные электрические поля, изучаемые в этих методах, возникают в горных породах под действием приложенного к ним первичного электрического или упругого поля. В этой статье мы рассмотрим технологию и аппаратуру метода ВП, разработанную для решения подобных задач.

Хотя характер электрокинетических процессов в горных породах, приводящих к появлению ВП, в основных чертах, изучен и существование ее зависимости от таких петрофизических параметров, как пористость, проницаемость, флюидонасыщенность не вызывает сомнений, построение строгой теории самого явления в силу чрезвычайно сложного и разнообразного строения горных пород вряд ли возможно. По-видимому, основные надежды установления таких зависимостей приходится возлагать на лабораторное исследование процессов ВП на образцах горных пород с известными петрофизическими свойствами. Однако и на этом пути необходимо формализовать процесс спада ВП таким образом, чтобы стало возможным его сопоставление с количественно охарактеризованными петрофизическими параметрами. Подобная формализация возможна на основе аппроксимации переходной характеристики ВП достаточно простыми выражениями, зависящими от небольшого количества параметров. Для описания процессов ВП разными исследователями были предложены различные эмпирически подобранные аппроксимационные конструкции [Комаров, 1980; Кормильцев, 1980; Pelton et al., 1983], среди которых чаще всего используется формула Cole-Cole, описывающая частотную дисперсию удельного сопротивления (проводимости):

$$\rho(p) = \rho_{\infty} \frac{1 + \frac{\rho_0}{\rho_{\infty}} (\tau p)^C}{1 + (\tau p)^C},$$

где ρ_0, ρ_{∞} - удельные сопротивления на бесконечно низких и бесконечно высоких частотах. В этом случае поляризационный процесс характеризуют три параметра (ρ_0 предполагается известным из измерений на постоянном токе):

$$\eta = \frac{\rho_0 - \rho_{\infty}}{\rho_{\infty}} - \text{стационарная поляризуемость,}$$

$$\tau - \text{постоянная времени поляризации,}$$

$$0 \leq C \leq 2 - \text{показатель степени, определяющий ширину экспоненциального спектра переходной}$$

характеристики ВП.

Адекватность этой формулы изучаемому явлению следует из того обстоятельства, что она является простейшей алгебраической формой входных передаточных функций, к классу которых принадлежит и электропроводность среды [Светов Б. С., 1992]. Формула Cole-Cole хорошо описывает экспериментальные данные в широком диапазоне времен (от микросекунд до десятков секунд).

Обработка зарегистрированных переходных процессов ВП сводится к подбору параметров η, τ и C , минимизирующих расхождение между экспериментальными данными и их Cole-Cole аппроксимацией. Однозначность решения этой задачи в значительной мере зависит от временного диапазона измерений. Например, если есть данные только на ранних временах (меньших, чем постоянная времени τ), то устойчиво определяется поляризуемость η , а параметры τ и C могут меняться в очень широких пределах. Наоборот, на больших временах (больших, чем τ) реализуется высокая чувствительность к параметру C при широких пределах области эквивалентности по η и τ . Для однозначного определения всех поляризационных параметров необходимым требованием к входным данным является их широкополосность. Для устойчивого определения всех трех параметров нужно зарегистрировать процесс ВП в диапазоне времен, составляющем не менее 4-5 порядков. В противном случае приходится обходиться определением какого-либо одного параметра не полностью характеризующего поляризационный процесс (например, кажущейся поляризуемости). Это может быть оправдано при решении таких традиционных для ВП задач, как поиск рудных тел, определение уровня грунтовых вод или при необходимости использовать большие (до нескольких километров) разности АВ, когда значительная часть переходной характеристики определяется индукционным становлением поля и только на поздних временах получается информация о поляризуемости. Здесь, однако, используется лишь малая часть информационного ресурса, заложенного в методе ВП. Когда же нужно обнаружить объект и одновременно определить его петрофизические свойства, необходимо определять все поляризационные параметры. Это выполнимо только при широкополосных измерениях.

