

Секция №4, устный

УДК 550.832

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КАРОТАЖНЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сухорукова К.В., Нечаев О.В., М.Н. Глущенко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

Представлены результаты численного моделирования сигналов бокового каротажного и высокочастотного электромагнитного зондирования в моделях макроанизотропных терригенных пород. Показаны приращения сигналов БКЗ в анизотропной среде и примеры оценки вертикального удельного электрического сопротивления анизотропного пласта в процессе численной инверсии. Сигналы рассчитаны для типичных значений диаметров скважины, корпуса прибора и УЭС бурового раствора. Приведены основные зависимости сигналов ВЭМКЗ при наклонном пересечении анизотропной однородной среды и границы изотропного и анизотропного пластов.

Ключевые слова: боковое каротажное зондирование, высокочастотное электромагнитное каротажное зондирование, песчано-глинистый коллектор, удельное электрическое сопротивление, макроанизотропия, численная интерпретация

С увеличением глубины в терригенных коллекторах появляются контрастные по значению удельного электрического сопротивления (УЭС) карбонатные и глинистые пропластки. Тонкое переслаивание песчаных и карбонатных или глинистых прослоев является причиной сильной макроанизотропии УЭС. Для отложений Западной Сибири значение УЭС одинаково в горизонтальной плоскости и меньше, чем в вертикальном направлении. В зависимости от угла наклона скважины электрическая анизотропия в разной степени проявляется в сигналах разных методов электрометрии. В связи с усложнением с глубиной геологического строения отложений, а также с применением наклонного бурения и буровых растворов высокой электропроводности, расширился диапазон возможных значений УЭС геоэлектрических моделей, и поэтому необходимо исследование сигналов электрометрии в новых условиях с помощью численного моделирования.

Впервые в истории каротажа электрическая анизотропия осадочных отложений была выявлена К. Шлюмберже в 1920 г., теоретические исследования сигналов постоянного тока в анизотропной среде были обобщены в [1], зависимость сигналов от угла между каротажным зондом и слоистости анизотропной пачки – в [2]. Как известно [1], при вертикальном пересечении анизотропной среды увеличиваются показания коротких зондов БКЗ при наличии скважины (в однородной среде сигналы не зависят от вертикального сопротивления). Рассмотрим сигналы зондов БКЗ в анизотропной среде в зависимости от типичных значений УЭС раствора и диаметров скважины и корпуса прибора.

На рис. 1 представлены зависимости сигналов зондов модуля БКЗ аппаратуры СКЛ [3] от УЭС изотропного пласта и приращения сигналов в анизотропном пласте с вертикальным сопротивлением ρ_v , вдвое большем горизонтального ρ_h . Можно заметить, что уменьшение УЭС раствора на порядок при одинаковых радиусах скважины и прибора приводит к такому же снижению сигналов коротких зондов в довольно широком диапазоне УЭС пласта ($> \approx 100$ Ом·м); сигналы длинных зондов снижаются таким же образом на больших значениях УЭС ($> \approx 500$ Ом·м). Увеличение радиуса корпуса, напротив, приводит к повышению сигналов, поскольку влияние частично вытесненного прибором проводящего раствора становится меньше – сигналы тонкого прибора в широкой скважине с пресным раствором (сплошные линии) и прибора среднего диаметра в узкой скважине с более соленым раствором (короткий пунктир) близки между собой. В анизотропном пласте сигналы увеличиваются по-разному (справа). Снижение УЭС раствора, увеличение радиуса скважины и уменьшение длины зонда приводит к смещению максимума приращения в сторону меньших значений ρ_h . Практически значимые приращения (не менее 10 %) фиксируются на всех зондах, максимум приращения сдвигается с увеличением длины зонда в сторону больших значений ρ_h , уменьшаясь с 13–17% для коротких зондов до 9–11% – для длинных. В среднем, для рассматриваемых параметров модели величина приращения достаточна для заключения о наличии анизотропии УЭС и оценки значения ρ_v с погрешностью, в 5–6 раз превышающей погрешность измерения [4]. Усиление анизотропии приводит к увеличению максимумов приращений.

