ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ПЛАСТОВ МЕТОДОМ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА В СКВАЖИНАХ, ПРОБУРЕННЫХ НА ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ РАСТВОРАХ

DETERMINATION OF FORMATION SATURATION BY INDUCTION LOGGING IN WELLS DRILLED WITH HIGH MINERALIZED SOLUTIONS

В. И. Дворкин

Vladimir I. Dvorkin

ООО НПФ «ГеоКИП»,
г. Уфа, Российская Федерация

Research and Production
Firm «GeoKIP» LLC,
Ufa, Russian Federation

Р. Ш. Сакаев

Rustem Sh. Sakaev

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. Р. Лаздин

Andrey R. Lazdin

ООО НПФ «ГеоКИП»,
г. Уфа, Российская Федерация

Research and Production
Firm «GeoKIP» LLC,
Ufa, Russian Federation

Н. А. Николаев

Nikolay A. Nikolaev

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Одной из основных целей проведения измерений в бурящихся скважинах является количественное определение нефтенасыщенности коллекторов. Поэтому точное определение удельного электросопротивления (УЭС) пластов в разрезе скважины представляет собой весьма актуальную задачу.

Однозондовый индукционный каротаж (ИК) достаточно давно является одним из основных методов решения поставленной задачи. Однако практика показывает, что вскрытие продуктивных интервалов на высокоминерализованных промысловых жидкостях с УЭС ниже 0,2 Ом·м приводит к существенному снижению точности определения электросопротивления пластов по данным измерений стандартного индукционного зонда длиной 1 м. Одним из способов повышения информативности метода ИК в этих условиях является использование многозондовых установок. Применение индукционного зондирования позволяет изучать распределение УЭС от стенки скважины в глубь пласта и более точно определять электрические характеристики коллекторов. Рассмотрены результаты исследований низкочастотным пятизондовым индукционным каротажем, многозондовым боковым каротажем в сопоставлении с данными однозондового индукционного каротажа. Показано, что в условиях тонкослоистого разреза применение индукционного зонда длиной 1 м не обеспечивает требуемой точности определения электросопротивления продуктивных коллекторов вследствие большого влияния промысловой жидкости на показания нецентрированного зонда и недостаточного вертикального расчленения разреза.

Ключевые слова

низкочастотный многозондовый
индукционный каротаж;
многозондовый боковой каротаж;
пробуренная скважина;
синтетические кривые
индукционного каротажа;
высокоминерализованная
промысловая жидкость

One of the main goals of measurements in drilled wells is to quantify the oil saturation of the reservoirs. Therefore, the precise determination of the resistivity of the formations in the well section is a very urgent problem. Single-probe induction logging (IR) has long been one of the main methods for solving this problem. However, practice shows that the opening of productive intervals on highly mineralized drilling fluids with resistivity below $0.2 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ leads to a significant decrease in the accuracy of determining the resistivity of formations according to measurements of a standard induction probe 1 m long. One of the ways to increase the information content of the IR method under these conditions is the use of multi-probe installations. The use of induction sounding makes it possible to study the distribution of resistivity from the borehole wall into the depth of the formation and more accurately determine the electrical characteristics of the reservoirs.

The results of studies with low-frequency five-probe induction logging, multi-probe lateral logging are considered in comparison with the data of single-probe induction logging. It is shown that, under conditions of a thin-layered section, the use of an induction probe 1 m long does not provide the required accuracy of determining the electrical resistance of productive reservoirs due to the large influence of the flushing fluid on the readings of the off-center probe and insufficient vertical dissection of the section.

Одной из основных целей проведения измерений в бурящихся скважинах является количественное определение нефтенасыщенности коллекторов. Поэтому точное определение удельного электросопротивления (УЭС) пластов в разрезе скважины представляет собой весьма актуальную задачу.

Однозондовый индукционный каротаж (ИК) достаточно давно является одним из основных методов решения поставленной задачи [1]. Однако практика показывает, что вскрытие продуктивных интервалов на высокоминерализованных промывочных жидкостях с УЭС ниже $0,2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ приводит к существенному снижению точности определения электросопротивления пластов по данным измерений стандартного индукционного зонда длиной 1 м. Одним из способов повышения информативности метода ИК в этих условиях является использование многозондовых установок. Применение индукционного зондирования позволяет изучать распределение УЭС от стенки скважины в глубь пласта и более точно определять электрические характеристики коллекторов [2–4].

