

УДК 550.832

В. В. Вержбицкий, В. А. Пантиухин
ООО "Нефтегазгеофизика"

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПРОВОДИМОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖЕЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ

Исследованы сигналы электромагнитного (ИК, ВЭМК3) и электрического (БК3) каротажей в рамках модели однородной анизотропной среды. Показано, что чувствительность одиночного зонда к любому параметру среды неоднозначно характеризует погрешность определения этого параметра. Введено понятие чувствительности комплекса зондов и проведен расчет этой величины для нескольких сочетаний зондов электрического (ЭК), электромагнитного (ЭМК) каротажей.

Ключевые слова: горная порода, анизотропия, электрический и электромагнитный каротаж, горизонтальная скважина, математическое моделирование.

Введение

Методики и средства интерпретации данных электрического и электромагнитного каротажей с учетом влияния анизотропии разреза создавались первоначально для исследования вертикальных скважин. В качестве примера можно привести методику комплексной интерпретации [12] и программно-методический комплекс ЭКАР, в основе которых лежит одна и та же интерпретационная модель среды. Рассматривалось два вида анизотропных (трансверсально-изотропных) пластов:

- 1) микроанизотропные пластины, анизотропные свойства которых обусловлены их текстурой или слоистым строением при толщине прослоев, недостаточной для обнаружения их методами ГИС;
- 2) макроанизотропные пластины, толщины прослоев которых позволяют выделить их на каротажных кривых методов с высоким вертикальным разрешением.

Методика определения электрических параметров микроанизотропных пластов ограниченной толщины изложена в первой части [12]. Коэффициент анизотропии пласта λ ($\lambda = \sqrt{\rho_p / \rho_t}$), где ρ_p – удельное

электрическое сопротивление (УЭС) породы в плоскости напластования; ρ_p – УЭС в перпендикулярном направлении. В проницаемых пластах величина коэффициента зафиксирована ($\lambda_{pp} = \lambda_{zp} = 1,1$), чтобы минимизировать погрешность результатов обработки, так как определение величины коэффициента анизотропии по данным традиционного комплекса невозможно. Результаты обработки в непроницаемых пластах с учетом анизотропии позволяют более корректно оценить качество измерений, уточнить значение УЭС промывочной жидкости и учесть погрешности измерения отдельными зондами комплекса. Аналогичные задачи решаются при помощи программы ЭКАР [14].

Методика определения электрических параметров макроанизотропных пластов изложена во второй части [12]. Применение этой методики позволяет исключить из эффективной толщины коллектора общую толщину непроницаемых прослоев и определить УЭС проницаемых прослоев.

При исследованиях в горизонтальных и наклонно-направленных скважинах основной является навигационная задача. Важно определить, что скважиной вскрыт именно запланированный объект, и обеспечить продолжение бурения так, чтобы горизонтальная часть ствола не выходила из пределов этого объекта. Если границы пласта все же будут нарушены, необходимо выделить интервалы ствола, находящиеся вне границ исследуемого пласта.

В анизотропном пласте результаты обработки данных ЭК, ЭМК в наклонной или горизонтальной скважине, проведенной при помощи средств, разработанных для вертикальных скважин, могут существенно отличаться от результатов, полученных в вертикальных скважинах. Это приводит к ошибкам не только в определении электрических параметров пласта, но и в его идентификации.

Настоящая работа посвящена оценке возможностей зондов ЭК и ЭМК для решения некоторых задач, возникающих при исследовании горизонтальных и наклонно-направленных скважин.

Выбор комплекса зондов и интерпретационной модели

Поскольку основные усилия при разработке отечественных приборов для исследования горизонтальных скважин (ГС) были сосредоточены на создании систем, способных наилучшим способом преодолеть искривленную и горизонтальную части ствола и обеспечить

возможность проведения измерений, конфигурация зондов ЭК и ЭМК изменилась слабо. В случае ЭК точечные электроды практически заменены кольцевыми, размещенными на непроводящем корпусе [19]. Зонды ЭМК содержат катушки, ориентированные вдоль оси прибора.

Как показывает опыт анализа скважинных материалов и результатов математического моделирования, любой комплекс ЭК, ЭМК можно условно разделить на зонды малого и большого радиусов исследования.

Показания зондов малого радиуса исследований подвержены существенному влиянию параметров скважины и зоны проникновения фильтрата промывочной жидкости в пласт. Есть основания предполагать, что форма сечения наклонной скважины существенно отличается от круга, при этом информация о форме профиля сечения в большинстве случаев отсутствует. Зона проникновения также является асимметричной, и о ее форме существуют различные предположения [6, 11]. Существующий комплекс исследований не позволяет определить параметры скважины и зоны проникновения и, следовательно, ввести корректные поправки в показания этих зондов. Только введение в комплекс исследований методов профилеметрии скважин и азимутально направленных зондов [1] позволит уточнить модель прискважинной зоны и использовать показания зондов с малым радиусом исследования.

