

Tu 02 01

Numerical Inversion of Electrologging Data in Highly Deviated and Horizontal Boreholes

M.N. Nikitenko* (IPGG SB RAS), V.N. Glinskikh (IPGG SB RAS), K.V. Suhorukova (IPGG SB RAS) & M.I. Epov (IPGG SB RAS)

SUMMARY

The paper is devoted to the interpretation of data acquired with the complex of electrologging tools for studying electrophysical properties of geologic sections penetrated by deviated and sub-horizontal boreholes. Currently, target formations are characterized by high vertical heterogeneity, which includes thin bedding of resistivity-contrast interbeds. The application of traditional approaches to evaluate such objects results in unreliable estimates of the reservoir's resistivity and net thickness, and, consequently, the hydrocarbon saturation index. For studying electrophysical properties of rocks exposed by sub-vertical and sub-horizontal wells, we have developed an algorithm for numerical inversion of induction and galvanic soundings data. To enhance the reliability of the interpretation results in highly deviated boreholes, we utilize a horizontally layered interpretation model taking into account thin resistivity-contrast layers, as well as integrate data of induction and galvanic soundings. We have done numerical inversion of the practical data, including joint one, in the intervals of deviated and sub-horizontal wells of Western Siberia. It is shown that an increase or decrease in apparent resistivity owing to the presence of thin clayey or high-resistivity interbeds may significantly understate or overstate oil content.

ЧИСЛЕННАЯ ИНВЕРСИЯ КОМПЛЕКСА ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ В НАКЛОННО-ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

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

Введение

Работа посвящена развитию программно-алгоритмических средств обработки и интерпретации комплекса данных скважинной электрометрии для изучения электрофизических свойств геологических разрезов, вскрытых наклонными и субгоризонтальными скважинами.

В настоящее время при интерпретации данных индукционных и гальванических зондирований широко используют средства численной инверсии, основанные на модели цилиндрически-слоистой среды для пласта с бесконечной мощностью. Однако коллекторы, мощность которых существенно превышает длину зондов, в последнее время встречаются чрезвычайно редко. Вовлекаемые в разработку пласты все больше имеют небольшую мощность, характеризуются высокой вертикальной неоднородностью, в том числе тонкой слоистостью контрастных по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) прослоев. Применение традиционных подходов к интерпретации в интервалах таких коллекторов приводит к недостоверной оценке значения УЭС коллектора и его эффективной толщины, и, в конечном счете, коэффициента нефтегазонасыщения.

Для изучения электрофизических свойств пород-коллекторов, вскрытых наклонно-горизонтальными нефтегазовыми скважинами, широкое применение получили высокочастотное электромагнитное каротажное зондирование (ВЭМКЗ) [1], а также боковое каротажное зондирование (БКЗ), практическое применение которого в субгоризонтальных интервалах стало возможным благодаря использованию новых каротажных комплексов на жестком корпусе [2]. Электрокаротажные зондирования нашли применение при технологических операциях бурения на всех этапах строительства нефтегазовых скважин – от геонавигации до шаблонирования [3, 4]. Повышение эффективности применения этих методов и точности результатов количественной интерпретации данных в наклонно-горизонтальных скважинах должно достигаться путем применения интерпретационной модели горизонтально-слоистой среды, учитывающей как наклон зонда, так и контрастные по УЭС пласты, а также комплексирования данных методов индукционного и гальванического зондирования, имеющих разную физическую природу.

Особенности численной инверсии комплекса данных электрометрии

Разработан алгоритм численной инверсии данных ВЭМКЗ и БКЗ, реализованных в аппаратных комплексах СКЛ [2] для изучения субвертикальных, наклонных и субгоризонтальных скважин. Комплексы СКЛ позволяют проводить измерения за одну спускоподъемную операцию, что исключает необходимость взаимной увязки диаграмм, а также позволяет выполнять численную инверсию в рамках единой интерпретационной геоэлектрической модели. Аппаратура ВЭМКЗ включает трёхкатушечные зонды длиной от 0.5 до 2.0 м с частотами от 14 до 0.875 МГц; БКЗ – трёхэлектродные градиент-зонды длиной от 0.2 м до 4.0 м и потенциал-зонд.

Интерпретации по значениям кажущегося УЭС сигналов используемых зондирующих установок недостаточно для обеспечения необходимого пространственного разрешения при измерении в наклонной или субгоризонтальной скважине, проходящей в тонком пласте, расположенном во вмещающих породах или осложненном тонкими прослоями, контрастными по УЭС. Для достоверной количественной оценки необходимо применять алгоритмы численной инверсии данных скважинной электрометрии в модели среды, соответствующей реальным геологическим условиям наклонно-горизонтальной скважины [5-7].

