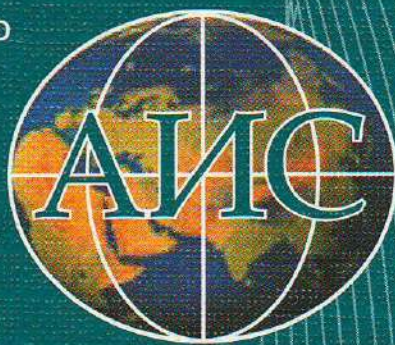


МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
И ДЕЛОВОГО СОТРУДНИЧЕСТВА ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ
ИССЛЕДОВАНИЯМ И РАБОТАМ В СКВАЖИНАХ

ISSN 1810-5599



3

(237)



ООО НПФ «АМК ГОРИЗОНТ»
15 лет

КАРОТАЖНИК

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

ТВЕРЬ 2014

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Н. С. Березовский

Зам. гл. редактора,
научный редактор
Ю. И. Кузнецов, д. г.-м. н., проф.

Отв. редактор С. В. Ларева

Редактор И. В. Шункова

Члены редакционной коллегии:

Ю. Н. Бармаков, д. т. н., проф.

Я. Н. Басин, д. т. н., проф. (США)

А. М. Блюменцев, д. т. н., проф.

А. Ф. Боярчук, к. г.-м. н.

Р. А. Валиуллин, д. т. н., проф.

В. А. Велижанин, к. т. н.

И. Н. Гайворонский, д. т. н., проф.

С. А. Дудаев, д. т. н.

Ф. Х. Еникеева, д. т. н.

В. Ю. Зайченко, д. г.-м. н.

В. И. Иванников, д. т. н., проф.

Л. Е. Кнеллер, д. т. н., проф.

Н. Г. Козыряцкий, к. т. н.

В. Ф. Козяр, д. т. н., проф.

А. К. Коньсов, д. т. н. (Казахстан)

М. Д. Красножон, д. геол. н.

(Украина)

А. А. Кременецкий, д. г.-м. н., проф.

О. Л. Кузнецов, д. т. н., проф.

Э. Е. Лукьянов, д. т. н.

А. В. Малинин, к. г.-м. н.

Ф. П. Митрофанов, д. г.-м. н.,
проф., академик РАН

А. А. Молчанов, д. т. н., проф.

Т. Н. Нестерова, к. т. н.

Г. А. Павленко, к. т. н.

В. А. Трофимов, д. г.-м. н., проф.

В. Г. Фоменко, д. г.-м. н., проф.

Р. Т. Хаматдинов, д. т. н., проф.

М. И. Эпов, д. т. н., проф.,
академик РАН

Г. Г. Яценко, д. г.-м. н.

Издательство "АИС"

Россия, 170041, г. Тверь,
ул. Зинаиды Коноплянниковой,
д. 17, корп. 1

Лицензия ЛР № 030838

от 29 июня 1998 г.

Свидетельство ПИ № 77-36891

от 20 июля 2009 г.

Индекс Роспечати – 82015.

ISSN 1810-5599.

Подписано в печать 3.03.2014.

Формат 60/84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 10,5. Уч.-изд. л. 10,5.

Тираж 1130. Зак. № 1444.

Компьютерная верстка, макет

ООО "Издательство "Триада".

Отпечатано в ООО "Тверская
фабрика печати".

© Издательство "АИС", 2014



Научно-технический вестник

(рецензируемое издание)

Год издания двадцать третий

КАРОТАЖНИК

Выпуск 3 (237)

Посвящен 15-летию

ООО НПФ "АМК ГОРИЗОНТ"

**ТВЕРЬ
2014**

Результаты исследований и работ ученых и конструкторов

УДК 550.832.73

Л. Г. Леготин
ООО НПФ "АМК ГОРИЗОНТ"

МНОГОЗОНДОВЫЙ МЕТОД БОКОВОГО КАРОТАЖА

Приведены теоретические расчеты многоэлементных фокусированных зондов электрического каротажа, которые могут быть заложены в основу многозондового метода бокового каротажа.

Ключевые слова: каротаж, теория, зонды, удельное электрическое сопротивление, палетка.

При геофизических исследованиях скважин все большее распространение получают многозондовые методы измерений физических свойств пород, вскрытых скважиной. В данной статье рассмотрим возможности построения фокусированных зондов электрического каротажа с использованием кольцевых токовых электродов, установленных на изоляционном покрытии скважинного прибора.

Рассчитаем электрическое поле зонда в среде с удельным электрическим сопротивлением ρ_s , ограниченной двумя плоскостями, перпендикулярными оси цилиндров, с координатами Z_1 и Z_4 и диаметром скважины D_2 (рис. 1). На обоих концах зонда в интервалах $Z_1 < Z < Z_2$

и $Z_3 < Z < Z_4$ имеются заземленные участки металлической трубы диаметром D_1 . В интервале $Z_2 < Z < Z_3$ на изоляционном покрытии диаметром D_1 симметрично установлены несколько токовых кольцевых электродов такого же диаметра. Высота каждого электрода равна $2h$.