Для исследования скважин, пробуренных на высокоминерализованных промывочных жидкостях, нами разработан модуль низкочастотного пятизондового индукционного каротажа 5ИКН. Прибор работает на частоте 25 кГц и включает пять трехкатушечных зондов ИК с длинами 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,4 м. Уменьшение влияния скважины на показания

Key words

low-frequency multi-probe induction logging; multi-probe lateral logging; drilled well; synthetic induction logging curves; highly mineralized drilling fluid

зондов ИК достигается: а) использованием низкой частоты работы индукционных зондов; б) центрацией прибора во время проведения измерений.

С целью оценки точности определения УЭС продуктивных тонкослоистых коллекторов, вскрываемых на высокоминерализованных промывочных жидкостях, различными приборами и методами ГИС нами проводились опытно-промышленные исследования.

Опытно-промышленные работы проводились на одной из центральных площадей Ромашкинского месторождения, находящегося на поздней стадии разработки. Исследования выполнялись комплексом методов электрического каротажа, прибором К1А-723М (ИК, БК, БКЗ, КС, ПС, Рез), пятизондовым боковым каротажем (БК), а также пятью зондами низкочастотного ИК, входящими в состав модуля 5ИКН. Зонды модуля 5ИКН были центрированы, в остальных приборах центрация отсутствовала. Всего было исследовано 6 скважин с номинальным диаметром 215,9 мм, вскрывших терригенные коллекторы девонского возраста. Удельное электросопротивление промывочной жидкости в них менялось от 0,07 до $0,024 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Проводилось сопоставление УЭС коллекторов, полученных по данным измерений низкочастотным индукционным каротажом с результатами исследований стандартным индукционным зондом длиной 1 м (ЗИ-1,0), входящим в состав комплексного прибора К1А-723М, пятизондовым БК (МАГИС-5БК).

В рассматриваемом случае, помимо аппаратурной погрешности, точность определения УЭС по данным индукционного каротажа будет зависеть от трех основных факторов:

- влияния проводимости ствола скважины;
- влияния ограниченной толщины пласта;
- влияния понижающей зоны проникновения.

Влияние ствола скважины, с приемлемой для практики точностью, можно оценить по приближенной формуле:

$$\sigma_k = \delta_{\text{скв}} + \sigma_{\text{пл}}, \quad (1)$$

где σ_k , $\sigma_{\text{пл}}$ — кажущаяся электропроводность измеряемая прибором ИК и электропроводность пласта, мСм/м;

$\delta_{\text{скв}}$ — сигнал, обусловленный влиянием скважины, мСм/м.

На рисунке 1 приведено сопоставление результатов измерений зондами длиной 1 м центрированного прибора 5ИКН и прибора К1А-723М. В интервале 1695,0–1735,0 м находится высокоомный карбонатный непроницаемый пласт с УЭС около 1000 Ом·м. При этом сигнал от пласта $\sigma_{\text{пл}} \approx 1$ мСм/м и сигналы, измеряемые индукционными зондами, определяются сигналами от ствола скважины $\sigma_k = \delta_{\text{скв}}$. Сигнал от ствола скважины для центрированного зонда прибора 5ИКН составляет ± 3 мСм/м, для нецентрированного метрового зонда прибора К1А-723М— 60 ± 15 мСм/м (рисунок 1).

Рисунок 1. Сопоставление результатов измерений зондами 3И-1,0 центрированным прибором 5ИКН и 3И-1,0 К1А-723М

Оценим погрешность определения УЭС пластов за счет влияния скважины зондами разных приборов ИК по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{\text{пл}} - \rho_{\text{к}}}{\rho_{\text{пл}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{пл}}$ — истинное сопротивление пласта, Ом·м;

$\rho_{\text{к}}$ — кажущееся сопротивление, определяемое по формуле:

$$\rho_{\text{к}} = \frac{1}{\sigma_{\text{к}}} = \frac{1}{\delta_{\text{скв}} + \sigma_{\text{пл}}}. \quad (3)$$

При этом, в соответствии с вышеизложенным, принимаем для метрового зонда прибора 5ИКН $\delta_{\text{скв}} = 3$ мСм/м, а для зонда прибора К1А-723М — 60 мСм/м. Анализ результатов расчетов показывает, что относительная погрешность определения УЭС пластов быстро

растет с увеличением электросопротивления пластов и для зонда прибора К1А-723М при УЭС пласта 5 Ом·м составляет 30 %, а 10 Ом·м — 60 % (рисунок 2). При этом для низкочастотного центрированного зонда эта погрешность в 20 раз меньше.