По данным зондов большого радиуса исследований решаются традиционная задача определения УЭС неизмененной части пласта и задача уточнения положения и ориентации скважины относительно границ пласта. На показания больших зондов практически не влияют изменения УЭС разреза в прискважинной зоне, и методика интерпретации их данных может быть разработана на основе решений прямых задач для модели плоскослоистой среды [5, 9, 21].

Прямые задачи ЭК, ЭМК для такой модели среды с учетом анизотропии разреза получены давно. Известны решения для зондов ЭК с точечными электродами [15]. Для поля произвольного гармонического источника в среде с произвольной ориентацией осей анизотропии в каждом слое [16] разработан общий подход. Этот подход был реализован в виде конкретного решения для поля произвольно ориентированного магнитного диполя в трансверсально-изотропной среде, что позволило исследовать показания зондов ИК в наклонной скважине [13, 18].

Наиболее простым объектом для исследования является пласт достаточно большой толщины. В случае, когда вмещающие породы не оказывают влияния на показания зондов комплекса, толщину можно считать неограниченной. Для зондов большого радиуса исследований свойства такого пласта соответствуют однородной среде. На основе этой простейшей модели удобно исследовать основные принципы обработки данных ЭК, ЭМК и оценки эффективности комплекса этих методов.

Выбор способа обработки и оценки эффективности комплекса

Показания зондов БКЗ в однородной анизотропной среде определяются формулой [10]: $\rho_k = \rho_t \lambda_k$, где λ_k – кажущееся значение коэффициента анизотропии; $\lambda_k = \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha / \lambda^2}$; α – угол между осью прибора и осью анизотропии (зенитный угол).

Расчет показаний зонда ЭМК с катушками, ориентированными вдоль оси прибора в анизотропном пласте с произвольным наклоном скважины, основан на известном решении задачи о поле произвольно ориентированного гармонического магнитного диполя в однородной анизотропной среде [22]:

$$h = \frac{[2 + (1-i)p]}{2} e^{-(1-i)p} + \frac{(1-i)p}{2} e^{-(1-i)p/\lambda_k}, \quad (1)$$

где h – магнитное поле, нормированное на поле в воздухе; p – расстояние от диполя до точки измерения, нормированное на толщину скрин-слоя δ в плоскости, нормальной оси анизотропии ($\delta = \sqrt{\frac{2\rho_t}{\omega\mu}}$, где ω – циклическая частота диполя, μ – магнитная проницаемость среды).

На рис. 1 приведены зависимости λ_k от угла α при $\lambda = \sqrt{2}$, 2. Эта величина плавно изменяется от 1 до λ при увеличении α от нуля до девяноста градусов.

Таким образом, любой комплекс, содержащий зонды ЭМК с катушками, ориентированными вдоль оси зондов, и зонды БКЗ позволяет определить только значения ρ_t и λ_k . Обработка показаний комплекса для этой модели среды может быть проведена двумя путями. Можно использовать величину зенитного угла, полученную по данным

инклинометрии, и решать обратную задачу относительно ρ_t и λ или ρ_t и ρ_n [20]. Второй путь заключается в решении обратной задачи относительно ρ_t и λ_k . В этом случае погрешность определения ρ_t не зависит от погрешности определения α . Этот подход является предпочтительным, поскольку именно величина ρ_t , определяется при исследованиях в вертикальных скважинах и служит для идентификации пластов. Значения λ и α при необходимости могут быть получены из величины λ_k с использованием данных инклинометра.

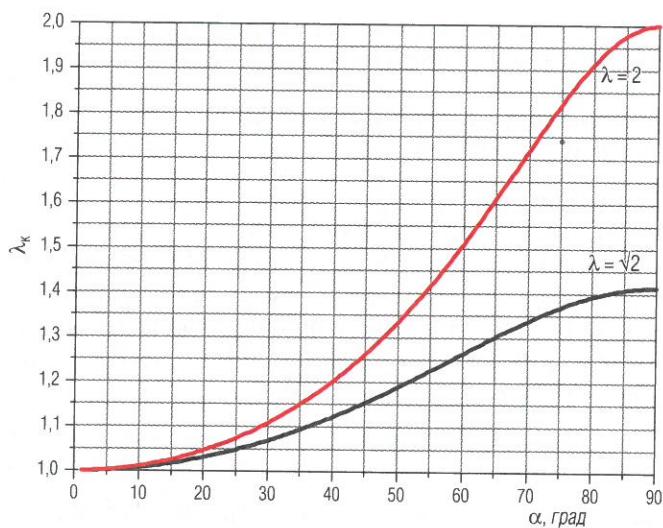


Рис. 1. Зависимости λ_k от угла α

Оценка погрешности результатов обработки может быть построена на основе анализа чувствительности комплекса зондов к различным параметрам модели разреза. Чувствительность показаний k -го зонда y_k к параметру модели x_i определяется соотношением [20, 21]:

