

ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ МНОГОКАТУШЕЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДА ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ СКВАЖИНЫ НА ИЗМЕРЯЕМЫЙ СИГНАЛ

Е.В. Онегова

Baker Hughes Inc., 2001 Rankin Road, Houston, Texas 77073, USA

Рассматривается эффект эксцентриситета многокатушечного электромагнитного зонда. Зонд представляет непроводящий корпус цилиндрической формы с соосными катушками. Предполагается, что скважина вертикальная и среда обладает осевой симметрией относительно оси скважины. С использованием конечно-элементного моделирования проведена серия расчетов. При моделировании учитывался корпус прибора и конечные размеры катушек. Был изучен широкий диапазон расстояний от генераторной до приемной катушки (0.18—1.0 м). Рабочая частота прибора была 1.75 МГц. Рассматривались различные буровые растворы и значения эксцентриситета. Доказано, что характер зависимости кажущегося сопротивления от эксцентриситета существенно варьируется в зависимости от длины зонда в случае сильно проводящих буровых растворов. Обнаружено, что эффект эксцентриситета тем сильнее, чем выше контраст между сопротивлением бурового раствора и зоны проникновения. Влияние эксцентриситета уменьшается с увеличением сопротивления бурового раствора и длины зонда. Также в статье анализируется, как смещение зонда влияет на конфигурацию электромагнитного поля.

Эффект эксцентриситета, многокатушечный зонд, электромагнитный каротаж, конечно-элементное моделирование.

EFFECT OF MULTICOIL ELECTROMAGNETIC TOOL ECCENTRICITY ON MEASURED SIGNALS

E.V. Onegova

The article discusses the effect on the measured signals of a multicoil electromagnetic tool offset with respect to the borehole axis. The tool is a nonconductive cylindrical body with several coaxial coils. It is assumed that the borehole is vertical and the medium is axisymmetric with respect to the borehole axis.

A number of computations based on the finite-element method were carried out. Simulations took into account the tool body and finite sizes of coils. A wide range of transmitter-receiver spacings (0.18–1.0 m) was studied. The operating frequency was 1.75 MHz. Different drilling muds and values of the tool offset were examined. It was shown that, for highly conductive drilling muds, the type of dependence between apparent resistivity and eccentricity varies greatly with the array length. It was discovered that increasing the contrast between invaded zone resistivity and mud resistivity also increases the eccentricity effect. The eccentricity effect increases with the decrease in mud resistivity and decreases as the array length increases. Also analyzed was the effect of the tool offset on electromagnetic field pattern.

Eccentricity effect, multicoil logging tool, electromagnetic logging, finite element modeling

ВВЕДЕНИЕ

При инверсии данных каротажа зачастую необходимо учитывать смещение зонда относительно оси скважины. Эта проблема возникает как при проектировании каротажных зондов, так и при интерпретации диаграмм. Исследованию влияния эксцентриситета посвящено достаточно много работ. В первых статьях [Кауфман и др., 1974; Gianzero, 1978] приводятся аналитические формулы для вычисления отклика смещенного индукционного зонда без учета его корпуса и при допущении, что источником является магнитный диполь. В более поздних работах уже учитывается корпус прибора, причем металлический [Lovell, Chew, 1990; Hue et al., 2005]. Учет влияния корпуса показывает, что в этом случае измеряемый сигнал более чувствителен к эксцентриситету [Lovell, Chew, 1990]. В последних работах [Wang et al., 2003; Davydycheva et al., 2008; Sun, Nie, 2008] рассматривается смещение зондов, предназначенных для исследования анизотропных сред в процессе бурения.

Несмотря на то что все работы объединяет одна тема, каждая из них носит частный характер и в каждой рассматривается какой-то узкий класс каротажных зондов. Однако трудно представить какое-то общее исследование, поскольку этот эффект действительно существенно варьируется в зависимости от многих параметров. Цель данной работы: определить влияние эксцентриситета многокатушечного электромагнитного зонда заданной конфигурации на измеряемый сигнал. Предполагается, что скважина вертикальная и среда обладает осевой симметрией относительно оси скважины. Зонд представляет непро-