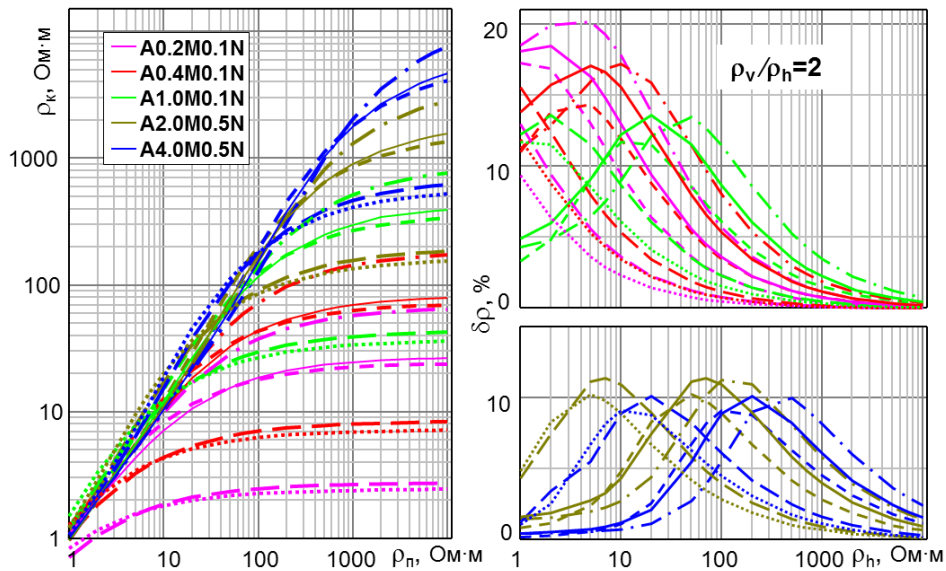


Рис. 1. Сигналы БЗ (слева) и их приращения в анизотропном пласте. Радиус скважины, радиус прибора, УЭС раствора: 0.108 м, 0.0365 м, 2 Ом·м (сплошные линии); 0.108 м, 0.0365 м, 0.2 Ом·м (длинный пунктир); 0.108 м, 0.08 м, 2 Ом·м (пунктир с точкой); 0.062 м, 0.051 м, 0.2 Ом·м (короткий пунктир); 0.062 м, 0.051 м, 0.02 Ом·м (точки).

На рис. 2 показан пример численной интерпретации данных электрметрии аппаратуры СКЛ в вертикальной скважине с глинистым раствором. Радиус скважины 0.108 м, прибора 0.0365 м, УЭС раствора 1.8 Ом·м. В непроницаемом глинистом пласте (на диаграммах выделен голубым прямоугольником) инверсия кривых зондирования БЗ и электромагнитного каротажа (ВЭМКЗ) приводит к модели изотропного пласта без проникновения (кривые ВЭМКЗ и БЗ – верхний и средний графики в правой части рисунка) или с зоной проникновения с повышенным УЭС (верхний и нижний графики). Поскольку сигналы ВЭМКЗ в вертикальной скважине не зависят от вертикальной составляющей УЭС, полученное значение 8.2 Ом·м – это горизонтальное УЭС пласта.

