

ИНДУКЦИОННЫЙ КАРОТАЖ В ОБСАЖЕННЫХ СКВАЖИНАХ

Ратушняк А.Н., Байдилов С.В. – Институт геофизики, г. Екатеринбург
Теплухин В.К. – ООО «ПетроТул», г. Октябрьский, Башкортостан

Аннотация. Описан способ индукционного каротажа обсаженных геологоразведочных скважин для определения удельного сопротивления горных пород с помощью индукционных частотных зондирований с несимметричной квадрупольной установкой, состоящей из двух магнитных диполей с различными моментами встречного направления. Показана информативность квадратур осевой составляющей магнитной индукции при определении удельного сопротивления среды. Определена дальность исследований заколонного пространства в зависимости от размера квадрупольной установки. Приведены материалы физического моделирования по оценке затухания электромагнитного поля на различных частотах.

Гармоническое электромагнитное поле, проводящая обсадная колонна, индукционные частотные зондирования, квадрупольный индукционный источник.

INDUCTION LOGGING IN CASSED WELLS

Ratushniak A.N., Baydikov S.V. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg
Teplukhin V.K. – "PetroTool" LLC, Oktyabrsky, Bashkortostan

Abstract. There is a method of induction logging cased wells exploration to determine the resistivity of rocks with the help of induction frequency soundings with asymmetric quadrupole unit, consisting of two magnetic dipoles with different moment's of counter direction. It is shown the information content of the quadrature component of the axial magnetic flux density in determining medium resistivity It is determined a distance annulus studies according to the size of the quadrupole system. There are materials of physical modeling to evaluate the electromagnetic field attenuation at different frequencies.

Harmonic electromagnetic field, conducting casing, induction frequency sensing, quadrupole induction source.

Введение

Задачей исследований электромагнитными методами каротажа через обсадную колонну скважины является определение удельного электрического сопротивления продуктивных на углеводороды пластов с учетом неоднородностей в радиальном направлении (зоны цементации и зоны проникновения фильтрата бурового раствора).

Решение этих задач позволяет выполнить оценку нефтенасыщенности пластов-коллекторов, текущее состояние выработки продуктивных пластов и уточнить положение невырабатываемых участков залежи.

Для определения удельного электрического сопротивления горных пород за металлической обсадной колонной скважины используется метод токового электрического каротажа, предложенный Л.М. Альпиным (Альпин, 1939). Метод реализуется с помощью зонда каротажа сопротивлений, состоящего из токовых и измеритель-

ных электродов, с измерением разности напряжения, возникающего при протекании тока по обсадной колонне и по породам вблизи скважины, и опробуется в нефтепромысловых скважинах (Аксельрод, 2000; Кашик и др., 2004; Феофилов и др., 2008).

В патенте (Vail, William, 1988) предложен способ индукционного каротажа, в котором сопротивление вмещающих пород за обсадной колонной скважины определяют по результату вычитания двух измерений осевой составляющей магнитной индукции, создаваемых гармоническим током различной частоты в последовательно включаемых двух соосных генераторных индуктивных катушках, расположенных выше и ниже измерительной катушки на нескольких частотах диапазона от 0,001 до 20 Гц.

Способ не нашел практического применения, поскольку каждое из двух изме-

рений магнитного поля содержит три слагаемых, убывающих по порядку величины: первое – первичное магнитное поле, создаваемое током генераторной катушки в однородной среде, второе – поле от проводящей обсадной колонны и третье слагаемое – поле от проводящих вмещающих пород. Вклад последнего слагаемого гораздо меньше слагаемого от проводящей обсадной колонны из-за высокой контрастности их удельного сопротивления и существенно меньше первого слагаемого – первичного поля, создаваемого током генераторной катушки. Каждое из двух измерений содержит очень малую величину полезной (аномальной) части и величина их разности, соответственно, так же будет составлять малую величину, определять по которой величину удельного сопротивления пород затруднительно.

Гармоническое магнитное поле магнитного диполя на оси обсаженной скважины

В настоящей работе изучена возможность применения индукционных частотных зондирований при каротаже скважин для определения удельного электрического сопротивления пород за обсадной колонной.

Физико-геометрическая модель среды (рис. 1), неоднородная по удельной электрической проводимости, включает: скважину радиуса a ; скважинный снаряд с удельной электропроводностью σ_1 ; вмещающие породы с удельной электропроводностью σ_2 ; обсадную колонну с удельной электропроводностью σ_c в виде цилиндрического слоя толщиной h . Цилиндрическую обсадную колонну, обладающую низким удельным электрическим сопротивлением, аппроксимируем S -слоем с продольной проводимостью $S = \sigma_c \cdot h = \text{const}$ при $\sigma_c \rightarrow \infty, h \rightarrow 0$ в виде тонкого цилиндра, находящегося на границе сред с удельными электропроводностями σ_1 и σ_2 .

Для определения величины удельного электрического сопротивления среды через обсадную колонну скважины предлагается использовать компенсационный способ измерений, а именно: индукционные час-

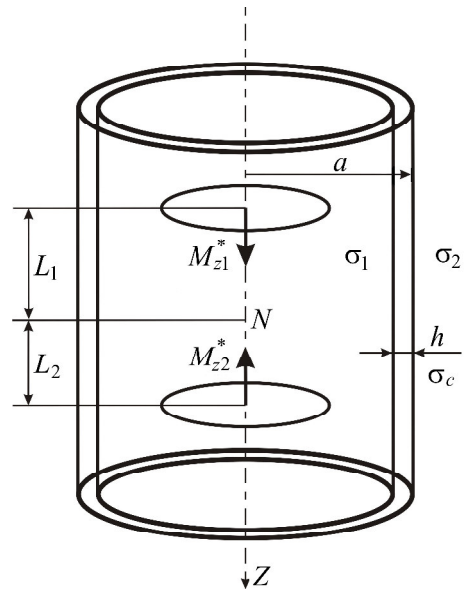


Рис. 1. Несимметричная квадрупольная установка соосных магнитных диполей с моментами M_{z1}^* и M_{z2}^* и обсадная колонна в виде проводящего S -слоя на границе скважина–среда

тотные зондирования с несимметричной квадрупольной установкой, состоящей из двух магнитных диполей с различными моментами встречного направления вдоль оси Z скважины $M_{z1}^* \neq -M_{z2}^*$ (Теплухин и др., 2015).