В ЦГЭМИ ИФЗ РАН разработана аппаратура ВПП-2, предназначенная для наземных и скважинных измерений ВП, а также для лабораторных исследований на образцах горных пород. Она позволяет изучать спад поля в диапазоне от первых микросекунд до 100 секунд. В таком широком диапазоне особое значение приобретает борьба с внешними электромагнитными помехами. Чтобы эффективно бороться с помехой, необходимо для разных временных участков применять различное накопление и использовать разные методические приемы, учитывающие специфику помехи. Так, в

микросекундном диапазоне приходится накапливать до тысячи импульсов и, чтобы это происходило в обозримое время, использовать достаточно короткие токовые последовательности импульсов. В миллисекундном диапазоне, где основной является помеха промышленной частоты 50 Гц и ее первые гармоники, оказывается наиболее эффективным использовать кратность периода разнопольной токовой последовательности с промышленной частотой. При вычитании полупериодов полезный сигнал удваивается, а промышленная помеха с гармониками погашается. При этом в отличие от процедур фильтрации в полезный сигнал не вносятся никаких искажений.

Аппаратура ВПШ-6 работает в 4 различных частотно-временных диапазонах. Генератор создает знакопеременную последовательность прямоугольных токовых импульсов заданной длительности со скважностью равной 1. Длительности импульсов тока и пауз согласованы в 4 диапазонах с измерителем и синхронизируются при выключении тока на расстояние до 1,5 км. На небольших расстояниях (до 100 м) возможна синхронизация с помощью коаксиального кабеля. При больших расстояниях используется радиоканал.

Генератор работает от аккумулятора 24 В и создает стабилизированный ток от 4 мА до 1 А (выбирается оператором) с шагом 2. Максимальная мощность 200 Вт, максимальное выходное напряжение 600 В. Длительности импульсов тока и пауз в разных диапазонах равны: 1 диапазон - 256 мкс; 2 диапазон - 30 мс; 3 диапазон - 1,28 с; 4 диапазон - 100 с.

Шестиканальный измеритель конструктивно представляет собой отдельный блок с автономным питанием и с встроенным одноплатным компьютером PCM-3350 (процессор NS Geodge GX1-300 MHz) с экраном TFT-LCD (640x480) и 6 выносных усилителей. Выносные усилители располагаются непосредственно в точках измерения. Входным является дифференциальный усилитель (INA111) со схемой защиты от сигналов более 8 В. Далее следует усилитель с гальванической развязкой AD215 (полоса усилителя 120 кГц) и буфер согласования с коаксиальным кабелем - AD8019. Сквозной коэффициент передачи выносного усилителя можно устанавливать $K_n=1$ или $K_n=10$.

Измерения выполняются и в момент пропускания тока и в паузах с разными коэффициентами усиления, задаваемыми программно. На эти усилители сигнал поступает через интеграторы, которые в каждом временном диапазоне имеют свою длительность, обеспечивающую дискретизацию 1024 отсчета измеряемой величины на период. Далее следует коммутатор, который коммутирует выход одного из выносных усилителей на АЦП. В качестве АЦП используется AD7674 (18-бит, частота измерения 600 кГц, напряжение питания 5 В, ток потребления 30 мА). Так как заданная максимальная частота измерения 200 кГц, то для шести каналов используется две идентичные схемы - АЦП с тремя аналоговыми каналами и коммутатор на три канала с частотой переключения 600 кГц. Число периодов измерений для накопления может изменяться от 1 до 1024. В каждом диапазоне предусмотрена калибровка каналов от внутреннего генератора и режим записи фонового поля. Возможно включение режекторных фильтров на частоты 50 и 100 Гц. Двухнаправленный интерфейс с компьютером (LPT порт) обеспе-

чивает управление режимами измерений ВПШ-6, необходимые чувствительности каналов, а также передачу информации в компьютер.

Результатом измерений, подлежащих последующей интерпретации, является совокупность переходных характеристик ВП в нескольких временных диапазонах. На рис. 1 приведен пример такой записи лабораторных измерений ВП на кернах песчаников. В процессе интерпретации подбираются такие поляризационные параметры модели Cole-Cole, при которых достигается минимум невязки расчетных и экспериментальных данных во всех диапазонах.