$$\eta_{ik} = \frac{\partial \ln y_k}{\partial \ln x_i}.$$

Использование непосредственно этой величины для оценки погрешности результатов обработки сигнала зонда оправдано в случае, когда он практически не зависит от остальных параметров модели.

В противном случае возникает ряд проблем. Чувствительность зонда к i -му параметру является неоднозначной величиной и зависит от выбора остальных параметров, описывающих модель. Так, чувствительность любого зонда БКЗ к ρ_t равна -1 , $-0,5$ или 0 , если в качестве второго параметра выбрать λ_k , $\rho_n = \rho_t \lambda_k^2$ или $\rho_m = \rho_t \lambda_k$, соответственно. При выборе фиксированного набора параметров отсутствие учета влияния погрешностей определения остальных параметров может привести к излишне оптимистической оценке возможностей метода при определении i -го параметра. Необходима оценка чувствительности комплекса методов.

В качестве оценки погрешности определения 1-го параметра геоэлектрической модели используем квадратный корень соответствующего диагонального элемента ковариационной матрицы [17]. Используя элементарное преобразование и формулу Бине–Коши, можно получить следующее выражение для чувствительности комплекса n зондов к x_1 :

$$\eta_1 = \left[\frac{\sum_{1 \leq k_1 < k_2, \dots, k_m \leq n} A_{(k_1, k_2, \dots, k_m)}^{(1, 2, \dots, m)}}{\sum_{2 \leq k_1 < k_2, \dots, k_{m-1} \leq n} A_{(k_1, k_2, \dots, k_m)}^{(2, 3, \dots, m)}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где $A_{(k_1, k_2, \dots, k_m)}^{(1, 2, \dots, m)}$ – миноры m -го порядка матрицы A размерности $m \times n$;

$a_{ik} = \eta_{ik} \cdot \frac{\delta}{\delta_k}$; m – количество параметров, описывающих модель; δ_k – относительная погрешность измерения y_k ; δ – некоторая характеристическая относительная погрешность комплекса; $A_{(k_1, k_2, \dots, k_m)}^{(2, 3, \dots, m)}$ – миноры $(m-1)$ -го порядка матрицы A с исключенной первой строкой. Чувствительность определяется для 1-го параметра исключительно из соображений удобства написания формулы. Эта величина равна отношению δ к относительной погрешности определения 1-го параметра. Например, если выбрать в качестве δ относительную погрешность измерения основным зондом комплекса, эта погрешность, деленная на чувствительность комплекса, равна погрешности определения искомого параметра. Легко показать, что величина η_1 инвариантна относительно выбора остальных $(m-1)$ параметров, описывающих модель.

Ниже рассмотрены особенности поведения чувствительности различных комплексов ЭК, ЭМК к величине ρ_t в однородной анизотропной среде.

Результаты моделирования в однородной анизотропной среде

На рис. 2 приведены результаты расчетов активной и реактивной составляющих кажущейся проводимости самого длинного зонда (ЗИ2,05) аппаратуры 5ИК.