В точке измерений N , расположенной на этой же оси на различном расстоянии $L_1 \neq L_2$ между диполями, измеряется осевая составляющая магнитной индукции $\text{Im } B_z$, создаваемая при одновременно включенных токах в источниках (см. рис. 1).

Перед проведением измерений в скважине проводят компенсацию вклада проводящей обсадной колонны в измеряемое магнитное поле. Компенсация заключается в подборе таких моментов M_{z1}^* и M_{z2}^* и расстояний L_1, L_2 , чтобы измеряемая в точке N величина $\text{Im } B_z$, при помещении установки внутрь обсадной колонны в воздухе, была скомпенсирована (равна нулю). Помещая установку в исследуемую обсаженную скважину и проводя измерения в исследуемом интервале глубин за счет индукции и возникновения вихревых токов во вмещающей проводящей среде, измеряемая величина $\text{Im } B_z$ будет отличаться от нуля.

В работе (Ратушняк и др., 2016) приведено решение задачи о гармоническом электромагнитном поле осевого магнитного диполя в цилиндрически-симметричной неоднородной среде с проводящим S -слоем на границе сред с удельными электропроводностями σ_1 (пространство скважины) и σ_2 (среда). Электромагнитное поле определено с помощью вспомогательного вектор-потенциала магнитного типа, который в каждой из сред имеет вертикальную и радиальную составляющие. Осевая составляющая напряженности магнитного поля в пространстве скважины на оси Z при $r = 0$ на расстоянии $z = L$ (разнос) от каждого диполя описывается тремя слагаемыми

$$H_{z1} = H_{zp} + H_{zc} + H_{zw}. \quad (1)$$

В случае для модели рис. 1, когда в пространстве скважины находится скважинный прибор, являющийся диэлектриком ($\sigma_1 = 0$), слагаемые в (1) описывают соответственно:

$$H_{zp} = \frac{M_z^*}{2\pi L^3} \quad \text{— первичное поле магнитного диполя в непроводящей среде;} \quad (2)$$

$$H_{zc} = -\frac{M_z^*}{2\pi^2} \int_0^\infty \lambda^2 \frac{K_1(\lambda a)}{I_1(\lambda a)} \cos \lambda L d\lambda \quad \text{— поле стоячей волны в скважине;} \quad (3)$$

$$H_{zw} = \frac{M_z^*}{2\pi^2} \int_0^\infty \lambda^2 \frac{K_1(ma)}{I_1(\lambda a)G} \cos \lambda L d\lambda \quad \text{— поле бегущей волны,}$$

где $m^2 = \lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma_2$; $G = \lambda a I_0(\lambda a) K_1(ma) + ma K_0(ma) I_1(\lambda a) + j\omega\mu_0 S a I_1(\lambda a) K_1(ma)$; I_0 , I_1 , K_0 , K_1 — модифицированные функции Бесселя и Макдональда порядков 0 и 1.

Измерения мнимой части осевой составляющей магнитного поля $\text{Im } B_z$ обусловлены тем, что информацию об электропроводности среды в составляющей магнитного поля B_z несет только квадратура $\text{Im } B_z$.

Анализ результатов расчетов электромагнитного поля

Слагаемые H_{zp} и H_{zc} не зависят от частоты и проводимости пород σ_2 и являются вещественными величинами. Информацию об электропроводности вмещающих пород дает мнимая квадратура осевой составляющей магнитного поля, описываемая слагаемым H_{zw} . Вклад от влияния электропроводности пород в формуле (4) от поля бегущей волны в вещественную составляющую магнитного поля $\text{Re } H_z$ очень мал, которая определяется, в основном, первичным полем магнитного диполя (2) и полем стоячей волны в скважине (3).

В непроводящей среде ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ «воздух») величина магнитного поля на фиксированном разnose L зависит от частоты тока источника f , продольной про-

