

СОВРЕМЕННАЯ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА *

К. В. Сухорукова, А. М. Петров, М. Н. Никитенко, О. В. Нечаев, И. В. Суродина

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
(ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск*

Аннотация. Для повышения эффективности методов электрокаротажа разработаны программные средства и методики интерпретации. При определении электрофизических свойств осадочных пород по данным электромагнитного и электрического каротажного зондирования применяется численное моделирование и инверсия. Программы базируются на численно-аналитических, конечно-разностных и конечно-элементных алгоритмах расчета сигналов. С их применением определяются геоэлектрические параметры отложений в условиях вертикальных и наклонных скважин, сложной формы их ствола и стенки, тонких пластов, наличия измененных прискважинных зон, анизотропии электропроводности и электрической поляризации пород.

Ключевые слова: нефтесодержащий коллектор, скважина, каротажное зондирование, постоянный ток, переменный ток, численная инверсия, геоэлектрическая модель

MODERN QUANTITATIVE INTERPRETATION OF RESISTIVITY LOGGING DATA

K. Sukhorukova, A. Petrov, M. Nikitenko, O. Nechaev, I. Surodina

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of IPGG SB RAS
(IPGG SB RAS), Novosibirsk*

Annotation. To improve the efficiency of electric logging methods, approaches to interpretation using modern software are being developed. Numerical modeling and inversion are used to determine the electrophysical properties of sedimentary rocks from electromagnetic and electrical logging data. The programs are based on numerical-analytical, finite-difference and finite-element algorithms for calculating signals. With their application, the geoelectric parameters of sediments are determined in the conditions of vertical and inclined wells, thin layers, the presence of invaded zones, electrical anisotropy and polarization of rocks.

Key words: Oil reservoir, borehole, resistivity logging, high-frequency induction logging, geoelectric models, numerical inversion

Цель электрокаротажа нефтегазовых скважин — определение удельного электрического сопротивления (УЭС) коллекторов, по значению которого оценивают содержание нефти в коллекторах. Разработано множество электрокаротажных зондов, в которых применяются разные принципы генерации электрического или электромагнитного воздействия и измерения

© К. В. Сухорукова, А. М. Петров, М. Н. Никитенко, О. В. Нечаев, И. В. Суродина, 2021

* Исследования выполнены в рамках проектов 0331-2019-0014 и 0331-2019-0015 ФНИ.

отклика от геологической среды. Вследствие стремления к удешевлению строительства скважины набор используемых методов часто минимизируется до одного метода зондирования (индукционного или гальванического), дополняемого одним зондом, работающим на другом принципе, или даже сводится до метода с единичным зондом. Например, в российской практике используют метод бокового каротажного зондирования (зондирование осуществляется комплексом градиент-зондов, работающих на постоянном токе) и метод низкочастотного индукционного каротажа с одним зондом или метод бокового каротажа также с одним фокусированным зондом.

Зондирующие методы применяются для того чтобы, с одной стороны, более точно определить удельное электрическое сопротивление ($УЭС$) не измененной при бурении части коллектора. Изменение происходит в момент вскрытия проницаемой породы: начинается фильтрация бурового раствора в поровое пространство через образующуюся на стенке скважины глинистую корку или биополимерную пленку. В результате изменяется состав флюида в прискважинной области, и следовательно меняется $УЭС$ породы. Изменение $УЭС$ — радиальный профиль $УЭС$ — с одной стороны, влияет на сигналы электрокаротажа и по этой причине должно учитываться при определении $УЭС$ пласта, а с другой стороны, содержит информацию о фильтрационно-емкостных свойствах и о соотношении пластовой воды и нефти. Поэтому определение радиального распределения $УЭС$ обеспечивает много большую информативность электрокаротажа, чем анализ сигнала одного зонда.

Для российской геофизики традиционен кусочно-однородный подход к построению модели электрических свойств геологической среды — геоэлектрической модели. В каротаже пористая проницаемая порода аппроксимируется несколькими цилиндрическими зонами: скважиной с буровым раствором, в которой находится каротажный прибор, одной или несколькими измененными фильтрацией бурового раствора зонами (зона проникновения — зона с фильтратом бурового раствора, окаймляющая зона — зона скопления пластовой воды) и неизменной породой. В уплотненных и глинистых пластах измененных зон, как правило, нет. Для решения задачи электрокаротажа, таким образом, надо выделить в разрезе пористые пласты и определить как можно точнее $УЭС$ неизменной проникновением фильтрата бурового раствора части. В разрезе с небольшой толщиной пластов кроме влияния на сигналы измененных зон велико будет также влияние вмещающих коллектор пород.

