

СИГНАЛЫ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Карина Владимировна Сухорукова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-49-52, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Виталий Сергеевич Аржанцев

Halliburton Worldwide Limited (Ирак), инженер по повышению нефтеотдачи, e-mail: Vitaly.Arzhantsev@halliburton.com

Ирина Владимировна Суродина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Представлены результаты численного моделирования сигналов бокового каротажного зондирования в наклонной скважине. Рассматривается геоэлектрическая модель, состоящая из горизонтальных пластов разной мощности, в том числе осложненных зонами проникновения. Расчет сигналов проводится с применением алгоритма, реализующего метод конечных разностей.

Ключевые слова: боковое каротажное зондирование, БКЗ, кажущееся удельное электрическое сопротивление, численное моделирование, наклонная скважина

LATERAL LOGGING SOUNDING SIGNALS CALCULATED IN INCLINED WELLS

Carina V. Sukhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyg Prospect, Ph. D., Senior Staff Scientist, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Vitaliy S. Arzhantsev

Halliburton Worldwide Limited (Basra, IRAQ), Stimulation Engineer (Frac/Acid/Coil Tubing), e-mail: Vitaly.Arzhantsev@halliburton.com

Irina V. Surodina

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Lavrentjeva Prospect, Ph. D., Senior Staff Scientist, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

We present the lateral logging sounding signals calculated for inclined wells. The model of horizontal layers is used. The layers have various thicknesses and invaded zones. The finite difference technique is used for signals simulating.

Key words: lateral logging sounding, RLL, apparent electrical resistivity, numerical simulation, inclined well.

Традиционно при численной интерпретации данных бокового каротажного зондирования (БКЗ) базовой принимается цилиндрически слоистая модель с одной зоной проникновения, при этом учет влияния вмещающих пласт пород представляет довольно сложную задачу. В вертикальных скважинах задача интерпретации решается в последнее время с помощью численного моделирования сигналов в двумерной геоэлектрической модели, в том числе и с учетом электрической анизотропии отложений [1, 2]. Для наклонных скважин разработка алгоритмов расчета сигналов БКЗ потребовалась в связи с началом эксплуатации новой скважинной аппаратуры СКЛ [3], которая включает модуль БКЗ на жестком корпусе и используется для измерений в наклонных и горизонтальных стволах нефтегазовых скважин. Первые расчеты сигналов градиент-зондов в наклонной скважине проведены с помощью алгоритма численного моделирования методом конечных разностей [4], ранее проведено исследование влияния диаметра корпуса прибора [5].

Наклон скважины, особенно в разрезах с небольшой мощностью пластов, контрастных по значению удельного электрического сопротивления (УЭС), существенно влияет на форму сигналов зондов БКЗ [6]. Изменяется геометрия областей околоскважинного пространства, влияющих на сигналы. Появляется тонкая понижающая зона проникновения в условиях использования при бурении биополимерных растворов высокой минерализации. Поэтому необходим подробный анализ влияния наклона скважины на сигналы комплекса БКЗ в широком диапазоне параметров геоэлектрической модели. Полученные синтетические сигналы будут также полезны при визуальной интерпретации практических данных.

Результаты численного моделирования. Для анализа влияния зенитного угла наклона скважины сравним сигналы градиент-зондов, рассчитанные в вертикальной и наклонной скважинах (зенитный угол равен 0° и 85°), пересекающих нефтенасыщенный коллектор переменной мощности, расположенный в глинистых вмещающих пластах.

Геоэлектрическая модель. Мощность коллектора менялась от 1 до 8 м, его УЭС 10 Ом·м, УЭС вмещающих пород – 4 Ом·м. В случае минерализованного бурового раствора ($\rho_{\text{скв}} = 0.05\text{--}0.1$ Ом·м) формируется понижающая зона проникновения, в случае глинистого раствора ($\rho_{\text{скв}} = 2$ Ом·м) наблюдается проникновение повышающее и более глубокое проникновение. Поэтому для расчетов были взяты средние параметры зоны проникновения: если раствор проводящий, УЭС зоны проникновения $\rho_{\text{зп}} = 0.5$ Ом·м, толщина $h_{\text{зп}} = 0.15$ м, если раствор глинистый, $\rho_{\text{зп}} = 20$ Ом·м, $h_{\text{зп}} = 0.4$ м. Рассчитаны сигналы для моделей, состоящих из 2, 3 и 9 пластов с проникновением и без него, для зенитных углов наклона скважины $0, 45, 60, 80$ и 85° . Диаметр скважины равен 0.062 м при минерализованном буровом растворе и 0.216 м – при глинистом.

Приведем пример синтетических данных для одной из трехслойных моделей. Для удобства сравнения на рисунках сигналы в наклонной скважине спроектированы на вертикальную ось.

Сравним сигналы БКЗ в модели с вертикальной скважиной при $\rho_{\text{СКВ}}=0.05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (рис. 1). Для наглядности на рисунке черной линией нанесены значения УЭС неизменной проникновением части пласта. На диаграммах кажущихся сопротивлений зондов (кроме А0.2М0.1N) в области кровли и подошвы коллектора метровой мощности наблюдаются небольшие максимумы над кровлей и под подошвой. На интервале коллектора значения для всех зондов много меньше его сопротивления. Даже длинные зонды (А2.0М0.5N, А4.0М0.5N, в том числе и обращенный N2.0М0.5A) показывают значения не выше 4.5 Ом·м при УЭС неизменной части пласта, равном 10 Ом·м. Такой эффект на сигнал оказывают проводящие раствор и зона проникновения.

