

В. С. МОГИЛАТОВ, А. М. ГЕНДЕЛЬМАН

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБСАЖЕННЫХ СКВАЖИН В НАЗЕМНО-СКВАЖИННОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ НА НЕФТЬ И ГАЗ В УСЛОВИЯХ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Исследуется влияние обсадной колонны скважины на поле источника, заземленного на колонну. На первом этапе рассматривается распределение стекающего с колонны тока. Применительно к условиям нефтегазоносных провинций Восточной Сибири среда представлена двуслойным разрезом, включающим тонкие проводящие горизонты.

Успешная реализация достоинств наземно-скважинных методов электроразведки (НСЭ) — приближение элементов приемно-питающей установки к объекту изучения, возможность образования конфигурации поля, наиболее чувствительной к объекту — существенно зависит от размещения установки в скважине. Рассмотрим принципиальный момент этой проблемы — влияние металлической обсадной колонны на создаваемое установкой поле. Если оно велико и не поддается учету, это резко снизит значение методов НСЭ, поскольку использование необсаженных скважин вряд ли возможно в широких масштабах.

Анализ применения обсадной трубы для погружения в нее источника включает прежде всего решение вопроса о характере стекания тока с колонны в среду в зависимости от параметров среды и положения источника. Этот вопрос рассматривался В. С. Монсеевым на примере обсаженной скважины, помещенной в проводящее полупространство.

Для сред с различной проводимостью им сделаны расчеты методом электротехнического эквивалента, результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными, сделаны определенные методические заключения.

В данной статье развивается иной подход, позволяющий рассчитать распределение стекающего тока в более сложных геоэлектрических условиях. Сразу следует выделить ситуацию, когда область стекания тока в

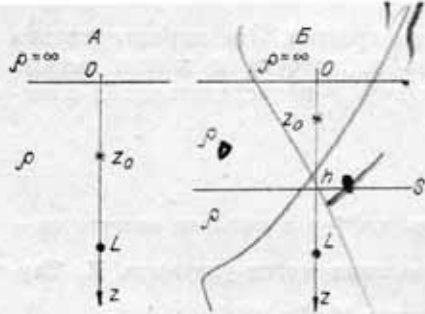


Рис. 1. Модели скважины (объяснения в тексте).

основном сконцентрирована вблизи точки заземления источника. В этом случае колонну можно игнорировать и пользоваться представлением о точечном источнике. Однако предварительные расчеты показывают, что для условий Восточной Сибири это не справедливо. В силу значительного удельного сопротивления вмещающей среды (примерно $70 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) плотность стекающего тока медленно уменьшается вниз по колонне, так что целесообразность погружения источника становится сомнительной. Но если скважина пересекает

хорошо проводящие горизонты, например, водонасыщенный коллектор (что типично для Восточной Сибири), то значительная часть тока будет попадать в эти горизонты непосредственно по колонне, обеспечивая возможность их прослеживания. Ниже количественно анализируется эта ситуация.

Постановка и решение задачи для полупространства. Пусть в полупространстве с удельным сопротивлением ρ погружена колонна длиной L и радиусом a . Источник постоянного тока силой I заземлен на колонну в точке z_0 (рис. 1, А). Распределение стекающего тока найдем способом, использованным в [1] для расчета сопротивления линейного заземления. Постановка и решение задачи сводятся к следующему: рассматриваем колонну как проводящую линию с линейным сопротивлением

$$q = \rho_n / S_n, \quad (1)$$

где ρ_n — удельное сопротивление материала колонны (сталь, $\rho_n = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$), S_n — проводящее сечение трубы.

Примем следующие условия:

1) токи, стекающие с торцов колонны, равны нулю (для верхнего торца это очевидно, а токами, стекающими с нижнего торца, можно пренебречь из-за его малой поверхности по сравнению с боковой);

2) сопротивление стеканию g определяется только сопротивлением вмещающей среды, а именно:

$$g = k \cdot \rho, \quad (2)$$

где k — коэффициент, слабо зависящий от длины и радиуса колонны.

