

P06

Real-Time Processing and Interpretation of Electromagnetic Logging Data at Different Stages of Well Construction

M.N. Nikitenko (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS), K.V. Sukhorukova* (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS), V.N. Glinskikh (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS) & V.N. Eremin (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS)

SUMMARY

The paper deals with the interpretation of electromagnetic logging data acquired in the process of drilling oil-and-gas wells and after their gauging. A software system for near real-time data processing and quantitative interpretation is developed to evaluate and forecast electrophysical properties of fluid-saturated reservoirs. The examples of analysis and inversion of high-frequency electromagnetic logging data obtained during drilling a subhorizontal well and after gauging a vertical well are provided. They demonstrate a capability to determine and control distances from boundaries and a relative dip angle of the latter, as well as to estimate resistivity of a layered formation. The up-to-date software considerably increases the efficiency of geophysical logging systems employment.

Оперативная обработка и интерпретация данных электромагнитного каротажа на разных этапах строительства нефтегазовой скважины

М.Н. Никитенко, К.В. Сухорукова, В.Н. Глинских, В.Н. Еремин (ИНГГ СО РАН)*

Введение

Разработка месторождений нефти и газа в сложных геологических условиях на разных этапах строительства скважин требует применения высокотехнологичных геофизических комплексов. Метод высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ) (Технология..., 2000) в настоящее время реализован в аппаратуре, применяемой как в процессе бурения (Еремин и др., 2012), так и в процессе шаблонирования скважин (Эпов и др. 2010). Бурение наклонных и горизонтальных стволов чаще всего проводится после бурения и исследования вертикальных скважин. Проведение ВЭМКЗ одновременно с технологической операцией шаблонирования позволяет совместить две операции и сократить время на подготовку скважины. Каротаж при этом проводится в диапазоне частот 0.875–14 МГц зондами длиной 0.5–2.0 м, аппаратура выполнена в изолирующем корпусе большого диаметра. Решаемые с помощью ВЭМКЗ в процессе шаблонирования задачи заключаются в расчленении разреза и достоверном определении пространственного распределения УЭС, прежде всего радиального. Общая тенденция сокращения временных затрат на операции в открытом стволе скважин приводит к необходимости оперативной численной интерпретации данных каротажа. На базе реалистичных моделей сложнопостроенных геологических сред и разработанных алгоритмов численного моделирования электромагнитных полей в слоисто-однородных изотропных и анизотропных средах разработан комплекс программ обработки и количественной интерпретации данных электромагнитного каротажа в процессе шаблонирования и бурения. Комплекс позволяет в масштабе реального времени определять значения электрофизических характеристик флюидонасыщенных пластов-коллекторов, вскрытых вертикальными, пологими и горизонтальными скважинами, оценивать близость водонефтяного контакта и вмещающих пород, а также их электрофизические характеристики. В качестве базовой модели типичных терригенных разрезов для численной инверсии используется горизонтально-слоистая изотропная или анизотропная модель с учётом наклона прибора относительно границ пластов.

Программно-алгоритмическая база обработки и интерпретации

Численное моделирование включает расчет значений разностей фаз и отношений амплитуд, измеряемых трехкатушечными зондами приборов высокочастотных электромагнитных зондирований, а также производных измеряемых характеристик по модельным параметрам. Для вычисления кажущихся УЭС реализован эффективный алгоритм, основанный на полиномиальной аппроксимации логарифма УЭС однородной среды в зависимости от логарифмов измеряемых электромагнитных сигналов. Нормированные производные служат оценкой функции чувствительности измеряемых сигналов к геоэлектрическим параметрам среды. Вычислительное ядро программного модуля позволяет оперативно рассчитывать полную магнитную матрицу и ее производных в горизонтально-слоистой анизотропной среде. Линейный анализ чувствительности представляет собой оценку погрешности определения модельных параметров для заданной системы измерений. Исследование чувствительности прибора к тому или иному набору параметров среды помогает правильно выбирать инверсионную модель и давать заключение о достоверности результатов инверсии. В основе алгоритма лежит анализ информационной матрицы системы наблюдения (Табаровский и др., 1985). С помощью линейного преобразования (псевдообращения матрицы производных) область неопределенности данных проектируется в пространство модельных параметров. Ключевой составляющей данной процедуры является учет метрологических характеристик для корректного описания ошибок измерений. Инверсия данных представляет собой минимизацию среднеквадратического отклонения модельных данных от экспериментальных путем изменения модельных параметров по