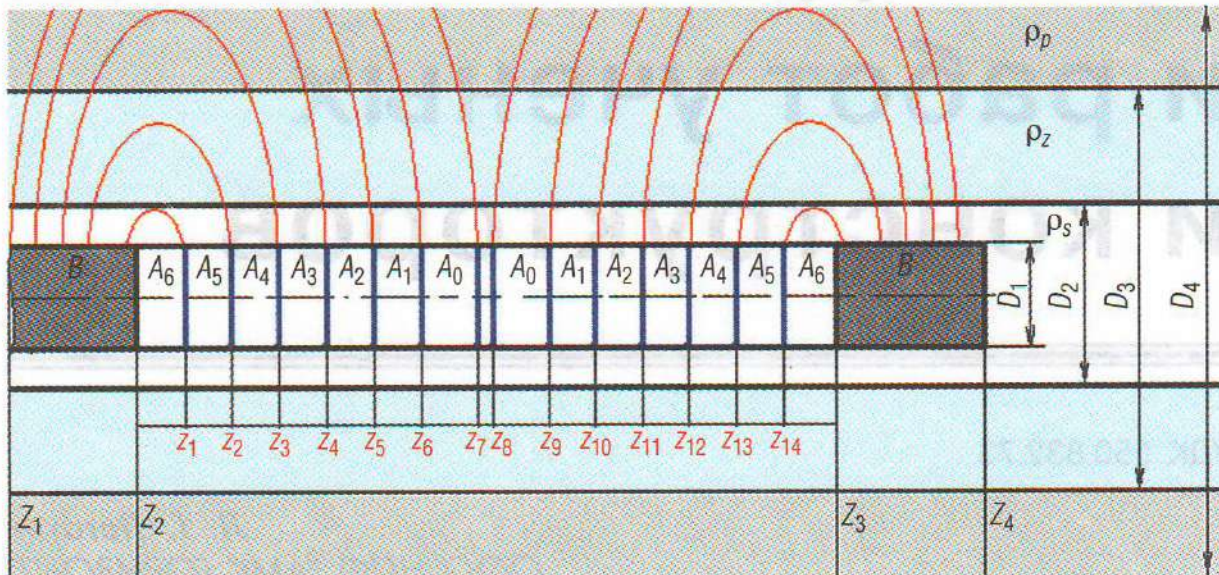


Рис. 1. Расчетная модель электрического зонда

Через токовые электроды A_0 – A_6 , имеющие одинаковые потенциалы U_0 , пропускается электрический ток. Отметим, что электрический ток замыкается через заземленные участки трубы и создает в окружающей среде электрическое поле, которое нужно определить.

Для решения задачи будем рассматривать следующие функции потенциалов:

$$U^s(Z, R) \text{ при } Z_1 \leq Z \leq Z_4, D_2 \geq D \geq D_1; \quad (1)$$

$$U^z(Z, R) \text{ при } Z_1 \leq Z \leq Z_4, D_3 \geq D \geq D_2; \quad (2)$$

$$U^p(Z, R) \text{ при } Z_1 \leq Z \leq Z_4, D \geq D_3. \quad (3)$$

Будем считать, что длина заземленных участков достаточно большая, и значения потенциалов при $Z = Z_1$ и $Z = Z_4$ можно принять равными нулю. Теперь запишем граничные условия для каждой выделенной области среды.

Для плоских поверхностей граничные условия запишем в следующем виде:

$$U^s(Z_1, R) = U^z(Z_1, R) = U^p(Z_1, R) = 0, \quad (4)$$

$$U^s(Z_4, R) = U^z(Z_4, R) = U^p(Z_4, R) = 0. \quad (5)$$

Запишем граничные условия для цилиндрических поверхностей:

$$U_m^s(Z, R_1) = 0 \text{ при } Z_m \leq Z \leq Z_{m+1}, m = 1, 3; \quad (6)$$

$$-\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial U_m^s(Z, R)}{\partial R} \Big|_{R_1} = j_2(Z, R_1) \text{ при } Z_2 \leq Z \leq Z_3, m = 2; \quad (7)$$

$$U^s(Z, R_2) = U^z(Z, R_2) \text{ при } Z_1 \leq Z \leq Z_4; \quad (8)$$

$$-\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial U^s(Z, R)}{\partial R} \Big|_{R_2} = -\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial U^z(Z, R)}{\partial R} \Big|_{R_2} \text{ при } Z_1 \leq Z \leq Z_4; \quad (9)$$

$$U^z(Z, R_3) = U^p(Z, R_3) \text{ при } Z_1 \leq Z \leq Z_4; \quad (10)$$

$$-\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial U^z(Z, R)}{\partial R} \Big|_{R_3} = -\frac{1}{\rho_p} \frac{\partial U^p(Z, R)}{\partial R} \Big|_{R_3} \text{ при } Z_1 \leq Z \leq Z_4, \quad (11)$$

где $m = 1, 2, 3$ – порядковый номер области среды.

Функцией $j_2(Z, R_1)$ задана плотность электрического тока токовых электродов на цилиндрической поверхности D_1 в интервале $Z_2 \leq Z \leq Z_3$ изоляционного покрытия зонда.

Выражения для потенциалов в каждой области будем рассматривать в виде ряда по собственным функциям $f(\mu_k Z)$:

$$U^t(Z, R) = \sum_{k=1}^{\infty} [M_k^t I_0(\mu_k R) + N_k^t K_0(\mu_k R)] f(\mu_k Z), \quad (12)$$

где $t = s, z, p$.

$$f(\mu_k Z) = \sin \mu_k (Z - Z_1); \quad (13)$$

$$\mu_k = \frac{\pi \times k}{Z_4 - Z_1}, k = 1, 2, 3 \dots \quad (14)$$

С учетом граничных условий (8)–(11) выражения для функций $U^t(Z, R)$ запишем в виде [1, 2]

$$U^s(Z, R) = \sum_{k=1}^{\infty} N_k^s [\Omega_k I_0(\mu_k R) + K_0(\mu_k R)] f(\mu_k Z), \quad (15)$$