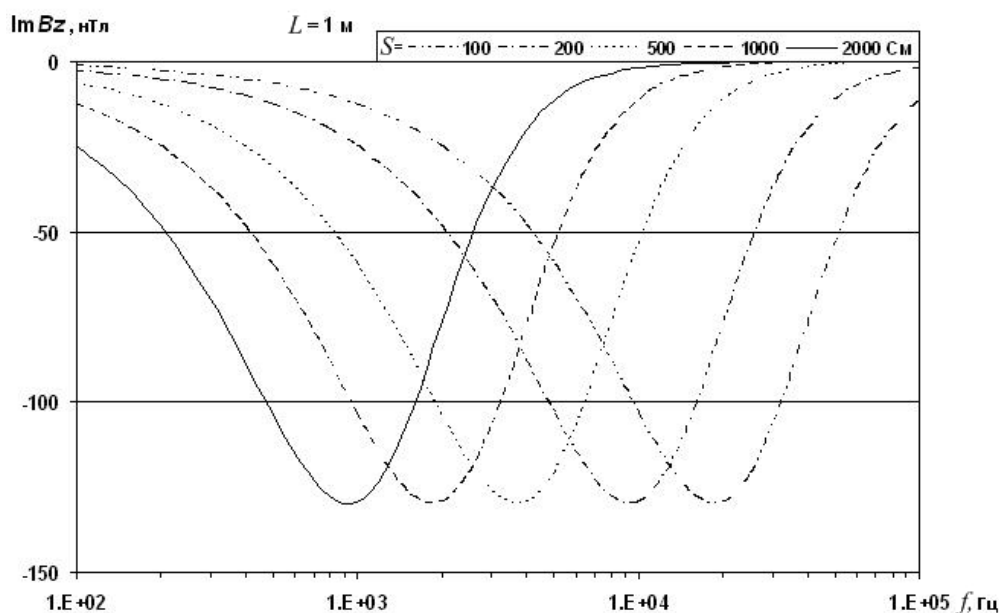


Рис. 2. Частотные кривые $\text{Im } B_z$ [нТл] в обсадной колонне радиусом $a = 0,075$ м в непроводящей среде при $M_{z1}^* = 1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ на разnose $L = 1$ м. Шифр кривых — S [См]

димости обсадной колонны S и ее радиуса a . Расчеты частотной зависимости магнитного поля в скважине радиусом $a = 0,075$ м при $M_{z1}^* = 1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ на разnose $L = 1$ м при различных величинах продольной проводимости S приведены на рис. 2. Экстремальное значение величины магнитного поля для всех величин S определяется только радиусом обсадной колонны, а частота, соответствующая экстремумам, изменяется обратно пропорционально величине продольной проводимости S . Чем больше величина продольной проводимости S , тем на более низкой частоте величина магнитного поля $\text{Im } B_z$ достигает экстремума.

При $\sigma_c = 2 \cdot 10^5 \text{ См/м}$ и толщине $h = 0,01$ м примем фиксированную величину продольной проводимости обсадной колонны $S = 2 \cdot 10^3 \text{ См}$. Высокая удельная электропроводность обсадной колонны существенно ограничивает частотный диапазон измерений магнитного поля для определения удельного сопротивления вмещающих пород из-за явления скин-эффекта. В работе (Ратушняк и др., 2016) показано, что экстремальные величины $\text{Im } B_z$ от соосного магнитного диполя в проводящей среде

(без обсадной колонны) для зондов с разносами порядка $L = 1$ м наблюдаются в диапазоне около 1 МГц. Исходя из толщины скин-слоя

$$h = \frac{1}{\text{Re}(k)} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}}, \text{ где } k - \text{ волновое число}$$

среды [м^{-1}], частота, на которой поле убывает в e раз, равна $f = 12,7 \text{ кГц}$, на более высоких частотах электромагнитное поле будет экранироваться проводящей колонной.

На рис. 3 приведены графики частотных зависимостей $\text{Im } B_z$ на различных разносах L при тех же параметрах источника и колонны.

Величина $\text{Im } B_z$ изменяется с изменением длины зонда пропорционально L^{-3} . На разnose $L = 1$ м величина $\text{Im } B_z = -129,46 \text{ нТл}$ при частоте тока $f = 1 \text{ кГц}$. Назовем эту частоту основной для данной величины $S = 2 \cdot 10^3 \text{ См}$. При увеличении разноса до $L = 1,5$ м на этой частоте величина поля уменьшается до $\text{Im } B_z = -38,41 \text{ нТл}$.

Для компенсации влияния S -слоя на измеряемую величину $\text{Im } B_z$ соотношение моментов диполей встречного направления должно быть равно $M_{z1}^*/M_{z2}^* = L_1^3/L_2^3 = 3,375$. При равных величинах радиусов катушек

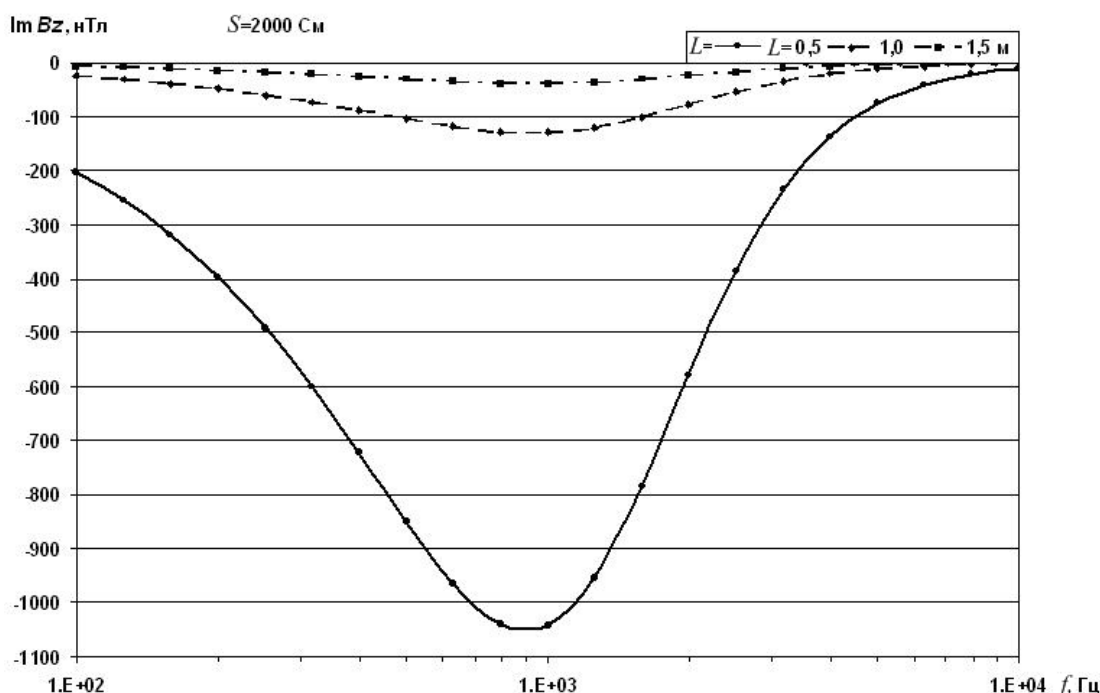


Рис. 3. Частотные кривые $\text{Im } B_z$ [нТл] в обсадной колонне радиусом $a = 0,075$ м в непроводящей среде при $M_{z1}^* = 1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$, $S = 2 \cdot 10^3 \text{ См}$, на различных разносах L (шифр кривых)

требуемое соотношение моментов пропорционально отношению произведения тока на число витков в катушке $M_{z1}^*/M_{z2}^* = J_1 v_1 / J_2 v_2$. При заданной конструкции с фиксированным целым числом витков в контурах и расстоянием между ними, точная компенсация на частотах, близких к экстремуму $\text{Im } B_z$, достигается прецизионной регулировкой силы тока в одном из магнитных диполей.