Индукционный каротаж является методом с достаточно большим влиянием вмещающих пород. Для того чтобы показания зонда приблизились к истинным значениям, требуется, чтобы толщина продуктивного пласта составляла 4 длины зонда [1]. Оценка влияния ограниченной толщины пласта на погрешность определения УЭС проводилась по формуле (3) по результатам расчета А.П. Потапова для метрового зонда [5]. Для пласта с УЭС величиной 5 Ом·м, расположенного во вмещающих породах (глинах) с сопротивлением 2–3 Ом·м,

Рисунок 2. Относительная ошибка определения электросопротивления пластов, обусловленная влиянием скважины

погрешность составляет: при толщине пласта 3 м — 10 %, 2 м — 20 %, 1 м — 40 %, 0,6 м — 50 %. Таким образом, погрешность определения УЭС нефтяного пласта за счет его ограниченной толщины, для индукционного зонда длиной 1 м, вполне сопоставима с влиянием ствола скважины диаметром 215,9 мм, заполненной высокопроводящим раствором.

При обработке кривых пятизондового прибора ИК проводилась процедура приведения их к единой разрешающей способности 0,6 м.

Для этого использовалась методика построения пяти синтетических зондов разной глубинности с разрешающей способностью два фута на основе применения аппарата обратной фильтрации [3, 5]. Применение такой технологии обработки позволяет с погрешностью 5–7 % определять УЭС пластов с толщиной 0,6 м и более [3, 6].

На рисунке 3 приведено сопоставление данных определения УЭС пластов в интервале горизонта «Д0», рассчитанных по дан-

ным модуля 5ИКН, зонда прибора К1А-723М и модуля псевдобоккового каротажа 5БК. В левой колонке представлены результаты определения кажущихся УЭС по данным разноглубинных физических зондов прибора 5ИКН с разным вертикальным разрешением. В средней колонке приведено сопоставление значений УЭС, полученных по данным зонда прибора К1А-723М (зеленая кривая), и синтетических зондов прибора 5ИКН, приведенных к вертикальному разрешению 0,6 м. В нефтенасыщенном пласте в интервале 1775,5–1776,7 м, толщиной 0,9 м, по данным прибора 5ИКН сопротивление составляет 10,29 Ом·м, по данным зонда прибора К1А-723М 5,2 Ом·м, т.е. относительная погрешность определения

УЭС коллектора по данным измерений нецентрированного индукционного зонда длиной 1 м близка к 100 %.

Сопоставление данных измерений зондами разных радиусов исследования приборов 5ИК и 5БК показывает, что в интервале продуктивного коллектора не наблюдается заметного влияния понижающей зоны проникновения на их показания. Показания зондов различной глубинности индукционного модуля и прибора бокового каротажа совпадают между собой (рисунок 3). Следовательно, зона проникновения в продуктивном коллекторе имеет весьма небольшую глубину и оказывает незначительное влияние на данные индукционного и бокового каротажа.

Рисунок 3. Сопоставление результатов определения сопротивления пластов горизонта «Д0», рассчитанных по данным модуля 5ИКН, индукционного зонда прибора К1А-723М и модуля 5БК

На рисунке 4 приведено сопоставление результатов определения УЭС коллекторов горизонта «Д1». По данным синтетических зондов модуля 5ИКН удастся четко разделить продуктивные пласты и обводненный коллектор в интервале 1794–1795,6 м. В интервале 1791,1–1791,6 м по данным прибора 5ИКН — 10,9 Ом·м, по данным зонда прибора К1А-723М — 6,4 Ом·м, в интервале 1796,5–1797,0 м — 8,3 и 5,3 Ом·м соответственно. По данным зонда прибора К1А-723М (зеленая кривая), сопротивления продуктив-

ных пластов существенно занижены. Вследствие этого по данным индукционного зонда прибора К1А-723М из 7,1 м коллекторов с УЭС выше 5 Ом·м в разрезе скважины 5,7 м (80 %) охарактеризованы как с неясной насыщенностью. По данным модуля 5ИКН, из них 4,7 м — нефтенасыщенные, а 1,0 м — заводненные. Отметим, что по данным прибора 5БК сопротивления существенно выше, чем по данным индукционных зондов прибора 5ИКН (рисунок 4).