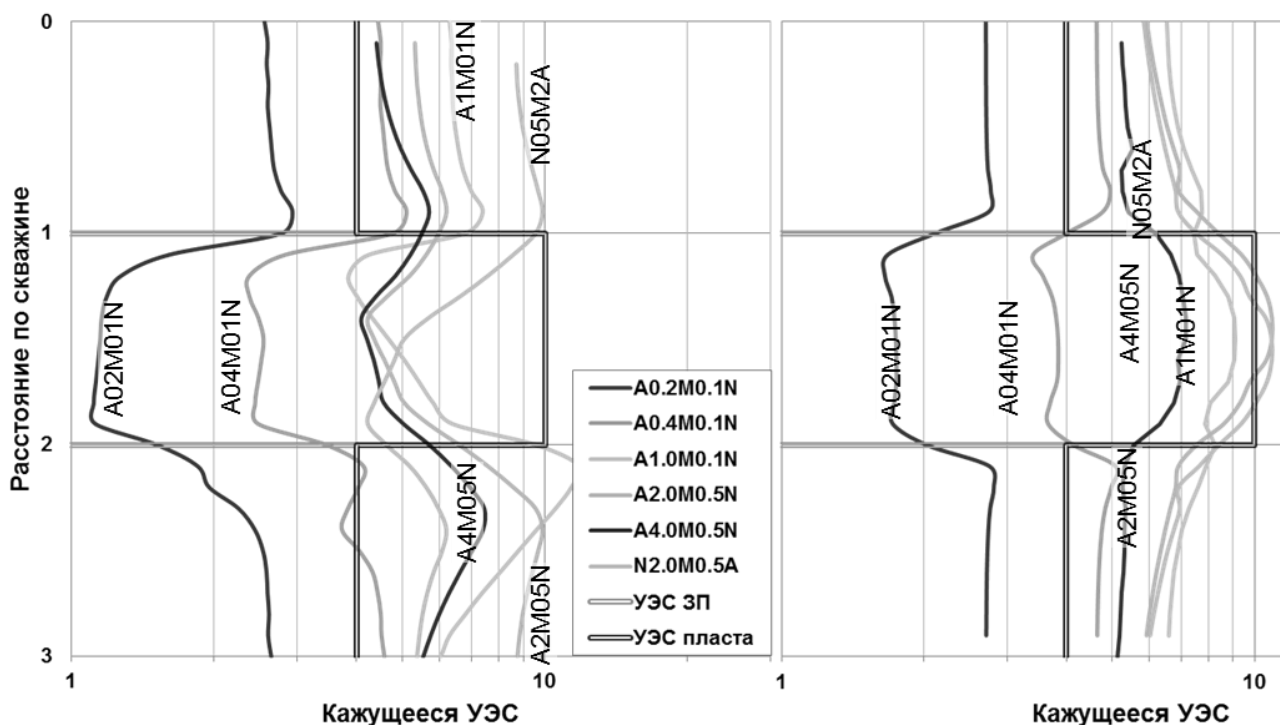


Рис. 1. Диаграммы синтетических сигналов БКЗ в вертикальной (слева) и наклонной (справа) скважинах при низком УЭС раствора и понижающей зоне проникновения на интервале коллектора ($\rho_{\text{ЗП}}=0.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_{\text{ЗП}}=0.15 \text{ м}$)

В наклонной скважине подобный эффект отсутствует ввиду большей длины интервала скважины между границами коллектора (около 11 м). По форме сигналов коротких зондов (А0.2М0.1N и А0.4М0.1N) на интервале пласта определяется наличие узкой понижающей зоны проникновения. Значения сигналов остальных зондов близки к УЭС неизменной части коллектора за исключением сигнала самого длинного зонда А4.0М0.5N, значения которого занижаются в результате влияния низкоомных вмещающих.

Интересной особенностью сигналов в сильнонаклонных скважинах является отсутствие экстремумов на границах, характерных для диаграмм в вертикальных скважинах, и отсутствие влияния на форму диаграмм несимметрии

зондов, приводящего к затруднениям визуального анализа при небольших зенитных углах.

С помощью алгоритма численного моделирования данных бокового каротажного зондирования на базе 3D-модели, реализующего метод конечных элементов, рассчитаны сигналы в геоэлектрических моделях разной сложности для разных зенитных углов их пересечения скважиной. К основным особенностям сигналов в сильнонаклонных скважинах можно отнести симметризацию диаграмм и сглаживание экстремумов на границах, характерных для их вертикального пересечения. За счет наклона скважины и удлинения интервала нахождения в коллекторе появляется возможность оценки УЭС маломощного коллектора при низком значении УЭС раствора в скважине.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 102–107.

2. Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Глущенко М.Н. Электрические и электромагнитные каротажные зондирования в анизотропных средах по результатам численного моделирования // VI Всероссийская Школа-семинар имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013: материалы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://emf.ru/ems2013/section4/Сухорукова_Нечаев_Глущенко.pdf

3. Эпов М.И., Каюров К.Н., Ельцов И.Н., Сухорукова К.В., Петров А.Н., Соболев А.Ю., Власов А.А. Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro // Бурение и нефть. - 2010. - № 2. - С. 16–19.

4. Labutin, I.B., Surodina, I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in the Conjugate Gradient Method // Reliable Computing. - 2013. - V. 19. - P. 120–126. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/volume-19/reliable-computing-19-pp-120-126.pdf>

5. Сухорукова К.В., Аржанцев В.С., Суродина И.В., Нечаев О.В.. Результаты численного моделирования сигналов бокового каротажного зондирования автономной аппаратуры СКЛ // Каротажник. - 2015. - № 11 (245). - С. 51–58.

6. Eпов M.I., Suhorukova C.V., Nikitenko M.N., Gorbatenko A.A. and Arzhantsev V.S. 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, Paper 162034-MS. - 18 p. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.onepetro.org>

© К. В. Сухорукова, В. С. Аржанцев, И. В. Суродина, 2015