На рис. 4 приведены кривые спектральных характеристик $\text{Im } B_z$ на оси скважины при $a = 0,075$ м; $S = 2 \cdot 10^3$ См от двух диполей со встречными моментами, в зависимости от различного удельного электрического сопротивления вмещающей среды. Для компенсации величины $\text{Im } B_z$ в точке измерений от тока в первом диполе на разnose $L_1 = 1,0$ м величина встречного момента второго диполя, находящегося на разnose $L_2 = 1,5$ м, должна быть близка к значению $M_{z2}^* = -3,4 \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

Различия амплитуд частотных кривых $\text{Im } B_z$ обусловлено различным удельным электрическим сопротивлением вмещающей среды в заколонном пространстве. Частоты, соответствующие экстремальным величинам $\text{Im } B_z$, определяются только ха-

рактеристиками обсадной колонны: радиусом a и продольной проводимостью S (толщиной h и удельной электропроводностью колонны).

Величину ρ среды удобно определять по размаху амплитуды поля

$$\Delta \text{Im } B_z(\rho) = \text{Im } B_z(\text{max}) - \text{Im } B_z(\text{min}),$$

графики которой приведены на рис. 5 при $a = 0,075$ м; $S = 2 \cdot 10^3$ См от двух диполей со встречными моментами с различными сочетаниями разnosов $L_1 = 1,0$ м; $L_2 = 0,5$ м и $L_1 = 1,0$ м; $L_2 = 1,5$ м.

Величина размаха амплитуды поля $\Delta \text{Im } B_z$ и разрешение по удельному электрическому сопротивлению ρ вмещающей среды в заколонном пространстве увеличивается по мере уменьшения размера несимметричной установки. Однако при этом требуется более точная компенсация магнитного поля квадрупольной установки в точке измерений.

Использование компенсационного способа измерений с несимметричной питающей индукционной установкой позволяет определять удельное электрическое сопротивление вмещающей среды за обсадной колонной скважины по экстремальным значениям величин мнимой части осевой со-

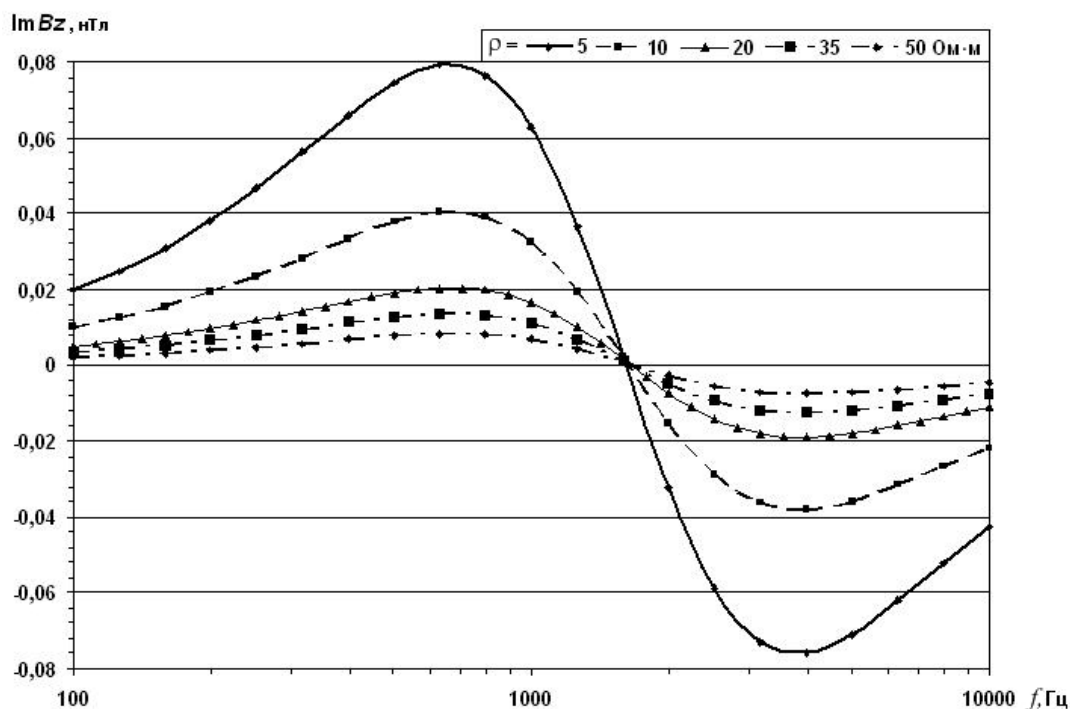


Рис. 4. Частотные кривые $\text{Im } B_z$ [нТл] с несимметричной квадрупольной установкой в обсадной колонне с продольной проводимостью $S = 2 \cdot 10^3$ См. Шифр кривых – ρ [Ом·м]