где для упрощения записи введены следующие обозначения:

$$\Omega_k = \frac{\frac{\rho_z}{\rho_s} \frac{\omega_k I_0(\mu_k R_2) + K_0(\mu_k R_2)}{\omega_k I_1(\mu_k R_2) - K_1(\mu_k R_2)} K_1(\mu_k R_2) + K_0(\mu_k R_2)}{\frac{\rho_z}{\rho_s} \frac{\omega_k I_0(\mu_k R_2) + K_0(\mu_k R_2)}{\omega_k I_1(\mu_k R_2) - K_1(\mu_k R_2)} I_1(\mu_k R_2) - I_0(\mu_k R_2)}; \quad (16)$$

$$\omega_k = \frac{\frac{\rho_p}{\rho_z} \frac{K_0(\mu_k R_3) + \frac{K_1(\mu_k R_4)}{I_1(\mu_k R_4)} I_0(\mu_k R_3)}{K_1(\mu_k R_3) - \frac{K_1(\mu_k R_4)}{I_1(\mu_k R_4)} I_1(\mu_k R_3)}}{\frac{\rho_p}{\rho_z} \frac{K_0(\mu_k R_3) + \frac{K_1(\mu_k R_4)}{I_1(\mu_k R_4)} I_0(\mu_k R_3)}{K_1(\mu_k R_3) - \frac{K_1(\mu_k R_4)}{I_1(\mu_k R_4)} I_1(\mu_k R_3)}} I_1(\mu_k R_3) + I_0(\mu_k R_3)}; \quad (17)$$

$$U^z(Z, R) = \frac{\rho_z}{\rho_s} \sum_{k=1}^{\infty} N_k^s [\Omega_k I_1(\mu_k R_2) - K_1(\mu_k R_2)] \frac{\omega_k I_0(\mu_k R) + K_0(\mu_k R)}{\omega_k I_1(\mu_k R_2) - K_1(\mu_k R_2)} f(\mu_k Z) =$$

$$= \frac{\rho_z}{\rho_s} \sum_{k=1}^{\infty} N_k^s [\Omega_k I_1(\mu_k R_2) - K_1(\mu_k R_2)] \Psi_k^z(R) f(\mu_k Z), \quad (18)$$

где введено обозначение функции

$$\Psi_k^z(R) = \frac{\omega_k I_0(\mu_k R) + K_0(\mu_k R)}{\omega_k I_1(\mu_k R_2) - K_1(\mu_k R_2)}; \quad (19)$$

$$U^p(Z, R) = \sum_{k=1}^{\infty} N_k^p [K_0(\mu_k R) - \eta_k I_0(\mu_k R)] f(\mu_k Z) =$$

$$= -\frac{\rho_p}{\rho_z} \sum_{k=1}^{\infty} [M_k^z I_1(\mu_k R_3) - N_k^z K_1(\mu_k R_3)] \frac{K_0(\mu_k R) - \eta_k I_0(\mu_k R)}{K_1(\mu_k R_3) + \eta_k I_1(\mu_k R_3)} f(\mu_k Z) =$$

$$= \frac{\rho_p}{\rho_s} \sum_{k=1}^{\infty} [\Omega_k I_1(\mu_k R_2) - K_1(\mu_k R_2)] \frac{\omega_k I_1(\mu_k R_3) - K_1(\mu_k R_3)}{\omega_k I_1(\mu_k R_2) - K_1(\mu_k R_2)} \Psi_k^p(R) f(\mu_k Z), \quad (20)$$

где введено обозначение функции

$$\Psi_k^p(R) = \frac{\eta_k I_0(\mu_k R) - K_0(\mu_k R)}{\eta_k I_1(\mu_k R_3) + K_1(\mu_k R_3)}. \quad (21)$$

Таким образом, функции потенциала $U^s(Z, R)$ в каждой области среды полностью определяются значениями коэффициентов N_k^s .

Эти коэффициенты зависят от конструкции электрического зонда, размеров и места расположения на цилиндрической поверхности D_1 источников тока и напряжения. Поэтому для данного электрического зонда необходимо найти значения коэффициентов N_k^s в выражении для функции потенциала $U^s(Z, R)$ при заданных граничных условиях (6) и (7) на цилиндрической поверхности D_1 .

Запишем выражение для потенциала (15) на цилиндрической поверхности D_1 в виде

$$U^s(Z, R_1) = \sum_{k=1}^{\infty} N_k^s [\Omega_k I_0(\mu_k R_1) + K_0(\mu_k R_1)] f(\mu_k Z). \quad (22)$$

Воспользуемся условием ортогональности собственных функций $f(\mu_k Z)$. Умножим равенство (22) на функцию $\frac{2}{Z_4 - Z_1} f(\mu_k Z)$ и проинтегрируем в интервале $Z_1 \leq Z \leq Z_4$. В результате получим

$$\frac{2}{Z_4 - Z_1} \int_{Z_1}^{Z_4} U^s(Z, R_1) f(\mu_k Z) dZ = N_k^s [\Omega_k I_0(\mu_k R_1) + K_0(\mu_k R_1)]. \quad (23)$$

В интервалах $Z_m \leq Z \leq Z_{m+1}$ на цилиндрической поверхности D_1 представим граничные условия в виде функций $U_{s,m}(Z, R_1)$. Поэтому равенство (23) запишем в виде

$$\begin{aligned} N_k^s [\Omega_k I_0(\mu_k R_1) + K_0(\mu_k R_1)] = \\ = \frac{2}{Z_4 - Z_1} \int_{Z_1}^{Z_4} U^s(Z, R_1) f(\mu_k Z) dZ = \frac{2}{Z_4 - Z_1} \int_{Z_1}^{Z_2} U_1^s(Z, R_1) f(\mu_k Z) dZ + \\ + \frac{2}{Z_4 - Z_1} \int_{Z_2}^{Z_3} U_2^s(Z, R_1) f(\mu_k Z) dZ + \frac{2}{Z_4 - Z_1} \int_{Z_3}^{Z_4} U_3^s(Z, R_1) f(\mu_k Z) dZ. \end{aligned} \quad (24)$$

В соответствии с граничными условиями (6) в интервалах $Z_m \leq Z \leq Z_{m+1}$, $m = 1, 3$, значение потенциала $U_m^s(Z, R_1)$ на цилиндрической поверхности D_1 должно быть равным нулю. Поэтому из (24) следует

$$N_k^s [\Omega_k I_0(\mu_k R_1) + K_0(\mu_k R_1)] = \frac{2}{Z_4 - Z_1} \int_{Z_2}^{Z_3} U_2^s(Z, R_1) f(\mu_k Z) dZ, \quad (25)$$

то есть значения коэффициентов N_k^s определяются функцией $U_2^s(Z, R_1)$ в интервале $Z_2 \leq Z \leq Z_3$.