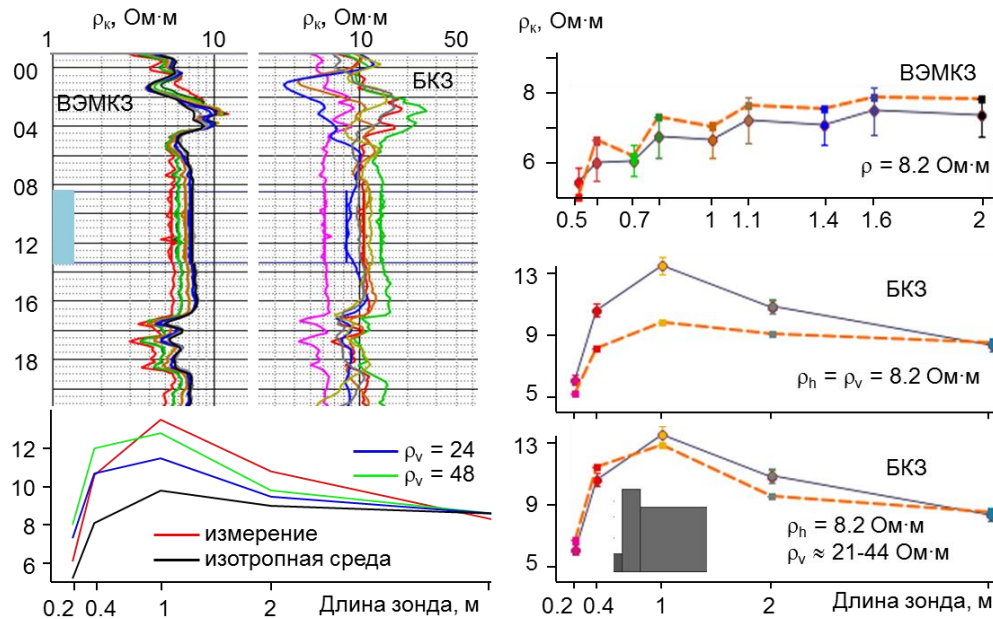


Рис. 2. Сигналы ВЭМКЗ и БЗ (слева сверху) в анизотропном пласте и результат интерпретации. Слева снизу – анизотропная модель, справа – изотропная модель.

Сигналы БЗ лучше подбираются в рамках изотропной модели с проникновением, однако для пород этого интервала не характерно проникновение фильтрата бурового раствора. Поэтому наиболее правдоподобно предположить влияние на сигналы БЗ анизотропии УЭС. УЭС подбираемой зоны при уменьшении её толщины должно в соответствии с теорией [1] стремиться к

среднему геометрическому значений ρ_h и ρ_v . Поскольку в пределах погрешности измерения сигнала подбирается некоторый диапазон значений толщины и УЭС зоны, то значение ρ_v оценивается также в диапазоне – от 21 до 44 Ом·м. С другой стороны, можно провести подбор кривой зондирования с помощью программы расчета сигналов в анизотропной модели. Результат подбора представлен на рис. 2 внизу слева. Дальнейшее увеличение ρ_v позволяет лучше подобрать сигналы длинных зондов, но при этом ухудшается качество подбора сигналов коротких зондов. Тем не менее, оценка $\rho_v = 48$ Ом·м близка к верхней границе диапазона, полученного при инверсии на базе изотропной модели.

По данным расчетов, приведенным в [1, 5], сигналы методов постоянного тока (БКЗ и БК) при наклоне скважины стремятся к среднему геометрическому значений ρ_h и ρ_v , которое достигается в горизонтальной скважине.

Другим зондирующим методом, реализованным в аппаратуре СКЛ, является высокочастотное электромагнитное каротажное зондирование (ВЭМКЗ; длины 0.5–2 м, частоты 0.875–14 МГц). Такое сочетание параметров обеспечивает высокую разрешающую способность, а измерение разности фаз – высокую достоверность данных. Практически одновременное измерение сигналов ВЭМКЗ и БКЗ позволяет находить согласованную геоэлектрическую модель коллектора, но при этом часто приводит к усложнению этой модели – разные физические постановки требуют расширения комплекса электрофизических и геометрических параметров. В том числе, учёта анизотропии УЭС.