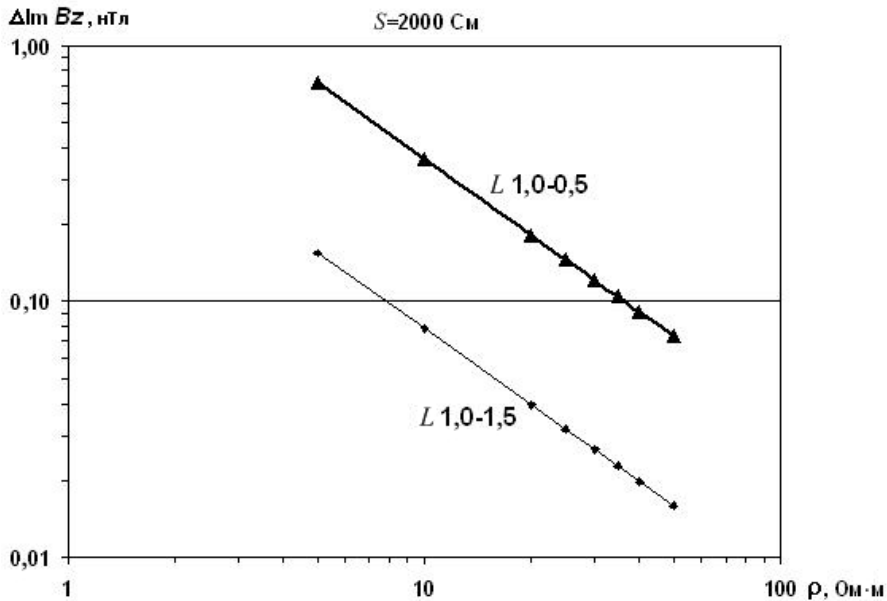


Рис. 5. Графики размаха амплитуды поля A в зависимости от ρ среды при $a = 0,075$ м; $S = 2 \cdot 10^3$ См для несимметричной индукционной установки с различными разносами $L_1 = 1,0$ м; $L_2 = 0,5$ м и $L_1 = 1,0$ м; $L_2 = 1,5$ м

ставляющей магнитной индукции $\text{Im } B_z$, измеряемой на ограниченном спектре частот.

Степень экранирования (ослабления) электромагнитного поля S -слоем можно оценить по величине азимутальной составляющей электрического поля E_ϕ , наводимой переменным магнитным полем за цилиндрическим S -слоем, рассчитанной по формуле (Ратушняк и др., 2016)

$$E_\phi = -j\omega\mu_0 \frac{M_z^*}{2\pi^2} \int_0^\infty \lambda \frac{K_1(mr)}{G} \cos\lambda L d\lambda. \quad (5)$$

Результаты расчетов $\text{Im } E_\phi$, наводимой за проводящей обсадной колонной, выполненные для параметров квадрупольной индукционной установки $L_1 = 1,0$ м и $L_2 = 1,5$ м при удельном электрическом сопротивлении среды $\rho = 10$ Ом·м на линии измерительной катушки $z = 0$, приведены на рис. 6 для частот от 2 до 5 кГц (шифр кривых).

Величины полумаксимумов напряженности электрического поля наблюдаются на расстояниях R от 0,75 до 3,5 м от оси

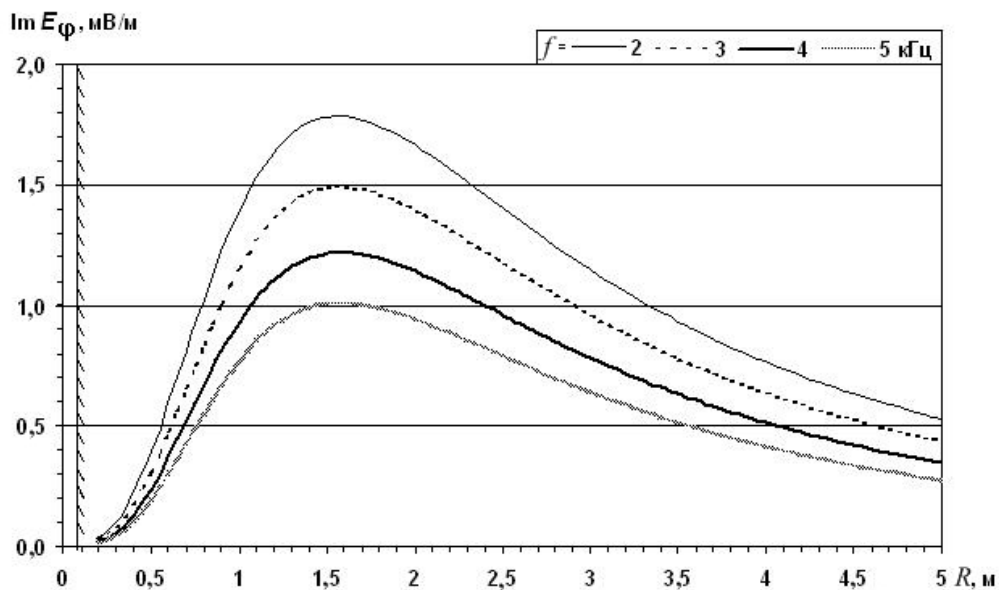


Рис. 6. Напряженность $\text{Im } E_\phi$ – составляющей электрического поля [мВ/м] от несимметричной квадрупольной установки за обсадной колонной скважины по линии $z = 0$

скважины, а максимум – на расстоянии, близком к разному удаленного магнитного диполя $L_2 = 1,5$ м. При этом электрическое поле за обсадной колонной практически не зависит от абсолютной величины удельного электрического сопротивления вмещающей среды.

Влияние магнитных свойств обсадной колонны

Обсадные колонны, как правило, обладают не только высокими значениями удельной электропроводности, но и магнитной проницаемости. Проведем с помощью математического моделирования оценку влияния магнитной проницаемости колонны на величину магнитного поля в среде за колонной.