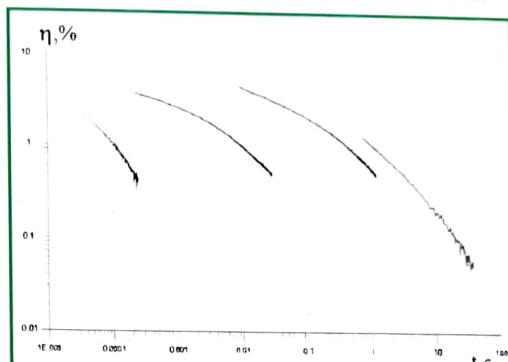


Рис. 1. Пример записи переходных характеристик ВП в 4 временных диапазонах при лабораторных исследованиях керна песчаника.

Разработанная программа интерпретации предназначена для выполнения расчетов временных и частотных характеристик при работе с генераторной линией АВ конечной длины и приемными электрическими (либо магнитными) приемниками над одномерными горизонтально слоистыми разрезами с частотно зависимыми удельными сопротивлениями. Расчеты выполняются для произвольной заданной геометрии установки и произвольного геоэлектрического разреза (до 10 слоев). Программа ориентирована на применение при интерпретации полевых данных, полученных с созданной аппаратурой ВПШ-6. Поэтому в ней основные вычислительные параметры (временные и частотные диапазоны, форматы данных и т.п.) согласованы с аппаратными параметрами. Вместе они создают законченный комплекс для работ методом ВП от этапа проектирования методики работ на конкретном объекте, оценки ожидаемых сигналов, до интерпретации полученных материалов.

Удобный интерфейс программы позволяет выводить на экран полевые кривые становления поля в паузе после выключения токового импульса и расчетные модельные кривые и проводить одномерную интерпретацию, изменяя параметры слоистой модели.

Полевые экспериментальные работы проводились в наземном и скважинном вариантах, в основном, с целью решения гидрогеологических и инженерных задач. Поскольку определение связи измеряемых процессов ВП с петрофизическими параметрами среды представляет наибольший интерес при скважинных исследованиях, ограничимся иллюстрацией одного из короткожных экспериментов. Он был поставлен в г. Вологде в скважине, пройденной на глубину 100 м, в детально описанных четвертичных песчано-глинистых отложениях. Был применен трехэлектродный зонд А0,75М0,25N с непolarизующимися медно-купоросными измерительными и свинцовыми питающими электродами. Измерения выполня-

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

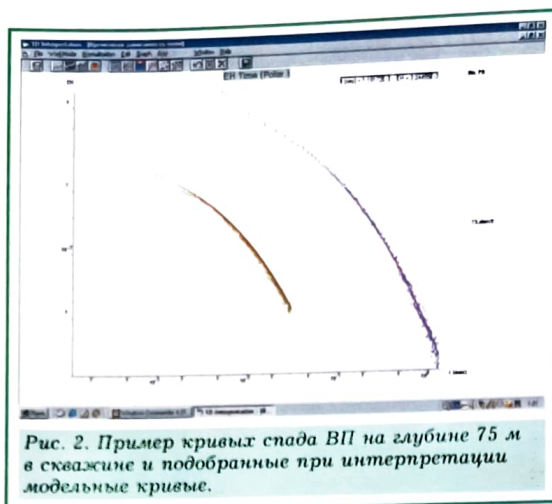


Рис. 2. Пример кривых спада ВП на глубине 75 м в скважине и подобранные при интерпретации модельные кривые.

лись во 2 и 3 диапазонах. В первом диапазоне полученные данные были искажены из-за паразитной емкости подводящих проводов, а 4 диапазон приводит к недопустимо долгому для каротажа процессу измерений. Измерения выполнялись с шагом 1 м. В комплексе с каротажом ВП был проведен гамма каротаж, который хорошо характеризует глинистость пород. На рис.2 показан пример кривых спада ВП на глубине 75 м и подобранные модельные кривые с параметрами Cole-Cole $\eta=8,5\%$, $\tau=80$ мс, $C=0,45$.

По результатам обработки измеренных данных получены представленные на рис.3 каротажные кривые поляризационных параметров и кажущегося удельного сопротивления. Необходимо заметить, что стационарная поляризуемость, которая фигурирует в формуле Cole-Cole и подбирается при интерпретации, представляет собой асимптотическое значение, на которое выходит поляризационная кривая на очень ранних временах. Эта величина непривычно велика для тех, кто имел дело с кажущейся поляризуемостью, измеряемой, например, через 0,5 с после выключения тока, когда кривая ВП уже спадает до привычных долей процента. Слева приведен схематический геологический разрез по данным бурения. Четвертичные отложения до глубины 101 м представлены тремя слоями: сверху суглинки и глины московской морены, ниже флювиогляциальные пески с линзами суглинков и алеврита (основной водоносный горизонт), его подстилают суглинки днепровской морены с линзами песков и глин.