Достоверность определения искомого $УЭС$ пласта-коллектора зависит от чувствительности сигнала зонда к этому параметру. Как правило, ни один зонд не обладает достаточной чувствительностью при наличии измененных зон и бурового раствора между ним и неизменной частью пласта. Учет влияния скважины с раствором возможен по данным кавернометрии и резистивиметрии, а учет влияния измененных зон (ЗП и ОЗ) — только путем определения их параметров и включения в геоэлектрическую модель. Таким образом, необходимо увеличить количество измерений, чтобы определить возросший набор параметров. Эти задачи и решал набор градиент-зондов метода бокового каротажного зондирования (БКЗ), разработанного почти столетие назад. Набор палеток позволял по кривой зондирования определить толщину и $УЭС$ ЗП и $УЭС$ неизменной части пласта. Однако метод БКЗ как метод постоянного тока не мог работать в скважинах, пробуренных на нефтяном буровом растворе, и был предложен индукционный способ каротажа (ИК).

Желание повысить разрешающую способность привело к разработке зондов, работающих на частотах единицы-десятки мегагерц (методы высокочастотного электромагнитного каротажа ВИКИЗ и ВЭМКЗ, частоты 1–14 МГц, каротажа в процессе бурения LWD, частоты 0.4–2.0 МГц). С одной стороны, разрешающая способность действительно была повышена, но с другой, добавились необъяснимые эффекты, например, сильное расхождение значений кажущегося сопротивления в непористых и непроницаемых средах, например, в баженовской

свите. Такое поведение сигналов обычно интерпретируется как наличие проникновения фильтра бурового раствора. Однако такой же эффект дает поляризация многофазного вещества при электромагнитном воздействии.

В настоящее время геофизические компании на территории месторождений Западной Сибири чаще всего применяют методы БКЗ и ВИКИЗ. Данные БКЗ также часто встречаются в архивах при пересмотре оценки продуктивности скважин на уже выработанных месторождениях.

Таким образом, расширенный подход к интерпретации данных обеспечивает повышение информативности методов электрокаротажа. Для обеспечения эффективности количественной интерпретации разработаны комплексы программ численного моделирования и инверсии и методики их применения для построения геоэлектрических моделей.

Методики и программное обеспечение количественной интерпретации условно делятся по условиям применения: в вертикальных или наклонных скважинах, с наличием глубоких радиальных изменений во вскрытой породе или с возможностью им пренебречь.

Для вертикальных скважин в последнее время разработаны средства двумерной инверсии сигналов БКЗ, ВИКИЗ, БК, как по отдельности, так и совместно, в результате чего строится детальная геоэлектрическая модель, удовлетворяющая сигналам всех учитываемых зондов. Двумерная инверсия особенно актуальна в разрезах с толщиной пластов, сравнимой с длинами зондов, при большом контрасте УЭС отложений, при наличии макро и микроанизотропии в пачках тонкого переслаивания песчаных и глинистых прослоев и глинистых покрышках. Определяемое радиальное распределение УЭС содержит не только более точное значение УЭС коллектора, но и информацию о глубине проникновения фильтра бурового раствора, зависящей от ФЕС и исходного флюидонасыщения, и о наличии окаймляющей зоны как признака наличия в коллекторе свободной нефти [1–3].

Численная инверсия сигналов в наклонно-горизонтальных скважинах на основе трехмерных постановок настолько ресурсоемкая, что применяется только в единичных случаях в научно-исследовательских целях. Но технологии бурения таковы, что влияние скважины малого диаметра и измененной (в результате диффузии солей из минерализованного биополимерного бурового раствора) зоны коллектора оказывается практически незначимым для сигналов индукционных зондов, обычно применяемых в таких условиях, в том числе низкочастотных зондов ВЭМКЗ. Оценка влияния и выбор зондов, сигналы которых можно инверсировать, обеспечиваются программами 3D моделирования, а численная инверсия сигналов базируется на одномерной горизонтально-слоистой геоэлектрической модели отложений. Результаты интерпретации практических данных, записанных в коллекторах небольшой толщины с электрически контрастными включениями, часто приводят к существенному уточнению УЭС и тем самым — к изменению оценки нефтесодержания по сравнению с оценкой по значению кажущегося сопротивления [4–5].

Список литературы

1. Сухорукова К. В., Петров А. М., Нечаев О. В. Геоэлектрические модели меловых коллекторов Западной Сибири по результатам комплексной интерпретации данных электрокаротажа // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2020. № 3(41). С. 77–86.
2. Eпов M. I., Sukhorukova K. V., Nechaev O. V., Petrov A. M., Rabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G. L., Abubakar A., Claverie M. Comparison of the Russian and Western Resistivity Logs in Typical Western Siberian Reservoir Environments: A Numerical Study // Petrophysics. 2020. T. 61. № 1. С. 38–71.

3. Петров А. М., Сухорукова К. В., Нечаев О. В. Совместная двумерная инверсия данных электрического и электромагнитного каротажных зондирований в анизотропных моделях песчано-глинистых отложений // Каротажник. 2019. № 3(297). С. 85–103.

4. Копытов Е. В., Сухорукова К. В., Никитенко М. Н. Инверсия данных высокочастотного электромагнитного каротажа в сильнонаклонных скважинах с определением электрической анизотропии // Каротажник. 2018. № 8(290). С. 39–57

5. Горбатенко А. А., Сухорукова К. В. Электромагнитные зондирования в субгоризонтальных скважинах: возможности геонавигации и численной инверсии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 7. С. 1408–1417.