В неоднородной по магнитной проницаемости модели среды (см. рис. 1), будем считать пространство скважины радиуса a со скважинным снарядом и вмещающие породы немагнитными $\mu = 1$, а обсадную колонну в виде цилиндрического слоя толщиной h имеющую магнитную проницаемость $\mu \gg 1$.

Используем стационарный режим источника, поскольку перемагничивание объекта переменным магнитным полем будет происходить синфазно с полем, создаваемым источником. Воспользуемся уравнением намагничивания 3D объекта постоянным магнитным полем стороннего источника в однородной немагнитной среде (Кормильцев, Ратушняк, 1999)

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^0(\mathbf{r}) - \frac{1}{4\pi} \text{grad}_A \times \int_V [\mu(\mathbf{r}') - 1] \mathbf{H}(\mathbf{r}') \text{grad}_M \left(\frac{1}{R} \right) dV, \quad (6)$$

где $\mu(\mathbf{r}')$ – магнитная проницаемость элементов объема $\mathbf{r}' \in V$; $\mathbf{H}^0(\mathbf{r})$ – напряженность магнитного поля источника в однородной среде; $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$; индексы A и M обозначают дифференцирование по точкам объема \mathbf{r}' или по точкам наблюдений \mathbf{r} .

При наличии осевой симметрии магнитное поле в цилиндрических координатах имеет две составляющие $\mathbf{H} = \mathbf{e}_\rho H_\rho + \mathbf{e}_z H_z$, поскольку отсутствуют компоненты поля

H_ϕ^0 и H_ϕ , уравнение (6) можно представить как (Кормильцев, Ратушняк, 2007)

$$\begin{cases} H_\rho = H_\rho^0 - \frac{1}{4\pi} \int_V [\mu(\mathbf{r}') - 1] (H_\rho G_{\rho\rho_0} + H_z G_{\rho z_0}) dV \\ H_z = H_z^0 - \frac{1}{4\pi} \int_V [\mu(\mathbf{r}') - 1] (H_\rho G_{z\rho_0} + H_z G_{zz_0}) dV, \end{cases} \quad (7)$$

где H_ρ, H_z – составляющие магнитного поля источника в неоднородной среде; H_ρ^0, H_z^0 – составляющие магнитного поля источника в однородной немагнитной среде; $G_{\rho\rho_0}, G_{\rho z_0}, G_{z\rho_0}, G_{zz_0}$ – компоненты тензора Грина.

Для расчета составляющих магнитного поля во внешних точках вне объема $\mathbf{r} \notin V$, необходимо предварительно определить величины \mathbf{H} во всех точках внутри объема $\mathbf{r} \in V$, т. е. решить систему объемных интегральных уравнений (7), которая сводится к системе линейных алгебраических уравнений вида $[\mathbf{A}] \cdot [\mathbf{H}] = [\mathbf{H}^0]$

$$\begin{Bmatrix} A_{\rho\rho} & A_{\rho z} \\ A_{z\rho} & A_{zz} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} H_\rho \\ H_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_\rho^0 \\ H_z^0 \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

где \mathbf{A} – матрица размером $2N \cdot 2N$, \mathbf{H} и \mathbf{H}^0 – векторы неизвестных и свободных членов размером $2N$. В цилиндрических координатах каждый элемент объема dV имеет форму кольца прямоугольного сечения. Вид элементов матрицы \mathbf{A} приведен в работе (Кормильцев, Ратушняк, 2007).

Для проведения математического моделирования создано программное обеспечение в виде пакета программ WMD-2M-C, реализующее расчеты составляющих магнитного поля, создаваемого током в двух магнитных диполях со встречными моментами, в пространстве за магнитной обсадной колонной. Для численного решения СЛАУ (8), ввиду большой контрастности магнитных восприимчивостей, использовался метод исключения Гаусса. Вычисления компонентов матрицы Грина в случае осевой симметрии довольно громоздки, по сравнению с трехмерной моделью, однако это окупается сокращением размерности СЛАУ и, в конечном счете, сокращением общего времени вычислений.

Входные данные для численного моделирования: радиус обсадной колонны

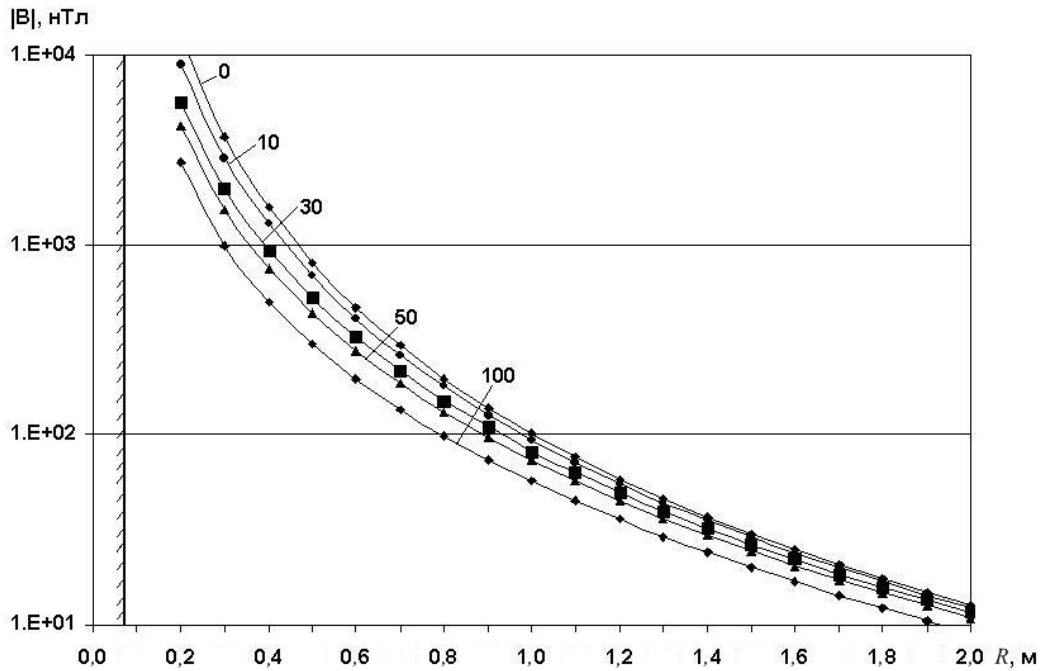


Рис. 7. Графики модуля магнитной индукции $|\mathbf{B}|$ в экваториальной плоскости магнитного диполя за обсадной колонной с различной магнитной восприимчивостью α (шифр кривых)

