

В. С. МОГИЛАТОВ, Н. В. ГОРОШКО

## СТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЯ ОТ ИСТОЧНИКА, ЗАЗЕМЛЕННОГО В ОБСАЖЕННОЙ СКВАЖИНЕ

Исследуется влияние обсадной колонны скважины на становление поля вертикальной электрической линии, заземленной в обсаженной скважине. Показано, что оно сводится к уменьшению силы тока источника. Предлагается формула, учитывающая это влияние, и рассматриваются некоторые практические аспекты полученных результатов.

Устанавливаемое поле, возбуждаемое вертикальным электрическим диполем (ВЭД), исследовалось в работе [1]. Полученные теоретические результаты показали, что поле такого источника в средах с изолирующим основанием обладает уникальными особенностями, в частности неограниченной разрешающей способностью, точнее, ограниченной только уровнем внешних помех и шумов регистрирующей аппаратуры. Обусловлено это тем, что в поздней стадии поле изменяется по экспоненциальному закону, причем показатель экспоненты зависит от всех геоэлектрических параметров среды. Устанавливаемое поле ВЭД имеет свойства, которые могут оказаться ценными для нефтяной электроразведки на Сибирской платформе. Одно из них состоит в том, что вклад аномального поля проводящего горизонта (водонасыщенного коллектора, например) в процессе становления неограниченно растет (до 100%), сколь бы малым ни был его вклад в суммарную продольную проводимость разреза. С другой стороны, влияние высокоомного перекрывающего экрана (соленосной толщи) меняется слабо.

В работе [1] предполагалось, что диполь заземлен в необсаженной скважине. Понятно, что наземно-скважинная электроразведка практически может использовать только обсаженные скважины. Но при заземлении концов линии на обсадную колонну распределение стекающего тока существенно меняется. Если среда низкоомна ( $\sim 2-4$  Ом·м, как это имеет место в Западной Сибири), то ток стекает в среду с колонны с небольшого участка вблизи конца линии. Другое дело в Восточной Сибири, где удельное сопротивление среды много выше ( $\sim 70$  Ом·м). Ток, прежде чем покинуть металлическую колонну, широко (по вертикали) распространяется по колонне. Если заземлена вертикальная линия, то часть тока просто замыкается по колонне.

Оценим влияние обсадной колонны на устанавливаемое поле вертикальной электрической линии, заземленной на колонну.

Пусть скважина длиной  $L$  пересекает (возможно, не до основания) двухслойный разрез с изолирующим основанием, мощностью  $H$  и удель-

ным сопротивлением  $\rho$ . Электроды генератора с током  $I_0$  заземлены в точках  $z_{01}$  и  $z_{02}$ . Устанавливаемое поле после выключения такого источника можно разделить на три слагаемых — поле вертикальной линии  $z_{01} - z_{02}$  с током  $I_0$  и поля двух систем вертикальных линий. В каждой из этих систем каждая линия заземлена одним концом в точке заземления источника ( $z_{01}$  или  $z_{02}$ ), а другим — в какой-либо точке колонны  $z$  ( $0 \leq z \leq L$ ), с окрестности которой  $\Delta z$  стекает ток этой линии  $\Delta I$ .

Приведем распределение стекающего тока [2]. До выключения с участка колонны  $\Delta z$  стекает ток

$$\Delta I(z) = -U(z)\Delta z/g. \quad (1)$$

Здесь  $U(z)$  — потенциал по колонне:

$$U(z) = I_0 \frac{q}{\alpha} \frac{\text{ch}[\alpha(L-z_0)] \text{ch}(\alpha z)}{\text{sh}(\alpha L)}, \quad 0 \leq z \leq z_0, \quad (2)$$

$$U(z) = I_0 \frac{q}{\alpha} \frac{\text{ch}(\alpha z_0) \text{ch}[\alpha(L-z)]}{\text{sh}(\alpha L)}, \quad z_0 \leq z \leq L,$$

где  $\alpha = \sqrt{q/g}$ ,  $q = \rho_m/S_m$  — линейное сопротивление единицы длины колонны,  $\rho_m$  — удельное сопротивление металла колонны,  $S_m$  — проводящее сечение колонны,  $g = k \cdot \rho$  — сопротивление стеканию единицы длины колонны,  $k$  — коэффициент, слабо зависящий от радиуса и длины колонны, значение которого обычно можно принять равным 1,5.