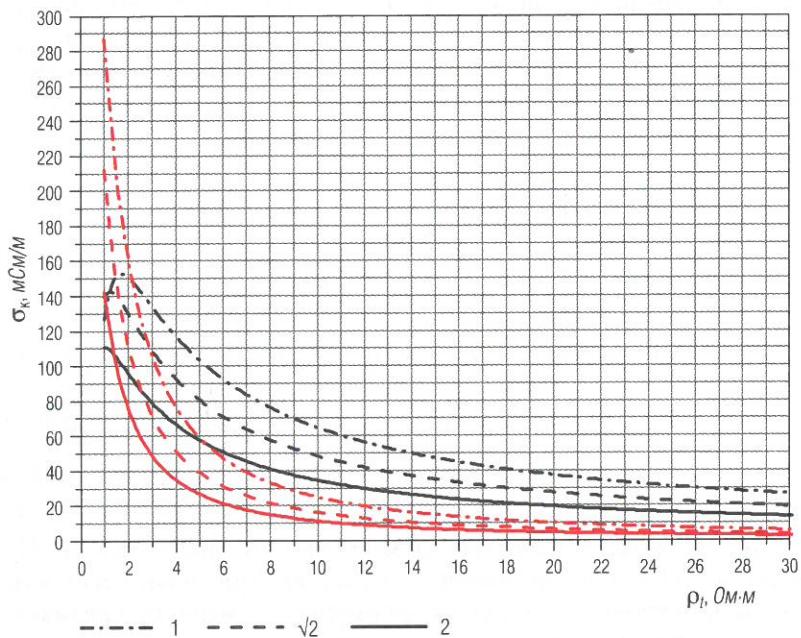


Рис. 2. Зависимости активной (черный цвет) и реактивной (красный цвет) составляющих кажущейся проводимости зонда ЗИ2,05 от ρ_t . Шифр кривых – λ_k

При увеличении коэффициента анизотропии пласта показания зондов уменьшаются, что приводит к завышению величины ρ_t , определенной по зависимостям для изотропной среды.

Из (1) следует, что по поведению в предельном случае $p \rightarrow 0$ все показания зондов ЭМК можно разбить на две группы. В первую входят активные составляющие показаний зондов ИК, показания зондов, регистрирующих разность фаз ($\Delta\phi$). Им соответствует $\rho_k = \rho_t \lambda_k$. К этой же группе относятся зонды БКЗ. Во вторую – реактивные составляющие показаний зондов ИК и показания зондов, регистрирующих отношение амплитуд сигналов измерительных катушек. В этом случае

$$\rho_k = \rho_t \left[\left(\frac{1}{4} + \frac{3}{4\lambda_k^2} \right) \right]^{\frac{2}{3}}.$$

При существенном влиянии скин-эффекта ρ_k становится больше, и это завышение тем сильнее, чем больше параметр p . Таким образом, при достаточно низком сопротивлении разреза и при наличии измерений зондами с различными величинами параметра p появляется возможность выделить анизотропный пласт и оценить величину коэффициента анизотропии. Комплекс таких зондов может содержать либо зонды с одинаковой рабочей частотой и разной длиной, либо зонды с различной рабочей частотой, либо зонды, принадлежащие к разным группам.

Если комплекс состоит из изопараметрических зондов, величина p остается одной и той же для всех зондов комплекса, и несмотря на то, что влияние анизотропии может быть существенным, отсутствует возможность не только определения ρ_t и λ_k , но и установления самого факта анизотропности пласта относительно электросопротивления.

Метод выделения анизотропных пластов, основанный на этом эффекте, первоначально был разработан и опробован на практических материалах [4] для анизотропных в плоскости напластования пластов, вскрытых вертикальной скважиной. С развитием горизонтального бурения был разработан и используется соответствующий блок в программе ЭКАР [2, 7]. При выделении анизотропных пластов и оценке их параметров используются показания зондов аппаратуры, разработанной как в ООО “Нефтегазгеофизика”, так и в других организациях.

На рис. 3 представлены результаты расчета чувствительностей составляющих показаний зонда ЗИ2,05 и чувствительность их совокупности к параметру ρ_t анизотропного пласта.