Принимая во внимание, что на концах интервала $Z_2 \leq Z \leq Z_3$ значение потенциала должно быть равным нулю, выражение для потенциала $U_2^s(Z, R)$ запишем в виде ряда по собственным функциям $f_2(\mu_{k2}Z)$:

$$U_2^s(Z, R) = \sum_{k2=1}^{\infty} b_{k2} [\Omega_{k2} I_0(\mu_{k2}R) + K_0(\mu_{k2}R)] f_2(\mu_{k2}Z), \quad (26)$$

где

$$f_2(\mu_{k2}Z) = \sin \mu_{k2} (Z - Z_2), \quad \mu_{k2} = \frac{\pi k2}{Z_3 - Z_2}, \quad k2 = 1, 2, 3 \dots \quad (27)$$

Используя выражение (26), найдем плотность электрического тока в интервале $Z_2 \leq Z \leq Z_3$ на цилиндрической поверхности D_1 :

$$\begin{aligned} j_2(Z, R_1) &= -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial U_2^s(Z, R)}{\partial R} \Big|_{R_1} = \\ &= -\frac{1}{\rho_s} \sum_{k2=1}^{\infty} b_{k2} \mu_{k2} [\Omega_{k2} I_1(\mu_{k2}R_1) - K_1(\mu_{k2}R_1)] f_2(\mu_{k2}Z). \end{aligned} \quad (28)$$

Воспользуемся условием ортогональности собственных функций $f_2(\mu_{k2}Z)$. Умножим равенство (28) на функцию $\frac{2}{Z_3 - Z_2} f_2(\mu_{k2}Z)$ и проинтегрируем в интервале $Z_2 \leq Z \leq Z_3$. В результате находим

$$b_{k2} = -\rho_s \frac{\frac{2}{Z_3 - Z_2} \int_{Z_2}^{Z_3} j_2(Z, R_1) f_2(\mu_{k2}Z) dZ}{\mu_{k2} [\Omega_{k2} I_1(\mu_{k2}R_1) - K_1(\mu_{k2}R_1)]}. \quad (29)$$

По условию данной задачи имеются N токовых электродов, через которые пропускается электрический ток I_n , $n = 1-N$. Электроды расположены симметрично относительно центра изоляционного покрытия на расстоянии $Z_2 + z_n$, $n = 1-N$. Каждый токовый электрод шириной $2h$ создает определенную плотность электрического тока, которую можно записать в виде

$$j_n = \frac{I_n}{2\pi R_1 (2h)}. \quad (30)$$

На изоляционном покрытии зонда за пределами токовых электродов радиальная плотность электрического тока должна быть равной нулю.

С учетом этого вычислим интеграл в выражении (29):

$$\begin{aligned} \frac{2}{Z_3 - Z_2} \int_{Z_2}^{Z_3} j_2(Z, R_1) f_2(\mu_{k2} Z) dZ &= \sum_{n=1}^N \frac{2}{Z_3 - Z_2} \int_{Z_2 + z_n - h}^{Z_2 + z_n + h} j_2(Z, R_1) f_2(\mu_{k2} Z) dZ = \\ &= \sum_{n=1}^N \frac{2}{Z_3 - Z_2} \int_{Z_2 + z_n - h}^{Z_2 + z_n + h} j_n f_2(\mu_{k2} Z) dZ = \frac{1}{2\pi R_1 (2h)} \sum_{n=1}^N I_n v_{k2,n}, \end{aligned} \quad (31)$$

где введено обозначение интеграла:

$$\begin{aligned} v_{k2,n} &= \frac{2}{Z_3 - Z_2} \int_{Z_2 + z_n - h}^{Z_2 + z_n + h} f_2(\mu_{k2} Z) dZ = \frac{2}{Z_3 - Z_2} \int_{Z_2 + z_n - h}^{Z_2 + z_n + h} \sin \mu_{k2} (Z - Z_2) dZ = \\ &= -\frac{1}{\mu_{k2}} \frac{2}{Z_3 - Z_2} [\cos \mu_{k2} (z_n + h) - \cos \mu_{k2} (z_n - h)] = \\ &= \frac{1}{\mu_{k2}} \frac{4}{Z_3 - Z_2} \sin \mu_{k2} z_n \sin \mu_{k2} h. \end{aligned} \quad (32)$$

После подстановки значений интегралов (31) в (29) находим

$$b_{k2} = -\frac{\rho_s}{4\pi R_1 h} \frac{\sum_{n=1}^N I_n v_{k2,n}}{\mu_{k2} [\Omega_{k2} I_1(\mu_{k2} R_1) - K_1(\mu_{k2} R_1)]}. \quad (33)$$

Теперь запишем выражение для потенциала (26) на цилиндрической поверхности D_1 в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_2^s(Z, R) &= \sum_{k2=1}^{\infty} b_{k2} [\Omega_{k2} I_0(\mu_{k2} R_1) + K_0(\mu_{k2} R_1)] f_2(\mu_{k2} Z) = \\ &= -\frac{\rho_s}{4\pi R_1 h} \sum_{k2=1}^{\infty} \frac{\Omega_{k2} I_0(\mu_{k2} R_1) + K_0(\mu_{k2} R_1)}{\mu_{k2} [\Omega_{k2} I_1(\mu_{k2} R_1) - K_1(\mu_{k2} R_1)]} \left(\sum_{n=1}^N I_n v_{k2,n} \right) f_2(\mu_{k2} Z) = \\ &= -\frac{\rho_s}{4\pi R_1 h} \sum_{k2=1}^{\infty} B_{k2} \left(\sum_{n=1}^N I_n v_{k2,n} \right) f_2(\mu_{k2} Z), \end{aligned} \quad (34)$$