водящий корпус цилиндрической формы с катушками. Особенностью зонда является широкий диапазон расстояний от генераторной до приемной катушки (0.18—1.0 м) и довольно высокие частоты (от 1 МГц). С помощью метода конечных элементов моделируется электромагнитное поле в горизонтально-слоистой среде с зоной проникновения с учетом корпуса зонда и конечного размера катушек.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим квазистационарное гармоническое электромагнитное поле, возбужденное катушкой с током. Из уравнений Максвелла можно вывести векторное уравнение для напряженности электрического поля \mathbf{E} , которое при зависимости от времени $e^{-i\omega t}$ имеет вид

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} - i\omega\mu_0\sigma\mathbf{E} = i\omega\mu_0\mathbf{J}, \quad (1)$$

где ω — угловая частота, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, σ — удельная электрическая проводимость среды, плотность стороннего тока $\mathbf{J} = (0, J_\varphi, 0)^T$.

Представим полное поле в виде суммы осесимметричной $\mathbf{E}^0 = (0, E_\varphi(r, z), 0)^T$ и трехмерной \mathbf{E}^+ частей поля

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^0 + \mathbf{E}^+.$$

Пусть \mathbf{E}^0 удовлетворяет следующему уравнению

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E}^0 - i\omega\mu_0\sigma^0\mathbf{E}^0 = i\omega\mu_0\mathbf{J}, \quad (2)$$

где σ^0 — удельная электрическая проводимость осесимметричной среды Ω^0 . Эта среда содержит зонд, ось которого совпадает с осью цилиндрической системы координат. Проводимости скважины и зоны проникновения сглаживаются и усредняются таким образом, чтобы отклик в полученной осесимметричной среде был максимально близок к отклику в исходной среде Ω .

Подставим в правую часть уравнения (1) левую часть уравнения (2), тогда получим уравнение для \mathbf{E}^+

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E}^+ - i\omega\mu_0\sigma\mathbf{E}^+ = i\omega\mu_0(\sigma - \sigma^0)\mathbf{E}^0.$$

Для получения единственного решения необходимо задать краевые условия. В геофизических приложениях обычно используют приближенные однородные условия Дирихле с учетом того, что граница достаточно удалена от источника и среда поглощающая. Мы будем следовать этому же подходу.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для получения численного решения вышеописанных краевых задач используется метод конечных элементов [Jianming, 2002]. Вариационная постановка краевой задачи для трехмерной части поля \mathbf{E}^+ имеет следующий вид:

$$\int_{\Omega} \operatorname{rot} \mathbf{E}^+ \operatorname{rot} \boldsymbol{\psi} d\Omega - i\omega\mu_0 \int_{\Omega} \sigma \mathbf{E}^+ \boldsymbol{\psi} d\Omega = i\omega\mu_0 \int_{\Omega} (\sigma - \sigma^0) \mathbf{E}^0 \boldsymbol{\psi} d\Omega \quad \forall \boldsymbol{\psi} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega),$$

где $H_0(\operatorname{rot}, \Omega) = \left\{ \mathbf{v} \in (L^2(\Omega))^3 \mid \operatorname{rot} \mathbf{v} \in (L^2(\Omega))^3, \mathbf{v} \times \mathbf{n} \Big|_{\partial\Omega} = 0 \right\}$ — это пространство пробных функций.

Вариационное уравнение для осесимметричной части имеет вид

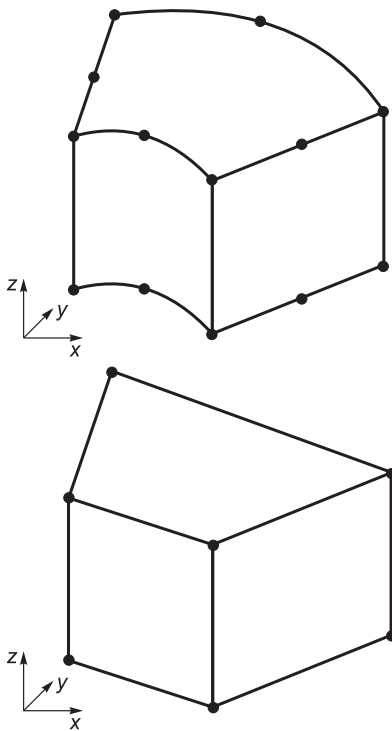
$$-\int_{\Omega^0} \operatorname{grad} E_\varphi \operatorname{grad} \psi d\Omega + \int_{\Omega^0} \frac{E_\varphi}{r^2} \psi d\Omega - i\omega\mu_0 \int_{\Omega^0} \sigma^0 E_\varphi \psi d\Omega = i\omega\mu_0 \int_{\Omega^0} J_\varphi \psi d\Omega \quad \forall \psi \in H_0^1,$$

где $H_0^1 = \left\{ v \in L^2(\Omega^0) \mid \operatorname{grad} v \in L^2(\Omega^0), v \Big|_{\partial\Omega^0} = 0 \right\}$.