Пунктиром приведена кривая кажущейся поляризуемости, полученная в 3 временном

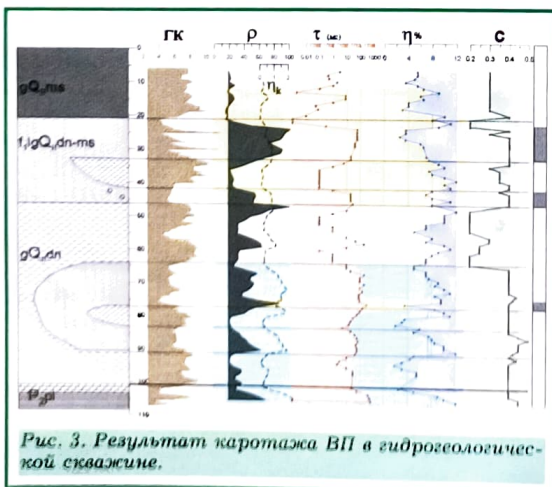


Рис. 3. Результат каротажа ВП в гидрогеологической скважине.

диапазоне на времени 0,5 с. Это традиционно изучаемый параметр в методе ВП. Видно, что кривой кажущегося удельного сопротивления с поэтому не несет существенной независимой информации. Иная ситуация наблюдается с поляризацией. С изменением параметрами разреза наблюдается изменение соотношения η и τ . Желтым и голубым фоном выделены участки разреза, где увеличение поляризуемости сопровождается уменьшением постоянной времени (желтый фон) и обратное поведение одновременного нарастания и спада (голубой фон). По комплексу этих параметров можно выделять перспективные интервалы с повышенным коэффициентом фильтрации (они отмечены штриховкой в правой колонке на рисунке). Эти интервалы удовлетворяют следующему сочетанию величин параметров - повышенное удельное сопротивление, низкое значение поляризуемости (соответствует хорошо промытым пескам), высокое значение постоянной времени (высокая зернистость песка).

Возможность получать и анализировать несколько независимых поляризационных параметров (η , τ и C) в отличие от традиционно применяемой в методе ВП кажущейся поляризуемости, существенно повышает информативность метода.

В результате интерпретации установлены следующие закономерности.

1. Все три поляризационных параметра хорошо коррелируют с литологией, с каротажом сопротивления и с гамма-каротажом.

2. Чистая глина и чистый песок характеризуются наименьшими величинами стационарной поляризуемости (2-3%). Поляризуемость песчано-глинистой толщи доходит до 12% в зависимости от соотношения глинистой фракции в песке и его зернистости.

3. Постоянная времени изменяется в очень широких пределах от единиц микросекунд до сотен миллисекунд.

4. Неожиданным стала очень четкая зависимость показателя C от геологии. До сих пор большинство исследователей обращают на этот параметр мало внимания, часто просто закрепляя некоторую среднюю величину и подбирая только поляризуемость и постоянную времени. Значение C меняется при пересечении геологических границ. Какую физическую содержательную информацию о среде несет этот параметр пока сказать сложно. Полагают, что параметр C характеризует степень однородности породы, в частности по гранулометрическому составу. Чем лучше отсортирована песчано-глинистая смесь, тем большие значения C следует ожидать.

5. Пески хорошо выделяются по удельному сопротивлению. По поляризуемости можно детализировать пески на чистые промытые, с пониженной поляризуемостью, и более глинистые. В дальнейшем планируется переходить к количественным оценкам фильтрационных параметров.

Литература

1. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л. Недра, 1980, 391 с.
2. Кормильцев В.В. Переходные процессы при вызванной поляризации. М., Наука, 1980, 112 с.
3. Светов Б.С. О частотной дисперсии электрических свойств среды. Физика Земли, 1992 г., № 4 с. 62-70.
4. Pollon W.H., Sill W.R., Smith B.D. Interpretation of complex resistivity and dielectric data. Geophysical transactions, 1983, vol 29, No 4, pp 297-330.