Таким образом, задача сводится к суммированию (интегрированию) полей вертикальных линий. Устанавливаемое после выключения тока поле вертикальной электрической линии (ВЭЛ) легко получить, проинтегрировав выражение для диполя, полученное в [1]. Для градиента на дневной поверхности имеем:

$$E_r^{\text{ВЭЛ}} = \frac{I_0}{\pi H} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n^{\text{ВЭЛ}} T_n,$$

$$Z_n^{\text{ВЭЛ}} = \cos\left(\frac{\pi n}{H} z_1\right) - \cos\left(\frac{\pi n}{H} z_2\right), \quad (3)$$

$$T_n = \exp\left(-\frac{n^2 \tau^2}{8H^2}\right) \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr) m^2 \exp((-m^2 \tau^2)/(8\pi^2))}{m^2 + \pi^2 n^2/H^2} dm,$$

где  $z_1$  и  $z_2$  — положения точек заземления,  $\tau = \sqrt{8\pi^2 I_0 \rho_m}$ ,  $\mu$  — магнитная проницаемость (вакуума),  $I$  — ток в линии до выключения.

Рассмотрим поле, связанное с одной из точек заземления, допустим, с  $z_{01}$ . Ток из точки  $z_{01}$  поступает по колонне ко всем точкам колонны и стекает в среду. Таким образом, с каждым участком трубы  $\Delta z$  мы связываем линию, заземленную в точках  $z_{01}$  и  $z$ . Суммируя поля всех линий вверх от  $z_{01}$  и вниз (т. е. интегрируя по  $z$  от 0 до  $L$  выражение (3), где теперь  $I$  есть функция от  $z$  (1),  $z_1$  и  $z_2$  — соответственно  $z_{01}$  и  $z$  и учитывая, что токи в линиях над  $z_{01}$  и под  $z_{01}$  текут в противоположных направлениях, получим окончательно поле становления от системы линий, связанных с  $z_{01}$  (на дневной поверхности):

$$E_r^{z_{01}} = \frac{I_0^0}{\pi H} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n^{z_{01}} T_n, \quad (4)$$

где теперь

$$Z_n^{z_{01}} = -\frac{\alpha \pi n/H}{\text{sh}(\alpha L) (\alpha^2 + \pi^2 n^2/H^2)} \left[ \cos\left(\frac{\pi n z_{01}}{H}\right) \text{sh}(\alpha L) - \text{ch}(\alpha z_{01}) \sin\left(\frac{\pi n L}{H}\right) \right].$$

Для системы линий, связанных с точкой  $z_{02}$ , получим аналогичное выражение (место  $z_{01}$  занимает  $z_{02}$ ). Наконец, суммируя эти два решения с разными знаками и добавляя поле линии  $z_{01} - z_{02}$  с током  $I_0$ , приходим к окончательному выражению для устанавливающегося поля ВЭЛ, заземленной на колонну на дневной поверхности двухслойного разреза с изолирующим основанием:

$$E_z^K = \frac{I_0 \rho}{\rho H} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n^K T_n,$$

$$Z_n^K = \frac{\alpha}{\text{sh}(\alpha L) (\alpha^2 + \pi^2 n^2 / H^2)} \left\{ \alpha \text{sh}(\alpha L) \left[ \cos\left(\frac{\pi n z_{01}}{H}\right) - \cos\left(\frac{\pi n z_{02}}{H}\right) \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{\pi n}{H} \sin\left(\frac{\pi n}{H}\right) [\text{ch}(\alpha z_{01}) - \text{ch}(\alpha z_{02})] \right\}. \quad (5)$$