Базовой интерпретационной моделью для алгоритма инверсии является горизонтально-слоистая модель среды с учётом наклона прибора относительно горизонтальных границ пластов. Алгоритмом предусмотрена численная инверсия данных ВЭМКЗ или БКЗ отдельно, так и совместно по комплексу методов, с учетом данных инклинометрии. С его использованием определяются значения УЭС пластов, положения геоэлектрических границ и угла их наклона. Результатом численной инверсии данных является горизонтально-слоистая геоэлектрическая модель геологического разреза, вскрытого наклонно-горизонтальной скважиной.

Оптимизационный подход к решению обратной задачи состоит в целенаправленном подборе модельных параметров на основе минимизации функционала невязки, характеризующего меру расхождения экспериментальных и синтетических данных, традиционно описываемая среднеквадратическим отклонением. Если отличие экспериментальных и синтетических данных по всем зондам и профилю вдоль скважины не превышает заданной погрешности измерений, то геоэлектрическая модель считается подобранной.

Как известно, результат численной инверсии во многом зависит от выбора стартовой геоэлектрической модели. Ее построение проводится на основе анализа кажущихся УЭС по измеренным сигналам ВЭМКЗ и БКЗ с привлечением априорной информации о геологическом строении разреза. При необходимости стартовая модель уточняется путем включения/исключения в неё контрастных по УЭС пластов.

Комплексирование методов скважинной электротомии является одним из широко используемых приёмов повышения эффективности их применения при изучении коллекторов нефти и газа сложного строения [8-10]. В силу разной чувствительности и разрешающей способности индукционных и гальванических каротажных зондирований обеспечивается возможность повышения достоверности определения УЭС по комплексу методов.

Неоднозначная связь характеристик измеряемых сигналов и геологической среды, а также неточность измеренных данных, приводят к тому, что параметры подобранной модели определяются с погрешностями. Поэтому вместо однозначного решения получается множество моделей, которые являются эквивалентными. Для сокращения области эквивалентности решения обратной задачи используется совместная численная инверсия данных ВЭМКЗ и БКЗ в рамках единой интерпретационной геоэлектрической модели [11-12].

Пример совместной численной инверсии в наклонно-горизонтальной скважине

Проведена численная инверсия экспериментальных данных ВЭМКЗ и БКЗ, в том числе совместная, в интервалах наклонных и субгоризонтальных скважин Западной Сибири. Среди изучаемых объектов для условий Широкого Приобья рассмотрены терригенные песчано-глинистые коллекторы АС, БС, ЮС. Типичной геоэлектрической моделью таких коллекторов является пласт нефтенасыщенного песчаника, перекрытый глинистой крышкой и подстилаемый водонасыщенным пластом или глинистыми отложениями, вскрытый скважиной со сложной траекторией.

По экспериментальным данным зондов ВЭМКЗ DF14, DF16 и DF20 (разность фаз и отношение амплитуд трёх зондов – длина 1.4 м, частота 1.75 МГц; 1.6 и 2.0 м, частота 0.875 МГц) и БКЗ А1.0М0.1N, А2.0М0.5N и N0.5М2.0А (кажущееся УЭС трёх зондов – 1.0, 2.0 м и обращенный) в интервале пластов БС₁₈₋₂₀, вскрытых наклонно-горизонтальной скважиной на биополимерном растворе, на одном из месторождений Сургутского свода выполнена совместная численная инверсия с использованием разработанного алгоритма (рис. 1). В результате численной инверсии данных определены геоэлектрические параметры разреза скважины, в том числе УЭС пластов и положения их горизонтальных границ.

На изучаемом интервале 30–140 м вскрыты нижнемеловые песчаные пласты-коллекторы БС₁₈₋₂₀ с редкими прослоями карбонатизированных песчаников, глин и алевролитов. Указанный наклонно-горизонтальный интервал пробурен на биополимерном буровом растворе с УЭС 0.05 Ом·м. Кровля проницаемого пласта вскрыта на глубине 41 м. В целом, коллектор имеет однородное строение. Верхняя часть коллектора (интервал 41–51 м по скважине) имеет УЭС выше 10 Ом·м, что соответствует смешанному насыщению нефтью и водой. От нижней части коллектора она отделяется пластом глин (51–68 м, УЭС около 7 Ом·м). Относительно высокие значения УЭС позволяют предполагать продуктивность нижнего коллектора (интервал 68–106 м). Незначительное повышение количества глинистого материала наблюдается в интервалах 88–92 и 108–132 м. Значения УЭС менее глинистых песчаников изменяется, в основном, от 7.4 до 28 Ом·м.

