НЕОБХОДИМОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАЛИБРОВОЧНО-ПОПРАВОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ АППАРАТУРЫ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА

Н.Е. Фролов, *студент*
Л.И. Гимазиева, *студент*
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(Россия, г. Уфа)

DOI:10.24412/2500-1000-2025-10-2-114-118

Аннотация. *В статье представлены результаты разработки калибровочно-поправочной функции (КПФ) для аппаратуры индукционного каротажа, предназначенной для определения удельной электрической проводимости (УЭП) пластов горных пород. Особое внимание уделено учету влияния удельной электрической проводимости промывочной жидкости (ПЖ) и температуры в скважине на точность измерений. Проведен анализ измеряемых и влияющих величин, обоснована конструкция эталонов, разработана структурная схема измерительной системы. Построена КПФ в виде полинома, проверена её точность. Результаты исследования позволяют повысить точность определения УЭП в реальных скважинных условиях.*

Ключевые слова: *индукционный каротаж, удельная электрическая проводимость, промывочная жидкость, температура, калибровочно-поправочная функция, эталоны, структурная схема.*

Индукционный каротаж (ИК) является одним из наиболее важных методов электрического каротажа. При ИК удельную электрическую проводимость горных пород, пересеченных стволом скважины, изучают с помощью специальной установки – зонда, принимающего сигналы, индуцированные вихревыми токами окружающей среды. Основные преимущества ИК – это относительно большая глубинность исследований при незначительном влиянии вмещающих пород, отсутствие гальванического контакта установки со средой, вследствие чего становится возможным исследование пустых и заполненных непроводящей промывочной жидкостью скважин, измерение КС с большой точностью в породах с малым значением удельных сопротивлений (менее 10 Ом·м).

Индукционный каротаж (ИК) основан на принципе электромагнитной индукции. В основе метода лежит возбуждение вихревых токов в горных породах и промывочной жидкости с помощью переменного магнитного поля, создаваемого излучающей катушкой зонда. Эти вихревые токи, в свою очередь, индуцируют вторичное электромагнитное поле, которое регистрируется приёмной катушкой. Интенсивность вторичного поля зависит от удельной электрической проводимости (УЭП) окружающей среды, что позволяет определять этот параметр для горных пород.

Понимание физических принципов индукционного каротажа позволяет более точно интерпретировать результаты измерений и разрабатывать эффективные методы калибровки аппаратуры. Учёт всех влияющих факторов – проводимости горных пород и промывочной жидкости, температуры, геометрии скважины и частоты – позволяет значительно повысить точность определения удельной электрической проводимости пластов.

Цель данной работы заключается в разработке калибровочно-поправочной функции (КПФ) для аппаратуры индукционного каротажа, которая позволяет учитывать влияние удельной электрической проводимости промывочной жидкости (ПЖ) и температуры в скважине на точность измерений.

Точность измерений удельной электрической проводимости пластов горных пород имеет критическое значение для оценки запасов и эффективности разработки нефтегазовых месторождений. Влияние промывочной жидкости и температуры может значительно искажать результаты измерений, что требует разработки методов коррекции этих влияний. В данной работе предлагается метод построения калибровочно-поправочной функции, ко-

торая позволяет учитывать эти влияния и повышать точность измерений.

Одной из ключевых влияющих величин является удельная электрическая проводимость промывочной жидкости (ПЖ). ПЖ может значительно искажать результаты измерений УЭП пластов. В данной работе рассматривается диапазон значений УЭП ПЖ от 0,1 до 50 См/м.