где для упрощения записи введено обозначение

$$B_{k2} = \frac{\Omega_{k2} I_0(\mu_{k2} R_1) + K_0(\mu_{k2} R_1)}{\mu_{k2} [\Omega_{k2} I_1(\mu_{k2} R_1) - K_1(\mu_{k2} R_1)]}. \quad (35)$$

После подстановки значения потенциала (34) в (25) получаем равенство

$$\begin{aligned}
 & N_k^s [\Omega_k I_0(\mu_k R_1) + K_0(\mu_k R_1)] = \\
 & = -\frac{\rho_s}{4\pi R_1 h} \frac{2}{Z_4 - Z_1} \int_{Z_2}^{Z_3} \left[\sum_{k2=1}^{\infty} B_{k2} \left(\sum_{n=1}^N I_n \nu_{k2,n} \right) f_2(\mu_{k2} Z) \right] f(\mu_k Z) dZ = \\
 & = -\frac{\rho_s}{4\pi R_1 h} \sum_{k2=1}^{\infty} B_{k2} \left(\sum_{n=1}^N I_n \nu_{k2,n} \right) \left[\frac{2}{Z_4 - Z_1} \int_{Z_2}^{Z_3} f_2(\mu_{k2} Z) f(\mu_k Z) dZ \right] = \\
 & = -\frac{\rho_s}{4\pi R_1 h} \sum_{k2=1}^{\infty} B_{k2} \left(\sum_{n=1}^N I_n \nu_{k2,n} \right) H_{k,k2}, \quad (36)
 \end{aligned}$$

где введено обозначение интегралов

$$H_{k,k2} = \frac{2}{Z_4 - Z_1} \int_{Z_2}^{Z_3} f_2(\mu_{k2} Z) f(\mu_k Z) dZ. \quad (37)$$

Отсюда находим

$$N_k^s = -\frac{\rho_s \sum_{k2=1}^{\infty} B_{k2} \left(\sum_{n=1}^N I_n \nu_{k2,n} \right) H_{k,k2}}{4\pi R_1 h [\Omega_k I_0(\mu_k R_1) + K_0(\mu_k R_1)]}. \quad (38)$$

После подстановки значений коэффициентов (38) в (15) получаем выражение для потенциала в виде

$$\begin{aligned}
 & U^s(Z, R) = -\frac{\rho_s}{4\pi R_1 h} \times \\
 & \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Omega_k I_0(\mu_k R) + K_0(\mu_k R)}{\Omega_k I_0(\mu_k R_1) + K_0(\mu_k R_1)} \sum_{k2=1}^{\infty} B_{k2} \left(\sum_{n=1}^N I_n \nu_{k2,n} \right) H_{k,k2} f(\mu_k Z). \quad (39)
 \end{aligned}$$

Запишем выражение для потенциалов на цилиндрической поверхности D_1 в виде

$$\begin{aligned}
 & U^s(Z, R_1) = -\frac{\rho_s}{4\pi R_1 h} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{k2=1}^{\infty} B_{k2} \left(\sum_{n=1}^N I_n \nu_{k2,n} \right) H_{k,k2} f(\mu_k Z) = \\
 & = -\frac{\rho_s}{4\pi R_1 h} \sum_{n=1}^N I_n \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{k2=1}^{\infty} \nu_{k2,n} B_{k2} H_{k,k2} f(\mu_k Z). \quad (40)
 \end{aligned}$$

Теперь найдем значения токов I_n , $n = 1-N$ при заданных условиях, когда все токовые электроды имеют потенциал U_0 .

Отметим, что потенциал в любой точке пространства определяется суммой потенциалов, создаваемых токами с каждого электрода. С учетом этого для потенциалов электродов на цилиндрической поверхности D_1 запишем следующую систему уравнений:

$$U^s(Z_2 + z_1, R_1) = U_0 = \rho_s \sum_{n=1}^N a_{1,n} I_n; \quad (41)$$

$$U^s(Z_2 + z_2, R_1) = U_0 = \rho_s \sum_{n=1}^N a_{2,n} I_n; \quad (42)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$U^s(Z_2 + z_{N-1}, R_1) = U_0 = \rho_s \sum_{n=1}^N a_{N-1,n} I_n; \quad (43)$$

$$U^s(Z_2 + z_N, R_1) = U_0 = \rho_s \sum_{n=1}^N a_{N,n} I_n, \quad (44)$$

где введены обозначения коэффициентов

$$a_{j,n} = -\frac{1}{4\pi R_1 h} \sum_{k=1}^{\infty} \left[\sum_{k_2=1}^{\infty} v_{k_2,n} B_{k_2} H_{k,k_2} \right] f[\mu_k(Z_2 + z_j)]. \quad (45)$$

Запишем эту систему уравнений в матричном виде:

$$\mathbf{A} \times \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{N-1} \\ I_N \end{vmatrix} = \frac{1}{\rho_s} \begin{vmatrix} U_0 \\ U_0 \\ \vdots \\ U_0 \\ U_0 \end{vmatrix}, \quad (46)$$

где матрица коэффициентов имеет вид

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & \dots & a_{1,N} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & a_{N-1,N-1} & a_{N-1,N} \\ a_{N,1} & \dots & \dots & a_{N,N-1} & a_{N,N} \end{vmatrix}. \quad (47)$$

Из выражения (46), используя обратную матрицу, находим значения токов, вытекающих с каждого электрода:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{N-1} \\ I_N \end{pmatrix} = \frac{1}{\rho_s} \mathbf{A}^{-1} \times \begin{pmatrix} U_0 \\ U_0 \\ \vdots \\ U_0 \\ U_0 \end{pmatrix} = \frac{U_0}{\rho_s} \mathbf{A}^{-1} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (48)$$

На рис. 2 показано распределение токов на электродах, имеющих одинаковый потенциал $U_0 = 1В$.