Если представить колонну вытянутым эллипсоидом вращения с полуосями $L/2$ и a , то согласно [1],

$$k = 1/2\pi \cdot \ln L/a. \quad (3)$$

Потенциал вдоль колонны удовлетворяет уравнению

$$U''(z) = \frac{q}{g} U(z). \quad (4)$$

Протекающий по колонне ток $I_n(z)$ связан с потенциалом:

$$I_n(z) = -\frac{1}{q} U'(z). \quad (5)$$

Стекающий в среду ток определяется изменением протекающего. С малого участка трубы Δz стекает ток

$$\Delta I_c(z) = \Delta z \frac{dI_n(z)}{dz} = -\frac{1}{g} U(z) \Delta z. \quad (6)$$

Кроме того, на потенциал должны быть наложены условия:

а) на дневной поверхности

$$U'|_{z=0} = 0; \quad (7)$$

б) на нижнем конце

$$U''|_{z=L} = 0;$$

в) в точке подключения источника (потенциал непрерывен, а сумма протекающих вверх и вниз токов равна полному току)

$$\begin{aligned} [U] |_{z=z_0} &= 0, \\ [U'] |_{z=z_0} &= qI. \end{aligned} \quad (8)$$

Решая уравнение (4) и учитывая условия а), б), в), найдем, что

$$\begin{aligned} U_1 &= I \frac{q}{\alpha} \frac{ch[\alpha(L-z_0)] ch(\alpha z)}{sh(\alpha L)}, \quad 0 \leq z \leq z_0, \\ U_2 &= I \frac{q}{\alpha} \frac{ch(\alpha z_0) ch[\alpha(L-z)]}{sh(\alpha L)}, \quad z_0 \leq z \leq L, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{q}{g}} = \sqrt{\frac{\rho_M}{\rho} \cdot \frac{1}{S_M k}}$.

Зная потенциал, по (6) имеем распределение стекающего тока.

Плоскость S в полупространстве. Найдем распределение потенциала для случая, когда колонна пересекает тонкий проводящий пласт с продольной проводимостью S . Для этого необходимо решить краевую задачу для потенциала, описанную выше, добавив условия в точке пересечения колонны с S -плоскостью.

Для определения этих условий рассмотрим пласт конечной мощности h_0 с сопротивлением ρ_0 , помещенный в среду с сопротивлением ρ (см. рис. 1, Б). В точках пересечения скважины с границами пласта должны соблюдаться условия непрерывности потенциала и его производной. Для потенциала на участке трубы в пределах границ пласта, согласно уравнению для U (4),

$$U_0 = A_0 e^{\alpha_0 z} + B_0 e^{-\alpha_0 z}, \quad (10)$$

где $\alpha_0 = \sqrt{q/(k \cdot \rho_0)}$.

На границах ($z = z_1$ и $z = z_1 + h_0$) имеем соотношения

$$\begin{aligned} U_1 &= A_0 e^{\alpha_0 z_1} + B_0 e^{-\alpha_0 z_1}, \\ U'_1 &= \alpha_0 (A_0 e^{\alpha_0 z_1} - B_0 e^{-\alpha_0 z_1}), \\ U_2 &= A_0 e^{\alpha_0(z_1+h_0)} + B_0 e^{-\alpha_0(z_1+h_0)}, \\ U'_2 &= \alpha_0 (A_0 e^{\alpha_0(z_1+h_0)} + B_0 e^{-\alpha_0(z_1+h_0)}). \end{aligned} \quad (11)$$

Используя разложение в ряд Тейлора по малому параметру h_0 в окрестности точки z_1 , получим

$$\begin{aligned} U_2(z_1) &\cong U_1(z_1) + h_0 \cdot U'_1(z_1), \\ U'_2(z_1) &\cong U'_1(z_1) + h_0 \cdot \alpha_0^2 U_1(z_1). \end{aligned} \quad (12)$$

Поскольку $h_0 \alpha_0^2 = q \cdot S/k$, приходим к условиям на S -плоскости:

$$\begin{aligned} U_2 &= U_1, \\ U'_2 - U'_1 &= S \rho \alpha^2 U. \end{aligned} \quad (13)$$

Решая краевую задачу с учетом этих условий, получим следующее решение для S -плоскости, помещенной на уровень $z = h$:

$$\begin{aligned} U(z) &= U_n(z) + U_a(z), \\ U_n^{(1)} &= -\beta U_n(h) \cdot ch[\alpha(L-h)] ch(\alpha z)/E, \quad 0 \leq z \leq h, \\ U_n^{(2)} &= -\beta U_n(h) \cdot ch[\alpha(L-z)] ch(\alpha h)/E, \quad h \leq z \leq L, \\ E &= sh(\alpha L) + \beta ch(\alpha h) \cdot ch[\alpha(L-h)], \\ \beta &= S \rho \alpha, \end{aligned} \quad (14)$$

а функция $U_n(z)$ — потенциал в отсутствии S -плоскости — определяется выражениями (9).