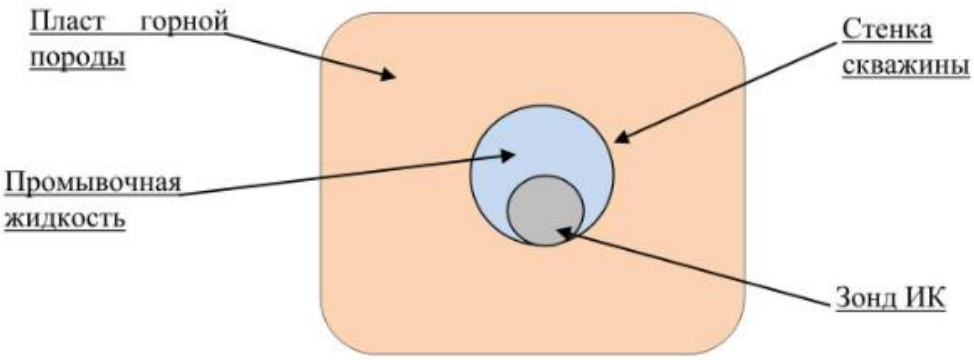

Рис. 1. Схема типовой структуры неоднородной среды при прямых измерениях УЭП пласта, пересеченной скважиной

Промывочная жидкость, заполняющая скважину, может иметь различную удельную электрическую проводимость, что влияет на распределение вихревых токов и, следовательно, на результаты измерений. Для учета этого влияния необходимо проводить калибровку аппаратуры с использованием эталонов, имитирующих различные значения УЭП ПЖ.

Температура в скважине может влиять на электрические свойства горных пород и промывочной жидкости. Для учета этого влияния необходимо проводить измерения при различных температурах и вводить соответствующие поправки.

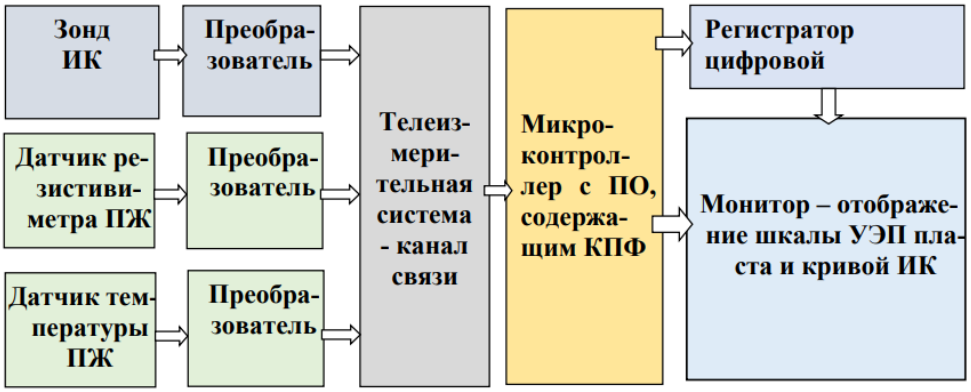

Рис. 2. Структурная блок-схема канала ИК ГИС

Описание блоков структурной схемы.

1. Зонд ИК: Индукционный зонд состоит из излучающей и приемной катушек. Излучающая катушка создает первичное электромагнитное поле, которое индуцирует вихревые токи в горных породах. Приемная катушка регистрирует вторичное электромагнитное поле, создаваемое этими токами.

2. Преобразователь: Преобразователь преобразует аналоговые сигналы от зонда ИК, датчика резистивиметра ПЖ и датчика температуры ПЖ в цифровые сигналы, которые могут быть переданы по каналу связи.

3. Телеизмерительная система – канал связи: Канал связи обеспечивает передачу цифровых сигналов от преобразователя к микроконтроллеру. В качестве канала связи может использоваться геофизический кабель или гидравлический канал связи.

4. Микроконтроллер с ПО, содержащим КПФ: Микроконтроллер обрабатывает поступающие сигналы и вычисляет скорректированное значение УЭП пласта с использованием калибровочно-поправочной функции (КПФ). КПФ учитывает влияние УЭП ПЖ и температуры на результаты измерений.

5. Регистратор цифровой: Регистратор записывает и отображает результаты измерений, включая скорректированные значения УЭП пласта и кривые ИК.

Зонд ИК, датчик резистивиметра ПЖ и датчик температуры ПЖ регистрируют соответствующие сигналы, которые преобразуются в цифровые сигналы преобразователем. Эти сигналы передаются по каналу связи к микроконтроллеру, который обрабатывает их с использованием КПФ и вычисляет скорректированные значения УЭП пласта. Результаты измерений отображаются на мониторе и записываются регистратором.