заданному алгоритму. Алгоритм численной инверсии основан на методе деформируемого многогранника (Химмельблау, 1975). Метод позволяет быстро выбрать правильное направление поиска и значительно уменьшить минимизируемую функцию уже на первых итерациях. Метод особенно эффективен, когда число определяемых параметров не превышает шести, а это условие практически всегда соблюдается при инверсии реальных данных в наклонно-горизонтальных скважинах. Алгоритм позволяет использовать произвольные комбинации сигналов из общего набора измерений, в то же время в инверсионной модели параметры можно фиксировать или задавать для них ограничения, что дает возможность учитывать информацию о пройденном участке скважины в предположении, что свойства среды в латеральном направлении меняются медленно (Эпов и др. 2013).

Инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе шаблонирования

Задачей численной инверсии данных ВЭМКЗ, полученных в вертикальной скважине при операции шаблонирования, являлось определение границ пластов и их УЭС. В инверсии участвовали разности фаз двух длинных зондов (длины 2 и 1.4 м, частоты 0.875 и 1.75 МГц), на значения которых незначительно влияют скважина и прискважинная зона. Рассмотрим основные особенности процесса инверсии на примере интервала скважины Фёдоровского месторождения, вскрывшего продуктивный пласт ЮС₂ в интервале 3132.2–3141.9 м (рис. 1). Приведены следующие обозначения диаграмм ВЭМКЗ: DF05 – длина зонда 0,5 м, частота 14 МГц; DF07 – 0,7 м, 7 МГц; DF10 – 1,0 м, 3.5 МГц; DF14 – 1,0 м, 1.75 МГц; DF20 – 2,0 м, 0.875 МГц. Характерное расхождение диаграмм кажущихся УЭС на указанном интервале отражает наличие проникновения фильтраата бурового раствора в пласт-коллектор. На основе представленных на рисунке данных интервал был разделен на 9 пластов, начальные значения УЭС для инверсии (стартовая модель) соответствовали осредненным значениям кажущегося УЭС внутри каждого пласта.

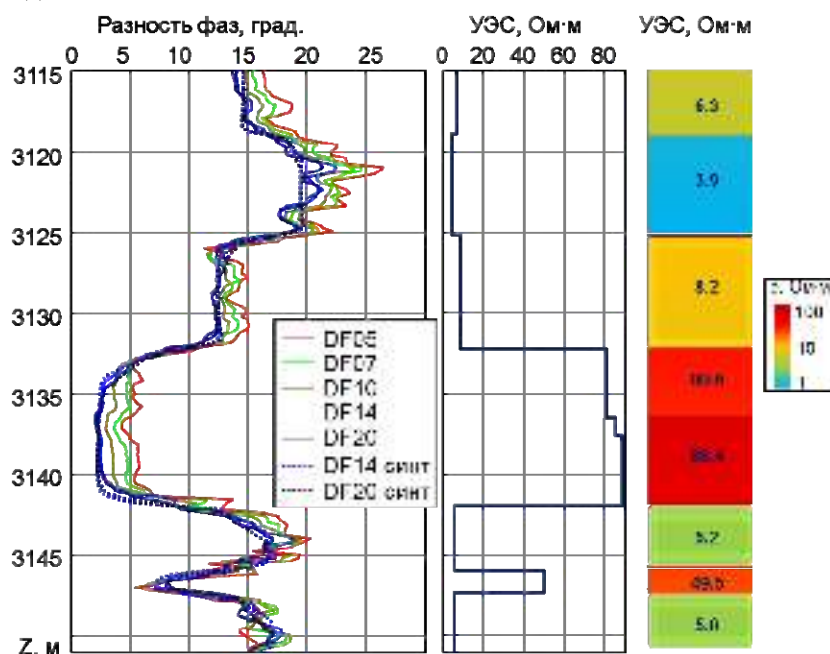


Рисунок 1 Данные ВЭМКЗ, измеренные в процессе шаблонирования и подобранные синтетические в результате инверсии, и восстановленное распределение УЭС среды.