На цилиндрической поверхности зонда потенциал будет изменяться по сложному закону (рис. 3). При этом вблизи токовых электродов часть электрического тока протекает вначале в осевом направлении, а затем его течение изменяется на радиальное направление. Таким образом, благодаря тому, что все электроды имеют одинаковый потенциал, в пределах зонда электрический ток распространяется только в радиальном направлении.

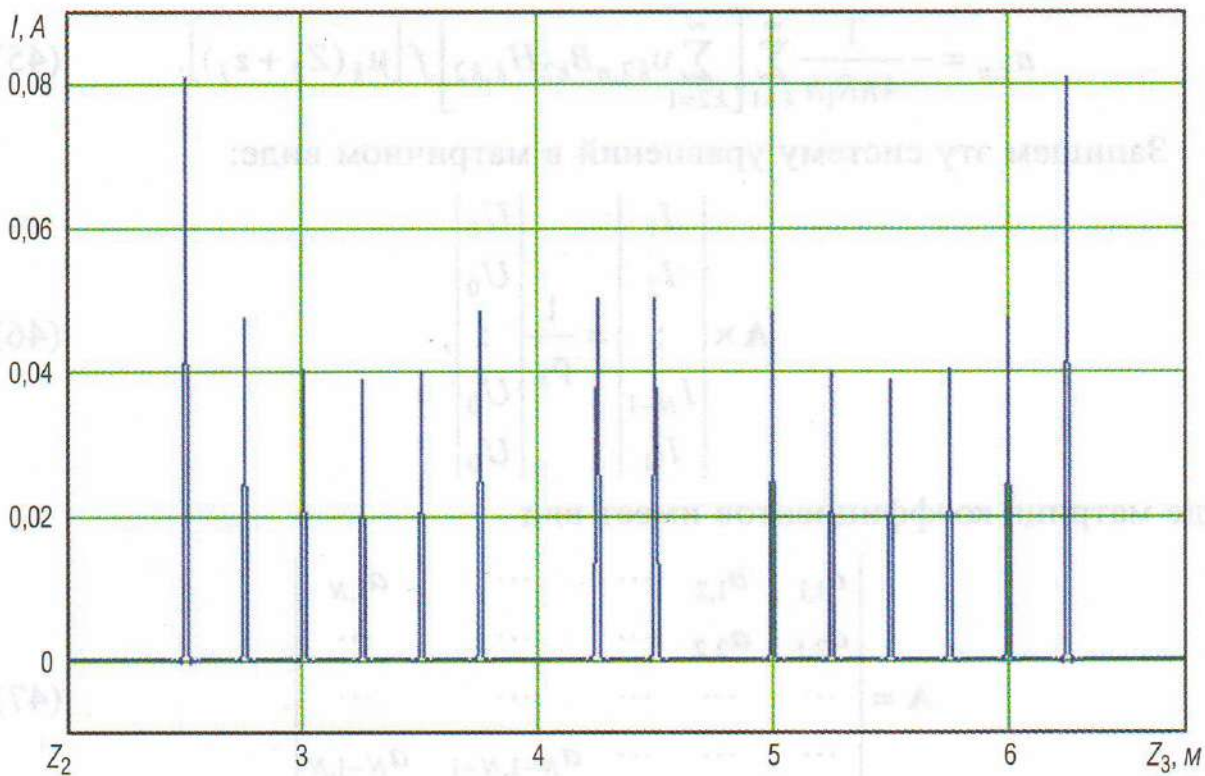


Рис. 2. Распределение токов на электродах зонда

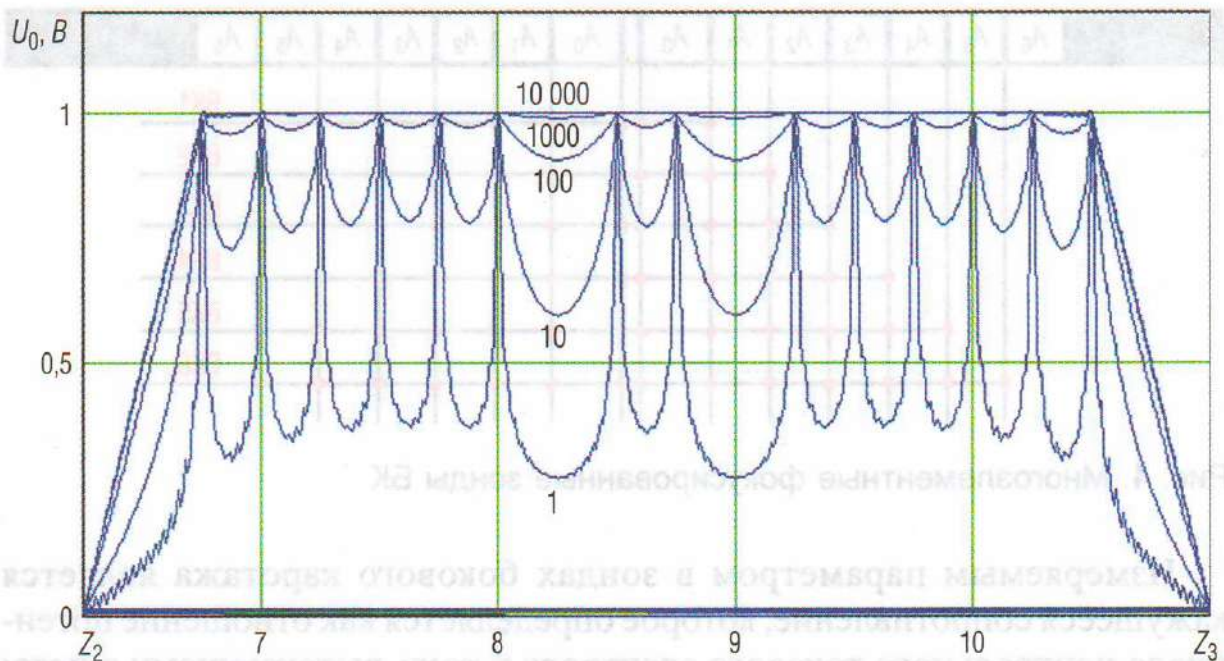


Рис. 3. Изменение потенциала на поверхности электрического зонда. Шифр кривых: отношение ρ_p/ρ_s

Используя полученные выражения, в зависимости от количества и места расположения токовых электродов можно рассчитать многоэлементные зонды различной конструкции.