Для построения калибровочно-поправочной функции (КПФ) необходимо учитывать не только основные влияющие факторы – удельную электрическую проводимость промывочной жидкости (УЭП ПЖ) и температуру, но и их взаимное влияние, а также возможные нелинейные эффекты. В современной практике геофизических исследований скважин (ГИС) широко используются полиномиальные модели, однако их точность зависит от правильного выбора степени полинома и учета всех значимых параметров.

Анализ влияющих факторов

1. Промывочная жидкость, заполняющая ствол скважины, обладает собственной удельной электрической проводимостью, которая может значительно варьироваться в зависимости от её состава и минерализации. При проведении индукционного каротажа вихревые токи индуцируются не только в горных породах, но и в промывочной жидкости. Это приводит к формированию дополнительного электромагнитного поля, которое накладывается на поле, создаваемое пластами горных пород. Таким образом, измеряемый сигнал содержит вклад как от горных пород, так и от промывочной жидкости, что может искажать результаты измерений. Для учёта влияния промывочной жидкости используются методы калибровки на эталонах с известными значениями УЭП ПЖ, а также введение поправочных коэффициентов в калибровочно-поправочную функцию (КПФ). Это позволяет минимизировать погрешности, связанные с влиянием промывочной жидкости, и повысить точность измерений.

2. Температура в скважине оказывает значительное влияние на электрические свойства как горных пород, так и промывочной жидкости. При повышении температуры увеличивается подвижность ионов в растворах, что приводит к росту их электрической проводимости. Для большинства водных растворов проводимость увеличивается на 1-2% на каждый градус Цельсия. Таким образом, при изменении температуры от 20°C до 100°C проводимость может вырасти на 20-40%. Для компенсации влияния температуры необходимо проводить измерения температуры в скважине с помощью специальных датчиков и корректировать измеренные значения УЭП с использованием температурных коэффициентов в КПФ.

3. Диаметр скважины является важным геометрическим параметром, влияющим на распределение вихревых токов и глубинность исследований. При увеличении диаметра скважины часть электромагнитного поля рассеивается в промывочной жидкости, что снижает глубинность исследований и увеличивает влияние промывочной жидкости на измеряемый сигнал. При уменьшении диаметра скважины глубинность исследований увеличивается, так как уменьшается объём промывочной жидкости, влияющей на сигнал. Напротив, при увеличении диаметра глубинность снижается, а вклад промывочной жидкости в измеряемый сигнал растёт. Для компенсации влияния диаметра скважины на результаты измерений проводят калибровку зонда на эталонах с различными диаметрами скважин и вводят поправочные коэффициенты в КПФ.

Для калибровки аппаратуры индукционного каротажа необходимо использовать специализированные эталоны, воспроизводящие характеристики горных пород определенного размера. В данной работе используются эталоны для измерения УЭП пластов горных пород и УЭП промывочной жидкости.

Эталоны представляют собой резервуары, заполненные электропроводящим водным раствором, с скважиной номинального диа-

метра. Для калибровки аппаратуры ИК используется комплект эталонов с различными значениями УЭП пласта и УЭП ПЖ.

Для калибровки аппаратуры ИК используется комплект из 8 эталонов с различными значениями УЭП пласта и УЭП ПЖ. Зонд ИК последовательно погружается в каждый из эталонов, и регистрируется выходной сигнал. Полученные данные используются для построения КПФ.

Чтобы измерять УЭП пласта, необходимо калибровать аппаратуру ИК с учетом влияния и автоматической компенсации влияния УЭП промывочной жидкости (ПЖ) и температуры ПЖ в процессе измерений при каком-либо фиксированном значении диаметра скважины.

Таблица 1. Исходные данные

Эталонные значения УЭП пласта, См/м	Эталонные значения УЭП ПЖ См/м	Выходной сигнал резистивиметра, В	Значения температуры ПЖ, °С	Выходной сигнал зонда ИК, В
0,1±0,001	1,00±0,01	0,2	20	5,0
0,1±0,001	1,00±0,01	0,2	100	5,2
0,1±0,001	20,0±0,2	4	20	5,4
0,1±0,001	20,0±0,2	4	100	5,6
1±0,01	1,00±0,01	0,2	20	51
1±0,01	1,00±0,01	0,2	100	52
1±0,01	20,0±0,2	4	20	55
1±0,01	20,0±0,2	4	100	58