Плотность стекающего тока можно записать:

$$\frac{dI_c(z)}{dz} = -\frac{1}{g} [U_n(z) + U_a(z)]. \quad (15)$$

Получим также выражение для тока, стекающего с колонны непосредственно в S -плоскости. Рассматривая пласт конечной мощности h_0 , получим, что в пласт уходит ток

$$\Delta I_s = -\frac{h_0}{g_0} \cdot U(h) = -\frac{S\rho}{g} U(h), \quad (16)$$

где ρ и g — удельное сопротивление и сопротивление току стекания вмещающей среды.

Две S -плоскости в полупространстве. Для условий Восточной Сибири характерно наличие во вмещающей толще нескольких проводящих горизонтов, которые обычно мало различаются по глубине. Разрешающая способность наземных методов электроразведки оказывается недостаточной для раздельного изучения таких горизонтов. В этом случае совершенно необходимо погружение источника поля с целью дифференцированного заряда проводящих пластов. Однако, если используется обсаженная скважина, то металлическая колонна, электрически соединяя проводящие горизонты, может существенно помешать раздельному возбуждению объектов. Таким образом, необходимо рассмотреть задачу о распределении стекающего тока в присутствии двух S -плоскостей.

Поместим первую S -плоскость с проводимостью S_1 на глубину h_1 , вторую с S_2 на глубину h_2 . Учитывая дополнительно условия на новой S -границе, получим следующие выражения для долей тока, втекающих в пласты непосредственно с колонны:

$$\frac{\Delta I_1}{I} = \frac{\beta_1}{E} [\gamma_1(1 - e_2) + 2\gamma_1\beta_2(1 + e_2) - 2\beta_2\gamma_2(1 + e_1) \sqrt{e_\delta}],$$

$$\frac{\Delta I_2}{I} = \frac{\beta_2}{E} [\gamma_2(1 - e_2) + \gamma_2\beta_1(1 + e_1)(1 + e_\delta) - 2\beta_1\gamma_1(1 + e_1) \sqrt{e_\delta}],$$

где

$$E = -(1 - e_2) - \beta_1(1 + e_1)(1 + e_\delta) - 2\beta_2(1 + e_2) - 2\beta_1\beta_2(1 + e_1)(1 - e_\delta),$$

$$\gamma_i = e^{-\alpha(z_0 - h_i)} (1 + e_2/e_{z_0})(1 + e_i)/(1 - e_2); \quad h_i \leq z_0,$$

$$\gamma_i = e^{\alpha(z_0 - h_i)} (1 + e_2/e_i)(1 + e_{z_0})/(1 - e_2), \quad h_i \geq z_0,$$

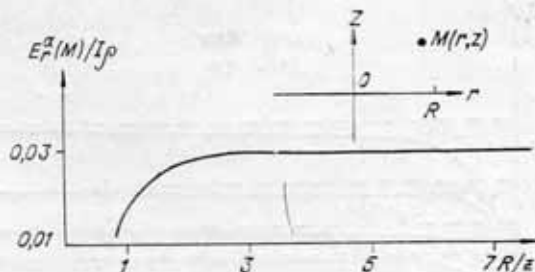
$$\beta_i = \rho S_i \alpha / 2; \quad e_i = e^{-2\alpha h_i}; \quad e_\delta = e^{-2\alpha(h_2 - h_1)}; \quad e_{z_0} = e^{-2\alpha z_0}, \quad i = 1, 2.$$

Здесь положено $L = h_2$.

О применимости полученных решений. Прежде чем перейти к обсуждению результатов, проанализируем характер допущений в постановке задачи. Определив сопротивление стекающего тока как $g = k\rho$ мы в сущности предположили, что характер стекания зависит лишь от вмещающей среды, непосредственно окружающей колонну. Если разрез достаточно выдержан по горизонтали, как обычно бывает в структурной электроразведке, это допущение выглядит оправданным. Обращаясь к рассмотренным моделям, можно заметить, что решение не зависит от того, пересекает скважина безграничную S -плоскость или ограниченный по простиранию тонкий пласт. Появляясь, если скважина проходит вблизи края S -объекта, это должно сказаться на распределении стекающего тока.

Оценим размеры S -объекта, эквивалентного S -плоскости в смысле распределения стекающего тока. С этой целью рассмотрим заряженный идеально проводящий диск в проводящем пространстве. Используя решения [2] и составленную В. С. Моисеевым программу, рассчитаем поля в фиксированной точке $M(r, z)$ при изменении радиуса диска R . На рис. 2 представлена зависимость компоненты аномального поля E_r^a в точ-

Рис. 2. Зависимость компоненты аномального поля E_r^a от радиуса диска.



