

## ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПЛАСТОВАНИЙ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ КАРОТАЖЕ ИЗ ОБСАЖЕННЫХ СКВАЖИН

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

**Аннотация.** Исследовано влияние пересекаемых скважиной горизонтальных пластов различного удельного электрического сопротивления при проведении индукционного каротажа из обсаженных геологоразведочных скважин при гармонических и импульсных зондированиях с помощью компенсационной установки. Показана информативность измеряемых величин осевой составляющей магнитной индукции и ЭДС спада при определении контакта сред с различными удельными электрическими сопротивлениями сред в условиях скомпенсированного влияния проводящей обсадной колонны.

*Гармоническое и импульсное электромагнитное поле, индукционный каротаж из обсаженных скважин, компенсационная установка.*

## INFLUENCE OF HORIZONTAL BEDDINGS AT INDUCTION LOGGING FROM THE SURROUNDED WELLS

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

**Abstract.** Influence of the horizontal layers of various specific electric resistance crossed by the well when carrying out induction logging from the surrounded prospecting wells at harmonious and pulse soundings by means of compensation installation is investigated. The informational content of the measured sizes of an axial component of magnetic induction and EMF of recession when determining contact of environments with various specific electric resistance of environments in the conditions of the compensated influence of the carrying-out upsetting column is shown.

*The harmonious and pulse electromagnetic field, induction logging from the surrounded wells, compensation installation.*

### **Введение**

Исследования электромагнитными методами каротажа через обсадную колонну скважины позволяют решать задачу определения удельного электрического сопротивления продуктивных на углеводороды пластов с учетом неоднородностей в радиальном направлении. При наличии контрастностей в удельном электрическом сопротивлении решение этой задачи позволяет выполнить оценку водо- или нефтенасыщенности пластов-коллекторов, а также текущее состояние выработки продуктивных пластов и уточнить положение невырабатываемых участков залежи.

В работах (Ратушняк и др., 2016; Ратушняк, Теплухин, 2017) исследована возможность применения индукционных частотных зондирований с компенсационной установкой для определения удельного электрического сопротивления вмещаю-

щих горных пород за обсадной колонной. В настоящей работе исследуется влияние пересекаемых скважиной горизонтальных пластов различного удельного сопротивления при проведении индукционного каротажа из обсаженных скважин. При проведении каротажа исследуемые интервалы скважины, в которых присутствует влияние контактов сред различного удельного сопротивления, должны быть исключены из изучаемой области исследований для корректного определения удельного электрического сопротивления пород за обсадной колонной скважины.

### **Физико-геометрическая модель среды**

Для определения удельного электрического сопротивления горных пород за металлической обсадной колонной скважины в патенте РФ № 2614853 (Ратушняк и др., 2017) предложено использовать индукционный метод. Метод реализуется с помо-

щью индукционных частотных зондирований с несимметричной квадрупольной установкой, состоящей из двух магнитных диполей с различными моментами встречного направления. В точке измерений  $N$ , расположенной на этой же оси на расстоянии  $L_1 \neq L_2$  между диполями, измеряется мнимая квадратура осевой составляющей магнитной индукции  $\text{Im } B_z$ , создаваемая при одновременно включенных токах в источниках. Использование двух диполей со встречными моментами позволяет добиться компенсации вклада проводящей обсадной колонны в измеряемое магнитное поле. Компенсация заключается в подборе таких моментов  $M_{z1}^*$ ,  $M_{z2}^*$  и расстояний  $L_1$ ,  $L_2$ , чтобы измеряемая в точке  $N$  величина  $\text{Im } B_z$ , при помещении установки внутрь обсадной колонны в непроводящей среде (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.

Применение симметричной квадрупольной установки позволяет скомпенсировать влияние всех радиально-симметричных неоднородностей: проводящей обсадной колонны и зоны проникновения фильтрата бурового раствора во вмещающие горные породы. Если в процессе каротажа скважины происходит переход симметричной установки через контакт пород с различными удельными электрическими сопротивлениями, то это приводит к раскомпенсации поля вблизи границы сред за счет различной плотности токов, индуцируемых в породах.