КПФ для аппаратуры ИК будем искать в следующем линейном виде:

$$\sigma_п = a+b\cdot N+c\cdot \sigma_c+d\cdot T+e\cdot N\cdot \sigma_c+f\cdot N\cdot T+g\cdot \sigma_c\cdot T+s\cdot N\cdot \sigma_c\cdot T$$

где a, b, c, d, e, f, g, s – коэффициенты; σ_c – УЭП резистивиметра, $\sigma_п$ – проводимость пласта, T – температура ПЖ, N – выходной сигнал зонда ИК.

Для начала составим систему из восьми линейных уравнений с восьми неизвестными:

$$\sigma_{п1}=a+b\cdot N_1+c\cdot \sigma_{c1}+d\cdot T_1+e\cdot N_1\cdot \sigma_{c1}+f\cdot N_1\cdot T_1+g\cdot \sigma_{c1}\cdot T_1+s\cdot N_1\cdot \sigma_{c1}\cdot T_1$$
$$\sigma_{п2}=a+b\cdot N_2+c\cdot \sigma_{c2}+d\cdot T_2+e\cdot N_2\cdot \sigma_{c2}+f\cdot N_2\cdot T_2+g\cdot \sigma_{c2}\cdot T_2+s\cdot N_2\cdot \sigma_{c2}\cdot T_2$$
$$\sigma_{п3}=a+b\cdot N_3+c\cdot \sigma_{c3}+d\cdot T_3+e\cdot N_3\cdot \sigma_{c3}+f\cdot N_3\cdot T_3+g\cdot \sigma_{c3}\cdot T_3+s\cdot N_3\cdot \sigma_{c3}\cdot T_3$$
$$\sigma_{п4}=a+b\cdot N_4+c\cdot \sigma_{c4}+d\cdot T_4+e\cdot N_4\cdot \sigma_{c4}+f\cdot N_4\cdot T_4+g\cdot \sigma_{c4}\cdot T_4+s\cdot N_4\cdot \sigma_{c4}\cdot T_4$$
$$\sigma_{п5}=a+b\cdot N_5+c\cdot \sigma_{c5}+d\cdot T_5+e\cdot N_5\cdot \sigma_{c5}+f\cdot N_5\cdot T_5+g\cdot \sigma_{c5}\cdot T_5+s\cdot N_5\cdot \sigma_{c5}\cdot T_5$$
$$\sigma_{п6}=a+b\cdot N_6+c\cdot \sigma_{c6}+d\cdot T_6+e\cdot N_6\cdot \sigma_{c6}+f\cdot N_6\cdot T_6+g\cdot \sigma_{c6}\cdot T_6+s\cdot N_6\cdot \sigma_{c6}\cdot T_6$$
$$\sigma_{п7}=a+b\cdot N_7+c\cdot \sigma_{c7}+d\cdot T_7+e\cdot N_7\cdot \sigma_{c7}+f\cdot N_7\cdot T_7+g\cdot \sigma_{c7}\cdot T_7+s\cdot N_7\cdot \sigma_{c7}\cdot T_7$$
$$\sigma_{п8}=a+b\cdot N_8+c\cdot \sigma_{c8}+d\cdot T_8+e\cdot N_8\cdot \sigma_{c8}+f\cdot N_8\cdot T_8+g\cdot \sigma_{c8}\cdot T_8+s\cdot N_8\cdot \sigma_{c8}\cdot T_8$$

Для нахождения коэффициентов a, b, c, d, e, f, g, s преобразуем систему уравнений в матричный вид:

$$\begin{matrix}\sigma_{п1}\\ \sigma_{п2}\\ \sigma_{п3}\\ \sigma_{п4}\\ \sigma_{п5}\\ \sigma_{п6}\\ \sigma_{п7}\\ \sigma_{п8}\end{matrix} = \begin{vmatrix} 1 & N_1 & \sigma_{c1} & T_1 & N_1\sigma_{c1} & N_1T_1 & \sigma_{c1}T_1 & N_1\sigma_{c1}T_1 \\ 1 & N_2 & \sigma_{c2} & T_2 & N_2\sigma_{c2} & N_2T_2 & \sigma_{c2}T_2 & N_2\sigma_{c2}T_2 \\ 1 & N_3 & \sigma_{c3} & T_3 & N_3\sigma_{c3} & N_3T_3 & \sigma_{c3}T_3 & N_3\sigma_{c3}T_3 \\ 1 & N_4 & \sigma_{c4} & T_4 & N_4\sigma_{c4} & N_4T_4 & \sigma_{c4}T_4 & N_4\sigma_{c4}T_4 \\ 1 & N_5 & \sigma_{c5} & T_5 & N_5\sigma_{c5} & N_5T_5 & \sigma_{c5}T_5 & N_5\sigma_{c5}T_5 \\ 1 & N_6 & \sigma_{c6} & T_6 & N_6\sigma_{c6} & N_6T_6 & \sigma_{c6}T_6 & N_6\sigma_{c6}T_6 \\ 1 & N_7 & \sigma_{c7} & T_7 & N_7\sigma_{c7} & N_7T_7 & \sigma_{c7}T_7 & N_7\sigma_{c7}T_7 \\ 1 & N_8 & \sigma_{c8} & T_8 & N_8\sigma_{c8} & N_8T_8 & \sigma_{c8}T_8 & N_8\sigma_{c8}T_8 \end{vmatrix}$$

Путем преобразования в матричную форму и нахождения определителя результирующей матрицы и дополнительных определителей мы находим коэффициенты и подставляем в КПФ. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерений с использованием КПФ

Поверка №	Измеренное Значение, сМ/м	Значение УЭП по эталону, сМ/м	Допустимая абсолютная погрешность, %	Фактическая погрешность,%
1	0,0999	0,10	0,001	0,0001
2	0,0998	0,10	0,001	0,0002
3	0,0999	0,10	0,001	0,0001
4	0,10	0,10	0,001	0
5	0,999	1,00	0,001	0,001
6	0,998	1,00	0,001	0,002
7	1,00	1,00	0,001	0
8	1,00	1,00	0,001	0

Заключение. В результате проведенных исследований была разработана калибровочно-поправочная функция для аппаратуры индукционного каротажа, которая позволяет учитывать влияние удельной электрической проводимости промывочной жидкости и температуры в скважине на точность измерений. Разработанная КПФ показала высокую эффективность и полностью соответствует заданным техническим требованиям, что подтверждает успешность проведенного проектирования и возможность практического применения разработанной аппаратуры.

Разработанная калибровочно-поправочная функция позволяет повысить точность измерений удельной электрической проводимости пластов горных пород в реальных скважинных условиях. Это имеет критическое значение для оценки запасов и эффективности разработки нефтегазовых месторождений.

Библиографический список

1. Лобанков В.М. Основы проектирования геофизических измерительных систем. Учебное пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2023. – 185 с.

2. Лобанков В.М. Основы метрологии геофизических измерений. Учебное пособие. – Уфа, 2013. – 14 с.

3. Лобанков В.М. Геофизика в нефтегазовом деле. Учебное пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021.

4. Горбачев Ю.И. Геофизические исследования скважин: учебник для вузов. – М.: Недра, 1990. – 81 с.

THE NEED TO USE A CALIBRATION AND CORRECTION FUNCTION FOR INDUCTION LOGGING EQUIPMENT

N.E. Frolov, *Student*
L.I. Gimazieva, *Student*
Ufa State Petroleum Technological University
(Russia, Ufa)

Abstract. *This article presents the results of developing a calibration-correction function (CCF) for induction logging equipment designed to determine the specific electrical conductivity (SEC) of rock formations. Special attention is paid to accounting for the influence of the specific electrical conductivity of the drilling fluid (DF) and temperature in the well on the measurement accuracy. An analysis of measured and influencing quantities was conducted, the design of standards was justified, and a structural diagram of the measuring system was developed. The CCF was constructed as a polynomial, and its accuracy was verified. The research results allow for improving the accuracy of determining SEC under real well conditions.*

Keywords: *induction logging, specific electrical conductivity, drilling fluid, temperature, calibration-correction function, standards, structural diagram.*