На рисунке показаны экспериментальные и синтетические разности фаз, полученные в результате инверсии, и вертикальное распределение УЭС среды. Коллектор (3132.2–3141.9 м) по определенным значениям УЭС (более 80 Ом·м) является нефтенасыщенным. Высокие значения УЭС в его нижней половине объясняются частичной карбонатизацией порового пространства, поэтому перспективной является верхняя часть (3132.2–3136.5 м). Пласты с УЭС 3.9 Ом·м (3118.9–3125.2 м) и 5.2 Ом·м (3141.9–3145.92 м) являются неоднородными, но не

являются целевым объектом изучения, поэтому не подвержены подробной разбивке и восстановлению значений УЭС. Выделение в модели мелких деталей (пропластков) может существенно осложнить инверсию, увеличивая области неопределенности параметров, в то же время подробное описание не дает дополнительной информации о структуре (составе) пересекаемой скважиной среды.

Инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения

Чтобы оценить возможность геонавигации при бурении горизонтального ствола в продуктивном пласте с помощью комплекса высокочастотного электромагнитного каротажа в процессе бурения (ВИК-ПБ), были смоделированы данные этого прибора (разности фаз) /6/ и зашумлены с помощью нормально распределенной случайной величины с дисперсией 0.2° . Три коротких зонда ВИК-ПБ работают на частоте 3.5 МГц, еще три длинных - на частоте 0.88 МГц. Зонды отличаются расстояниями между генераторной и приемными катушками. Используются следующие обозначения высокочастотных зондов: H - длина 0.70 м, расстояние между приемными катушками 0.18 м; HD - 1.05 и 0.35 м; HE - 1.05 и 0.53 м; низкочастотных зондов: L - 1.40 и 0.35 м; LD - 1.05 и 0.18 м; LE - 1.40 и 0.53 м.

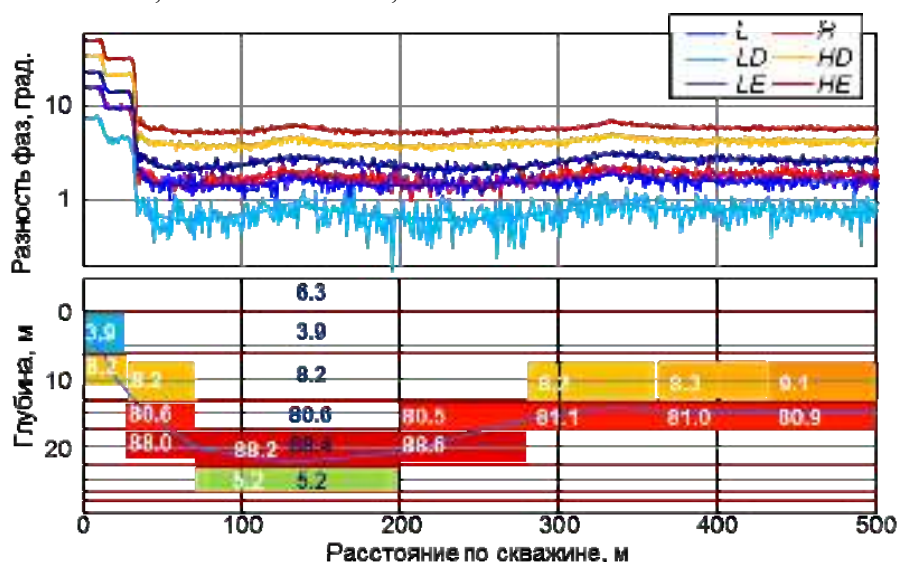


Рисунок 2 Вверху: синтетические данные ВИК-ПБ с наложенной помехой и данные, рассчитанные в модели, полученной в результате инверсии. Внизу: положение границ модели, траектория скважины и восстановленные значения УЭС пластов.