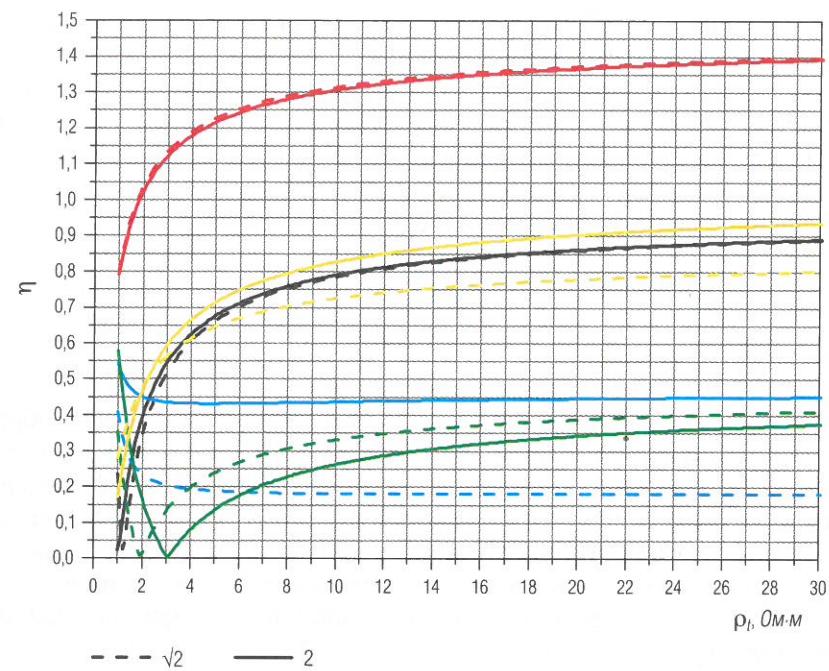


Рис. 3. Чувствительность кажущейся проводимости зонда ЗИ2,05 к ρ_t . Активная (черный цвет) и реактивная (красный цвет) составляющая при известном λ_k . Активная (зеленый цвет) и реактивная (желтый цвет) составляющая при известном $\rho_t \lambda_k^2$. Чувствительность комплекса (синий цвет). Шифр кривых – λ_k

Чувствительность каждой составляющей существенно зависит от выбора второго известного параметра. При определении ρ_t и λ_k или ρ_t и $\rho_t \lambda_k^2$ одновременно по активной и реактивной составляющим показаний зонда чувствительность комплекса к ρ_t остается неизменной. При этом появляется более сильная зависимость от величины λ_k , а прогноз погрешности определения ρ_t становится менее оптимистическим. При возрастании ρ_t чувствительность комплекса к активной и реактивной составляющим сигнала зонда стремится к постоянной величине, обусловленной асимптотическими значениями этих составляющих. Относительные погрешности регистрируемых сигналов здесь и ниже берутся одинаковыми, если не оговорено обратное.

Чувствительности к ρ_t различных пар зондов, относящихся к первой группе, представлены на рис. 4.

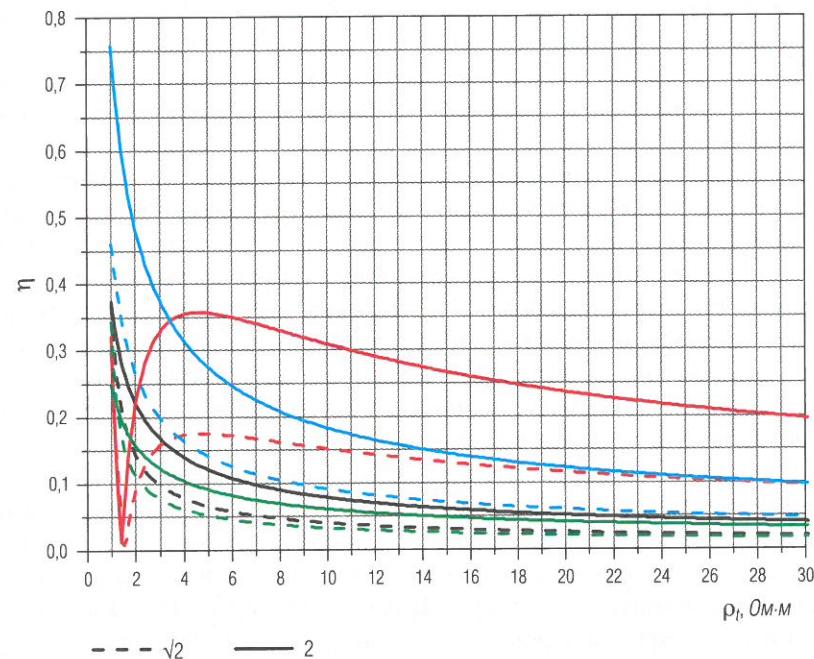


Рис. 4. Чувствительность к ρ_t парных измерений активной составляющей показаний зонда ЗИ2,05 со следующими сигналами: активной составляющей показаний зонда ЗИ1,26 (черный цвет); $\Delta\phi$ ВЭМКЗ (красный цвет); ρ_k БКЗ (синий цвет); ρ_k БКЗ с погрешностью в четыре раза больше погрешности основного зонда (зеленый цвет). Шифр кривых – λ_k

В этом случае возможность определения параметров анизотропного пласта обусловлена исключительно различным влиянием скин-эффекта на показания используемых зондов. При увеличении сопротивления среды величина η стремится к нулю, поскольку асимптотические значения всех измерений (ρ_k) совпадают. Как и следовало ожидать, лучшей чувствительностью обладают пары зондов, максимально различающиеся по величине влияния скин-эффекта: ИК и ВЭМКЗ, а также ИК и БКЗ.