Заметим, прежде всего, что спад поля на поздних временах определяется первым членом и происходит экспоненциально:

$$E_r^K \approx \frac{I_0 \rho}{\pi H} \cdot Z_1^K \cdot \exp\left(-\frac{\tau^2}{8H^2}\right) \cdot \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr) m^2 \exp((-m^2 \tau^2)/(8\pi^2))}{m^2 + \pi^2/H^2} dm. \quad (6)$$

Оценивая влияние колонны сравнением поля колонны и линии, рассмотрим отношение полей в поздней стадии, взяв в (3) и (5) первые члены ряда:

$$\frac{E_r^K}{E_r^{ВЭЛ}} = \frac{Z_1^K}{Z_1^{ВЭЛ}} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \pi^2/H^2} - \frac{\alpha \pi / H}{\alpha^2 + \pi^2/H^2} \cdot \frac{\sin(\pi L/H)}{\text{sh}(\alpha L)} \cdot \frac{\text{ch}(\alpha z_{01}) - \text{ch}(\alpha z_{02})}{\cos(\pi z_{01}/H) - \cos(\pi z_{02}/H)}. \quad (7)$$

При  $L = H$  (колонна достигает фундамента) получаем особенно простой вид:

$$\frac{E_r^K}{E_r^{ВЭЛ}} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \pi^2/H^2}. \quad (8)$$

Таким образом, на поздней стадии ( $\tau/H > 2$ ) влияние скважины эквивалентно уменьшению мощности источника на всех временах этой стадии и на всех разносах и определяется только параметром  $\alpha$ . Простой расчет по формуле (8) дает следующую зависимость, представленную в табл. 1.

На ранних временах поле близко к полю постоянного тока. Полагая  $\tau \rightarrow 0$ , получим для  $T_n$

$$T_n \rightarrow T_n^0 = \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr) m^2}{m^2 + \pi^2 n^2 / H^2} dm = \frac{\pi n}{H} K_1\left(\frac{\pi n r}{H}\right),$$

где  $K_1\left(\frac{\pi n r}{H}\right)$  — модифицированная функция Бесселя.

Таким образом, в ранней стадии становления поле определяется для колонны выражением

$$E_r^K \approx \frac{I_0 \rho}{\pi H} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n^K \left(\frac{\pi n}{H}\right) \cdot K_1\left(\frac{\pi n r}{H}\right), \quad (9)$$

а для линии

$$E_r^{ВЭЛ} \approx \frac{I_0 \rho}{\pi H} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n^{ВЭЛ} \left(\frac{\pi n}{H}\right) K_1\left(\frac{\pi n r}{H}\right). \quad (10)$$

Учитывая поведение функции  $K_1$ , можно утверждать, что на разносах, сравнимых или больших мощности  $H$ , поля колонны и линии опре-

Таблица 1. Влияние колонны на поздних временах

$\alpha \cdot H$	$E_r^k / E_r^{ВЭЛ}$
1	0,092
2	0,288
3	0,447
5	0,717
10	0,910

Таблица 2. Влияние колонны на ранних временах

$\alpha \cdot H$	$r/H$	$E_r^k / E_r^{ВЭЛ}$
1	0,5	0,096
	1,0	0,093
	2,0	0,092
5	0,5	0,740
	1,0	0,729
	2,0	0,727
10	0,5	0,932
	1,0	0,926
	2,0	0,926

Таблица 3. Аномальные эффекты

$S/S_0$	ВЭЛ	ВЭЛк
1,00	380	100
0,50	150	40
0,25	60	15
0,125	30	10

деляются первыми членами рядов (9) и (10), так что отношение полей определяется теми же выражениями, что и на поздних временах, т.е. (7) или (8). Точный расчет с учетом и последующих членов рядов (9) и (10) дает для более широкого диапазона разносов зависимость соотношения  $E_r^k$  и  $E_r^{ВЭЛ}$  на ранних временах ( $L = H$ ), приведенную в табл. 2.