Физико-геометрическая модель среды (рис. 1), неоднородная по удельной электрической проводимости, включает: скважину радиуса  $a$ , в которой находится скважинный снаряд с симметричной квадрупольной установкой, состоящей из двух магнитных диполей с одинаковыми моментами встречного направления вдоль оси  $Z$  скважины  $M_{z1}^* = -M_{z2}^*$ , контакт вмещающих

пород с удельными электрическими сопротивлениями  $\rho_0$  и  $\rho_1$ . В точке измерений  $N$ , расположенной на этой же оси на одинаковом расстоянии  $L$  между диполями, измеряется осевая составляющая магнитной индукции  $\text{Im } B_z$ , создаваемая при одновременно включенных гармонических токах в источниках.

Особенностью магнитного поля, создаваемого симметричной квадрупольной установкой, является отсутствие  $B_z$ -составляющей, измеряемой на оси скважины, от электрических неоднородностей в виде цилиндрически-неоднородных слоев из-за симметрии электромагнитного поля. Это происходит потому, что магнитное поле в точке  $N$ , создаваемое первым диполем, скомпенсировано магнитным полем, создаваемым вторым диполем со встречным моментом равной величины. При наличии горизонтальных границ раздела сред, перемещение установки по скважине из среды с удельным сопротивлением  $\rho_0$  в среду с удельным сопротивлением  $\rho_1$  приводит к раскомпенсации поля вблизи границы и появлению  $B_z$ -составляющей магнитного поля, величина которого зависит от частоты

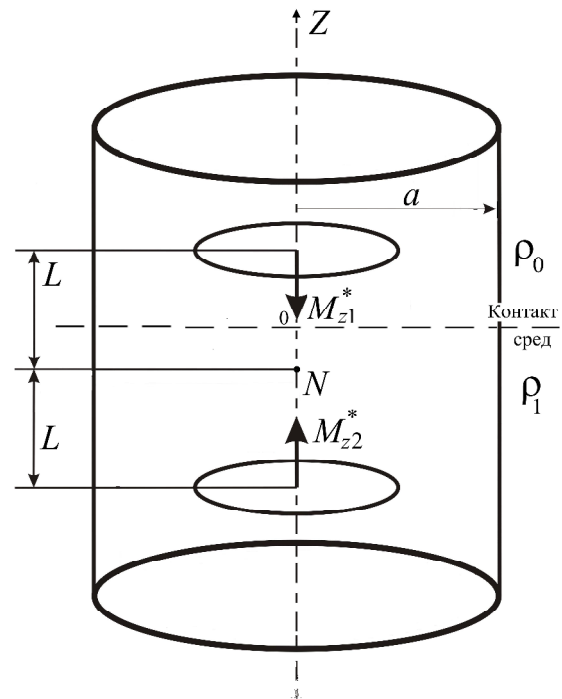


Рис. 1. Модель среды и симметричной установки индукционного каротажа

ты тока в дипольных источниках, величины моментов диполей, разности установок  $2L$  и контрастностей сред по удельным электрическим сопротивлениям  $\rho_0/\rho_1$ .

**Электромагнитное поле симметричной квадрупольной индукционной установки вблизи границы раздела двух сред**

В работах (Бурсиан, 1972; Краев, 1965) приведено решение задачи об определении электромагнитного поля гармонического магнитного диполя для двух полупространств с различными удельными электрическими сопротивлениями. Исследование влияния двух полупространств на величину измеряемого магнитного поля и ЭДС спада при проведении индукционного каротажа при частотном и импульсном режимах изменения тока в источнике в условиях открытого ствола скважины выполнено в работе (Ратушняк, Теплухин, 2017). Эта задача возникает при пересечении скважиной контакта пород по направлению, близкому к нормали.

Комбинируя положение диполей и точки измерений в различных средах, можно рассчитать электромагнитное поле при переходе установки через контакт двух сред с различным удельным электрическим сопротивлением при частотном или временном режимах изменения тока в источнике. При этом частотную зависимость величины ЭДС, наводимой в одном витке малого радиуса  $r_k \ll L$ , можно определить в каждой из сред через изменение потока индукции магнитного поля  $\text{Re}\mathcal{E}_i = \omega\pi r_k^2 \text{Im} B_{zi}$ . Определение ЭДС через циркуляцию напряженности электрического поля в одном витке  $\mathcal{E}_i = 2\pi \cdot r_k E_{\phi i}$  дает аналогичные формулы. Для получения временной характеристики спада ЭДС при импульсном режиме тока в источниках используется численное синус-преобразование Фурье от ее частотного спектра (Ваньян, 1965). Для режима спада поля после пропускания токового импульса длительностью  $T$  расчет проводится с помощью теоремы наложения  $\mathcal{E}(T, t) = \mathcal{E}(T + t) - \mathcal{E}(t)$ , где время  $t$  отсчитывается от момента выключения тока (Атабеков, 1978). При больших временах зарядки  $T$ , когда магнитное поле устремляется к