В качестве примера для практической реализации можно предложить следующие зонды бокового каротажа (рис. 4):

- ВК1 – В 1,75 A_1 0,50 A_0 0,25 A_0 0,50 A_1 1,75 В
- ВК2 – В 1,50 (A_2-A_1) 0,50 A_0 0,25 A_0 0,50 (A_1-A_2) 1,50 В
- ВК3 – В 1,25 (A_3-A_1) 0,50 A_0 0,25 A_0 0,50 (A_1-A_3) 1,25 В
- ВК4 – В 1,00 (A_4-A_1) 0,50 A_0 0,25 A_0 0,50 (A_1-A_4) 1,00 В
- ВК5 – В 0,75 (A_5-A_1) 0,50 A_0 0,25 A_0 0,50 (A_1-A_5) 0,75 В
- ВК6 – В 0,50 (A_6-A_1) 0,50 A_0 0,25 A_0 0,50 (A_1-A_6) 0,50 В

Здесь в интервале $Z_3 - Z_2 = 4,75$ м на изоляционном покрытии симметрично установлены четырнадцать кольцевых токовых электродов. Причем два центральных электрода A_0 предназначены для измерения радиального значения электрического тока I_0 в центре каждого зонда, а на остальных электродах за счет регулировки тока устанавливаются потенциалы, равные потенциалу измерительных электродов. Расстояние между токовыми электродами равно 0,25 м.

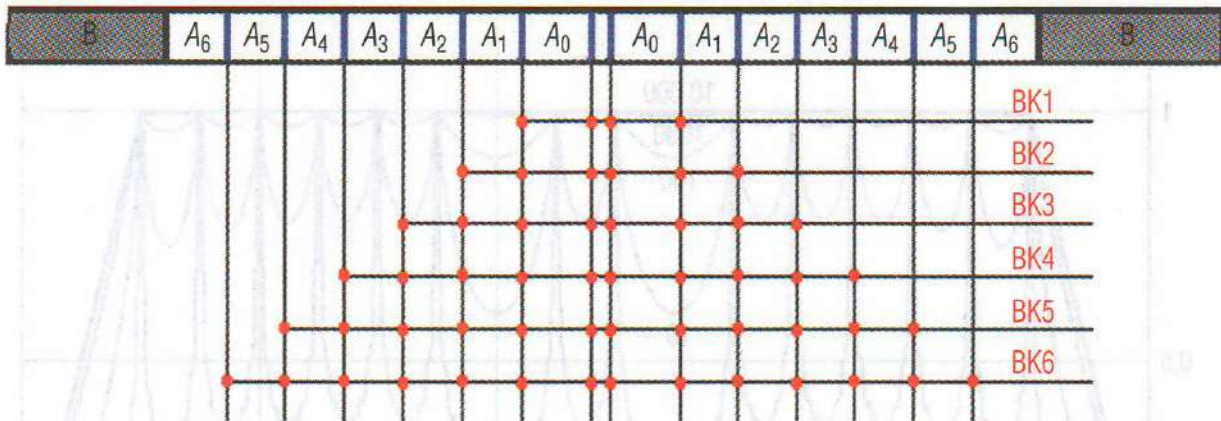


Рис. 4. Многоэлементные фокусированные зонды БК

Измеряемым параметром в зондах бокового каротажа является кажущееся сопротивление, которое определяется как отношение потенциала центрального токового электрода к току, вытекающему с него:

$$\rho k = U_0 / I_0. \quad (49)$$

На рис. 5 показаны зависимости изменения $\rho k / \rho_s = f(\rho_p / \rho_s)$ для зондов ВК1 и ВК6 при двух значениях диаметра скважины D_c .