ке $M(1,1)$ от R . Видно, что при $R = 2$ кривая практически выходит на асимптотическое значение. В реальной ситуации при небольших значениях продольной проводимости критический радиус, разумеется, гораздо меньше. Таким образом, полученные выше решения справедливы, если край объекта удален от скважины более, чем на две глубины погружения объекта (это весьма осторожная оценка, поскольку использовался идеально проводящий диск).

В некоторых простых случаях (например, бесконечная колонна, пересекающая S -плоскость) удается получить строгое решение для поля в произвольной точке вне скважины. Сравнение результатов этих двух решений при должном выборе коэффициента k дает хорошее совпадение (примерно 2%).

Использование обсаженной скважины в условиях Восточной Сибири. Рассматривая выражения (9), (14) и (16), необходимо отметить, что решающее значение для характера распределения тока имеет величина $\alpha = \sqrt{\rho/g}$.

Принимая удельное электрическое сопротивление колонны $\rho_n = 2,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, внутренний и наружный диаметры ее $d_n = 0,12$ и $d_n = 0,15$ м, получим, согласно (1),

$$\rho/g = \rho_n/S_n = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м.}$$

Сопротивление току стекания на единицу длины колонны (g) может быть оценено с помощью соотношения (3). Поскольку на Сибирской платформе L изменяется от 2 до 4 км, что приводит к возрастанию g всего на 7%, можно принять $g = 1,7\rho$, а $\alpha = 5 \cdot 10^{-3}\sqrt{\rho}$. Удельное сопротивление среды примем равным 70–100 Ом·м.

На рис. 3 представлены кривые распределения стекающего тока для значения $\alpha \cdot L = 1,2$ при заземлении на колонну, пересекающую проводящий пласт на глубине $h = L = 2,4$ км, при фиксированной проводимости ($S = S_1$) горизонта. В точке заземления наблюдается максимум поля. С приближением точки заземления к проводящему горизонту все большая доля тока уходит в пласт (до 60% при заземлении в забое). Интересно оценить влияние величины продольной проводимости на величину тока, поступающего в пласт. На рис. 4 представлены соответствующие кривые для различных положений точки заземления ($L = h = 2$ км, $\rho = 70$ Ом·м). Видно, что с увеличением S кривые для различных точек заземления быстро, уже при $S/S_1 \sim 1$, выходят на асимптотическое значение. Другой интерес-

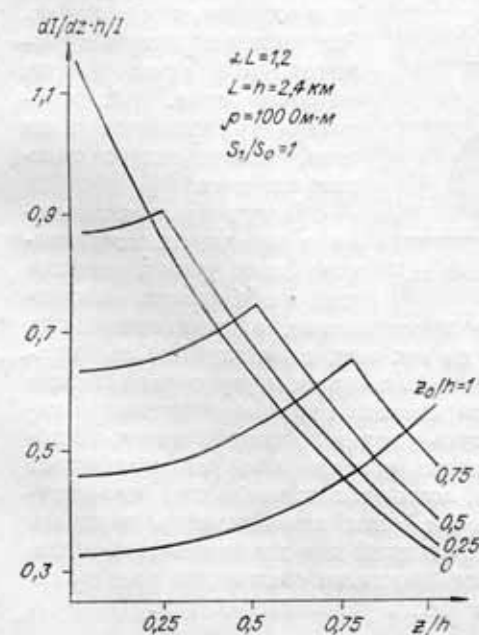


Рис. 3. Распределение стекающего тока при различных положениях точки заземления.

Рис. 3. Распределение стекающего тока при различных положениях точки заземления.

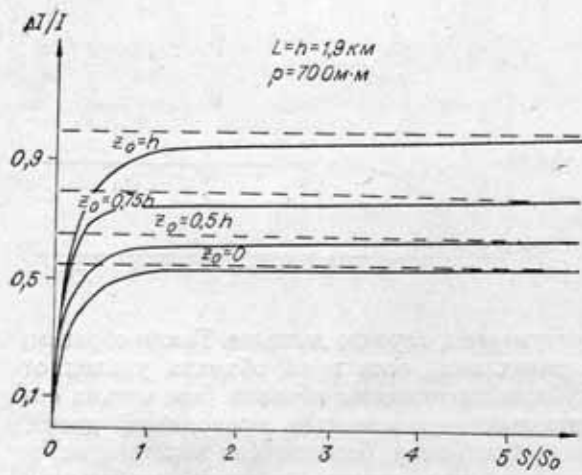


Рис. 4. Доля тока, стекающего в S -плоскость.