стационарному значению, ЭДС становления и спада равны по модулю  $\mathcal{E}(T, t) = -\mathcal{E}(t)$ .

Используя формулы (2.20–2.21), приведенные в работе (Ратушняк, Теплухин, 2017), получим для комбинации диполей на оси скважины  $r = 0$  при их различном положении в средах с удельными электрическими сопротивлениями  $\rho_0$  и  $\rho_1$ :

1) Точка измерений  $z \geq L$ . Оба диполя в среде  $\rho_0$

$$B_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{1+k_0|2z-L|}{|2z-L|^3} e^{-k_0|2z-L|} - \frac{1+k_0|2z+L|}{|2z+L|^3} e^{-k_0|2z+L|} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda^3}{m_0+m_1} (e^{-m_0(2z+L)} - e^{-m_0(2z-L)}) d\lambda.$$

2) Точка измерений  $0 \leq z \leq L$

$$B_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{1+k_0L}{L^3} e^{-k_0L} - \frac{1+k_0|2z+L|}{|2z+L|^3} e^{-k_0|2z+L|} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda^3}{m_0+m_1} (e^{-m_0(2z+L)} - e^{m_1(z+L)-m_0z}) d\lambda.$$

3) Точка измерений  $-L \leq z \leq 0$

$$B_z = -\frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{1+k_1L}{L^3} e^{-k_1L} - \frac{1+k_1|2z+L|}{|2z+L|^3} e^{-k_1|2z+L|} \right) - \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda^3}{m_0+m_1} (e^{m_1(2z-L)} - e^{m_0(z-L)+m_1z}) d\lambda.$$

4) Точка измерений  $z \leq -L$ . Оба диполя в среде  $\rho_1$

$$B_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{1+k_1|2z-L|}{|2z-L|^3} e^{-k_1|2z-L|} - \frac{1+k_1|2z+L|}{|2z+L|^3} e^{-k_1|2z+L|} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda^3}{m_0+m_1} (e^{m_1(2z+L)} - e^{m_1(2z-L)}) d\lambda.$$

Здесь  $m_i = \sqrt{\lambda^2 + k_i^2}$ ,  $k_i = \sqrt{j\omega\mu_0 / \rho_i}$  – волновое число среды с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_i$ .

**Анализ расчетов электромагнитного поля симметричной квадрупольной индукционной установки**

Ввиду линейности электромагнитного поля величины встречных моментов диполей приняты единичными  $M_{z12}^* = \pm 1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ , а площадь измерительной катушки при им-

пульсном режиме тока в источниках и измерениях ЭДС спада принята  $S_H = 1 \text{ м}^2$ . При гармоническом режиме тока в источниках частота тока составляет  $f = 1 \text{ кГц}$ .

На рис. 2 (цветная вкладка) приведены результаты расчетов величин  $\text{Im } B_z$ -составляющей магнитной индукции последовательной установки  $Zd = Z + L$  (магнитный диполь выше точки измерений), обращенной установки со встречным моментом  $Zd = Z - L$  (магнитный диполь ниже точки измерений) и симметричной установки для разносов  $L = 1 \text{ м}$  при контрастностях удельных сопротивлений  $\rho_0/\rho_1$  равных 0,2 (слева) и 5 (справа).

С удалением от границы раздела сред экстремумы величин  $\text{Im } B_z$ -составляющей магнитной индукции на оси скважины последовательной и обращенной установок устремляются к предельному значению, соответствующему однородной среде.