В двумерной задаче для конечно-элементной дискретизации используются прямоугольники с узловыми билинейными базисными функциями.

Для трехмерного моделирования используются векторные базисные функции. Поскольку расчетная область содержит объекты цилиндрической формы (такие как зонд и скважина), в качестве конечных элементов были выбраны шестигранники [Monk, 2003], каждый из которых получается переносом четырехугольника, лежащего в плоскости xy , по оси z (рис. 1). В окрестности криволинейных границ исполь-

Рис. 1. Квадратичный и линейный шестигранники.



зуются шестигранники с квадратичными ребрами, в оставшейся части области — с линейными ребрами. Такие элементы позволяют с высокой точностью описывать криволинейные границы без значительного измельчения сетки.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для верификации разработанного алгоритма использовались следующие модели:

- двумерная среда, несмещенный зонд с учетом корпуса;
- двумерная среда, смещенный зонд без учета корпуса.

Рассматривались буровые растворы на нефтяной и водной основе, а также соленый буровой раствор. Расчеты были проведены для различных частот. Для сравнения использовались апробированные методы двумерного и 2.5-мерного моделирования. Тестирование показало хорошее совпадение результатов.

Для исследования эффекта эксцентриситета была проведена серия расчетов. Рассматривались четыре значения удельного электрического сопротивления (Ом·м) бурового раствора R_m : 24, 2.4, 0.24, 0.024 и четыре положения зонда. Максимальное смещение, для которого проводились расчеты, соответствует ситуации, когда расстояние между зондом и стенкой скважины составляет 0.005 м.

Использовалась модель, состоящая из следующих объектов:

- скважина радиусом 0.108 м;
- зона проникновения радиусом 0.5 м, с сопротивлением $R_x = 1.3$ Ом·м;
- пласт с сопротивлением 11 Ом·м.
- корпус прибора радиусом 0.045 м, длиной 1.2 м;

Прибор состоит из одной генераторной катушки и четырех пар приемных катушек. Генераторная катушка и пара приемных катушек образуют трехкатушечный зонд. В табл. 1 приведены расстояния между генераторной и приемными катушками для каждого трехкатушечного зонда. Частота тока в генераторной катушке 1.75 МГц, сила тока 1 А. Внутренний радиус генераторной катушки 0.34 м, внешний радиус 0.4 м, высота 0.03 м. Измеряемой величиной является разность фаз между ЭДС, наведенными в приемных катушках.

Разность фаз была вычислена со средней относительной погрешностью менее 0.5%. По значениям разности фаз было вычислено кажущееся сопротивление в предположении однородности среды. На рис. 2 изображены графики кажущегося сопротивления в зависимости от относительного эксцентриситета для трех значений сопротивления бурового раствора R_m : 24, 2.4, 0.24 Ом·м. Под относительным эксцентриситетом здесь понимается расстояние между осью скважины и осью прибора, разделенное на радиус скважины. Отдельно изображено кажущееся сопротивление при $R_m = 0.024$ Ом·м (рис. 3), так как в этом случае наблюдается наибольшее влияние эксцентриситета, и графики имеют совершенно другой масштаб. Кроме того, в этом случае для построения зависимости кажущегося сопротивления от эксцентриситета для зонда 1 (таблица) было недостаточно четырех точек, и поэтому был проведен дополнительный расчет при относительном эксцентриситете зонда 0.45. Для оставшихся зондов характер зависимости не меняется при добавлении на график вычисленной дополнительной точки.

Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод, что характер зависимости кажущегося сопротивления от эксцентриситета варьируется в зависимости от длины зонда и сопротивления бурового раствора. Наименьшее влияние эксцентриситета наблюдается при $R_m = 2.4$ Ом·м, т.е. при наименьшем контрасте между сопротивлениями бурового раствора и зоны проникновения R_x/R_m (что согласуется с результатами [Wang et al., 2003; Hue et al., 2005]). Здесь изменение кажущегося сопротивления от смещения зонда не превышает 3%. На последнем, самом длинном зонде № 4, кажущееся сопротивление меняется от 2.96 до 2.98 Ом·м, а разность фаз от 22.4° до 22.3°, т.е. если принять, что относительная ошибка измерений составляет 1%, то можно с уверенностью сказать, что на эти измерения эксцентриситет не влияет.

При $R_m = 0.024$ Ом·м на зонде 1 с ростом смещения кажущееся сопротивление возрастает, а на зондах 3 и 4 — уменьшается. На

Длины трехкатушечных зондов	
Номер зонда	Длина, м
1	0.18, 0.25
2	0.28, 0.40
3	0.45, 0.64
4	0.70, 1.00

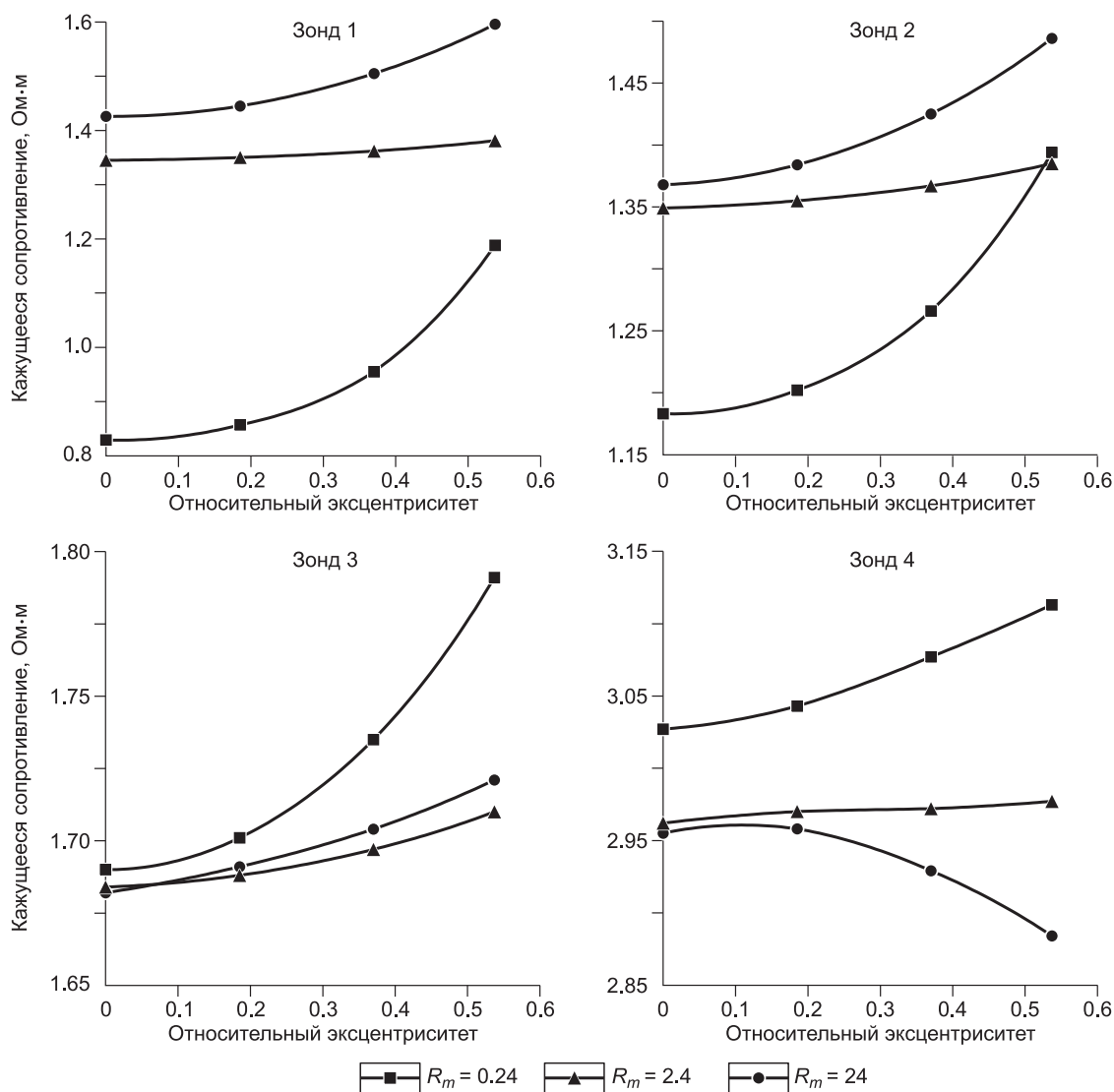


Рис. 2. Графики зависимости кажущегося сопротивления от относительного эксцентриситета при сопротивлении бурового раствора R_m : 0.24, 2.4, 24 Ом·м.

зонде 2 наблюдается смена характера зависимости. При $R_m = 24$ Ом·м на всех зондах кроме зонда 4 зависимость возрастающая. При $R_m = 0.24$ и 2.4 Ом·м на всех зондах наблюдается возрастающая зависимость.