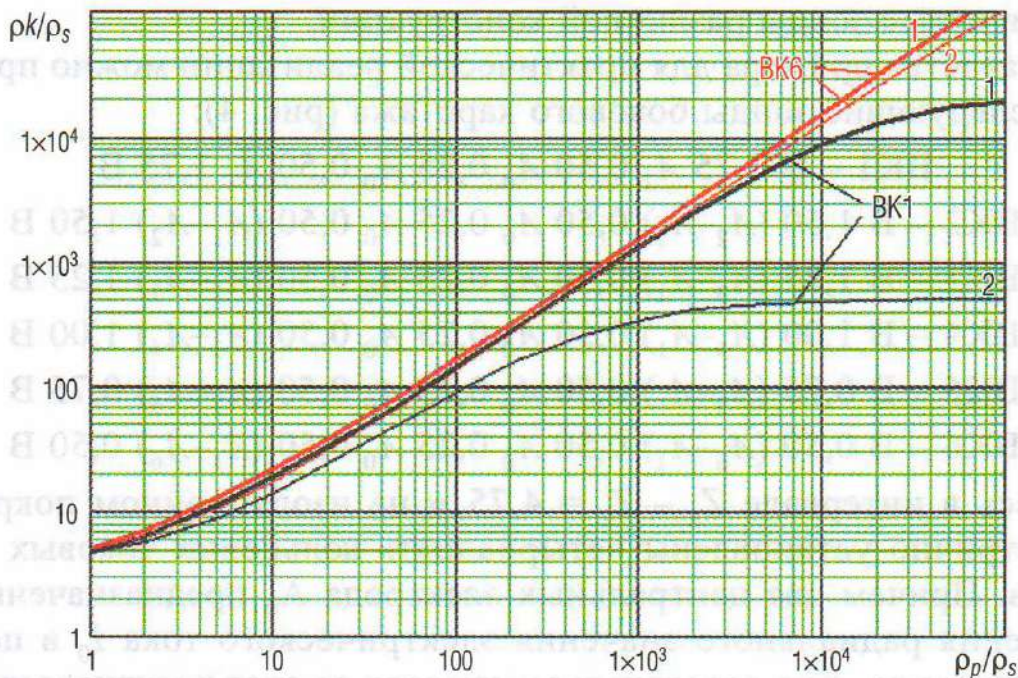


Рис. 5. Зависимость кажущегося сопротивления от диаметра скважины. Шифр кривых: $D_c = 124$ мм (1); $D_c = 216$ мм (2)

Из приведенных графиков видно, что влияние диаметра скважины на более длинные зонды ВК6 существенно меньше, чем на короткие зонды ВК1.

На рис. 6 приведены палетки для зондов бокового каротажа, рассчитанные для диаметра скважины 216 мм с понижающей ($\rho_p/\rho_{zp} = 15$) и повышающей ($\rho_p/\rho_{zp} = 0,2$) зоной проникновения.

Из приведенных графиков видно, что кажущееся сопротивление, измеренное зондами БК, зависит от параметров зоны проникновения, благодаря чему можно выделять коллекторы в геологическом разрезе скважины.

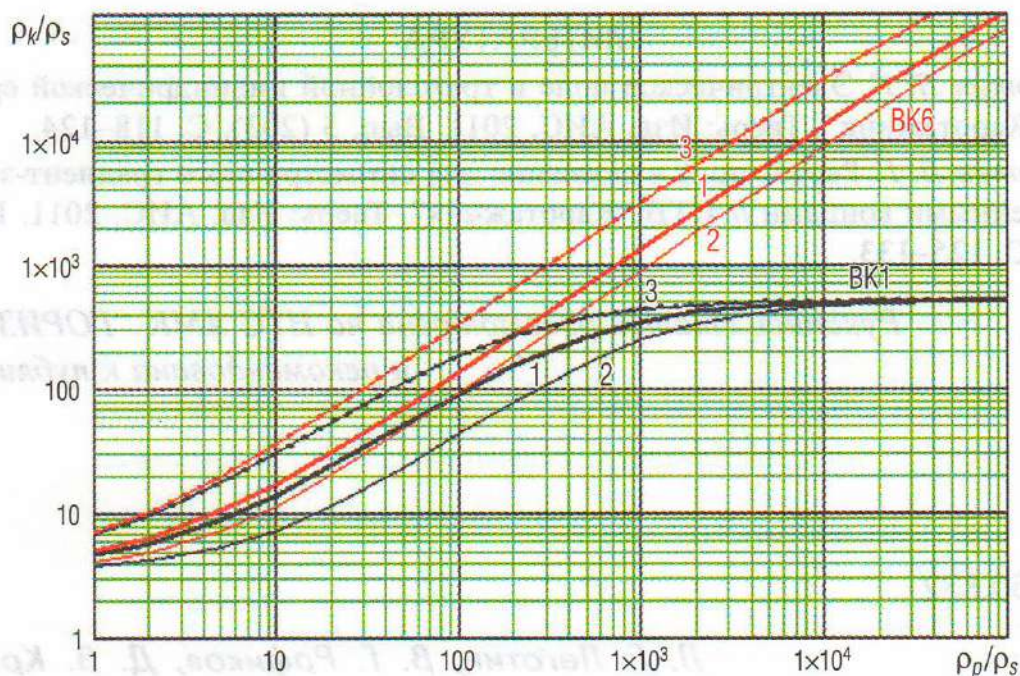


Рис. 6. Зависимость кажущегося сопротивления от параметров зоны проникновения. Шифр кривых: 1 – зона проникновения отсутствует; 2 – понижающая зона проникновения $\rho_p/\rho_{zp} = 15$, $D_{zp}/D_c = 3$; 3 – повышающая зона проникновения $\rho_p/\rho_{zp} = 0,2$, $D_{zp}/D_c = 3$

На рис. 5 и 6 для наглядности приведены палетки только для двух зондов ВК1 и ВК6. Палетки по остальным зондам занимают промежуточное значение.

Конструкция многоэлементного электрического зонда должна быть выбрана таким образом, чтобы одновременно с зондами бокового каротажа появлялась возможность реализации симметричных градиент-зондов [2]:

$$GZ_1 - A_1 \ 0,50 \ M \ 0,25 \ N \ 0,50 \ B_1$$

$$GZ_2 - A_2 \ 0,75 \ M \ 0,25 \ N \ 0,75 \ B_2$$

$$GZ_3 - A_3 \ 1,00 \ M \ 0,25 \ N \ 1,00 \ B_3$$

$$GZ_4 - A_4 \ 1,25 \ M \ 0,25 \ N \ 1,25 \ B_4$$

$$GZ_5 - A_5 \ 1,50 \ M \ 0,25 \ N \ 1,50 \ B_5$$

$$GZ_6 - A_6 \ 1,75 \ M \ 0,25 \ N \ 1,75 \ B_6$$

Благодаря этому существенно расширяются функциональные и методические возможности многоэлементных зондов электрического каротажа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леготин Л. Г. Электрическое поле в трехслойной цилиндрической среде // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2011. Вып. 5 (203). С. 118–124.
2. Леготин Л. Г. Расчет поля в скважине для симметричного градиент-зонда с заземленными концами // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2011. Вып. 5 (203). С. 125–133.

*Рукопись статьи рассмотрена на НТС АМК "ГОРИЗОНТ"
и рекомендована к публикации*

УДК 550.832