На рис. 2 показаны рассчитанные сигналы (вверху), типичная траектория горизонтальной скважины, границы пластов и их восстановленные УЭС (внизу). Продуктивный пласт по данным, полученным в процессе шаблонирования вертикальной скважины, состоит из двух частей (граница 3136.5 м). Нижняя часть является частично карбонатизированной, поэтому горизонтальный ствол целесообразно проводить в верхней части. Начальная точка траектории горизонтальной скважины привязана к глубине 3118.9 м, с этой точки на рисунке отсчитываются x и z координаты. После пересечения кровли коллектора наклонно-горизонтальная скважина приближается к подошве продуктивного пласта на 0.8 м (глубина нижней точки скважины 22 м), при этом угол меняется от 66° в точке кровли до 90° в нижней точке. Далее скважина поднимается к верхней границе пласта; в верхней точке траектории расстояние до кровли составляет 0.73 м, угол достигает 93.6° . На участке от 334 м до 500 м скважина медленно отдалается от границы до 1.65 м, угол составляет 89.9° .

На изучаемом интервале скважины было выделено 7 интервалов (окон), в которых проведена инверсия данных. В процессе инверсии определялись значения УЭС пластов, пересекаемых скважиной или находящихся в зоне чувствительности прибора, а также положения границ и угол их наклона относительно скважины. Для каждого инверсионного окна показаны

экспериментальные и подобранные синтетические данные, также представлена полученная в результате интерпретации модель: восстановленные значения УЭС и положения границ. Значения УЭС исходной модели показаны синим цветом.

На интервале 2-25 м скважина еще не приблизилась к коллектору, определяются лишь параметры кровли. На интервале 26-70 м определены параметры кровли и двух частей продуктивного пласта. На интервале 71-200 м произошло приближение к подошве пласта, и сигналы ВИК-ПБ показали наличие границы с более проводящим основанием. На интервале 201-280 м инверсия показывает, что скважина поднимается к верхней границе продуктивного пласта. На интервале 281-360 м (и на последующих интервалах 361-430 м и 431-500 м) скважина находится в верхней части продуктивного пласта, поэтому с помощью инверсии контролируется угол и расстояние до кровли. Исследования показали, что погрешность определения УЭС, границы и угла наклона менее 2% и только на последнем интервале из-за удаления от верхней границы и снижения чувствительности к параметрам кровли ошибка в определении УЭС кровли составляет около 11 %. Хорошие результаты обусловлены тем, что были заранее оценены возможные значения УЭС модели, а также обеспечено "наследование" модельных параметров между окнами.

Выводы

Разработан комплекс программ оперативной обработки и количественной интерпретации данных электромагнитного каротажа для оценки и прогнозирования электрофизических характеристик флюидонасыщенных пластов-коллекторов в масштабе реального времени. На примерах анализа измеренных и синтезированных данных показано, что с помощью прибора каротажа во время бурения можно контролировать расстояния до границ, а также оценивать удельные электрические сопротивления слоистой среды при условии наличия априорной информации об определяемых геоэлектрических параметрах, полученной в процессе шаблонирования. Проведенные научные исследования показали, что комплексные подходы к изучению сложнопостроенных геологических сред, вскрытых скважинами на разных этапах строительства, и современная программно-алгоритмическая база оперативной обработки и инверсии каротажных данных позволяют значительно повысить достоверность результатов интерпретации и эффективность применяемых геофизических комплексов.

Библиография

Эпова, М.И., Антонова, Ю.Н. Под ред [2000] *Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство*. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, Изд. СО РАН, 121 с.

Еремин, В.Н., Волканин, Ю.М., Тарасов, А.В. [2012] Аппаратурно-методическое обеспечение электромагнитного каротажа в процессе бурения. *Каротажник*, **226**, 62-69.

Эпов, М.И., Каюров, К.Н., Ельцов, И.Н., Сухорукова, К.В., Петров, А.Н., Соболев, А.Ю., Власов, А.А. [2010] Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro. *Бурение и нефть*, **2**, 16-19.

Табаровский, Л.А., Эпов, М.И., Сосунов, О.Г. [1985] Оценка разрешающей способности электромагнитных методов и подавление помех в системах многократного наблюдения (теория, алгоритмы, программы). *Новосибирск: Препринт ИГиГ СО АН СССР*, № 7, 48 с.

Химмельблау, Д. [1975] *Прикладное нелинейное программирование*. М.:Мир, 536 с.

Эпов, М.И., Никитенко, М.Н., Глинских, В.Н., Сухорукова, К.В., Еремин, В.Н. [2013] Интерпретационная база электромагнитного каротажа в процессе бурения. *Материалы VI Всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013*, <http://ems2013.ipgg.sbras.ru>.