При $R_m = 24$ Ом·м кажущееся сопротивление в зависимости от эксцентриситета меняется на 2—12 %, при $R_m = 0.24$ Ом·м — на 3—43 %. Таким образом, если сравнивать эти две ситуации, то в последнем случае наблюдается большее влияние эксцентриситета. В целом, с увеличением длины зонда влияние эксцентриситета уменьшается.

Рассмотрим поведение поля в случае наибольшего и наименьшего значения контраста R_x/R_m . На рис. 4 приведены действительная и мнимая части напряженности электрического поля \mathbf{E} в сечении $z = 0.28$ м для $R_m = 0.024$ и 2.4 Ом·м при максимальном значении эксцентриситета зонда. Схематично изображены границы скважины и корпуса зонда. Из рисунков видно, что в первом случае конфигурация поля значительно более сложная: в скважине возникают вихри; и именно в этом случае влияние эксцентриситета наиболее существенно. Кроме того, при смещении зонда на стенке скважины возникают поверхностные заряды. Их плотность равна скачку нормальных компонент напряженности электрического поля \mathbf{E} . На рис. 5 изображено распределение модуля плотности поверхностного заряда на стенке скважины в цилиндрических ф φ -координатах при $R_m = 0.024$ Ом·м и максимальном эксцентриситете. Угол отсчитывается от точки на скважине, максимально близкой к прибору, до самой дальней точки. Поверхностные заряды — это дополнительный потенциальный источник поля. Как видно из рис. 5, на уровне источника ($z = 0$) их плотность максимальна, с удалением от источника она уменьшается, т.е. поверхнос-