Для представленного наклонно-горизонтального интервала выполнена совместная численная инверсия данных разности фаз и отношения амплитуд зондов ВЭМКЗ и кажущегося УЭС зондов БКЗ (рис. 1). На рисунке вверху показаны измеренные экспериментальные данные и рассчитанные для полученной модели синтетические диаграммы разности фаз зондов DF14, DF16 и DF20, в середине приведены диаграммы отношения амплитуд, внизу – кажущегося УЭС зондов А1.0М0.1N, А2.0М0.5N и обращенного. Здесь же в середине даны результаты подбора параметров геоэлектрической модели по сигналам указанных зондов – подобранное распределение УЭС пластов вдоль скважины.

Анализ результатов численной инверсии показал следующее. Толщина верхней части коллектора с повышенным содержанием нефти составляет примерно 6 м. При этом на большей половине этого интервала УЭС равно 14 Ом·м, что соответствует высокому нефтесодержанию. Нижняя часть коллектора также является нефтенасыщенной. Она разделена на 2 части глинистой перемычкой, УЭС в верхней части составляет 22.6 Ом·м, нижней – около 35.0 Ом·м. Таким образом, в результате совместной численной инверсии экспериментальных данных ВЭМКЗ и БКЗ в наклонно-горизонтальной скважине одного из месторождений Сургутского свода установлена геоэлектрическая модель коллектора БС₁₈₋₂₀.

Другие практические примеры показывают, что зачастую наблюдаемое на диаграммах увеличение кажущихся УЭС в интервале коллектора, которое ошибочно связывают с увеличением нефтесодержания, обычно обусловлено наличием тонких высокоомных прослоев.