Ранее были показаны возможности определения по данным ВЭМКЗ коэффициента анизотропии в наклонных скважинах [6]. Основные ограничения метода – информацию об анизотропии можно извлечь, если или известно значение горизонтального УЭС из вертикальных скважин, или зенитный угол при измерении в анизотропной пачке меняется на достаточную величину, и при этом не в диапазоне от 85 до 90°, в котором сигнал почти не меняется. Границы пласта должны быть на достаточном удалении, а сам пласт однороден по латерали. В остальных случаях необходимо выбирать базовую геоэлектрическую модель, близкую по сложности к реальной постановке, и основываться на данных сложного численного моделирования. С другой стороны, в отличие от сигналов БКЗ, сигналы длинных зондов ВЭМКЗ практически не зависят от УЭС раствора и прискважинной зоны, что позволяет при численной интерпретации в большинстве случаев выбирать в качестве базовой модели модель наклонного зонда в горизонтально-слоистой среде.

Рассмотрим основные зависимости сигналов ВЭМКЗ от параметров анизотропных моделей. В однородном анизотропном пространстве ($\rho_h = 10$ Ом·м, $\rho_v = 40$ Ом·м; рис. 3, слева) измеряемая характеристика поля – разность фаз – при небольших зенитных углах наклона зонда (до 5°) равна значению в изотропной среде с УЭС, равным ρ_h , при увеличении угла начинает быстро снижаться и в интервале 85–90° становится равной 5.5°, что соответствует 27.4 Ом·м. Заметим, что среднее геометрическое в такой среде много меньше – 20 Ом·м.

Возьмём модель, состоящую из 2 слоёв, верхний из которых изотропен, горизонтальное УЭС нижнего равно УЭС верхнего слоя, а вертикальное УЭС вдвое больше горизонтального (рис. 3). По вертикальной оси отложены значения вертикальной координаты точки измерения. При больших углах наклона зонда очевиден одинаковый характер изменения сигналов. Однако при одном и том же коэффициенте анизотропии в высокоомной модели (средний график) граница между слоями начинает влиять на большем расстоянии (примерно на расстоянии длины зонда), чем в проводящей модели (менее чем за половину длины, левый график). В проводящей модели значение, на которое выходит кажущееся сопротивление, равно 6.4 Ом·м (при среднем геометрическом 5.7 Ом·м), в высокоомной модели – 282 Ом·м (при среднем геометрическом 280 Ом·м). По результатам расчетов установлено, что сигнал зонда ВЭМКЗ соответствует среднему геометрическому значений ρ_h и ρ_v при значении ρ_h более 100 Ом·м. Увеличение зенитного угла до 87° (правый график) к существенному изменению зависимости не приводит.

Введение анизотропных параметров целесообразно при явном завышении кажущихся сопротивлений в наклонном стволе относительно значений в соседних вертикальных скважинах. Например, на рис. 4 показаны диаграммы, измеренные на мощном интервале тонкослоистого битумизированного песчаника в близко расположенных вертикальной (слева, глинистый раствор) и наклонной (справа, угол 82°, раствор на нефтяной основе) скважинах. УЭС в выделенных цветными прямоугольниками частях коллектора по данным электрометрии в вертикальной скважине 150 и 130 Ом·м, а в наклонной – 370 и 250 Ом·м. Считая, что ρ_h равно значениям в вертикальной скважине, определяем для наклонной скважины значения ρ_v : 750 и 400 Ом·м.

Итак, с помощью численного моделирования показано, что анизотропия УЭС является важным параметром геоэлектрической модели, который следует учитывать при численной инверсии

практических данных БКЗ. Неучет макроанизотропии осадочных отложений может привести к появлению в геоэлектрической модели ложной тонкой повышающей зоны проникновения.

В практически важном диапазоне УЭС (до 100 Ом·м) кажущееся сопротивление, рассчитанное по сигналу зонда ВЭМКЗ, в сильно наклонной и горизонтальной скважине больше, чем среднее геометрическое горизонтального и вертикального УЭС. Параметры анизотропии оцениваются по сигналам длинных зондов, практически не зависящим от скважины и прискважинной зоны.