В случае использования зондов БКЗ следует учитывать, что на показания даже зондов большой длины существенное влияние могут оказывать параметры скважины. В случае нарушения симметрии среды за счет искажения формы сечения скважины [3], анизотропии проводимости [8], существования границы между пластами [6], это влияние усиливается. Поэтому при оценке чувствительности комплекса в погрешность сигнала БКЗ должна включаться не только погрешность регистрации сигнала, но и ошибка, связанная с отсутствием корректного учета влияния скважины. Величина этой ошибки возрастает с увеличением контрастности сопротивлений промывочной жидкости и пласта и может существенно превосходить погрешность регистрации сигнала. В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости чувствительности к ρ_t измерений активной составляющей показаний зонда ЗИ2,05 и ρ_k БКЗ с погрешностью, равной и в четыре раза превосходящей погрешность основного зонда. Из приведенных зависимостей видно, что увеличение погрешности измерений одним из методов существенно снижает чувствительность комплекса.

Правильная оценка погрешности показаний зонда, в том числе и связанная с отсутствием учета влияния на них тех или иных факторов, имеет большое значение для получения достоверного результата обработки. С одной стороны, добавление дополнительных методов повышает достоверность результатов обработки данных комплекса, с другой – снижение погрешностей измерения этими методами может привести к существенному искажению результатов обработки.

На рис. 5 представлены результаты расчета чувствительности обеих составляющих показаний зонда ЗИ2,05 и чувствительностей с дополнительными сигналами $\Delta\phi$ ВЭМКЗ и ρ_k БКЗ к параметру ρ_t анизотропного пласта.

Наилучшим является комплекс ИК, ВЭМКЗ, что подтверждается практическими результатами [2, 7].

Как правило, наклонно-направленные и горизонтальные скважины бурятся для дополнительной разведки или эксплуатации месторождений. Поэтому еще на стадии планирования проведения такой скважины известны приблизительные значения параметров разреза. Чувствительности к ρ_t показаний зонда ЗИ2,05 с учетом априорной оценки этого параметра с различными погрешностями приведены на рис. 6.

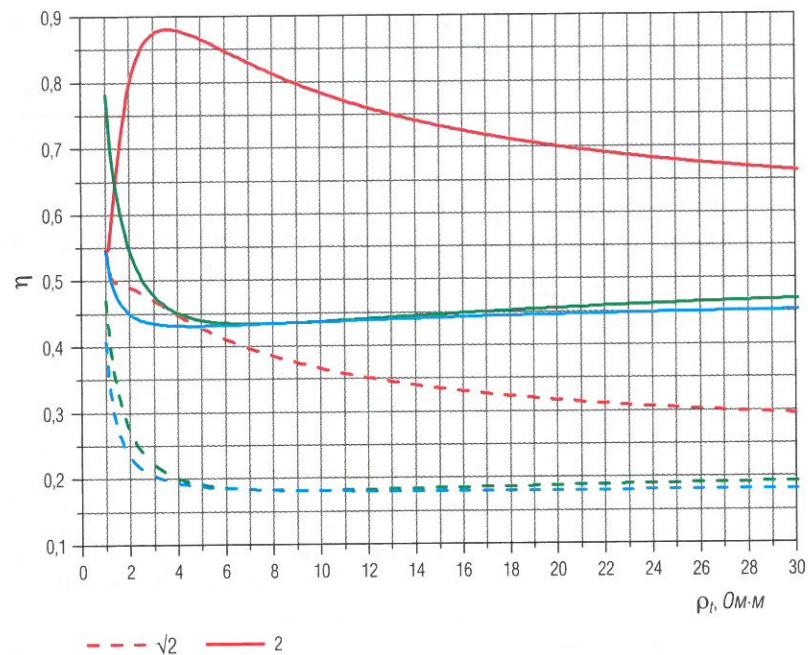


Рис. 5. Чувствительность к ρ_t измерений активной и реактивной составляющих показаний зонда ЗИ2,05 (синий цвет) со следующими дополнительными сигналами: $\Delta\phi$ ВЭМКЗ (красный цвет); ρ_k БКЗ (зеленый цвет). Шифр кривых – λ_k

Из представленных зависимостей следует, что достоверность определения ρ_t может быть существенно повышена с использованием априорной информации о его величине. Погрешность этой информации связана с предварительной изученностью разреза и латеральной изменчивостью его свойств.

Заключение

Проведенное математическое моделирование показывает, что тангенциальное УЭС толстого анизотропного пласта может быть определено по данным ЭК, ЭМК без определения угла наклона скважины и коэффициента анизотропии пласта. Определение этих величин заменяется определением λ_k .