Рисунок 4. Сопоставление результатов определения сопротивления пластов горизонта «Д1», рассчитанных по данным модуля 5ИКН, индукционного зонда прибора К1А-723М и модуля 5БК

В остальных скважинах были получены аналогичные результаты. Во всех скважинах значения УЭС продуктивных коллекторов, рассчитанные по результатам измерений индукционного зонда прибора К1А-723М, были существенно ниже, чем по данным исследований модулем 5ИКН. При этом также не наблюдалось существенного влияния зоны проникновения на данные измерений разноглубинных зондов модулей 5ИКН и 5БК.

Результаты обработки и интерпретации данных модуля 5ИКН, а также анализа результатов измерений прибора 5БК показывают, что при вскрытии нефтяных пластов на высокоминерализованных полимерных растворах отмечается неглубокая зона проникновения фильтрата промывочной жидкости, диаметр которой в продуктивных коллекторах не превышает 0,2–0,3 м.

В ряде скважин, по данным исследования коротких зондов длиной 0,5 и 0,7 м модуля 5ИКН, в интервале обводненных пластов, наблюдалась понижающая зона проникновения. Расчеты показывают, что диаметр зоны проникновения при этом составляет 0,3–0,5 м.

Таким образом, основными причинами снижения точности определения электросопротивления продуктивных коллекторов в терригенных отложениях девонского воз-

раста, при вскрытии их на полимерных растворах с низким УЭС являются большое влияние промывочной жидкости на показания индукционного зонда длиной 1 м и недостаточное вертикальное расчленение зонда.

Анализ исследований прибором 5БК показал высокое качество исследований и значительный динамический диапазон измерений, достигающий нескольких тысяч Ом·м. Однако в большинстве исследованных скважин в интервале нефтеносных коллекторов наблюдается значительное превышение значений УЭС по сравнению с индукционным каротажем. Возможно это связано с влиянием анизотропии продуктивных коллекторов и наличием тонких субгоризонтальных прослоев с высоким электросопротивлением.

Выводы

1. Применение индукционного зонда ЗИ-1,0 не обеспечивает требуемой точности определения УЭС пластов с толщиной менее 2 м, при вскрытии их на минерализованных растворах с УЭС менее 0,2 Ом·м вследствие большого влияния промывочной жидкости на показания зонда и недостаточного вертикального расчленения зонда длиной 1 м.

2. Низкая точность определения УЭС коллекторов с сопротивлением более 5 Ом·м по

данным стандартного индукционного зонда в приборе К1А-723М не позволяет разделить коллекторы на нефтяные и обводненные, и часто в заключениях производственного геофизического предприятия пласты характеризуются неопределенной насыщенностью.

3. Результаты обработки и интерпретации данных модуля 5ИКН, а также анализа результатов измерений прибора 5БК показывают, что при вскрытии коллекторов на высокоминерализованных полимерных растворах отмечается неглубокая зона проникновения фильтрата промывочной жидкости: в продуктивных коллекторах диаметрами 0,2–0,3 м, в водоносных и обводненных диаметрами 0,3–0,5 м.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Плюсин М.И. Индукционный каротаж. М.: Недра, 1968. 142 с.
2. Дворкин В.И., Лаздин А.Р., Морозова Е.А. Результаты опробования новой пятизондовой аппаратуры индукционного каротажа // Геофизика. 2011. № 3. С. 74–79.
3. Дворкин В.И., Лаздин А.Р., Морозова Е.А. Определение удельного сопротивления коллекторов по данным пятизондового индукционного каротажа // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 1. С. 279–282. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Dvorkin/Dvorkin_1.pdf (дата обращения: 19.12.2020).
4. Дворкин В.И., Лаздин А.Р., Морозова Е.А. Развитие метода индукционного каротажа в ОАО НПФ «Геофизика» // Каротажник. 2015. Вып. 11 (257). С. 17–30.
5. Потапов А.П., Кнеллер Л.Е. Решение прямой и обратной задач индукционного каротажа для сред с произвольным дискретным распределением проводимости по глубине // Геология и геофизика. 1990. № 5. С. 122–130.
6. Zhou Qiang Log Interpretation with Fast Induction Log Inversion // The Log Analyst. 1999. Vol. 40. Issue 6. Paper No. SPWLA-1999-v40n6a2.