Сравнение табл. 1 и 2 позволяет сделать вывод, который и является основным результатом данного исследования: заземление линии в обсаженную скважину не изменяет пространственной конфигурации поля и поведения поля со временем, влияние колонны эквивалентно уменьшению тока источника. Это уменьшение на всех рабочих временах и разносах определяется формулой (7) или (8).

Покажем, как этот простой по своему смыслу результат проявляется в различных реальных ситуациях.

Для обсадных труб с внешним диаметром 0,15 м и внутренним 0,12 м можно предложить следующую формулу для  $\alpha$ :

$$\alpha = 5 \cdot 10^{-3} / \sqrt{\rho}. \quad (11)$$

Воспользовавшись этой формулой, найдем, что диапазон  $\alpha H = 1 \div 2$  соответствует условиям Восточной Сибири, а  $\alpha H = 5 \div 10$  — условиям Западной Сибири.

Таким образом, в условиях Западной Сибири заземление линии в обсаженной скважине не приводит к каким-либо существенным потерям в энергетике, а процесс становления поля можно рассматривать как процесс становления от вертикальной линии с точечными заземлениями.

Оценим теперь перспективы применения режима становления при использовании заземленных в обсаженной скважине электрических линий на Сибирской платформе. Как уже отмечалось, вертикальная электрическая линия в «чистом» виде в режиме становления — весьма эффективный [1] источник при выделении, разделении и оконтуривании водонасыщенной части коллектора. Однако, как следует из таблиц 1, 2 ( $\alpha H \sim 1,5$ ), поле линии ослабляется на порядок при заземлении в обсаженной скважине. Учитывая технические ограничения на величину посылаемого в скважину тока, мы сталкиваемся с проблемой измерения сигнала от малоомощного источника. Это обстоятельство может оказаться решающим, ибо эффективность ВЭЛ тем выше, чем более поздние времена мы используем.

Сравним поля линий, заземленных в обсаженной и в необсаженной скважине, задавшись одним и тем же минимальным сигналом в 1 мкВ (при одной мощности источника тока  $\sim 10$  А). Для сравнения используем аномальный эффект от проводящей плоскости с продольной проводимостью  $S$ , включенной в слой проводимостью  $S_0 = H/\rho$ . В табл. 3 приведены величины относительных аномальных эффектов ( $E_r^k/E_r^a, E_r^k/E_r^u$  — градиент в отсутствие проводящего горизонта) для разных значений  $S/S_0$  (в %).

Как видно, реальная эффективность ВЭЛ в обсаженной скважине резко упала.

Если в наземно-скважинной электроразведке в условиях высокоомной вмещающей среды использовать режим становления, то при заземлении в обсаженную скважину следует заземлять только один конец питающей линии, а второй заземлять в удалении от устья скважины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдман М. М., Могилатов В. С. Становление поля вертикального электрического диполя, погруженного в горизонтально-слоистое полупространство.— В кн.: Теория и опыт применения электромагнитных полей в разведочной геофизике. Новосибирск: изд. ИГиГ СО АН СССР, 1978.
2. Могилатов В. С., Гендельман А. М. О возможности использования обсаженных скважин в наземно-скважинной электроразведке на нефть и газ в условиях Сибирской платформы.— Геология и геофизика, 1983, № 3.

*СНИИГГиМС  
Новосибирск*

*Поступила в редакцию  
15 мая 1985 г.*

**V. S. Mogilatov, N. V. Goroshko**

#### TRANSIENT FIELD DUE TO SOURCE GROUNDED IN THE CASSED WELL

The effect of the casing on the transient field of the vertical electric line, grounded in cased well, is studied. It is shown, that this effect reduces current strength of the source. Proposed is the formula with the allowance for this effect and certain practical aspects of the obtained results are discussed.