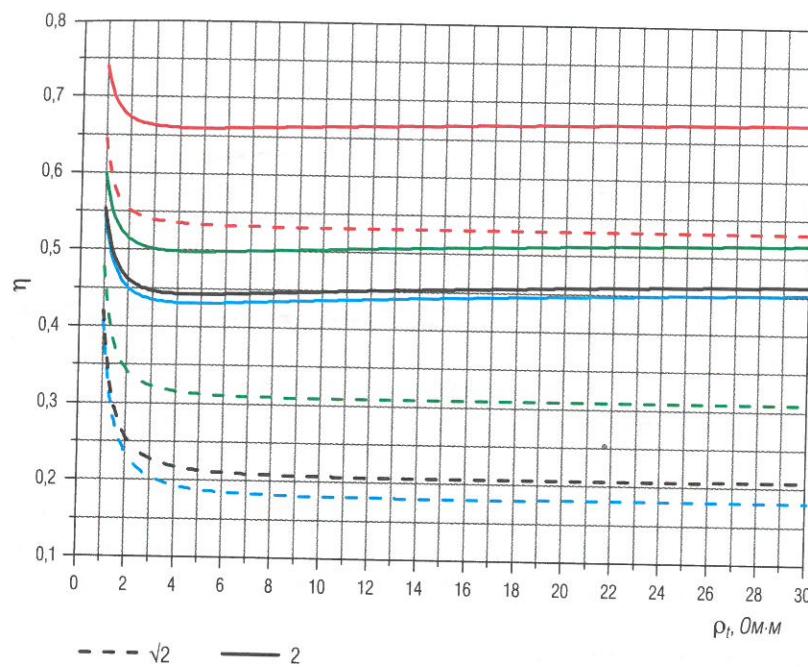


Рис. 6. Чувствительность к ρ_t измерений активной и реактивной составляющих показаний зонда ЗИ2,05 (синий цвет) с учетом априорной оценки ρ_t с погрешностями больше погрешности регистрации сигнала зонда: в 10 раз (черный цвет); в 4 раза (зеленый цвет); в два раза (красный цвет). Шифр кривых – λ_k

Чувствительность одиночного зонда к любому параметру среды однозначно характеризует погрешность определения этого параметра только в случае, когда показания зонда не зависят от других параметров среды. В противном случае необходимо использовать чувствительность комплекса зондов в количестве не менее, чем число параметров, влияющих на их показания.

Достоверность определения электрических параметров анизотропного пласта, вскрытого горизонтальной или наклонной скважиной, может быть существенно повышена с учетом априорной информации о параметрах разреза, полученных в результате исследований вертикальных скважин. Особенно большое значение эта информация

будет иметь при рассмотрении более сложных моделей среды. Даже в изотропном разрезе для обратной задачи ЭК, ЭМК характерна модельная эквивалентность [9], связанная в основном с влиянием тонких прослоев.

Обработка скважинных материалов по отдельно взятой горизонтальной скважине представляет сложную и часто неразрешимую задачу из-за отсутствия необходимой информации. В частности, это информация о параметрах подстилающей породы и толщины исследуемого пласта. Поэтому необходимо предусмотреть возможность использования в программе обработки данных по близлежащим вертикальным скважинам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксельрод С. М. Методы опережающей навигации при бурении горизонтальных скважин (по результатам зарубежной литературы) // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2012. Вып. 9 (219). С. 42–54.
2. Вержбицкий В. В., Девицын В. А., Снежко О. М. Результаты испытаний модуля 4ИК-73Г в горизонтальных скважинах треста “Сургутнефтегеофизика” // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 1998. Вып. 57. С. 87–97.
3. Вержбицкий В. В. Зонды БКЗ в скважине эллиптического сечения // Изв. вузов. Геология и разведка. 1984. № 7. С. 112–116.
4. Вержбицкий В. В., Малинин А. В., Кузьмичев О. Б., Юматова Т. Г. Применение электрокаротажа при исследовании анизотропии проницаемости горных пород // Разведочная геофизика: Обзор. 1992. Вып. 4. 28 с.
5. Вержбицкий В. В. Оценка некоторых возможностей многозондовых комплексов ЭМК при исследовании горизонтальных скважин // Электрические и электромагнитные методы исследования в нефтегазовых скважинах. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1999. С. 72.
6. Вержбицкий В. В. Прямые задачи электрокаротажа горизонтальных скважин // Изв. РАН. Физика Земли. 1997. № 3. С. 71–74.
7. Вержбицкий В. В., Рудяк Б. В., Снежко О. М. и др. Электрическая анизотропия продуктивных пластов-коллекторов в горизонтальных скважинах Федоровского месторождения Западной Сибири // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2005. Вып. 2 (129). С. 9–23.
8. Вержбицкий В. В., Шеин Ю. Л. Влияние горизонтальной анизотропии проводимости на показания зондов БКЗ // Изв. вузов. Геология и разведка. 1987. № 6. С. 119–121.
9. Горбатенко А. А., Сухорукова К. В. Особенности сигналов высокочастотного электромагнитного каротажа в наклонных и горизонтальных скважинах // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2014. Вып. 11 (245). С. 42–54.