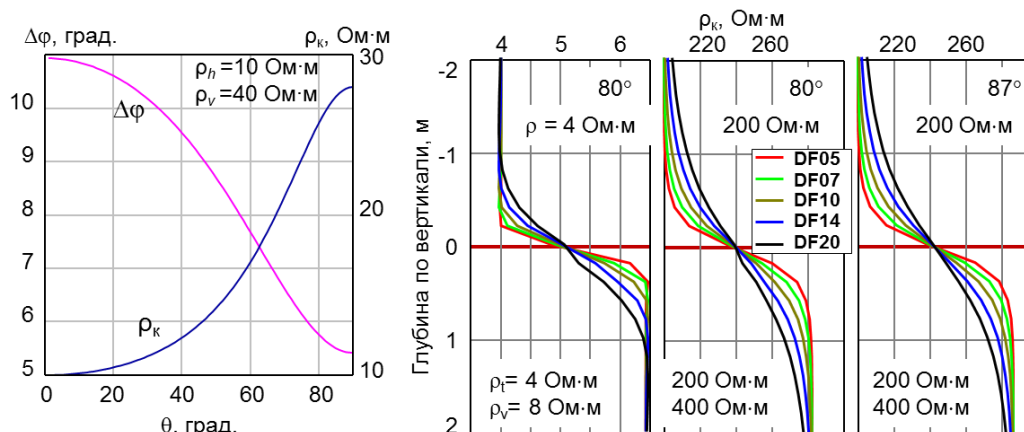


Рис. 3. Зависимость сигналов ВЭМКЗ от зенитного угла наклона зонда θ в однородной анизотропной среде (слева) и при пересечении границы с анизотропным полупространством.

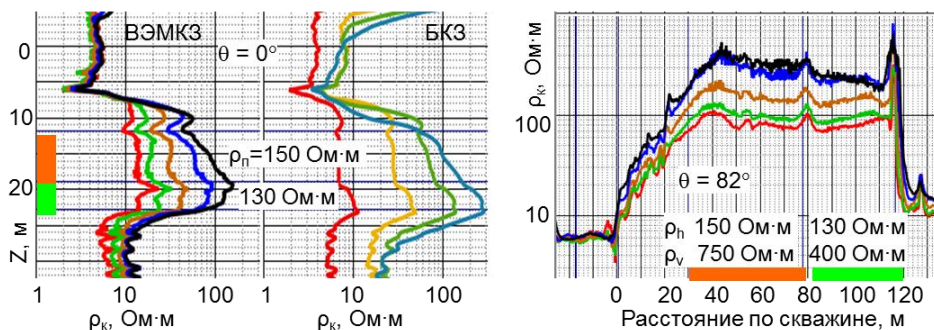


Рис. 4. Сигналы ВЭМКЗ в анизотропном коллекторе при вертикальном и наклонном пересечении.

1. Kunz K. S., Moran J. H. Some effects of formation anisotropy on resistivity measurements in boreholes. 1958.
2. Developments in geophysical exploration methods-3 / Edited by A. A. Fitch. - Applied Science Publishers, London and New York, 1982. - 316 p.
3. Эпов М.И., Каюров К.Н., Ельцов И.Н., Петров А.Н., Сухорукова К.В., Соболев А.Ю., Власов А.А. Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro // Бурение и нефть, № 2, 2010, с. 16–19.
4. Сухорукова К.В., Нечаев О.В. Сигналы бокового каротажного зондирования в анизотропных отложениях по результатам численного моделирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": Сб. материалов в 3 т. - Новосибирск: СГГА, 2013. - Т. 2. - С. 102-107.
5. Wang H., Shen L. C. Dual Laterolog Responses in Anisotropic Crossbedding Formation // Petrophysics. - V. 42. No. 6. 2001. - P 624-632.
6. Эпов М.И., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Горбатенко А.А., Арзхантсев В.С. Electromagnetic sounding in deviated and horizontal wells: mathematical modeling and real data interpretation // SPE Russian Oil & Gas Exploration & Production Technical Conference & Exhibition, Moscow, Russia 16–18th October 2012. OnePetro (<http://www.onepetro.org>). – SPE Conference Paper 162034-MS. 18 pp.