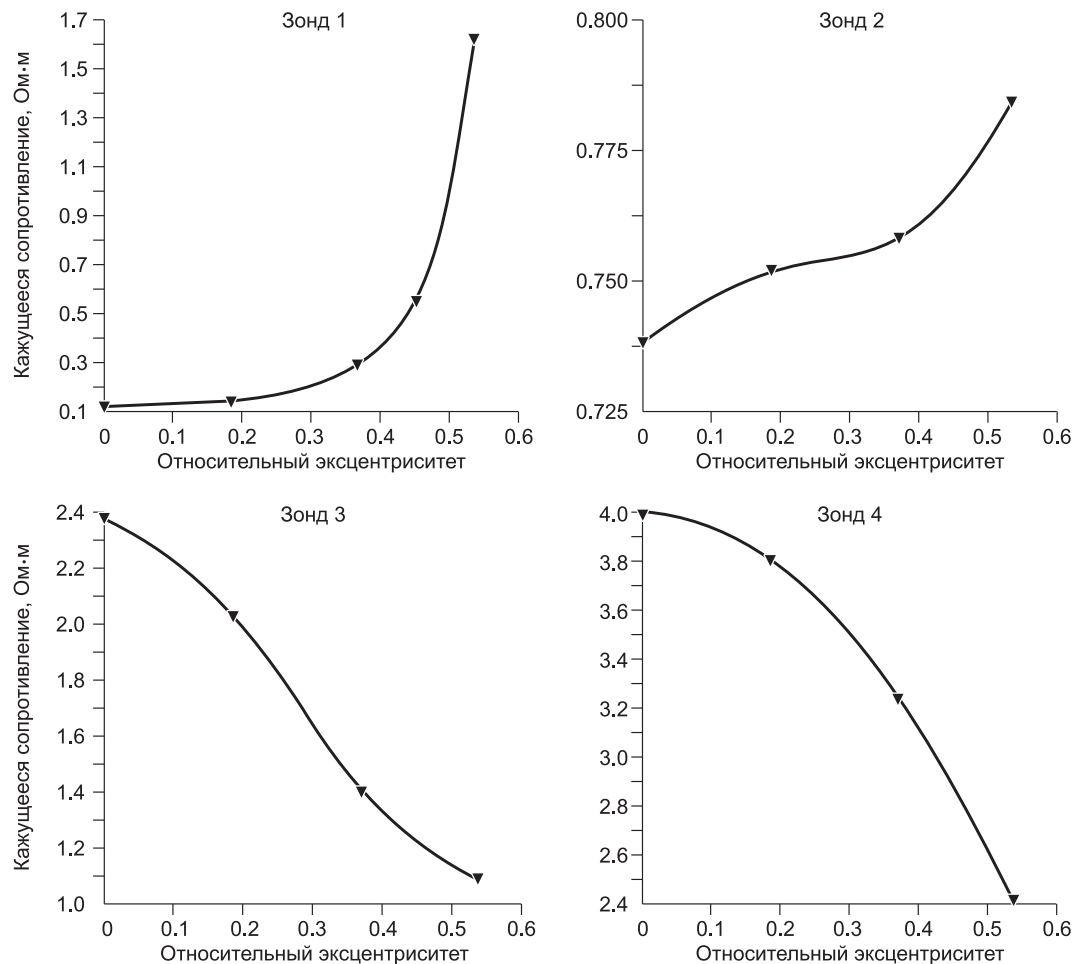


Рис. 3. Графики зависимости кажущегося сопротивления от относительного эксцентриситета при сопротивлении бурового раствора $R_m = 0.024 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