10. Дахнов В. Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. М.: Недра, 1981. 344 с.
11. Лежсанкин С. И., Рапин В. А. Особенности интерпретации результатов промыслового-геофизических исследований в горизонтальных скважинах // Геофизика. 1994. № 2. С. 31–36.
12. Методические указания по комплексной интерпретации данных БКЗ, БК, ИК (с комплектом палеток) / Под ред. А. В. Ручкина. Калинин: Союзпромгеофизика, 1990. 85 с.
13. Пантиюхин В. А., Чаадаев Е. В., Юматова Т. Г. Эквивалентность при индукционном каротаже наклонных анизотропных пластов // Изв. вузов. Геология и разведка. 1986. № 2. С. 148–151.
14. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610807 LogWin-ЭК. 2005.
15. Сидорчук А. И., Чаадаев Е. В. Оценка влияния анизотропии на кривые КС в многослойных средах // Геология и геофизика. 1976. № 11. С. 86–94.
16. Табаровский Л. А., Эпов М. И. Электромагнитное поле гармонических источников в слоистых анизотропных средах // Геология и геофизика. 1977. № 1. С. 101–109.
17. Тихонов А. Н., Уфимцев М. В. Статистическая обработка результатов экспериментов. М.: Издательство МГУ, 1998. 174 с.
18. Чаадаев Е. В., Гайдаш А. Д., Санто К. Л., Пантиюхин В. А. Индукционный каротаж наклонных анизотропных пластов // Геология и геофизика. 1980. № 10. С. 106–112.
19. Эпов М. И., Каюров К. Н., Ельцов И. Н., Сухорукова К. В. и др. Новый аппаратурный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro // Бурение и нефть. 2010. № 2. С. 16–19.
20. Эпов М. И., Никитенко М. Н., Сухорукова К. В., Глинских В. Н. Исследование возможностей электрического и электромагнитного каротажа в электрически макроанизотропных пластах, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. 2 (260). С. 64–79.
21. Эпов М. И., Никитенко М. Н. Глинских В. Н., Сухорукова К. В. Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2014. Вып. 11 (245). С. 29–42.
22. Moran J. H., Gianzero S. Effect of Formation Anisotropy on Resistivity – Logging Measurements // Geophysics. V. 44. № 7. 1979. P. 1266–1268.

Рукопись рассмотрена на научно-техническом совете
ООО “Нефтегазгеофизика” и рекомендована к публикации

УДК 550.832.7

В. А. Пантиюхин, В. Г. Диченко, Р. А. Нигматзянов
ООО “Нефтегазгеофизика”

МНОГОЗОНДОВЫЙ ПРИБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЭК-ВР

Представлены результаты разработки прибора многозондового бокового каротажа. Приведены технические характеристики прибора и области его применения. Описано программно-методическое обеспечение регистрации и обработки данных. Показаны примеры выполненных исследований бурящихся скважин.

Ключевые слова: каротаж, электрометрия, многозондовый прибор, интерпретация, обратная задача.

Точность определения удельного электрического сопротивления (УЭС) пластов всегда была определяющим фактором при выделении коллекторов, оценке характера насыщения и определении коэффициента нефтегазонасыщенности.

Традиционные методы однозондовых (БК-3) и двухзондовых модификаций (БК-3+БК-5 и БК-7+БК9) бокового каротажа не всегда обеспечивают достаточную информацию для корректного решения этих задач.

Наибольшие ограничения наблюдаются при проведении каротажа в условиях высокоминерализованной промывочной жидкости (ПЖ), когда контрастность (отношение УЭС пород к УЭС ПЖ) достигает значений порядка 10^5 и более. Искажения записей глубинных зондов БК (БК-3 или БК-7), известные как Гронинген- и Делавар-эффекты, усугубляют проблему, а зачастую делают невозможной правильную интерпретацию данных двойного бокового каротажа.

Для повышения эффективности метода бокового каротажа ведущими каротажными компаниями разработаны многозондовые приборы БК [1, 4–6].

Учитывая наметившийся спрос на российском сервисном рынке к таким приборам, ООО “Нефтегазгеофизика” в 2013 г. приступило к разработке своей модификации скважинного прибора многозондового бокового каротажа. На основе результатов моделирования и опыта предыдущих разработок приборов двойного бокового каротажа за основу реализации многозондового прибора БК была выбрана компоновка,