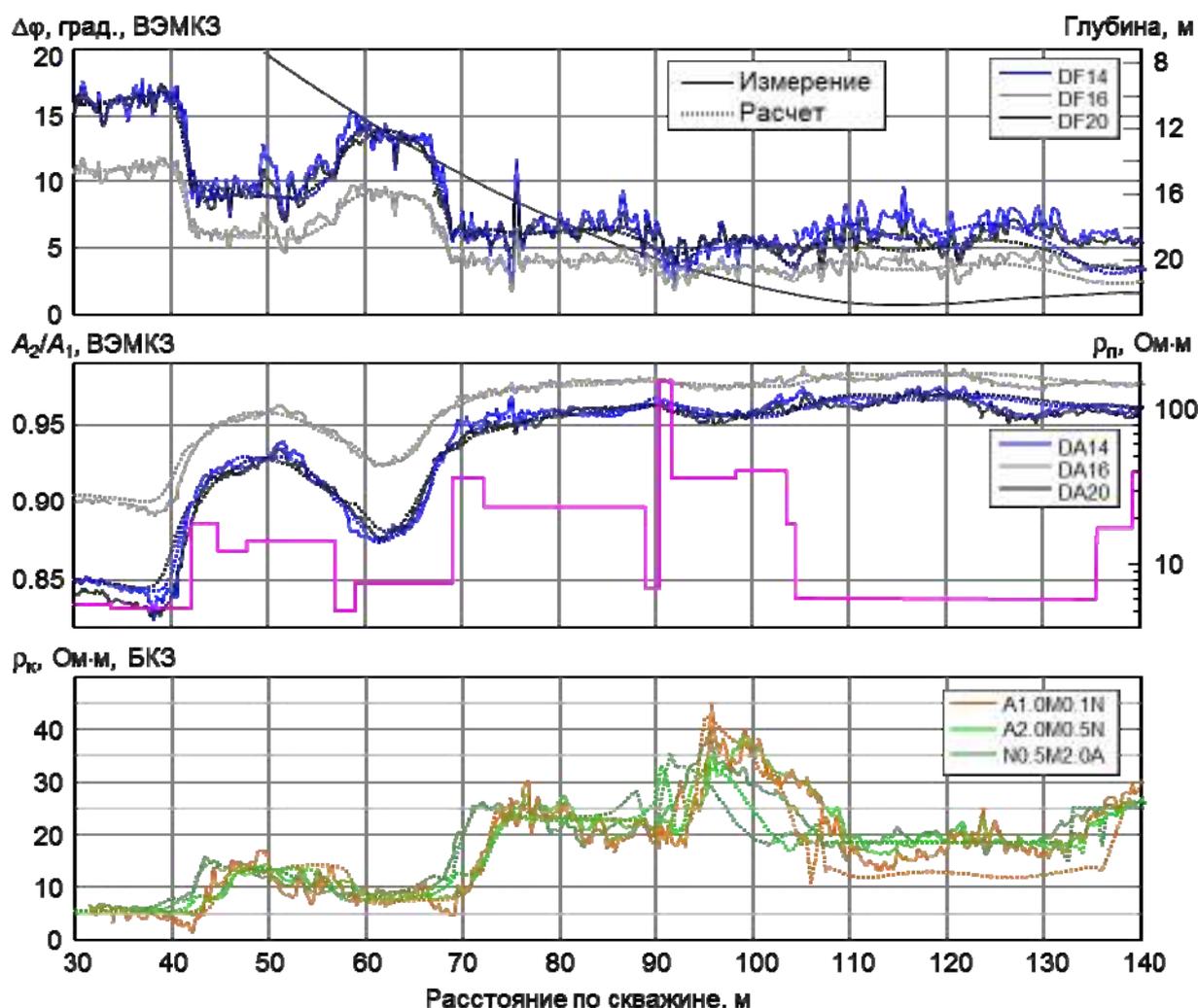


Рисунок 1 Экспериментальные и синтетические диаграммы разности фаз (вверху), отношения амплитуд (в середине) зондов ВЭМКЗ DF14, DF16 и DF20 и кажущейся УЭС зондов БКЗ A1.0M0.1N, A2.0M0.5N и N0.5M2.0A (внизу). Вверху показана глубина скважины, посередине – подобранная модель распределения УЭС пластов в зависимости от расстояния по скважине.

Выводы

Для изучения электрофизических свойств горных пород, вскрытых субвертикальными, наклонными и субгоризонтальными скважинами разработан алгоритм численной инверсии данных индукционных и гальванических зондирований. Базовой интерпретационной моделью для алгоритма инверсии является горизонтально-слоистая модель среды, учитывающая наклон прибора относительно горизонтальных границ пластов. С его использованием выполняется определение значений УЭС пластов, положения геоэлектрических границ и угла их наклона. На примере коллекторов АС, БС,

ЮС, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами, на месторождениях Сургутского свода выполнена совместная численная инверсия экспериментальных данных ВЭМКЗ (DF14, DF16 и DF20) и БКЗ (A1.0M0.1N, A2.0M0.5N и обращенного) с использованием разработанного алгоритма. Показано, что уменьшение или увеличение кажущихся УЭС в интервале коллектора, обусловленное наличием тонких глинистого или высокоомного прослоев, может значительно занижать или завышать нефтесодержание. Повышение достоверности результатов интерпретации данных скважинной электротометрии в наклонно-горизонтальных скважинах основывается на применении интерпретационной модели горизонтально-слоистой среды, учитывающей тонкие контрастные по УЭС пласты, а также комплексировании данных методов ВЭМКЗ и БКЗ.

Благодарности

Авторы благодарят компанию НПП ГА «Луч» (г. Ноосибирск) за предоставленные экспериментальные данные программно-аппаратурных комплексов СКЛ для апробации разработанных программно-алгоритмических средств.

Литература

1. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ: методическое руководство / под ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова / сост.: И.Н. Ельцов и др. – Новосибирск: НИЦ ОИГТМ СО РАН. – 2000. – 121 с.
2. 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.
3. Каюров К.Н., Еремин В.Н., Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н. Аппаратура и интерпретационная база электромагнитного каротажа в процессе бурения // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 12. – С. 112-115.
4. Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Еремин В.Н. Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовой скважины // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 8. – С. 1520-1529.
5. Nikitenko M.N., Epov M.I., Glinskikh V.N., Suhorukova K.V. and Eremin V.N. Development of LWD High-frequency Resistivity Tool [Электронный ресурс] // 6th Saint Petersburg International Conference & Exhibition «Geosciences – Investing in the Future», 2014. – ThD05.
6. Никитенко М.Н., Сухорукова К.В., Глинских В.Н., Еремин В.Н. Оперативная обработка и интерпретация данных электромагнитного каротажа на разных этапах строительства нефтегазовой скважины [Электронный ресурс] // 4-ая международная научно-практическая конференция «Тюмень-2015»: Глубокие горизонты науки и недр, 2015. – P06.
7. 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 // Каротажник. – 2016. – Вып. 2 (260). – С. 64-79.
8. Mezzatesta A.G., Payton C.C., Strack K.M., Tabarovsky L.A. Simultaneous Inversion of Galvanic and Induction Logging Measurements to Improve Resolution // SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference, 1994. – Paper SPE 26976.
9. Shanjun L., Richard C.L., Navarro D., Changxi L., Cancan Z. Joint Inversion Of SP and Dual Laterlog/Dual Induction Data in 2D Formation // SPWLA 48th Annual Logging Symposium, 2007. – Paper ZZ.
10. Yang W. Determining Resistivity Anisotropy by Joint Lateral and Induction Logs // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium, 2001. – Paper CC.
11. Nikitenko M.N., Surodina I.V., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Suhorukova C.V. Formation Evaluation via 2D Processing of Induction and Galvanic Logging Data Using High-performance Computing [Электронный ресурс] // 77th EAGE Conference and Exhibition, 2015. – P. Tu N107 15.
12. Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V. Joint 2D Inversion of Induction and Galvanic Borehole Sounding Data When Logging Hydrocarbon Reservoirs [Электронный ресурс] // 7th Saint Petersburg International Conference & Exhibition, 2016. – We P 05.