Существенным отличием поведения кривых  $\text{Im } B_z$ -составляющей магнитной индукции на оси скважины последовательной и обращенной установок, кроме разного знака, является положение точек перегиба, которые всегда смещены от точки измерений в сторону диполя. Вследствие этого при переходе симметричной компенсационной установки контакта двух сред с различными удельными электрическими сопротивлениями  $\text{Im } B_z$  имеет однополярный экстремум на контакте сред со знаком «+» или «-», в зависимости от контрастности сопротивлений сред. Если перекрывающие породы более проводящие, знак отрицательный, если менее проводящие – знак положительный. Величина экстремума  $\text{Im } B_z$  зависит от контрастности сопротивлений сред, частоты тока и от разноса установки.

На рис. 3 (цветная вкладка) приведены кривые  $\text{Im } B_z$ -составляющей магнитной индукции симметричной установки для разносов  $L = 1 \text{ м}$  при удельных сопротивлениях сред  $\rho_0 = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и  $\rho_1 = 40; 30; 20; 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  (слева) и при различных разносах установки  $L = 1; 1,5; 2,0; 2,5 \text{ м}$  при контрастностях удельных сопротивлений  $\rho_0/\rho_1 = 5$  (справа).

Величина  $\text{Im } B_z$ -составляющей магнит-

ной индукции симметричной установки увеличивается по мере увеличения контрастностей удельных электрических сопротивлений сред или уменьшения разноса установки. При обратном соотношении удельных электрических сопротивлений сред кривые  $\text{Im } B_z$  симметричной установки имеют обратные знаки.

На рис. 4 (цветная вкладка) приведены результаты расчетов ЭДС спада на времени  $t = 10^{-7} \text{ с}$  последовательной установки  $Zd = Z + L$  (магнитный диполь выше точки измерений), обращенной установки со встречным моментом  $Zd = Z - L$  (магнитный диполь ниже точки измерений) и симметричной установки для разносов  $L = 1 \text{ м}$  при контрастностях удельных сопротивлений  $\rho_0/\rho_1$  равных 0,2 (слева) и 5 (справа).

Как и в частотном случае, существенным отличием поведения кривых ЭДС спада последовательной и обращенной установок, кроме разного знака, является положение точек перегиба, которые всегда смещены от точки измерений в сторону диполя. Вследствие этого при переходе симметричной компенсационной установки контакта двух сред с различными удельными электрическими сопротивлениями ЭДС имеет однополярный экстремум вблизи контакта сред со знаком «+» или «-» в зависимости от контрастности сопротивлений сред. Если перекрывающие породы более проводящие, знак положительный, если менее проводящие – знак отрицательный. Величина экстремума ЭДС зависит от контрастности сопротивлений сред и от разноса установки.

На рис. 5 (цветная вкладка) приведены результаты расчетов экстремальных значений величин спада ЭДС при переходе симметричной компенсационной установки с разносом  $L = 1 \text{ м}$  через контакт сред с фиксированными значениями удельных электрических сопротивлений верхнего (справа) или нижнего (слева) полупространств.

Как видно из рис. 5 (цветная вкладка), контакт сред отмечается одноэкстремальной кривой спада ЭДС с экстремумом, смещенным от границы сред в сторону более проводящей среды на величину, рав-

ную полуразносу установки  $L/2$ . С удалением от границы раздела сред экстремумы величин спада ЭДС симметричной установки устремляются к нулю.

**Вывод**

Применение квадрупольной симметричной установки позволяет определить горизонтальные контакты сред с различными удельными электрическими сопротивлениями по измерениям осевой составляющей магнитной индукции при гармоническом режиме тока в источниках или ЭДС спада при нестационарном режиме тока.

**Литература**

*Атабеков Г.И.* Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи. М.: Энергия, 1978. 592 с.  
*Бурсиан В.Р.* Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. Л.: Недра, 1972. 245 с.

*Ваньян Л.Л.* Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.  
*Краев А.П.* Основы геоэлектрики. Изд. 2-е. Л.: Недра, 1965. 587 с.  
*Ратушняк А.Н., Теплухин В.К., Наянзин А.Н.* Способ индукционного каротажа из обсаженных скважин и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2614853. 29.03.2017. Бюл. № 10.  
*Ратушняк А.Н., Байдинов С.В., Теплухин В.К.* Индукционный каротаж в обсаженных скважинах // Уральский геофизический вестник. 2016. № 2 (28). С. 98–107.  
*Ратушняк А.Н., Теплухин В.К.* Теоретические и экспериментальные основы индукционных методов исследований скважин. Екатеринбург: УрО РАН, 2017. 127 с.