$a = 0,075$ м; толщина колонны $h = 10^{-2}$ м; магнитные восприимчивости колонны α от 10 до 100 ед. СИ.

На рис. 7 представлены графики модуля магнитной индукции $|\mathbf{B}|$ (нТл), создаваемого одним магнитным диполем с моментом $M_z^* = 1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$, в экваториальной плоскости диполя по линии $z = 0$ за магнитной и немагнитной обсадной колонной α от 0 до 100 ед. СИ.

В экваториальной плоскости диполя

(по линии $z = 0$) на расстоянии $r = 0,2$ м максимальное отклонение модуля магнитной индукции $|\mathbf{B}|$ с магнитной восприимчивостью колонны $\alpha = 100$ ед. СИ от нормального поля $|\mathbf{B}^0|$ составляет величину

$$\delta = \frac{|\mathbf{B}^0 - \mathbf{B}|}{|\mathbf{B}^0|} = 30\% .$$

На рис. 8 приведен графики модуля магнитной индукции $|\mathbf{B}|$ от квадрупольной установки с магнитными моментами $M_{z1}^* = 1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$, $M_{z2}^* = -3,375 \text{ А}\cdot\text{м}^2$, на разносах $L_1 = -1,0$ м и $L_2 = 1,5$ м в пространстве за

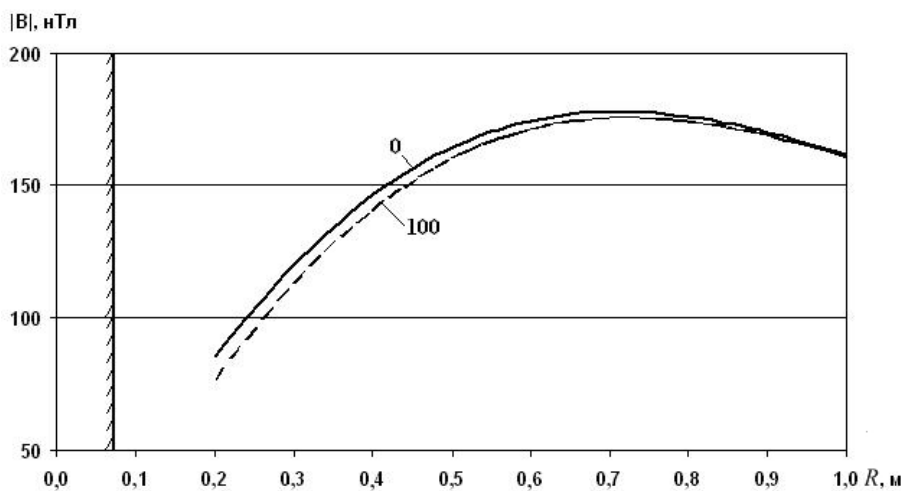


Рис. 8. Графики модуля магнитной индукции $|\mathbf{B}|$ квадрупольной установки по линии $z = 0$ м за обсадной колонной с магнитной восприимчивостью $\alpha = 0$ ед. СИ и $\alpha = 100$ ед. СИ

обсадной колонной с теми же параметрами.

Вид изолиний модуля магнитной индукции от квадрупольной установки в немагнитной среде и при наличии магнитной колонны существенно отличается от вида, представленного на рис. 7, поскольку в пространстве происходит частичная компенсация магнитных полей диполей со встречными моментами.

В экваториальной плоскости (на линии $z = 0$ м) на расстоянии $r = 0,2$ м максимальное отклонение модуля магнитной индукции B с магнитной восприимчивостью колонны $\alpha = 100$ ед. СИ от нормального поля B_0 составляет величину

$$\delta = \frac{|\mathbf{B}^0 - \mathbf{B}|}{|\mathbf{B}^0|} = 11\% .$$

Если в немагнитной среде (см. рис. 8) напротив точки измерений ($z = 0$ м) магнитное поле ослаблено за счет суперпозиции магнитных полей встречных диполей, то при наличии магнитной колонны с магнитной восприимчивостью $\alpha = 100$ ед. СИ ее намагничивание приводит к уменьшению поля в области за колонной (экранирование магнитного поля).

Приведенные расчеты показывают, что магнитная колонна, намагничивающаяся магнитным полем тока в квадрупольной установке, оказывает уменьшающее (экранирующее) влияние на величину поля в зоне, непосредственно прилегающей к

стенке колонны, ограниченной расстоянием $R \approx (3 \div 4) \cdot D_c$.

Вместе с тем, применение в установке гармонического режима тока приводит к изменению магнитного поля в фазе с током источника. В данном случае сдвига фаз магнитного поля в среде относительно фазы тока в излучателе не происходит, в отличие от эффекта индукции в проводниках. Существенного влияния магнитных свойств обсадной колонны на величину измеряемой мнимой квадратуры $\text{Im } B_z$ от тока в квадрупольной индукционной установке ожидать не следует.