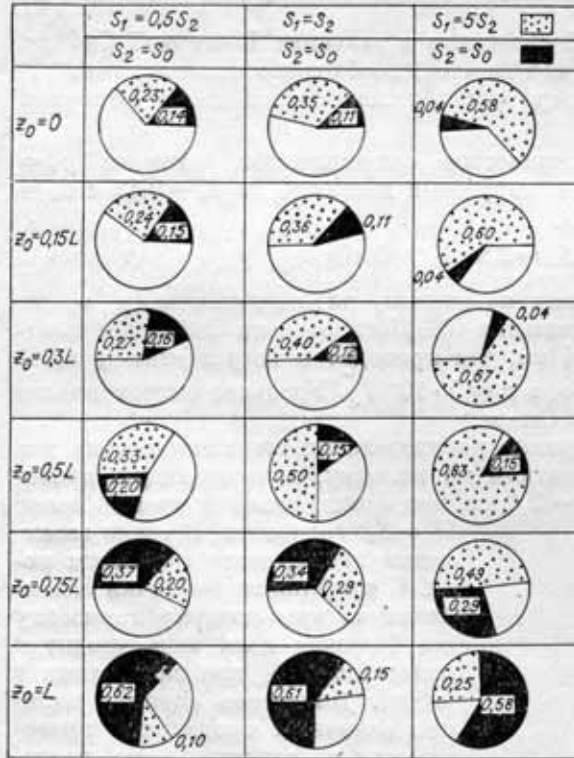


Рис. 5. Доли тока, стекающего в две S -плоскости.

ный момент заключается в том, что даже при заземлении в устье колонны более 50% ($S > S_1$) тока попадает непосредственно в пласт. В этом случае колонна — благоприятный фактор, позволяющий обойтись без погружения источника.

Как уже отмечалось, одной из основных задач НСЭ в Восточной Сибири является раздельное изучение перекрывающихся друг друга коллекторов.

На рис. 5 изображены доли тока, стекающие в каждую из S -плоскостей, при фиксированной величине продольной проводимости второй плоскости и различных точках заземления. Расчеты проводились для тех же величин, что и в задаче с одной S -плоскостью. Глубина залегания первой S -плоскости в два раза меньше, чем второй S -плоскости.

При заземлении на устье скважины большая часть тока поглощается вышележащим проводящим пластом даже в том случае, если его продольная проводимость в два раза меньше, чем нижнего. Эта доля возрастает с увеличением проводимости нижнего слоя. Одновременно уменьшается доля тока, поглощаемого нижним пластом.

Погружение источника приводит к возрастанию доли токов, стекающих в оба пласта, по сравнению с током, уходящим в остальное пространство, однако отношение

этих токов изменяется несущественно до тех пор, пока глубина заземления источника меньше или равна глубине залегания первого слоя. После прохождения первого слоя картина распределения тока между плоскостями резко меняется: все большая его часть уходит во второй пласт. Наконец, при помещении источника на уровень второго слоя он поглощает большую часть тока даже в том случае, если проводимость нижнего горизонта меньше, чем верхнего. В частности, если проводимость верхнего слоя в пять раз выше, чем нижнего, последний все же поглощает в два раза меньший ток. Если же проводимость верхнего слоя в два раза меньше, чем нижнего, то в него натекает в шесть раз меньший ток.

Таким образом, в геоэлектрических условиях Восточной Сибири погружение источника тока в обсаженную скважину, расположенную в водонасыщенной части месторождения, — эффективное средство раздельного изучения двух проводящих горизонтов. При этом заряд первого горизонта можно осуществлять (как и в случае одного коллектора в разрезе) либо погружением источника на его уровень, либо заземлением на устье. Для заряда нижнего горизонта совершенно необходимо помещение источника на его уровень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заборовский А. И. Электроразведка. М.: Гостехиздат, 1963.
2. Сапожников В. М. Возмущение электрического поля точечного источника проводящим круглым диском. — В кн.: Вопросы рудной геофизики. Свердловск, 1973. (Научн. тр. Свердловского горного ин-та, вып. 105).

СНИИГГуМС
Новосибирск

Поступила в редакцию
16 апреля 1982 г.

V. S. Mogilatov, A. M. Gendel'man
ON POSSIBLE USE OF CASED WELLS
IN SUPERFICIAL-WELL ELECTRIC PROSPECTING
FOR OIL AND GAS ON THE SIBERIAN PLATFORM

The paper deals with the study of influence of casing of well on the source field earthed on casing. At first stage discussed is the distribution of current of the casing. In conformity with the conditions in oil-and-gas bearing provinces of East Siberia, medium is represented by double-layer section comprising thin conductive horizons.