REFERENCES

1. Plyusnin M.I. *Induktsionnyi karotazh* [Induction Logging]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 142 p. [in Russian].

4. Приведение результатов исследований разноглубинных зондов ИК к единой разрешающей способности 0,6 м позволяет с достаточной для практических расчетов точностью определить УЭС нефтяных пластов толщиной 0,6 м и выше.

5. Применение модуля пятизондового низкочастотного индукционного каротажа 5ИКН в скважинах, пробуренных на растворах с $УЭС \leq 0,2$ Ом·м позволит на порядок повысить точность определения электросопротивления коллекторов с УЭС выше 5 Ом·м, а также надежно разделить продуктивные, водоносные и обводненные пласты в условиях тонкослоистого разреза, вскрытого скважиной с номинальным диаметром 215,9 мм.

2. Dvorkin V.I., Lazdin A.R., Morozova E.A. Rezul'taty oprobovaniya novoi pyatizonдовой apparatury induktsionnogo karotazha [The Results of Testing the New Five-Probe Induction Logging Equipment for Horizontal Wells Exploration]. *Geofizika — The Russian Geophysics Journal*, 2011, No. 3, pp. 74–79. [in Russian].
3. Dvorkin V.I., Lazdin A.R., Morozova E.A. Opredelenie udel'nogo soprotivleniya kollektorov po dannym pyatizonndovogo induktsionnogo karotazha [Formation Resistivity Evaluation According to the Five-Sonde Induction Logging Data]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2012, No. 1, pp. 279–282. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Dvorkin/Dvorkin_1.pdf (accessed 19.12.2020). [in Russian].
4. Dvorkin V.I., Lazdin A.R., Morozova E.A. Razvitiye metoda induktsionnogo karotazha v OAO NPF «Geofizika» [Induction Logging Development in NPF Geofizika OJSC]. *Karotazhnik — Karotazhnik*, 2015, Issue 11 (257), pp. 17–30. [in Russian].
5. Potapov A.P., Kneller L.E. Reshenie pryamoi i obratnoi zadach induktsionnogo karotazha dlya sred s proizvol'nym diskretnym raspredeleniem provodimosti po glubine [Solution of Direct and Inverse Problems of Induction Logging for Media with an Arbitrary Discrete Distribution of Conductivity over Depth]. *Geologiya i geofizika — Russian Geology and Geophysics*, 1990, No. 5, pp. 122–130. [in Russian].
6. Zhou Qiang Log Interpretation with Fast Induction Log Inversion. *The Log Analyst*, 1999, Vol. 40, Issue 6, Paper No. SPWLA-1999-v40n6a2.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Дворкин Владимир Исаакович, д-р техн. наук, директор ООО НПФ «ГеоКИП», г. Уфа, Российская Федерация

Vladimir I. Dvorkin, Doctor of Engineering Sciences, Director of Research and Production Firm «GeoKIP» LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: dvorkin_geokip@mail.ru

Лаздин Андрей Робертович, заместитель директора ООО НПФ «ГеоКИП», г. Уфа, Российская Федерация
Andrey R. Lazdin, Deputy Director of Research and Production Firm «GeoKIP» LLC
e-mail: lazdin.andrey@yandex.ru

Сакаев Рустем Шамилевич, старший преподаватель кафедры «Геофизические методы исследования», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Rustem Sh. Sakaev, Senior Lecturer of Geophysical Methods of Well Surveying Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: tem87rus@mail.ru

Николаев Николай Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Геофизические методы исследования», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Nikolay A. Nikolaev, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Geophysical Methods of Well Surveying Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: nikolaev_nikolay@mail.ru