Результаты физического моделирования

На рис. 9 представлены результаты физического моделирования с использованием гармонического тока в одной генераторной катушке диаметром $d = 90$ мм и числом витков $N = 90$, расположенной внутри металлической титановой трубы с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 6,7 \cdot 10^{-7}$ Ом·м с наружным диаметром $d = 147$ мм и толщиной стенки трубы $h = 37$ мм.

Величины измеренных ЭДС приведены к длинам каждого из замкнутых проводящих измерительных контуров $E_\phi = \varepsilon / (2\pi R)$ радиусами $R = 0,075; 0,15; 0,21; 0,28$ и $0,35$ м, расположенными в одной экваториальной

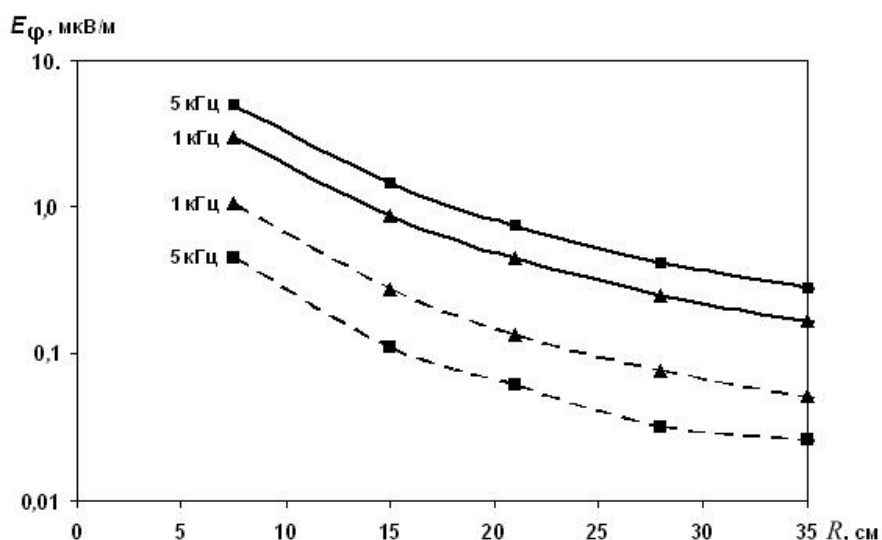


Рис. 9. Графики модуля E_ϕ – составляющей электрического поля [мкВ/м] по результатам физического моделирования в контурах различного радиуса на частотах $f = 1$ и 5 кГц с экранирующей трубой (штриховые линии) и без трубы (сплошные линии)

плоскости с генераторной катушкой.

Величина напряженности E_ϕ составляющей электрического поля [мкВ/м] с экранирующей трубой (штриховые линии) с высокой продольной проводимостью $S = h/\rho \approx 5,5 \cdot 10^4$ См, существенно меньше, чем без трубы (сплошные линии). На частоте $f = 5$ кГц величина E_ϕ ослабевает по сравнению со значением без трубы в 10 раз, но полностью не экранируется. С дальнейшим увеличением частоты до $f = 10$ кГц величина ослабления E_ϕ достигает 30 раз, что соответствует явлению скин-эффекта электромагнитного поля в проводнике.

Полное экранирование поля не было достигнуто, т. к. отрезок титановой трубы не был достаточно длинным и силовые линии магнитного поля частично замыкаются за пределами трубы.

Выводы

– Определение удельного сопротивления пород в заколонном пространстве обсаженных скважин возможно с помощью компенсационного способа измерений магнитного поля с применением квадрупольной индукционной установки с гармоническим режимом тока.

– Для определения удельного сопротивления пород в заколонном пространстве обсаженных скважин необходимо проведение фазочувствительных измерений осевой составляющей магнитного поля, создаваемой током в несимметричной квадрупольной индукционной установке, с использованием мнимой квадратуры $\text{Im } B_z$.

– Компенсационный способ измерений с несимметричной питающей индукционной установкой позволяет определять удельное электрическое сопротивление вмещающей среды за обсадной колонной скважины по экстремальным значениям величин мнимой части осевой составляющей магнитной индукции $\text{Im } B_z$, измеряемой на ряде частот.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (Проект № 15-11-5-13).

Литература

Аксельрод С.М. Измерение сопротивления пород через обсадную колонну (по материалам зарубежной литературы) // НТВ Каротажник. 2000. Вып. 75. С. 125–140.

Альпин Л.М. Способ электрического каротажа обсаженных скважин. А. с. (СССР) № 56026, 1939.

Кашик А.С., Рыхлинский Н.И., Книжнерман Л.А., Кривонос Р.И., Степанов А.С. К вопросу об электрическом каротаже скважин, обсаженных стальными колоннами, аппаратурой на кабеле // НТВ Каротажник. 2004. № 3–4. С. 116–117.

Кормильцев В.В., Ратушняк А.Н. Моделирование геофизических полей при помощи объемных векторных интегральных уравнений. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 88 с.

Кормильцев В.В., Ратушняк А.Н. Теоретические и экспериментальные основы спонтанной поляризации горных пород в нефтегазовых скважинах. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 135 с.

Ратушняк А.Н., Байдинов С.В., Теплухин В.К. Индукционный каротаж скважин с учетом влияния проводящей промывочной жидкости // Уральский геофизический вестник. 2016. № 1(27). С. 40–47.

Теплухин В.К., Ратушняк А.Н., Наянзин А.Н. Способ индукционного каротажа из обсаженных скважин и устройство для его осуществления. Заявка на изобретение № 2015107806. 27.09.2016. Бюл. № 27.

Феофилов Д.Т., Булатов А.В., Шкварок И.Р. Электрический каротаж через обсадную колонну. Опыт внедрения // Нефтегаз INTERNATIONAL. 2008. Вып. 1.

Vail, III; William B. Methods and apparatus for induction logging in cased boreholes. Patent US 4748415. 1988.