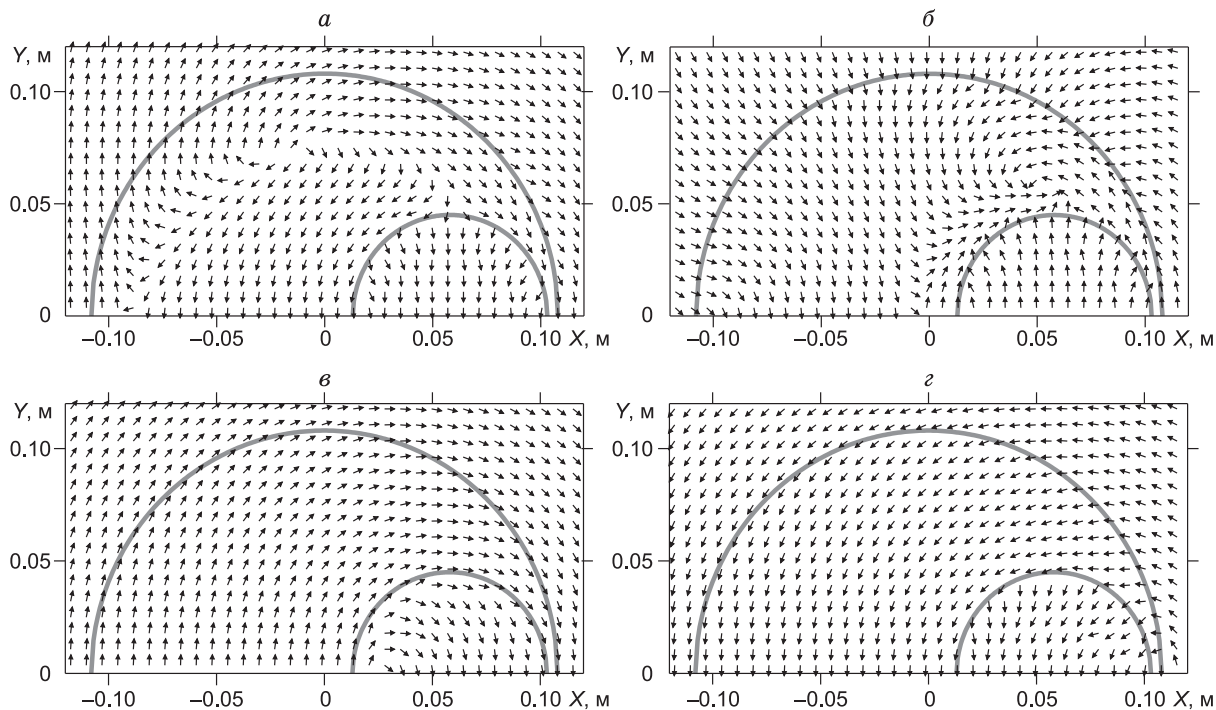


Рис. 4. Напряженность электрического поля E в плоскости $z = 0.28 \text{ м}$.

$a, б$ — $R_m = 0.024 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $в, г$ — $R_m = 2.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $a, в$ — действительная, $б, г$ — мнимая части.

Рис. 5. Распределение плотности поверхностного заряда (Кл/м^2) на стенке скважины.

тные заряды влияют только на измерения на коротких зондах. Плотность поверхностного заряда также тем больше, чем выше контраст между сопротивлениями бурового раствора и зоны проникновения. И вследствие этого на графиках (см. рис. 2, 3) в случае сильно проводящих буровых растворов ($R_m = 0.024$ и $0.24 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) на коротких зондах мы получаем сложную нелинейную зависимость кажущегося сопротивления от эксцентриситета зонда.

ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Доказано, что характер зависимости кажущегося сопротивления от эксцентриситета существенно варьируется в зависимости от длины зонда в случае сильно проводящих буровых растворов. В целом эффект эксцентриситета тем сильнее, чем меньше сопротивление бурового раствора и чем выше контраст между сопротивлением бурового раствора и зоны проникновения. Так, при сопротивлении зоны проникновения $1.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в случае сильно проводящих буровых растворов эффект эксцентриситета очень сильный (до 40 % при $R_m = 0.24 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и более 100 % при $R_m = 0.024 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и нелинейный, а в случае буровых растворов на нефтяной ($R_m = 24 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и водной основе ($R_m = 2.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) эффект эксцентриситета достигает 12 и 3 % соответственно. Также влияние эксцентриситета уменьшается с увеличением длины зонда. Показано, что в случае высокого контраста между сопротивлением бурового раствора и зоны проникновения при смещении зонда конфигурация электромагнитного поля существенно меняется: в скважине возникают вихри, на стенке скважины появляются поверхностные заряды.

В случае соленых буровых растворов рекомендуется использовать специальные центрирующие устройства. В случае буровых растворов на водной и нефтяной основе необходима коррекция измеренных сигналов. Определение частотной зависимости эффекта эксцентриситета для данного прибора требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- Кауфман А.А., Каганский А.М., Кривоуцкий В.С.** Радиальные характеристики индукционных зондов, смещенных относительно оси скважины // Геология и геофизика, 1974 (7), с. 102—116.
- Davydycheva S., Homan D., Minerbo G.** Triaxial induction tool with electrode sleeve: FD modeling in 3D geometries // J. Appl. Geophys., 2009, v. 67, № 1, p. 98—108.
- Gianzero S.** Effect of sonde eccentricity on responses of conventional induction-logging tools // IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1978, v. GE-16, № 4, p. 332—339.
- Hue Y-K., Teixeira F., Martin L., Bittar M.** Three-dimensional simulation of eccentric LWD tool response in borehole through dipping formations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, v. 43, № 2, p. 257—268.
- Jianming J.** The finite element method in electromagnetics. New York, USA, Wiley, 2002, 753 p.
- Lovell J., Chew W.** Effect of tool eccentricity on some electrical well-logging tools // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, v. 28, № 1, p. 127—136.
- Monk P.** Finite element methods for Maxwell's equations. Oxford, England, Oxford University Press, 2003, 450 p.
- Sun X., Nie Z.** Vector finite element analysis of multicomponent induction response in anisotropic formations // Prog. Electromag. Res., 2008, v. 81, p. 21—39.
- Wang T., Yu L., Fanini O.** Multicomponent induction response in a borehole environment // Geophysics, 2003, v. 68, № 5, p. 1510—1518.

Рекомендована к печати 1 апреля 2009 г.
М.И. Эповым

Поступила в редакцию
11 февраля 2009 г.

