

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 550.372 : 624.131.5.

С.М. Простов, Е.А. Мальцев, В.В. Демьянов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ГЕОКОНТРОЛЯ НА КОЛЬЦЕВОМ ИНТЕГРАТОРЕ

Геоконтроль методом индукционного каротажа, основанном на измерении ЭДС переменного магнитного поля вихревых токов в диапазоне частот 50-150 кГц, является эффективным средством исследования геомеханического состояния электропроводящих рудных и породных массивов.

Применение импульсно-резонансного способа измерений с автоматическим регулированием резонансного режима генераторного контура позволило обеспечить достаточную чувствительность контроля сред с удельным электросопротивлением (УЭС) до 300 Ом·м [1]. Опытно-производственные испытания скважинного индукционного геоконтроля при укреплении влагонасыщенных грунтов в основании производственного объекта в комплексе с бесскважинными электрофизическими методами показали, что применение индукционного метода позволяет вдвое повысить точность определения границ геоэлектрических аномалий в геологически неоднородных грунтовых массивах [2]. При геофизическом изучении многослойных неустойчивых песчано-глинистых наносов и плывунов индукционный каротаж является единственным методом, обеспечивающим поинтервальное измерение эффективного УЭС среды путем бесконтактного электромагнитного зондирования в скважинах, обсаженных трубами из непроводящего материала (полиэтилен, асбоцемент).

Для повышения достовер-

ности интерпретации каротажных диаграмм проведены лабораторные исследования данного метода геоконтроля на физических моделях неоднородных проводящих сред.

Известны два основных способа подобного моделирования: использование емкостей с растворами переменной концентрации и эталонировочных колец (кольцевых интеграторов) [3]. Поскольку электролитическое моделирование требует емкостей объемом не менее 6-8 м³, целесообразно использовать кольцевой интегратор, причем

лированного алюминиевого провода диаметром 4 мм (рис.1). При сборке схемы интегратора впервые применено последовательное соединение колец перемычками. В разрыв секций интегратора подключали магазин электросопротивлений 4 типа ММЭС 3026.

Основное содержание лабораторных исследований состояло в следующем.

1. Исследование осевой и радиальной чувствительности геоконтроля. Относительно проволочных колец с диаметрами $D = 20, 40, 60, 80$ см, расположенных в вертикальной плос-

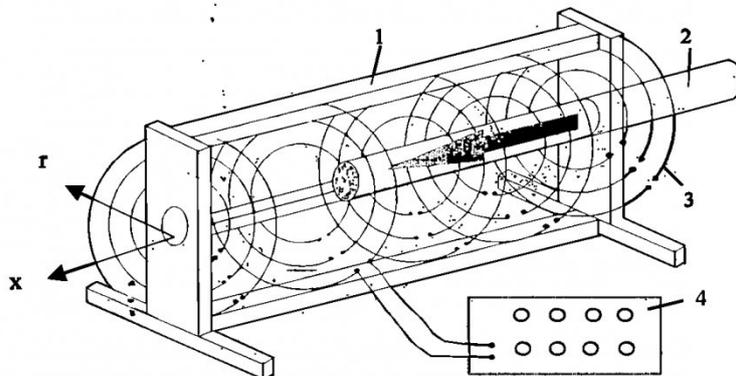


Рис. 1. Схема установки

при УЭС ρ моделируемой среды до 10 Ом·м применяют замкнутые проволочные кольца, подбирая диаметр, сечение и проводимость материала колец, при $\rho > 10$ Ом·м – разомкнутые, с включением в разрыв резистора или потенциометра [4].

Лабораторная установка состояла из непроводящего деревянного каркаса 1 с направляющей для датчика 2, на которой укреплены кольца 3 из изо-

кости коаксиально, перемещали вдоль горизонтальной оси датчик с шагом 5 см. В каждом положении датчика изменяли электросопротивление, включенное в разрыв кольца соответствующего диаметра, фиксировали величину E сигнала.

2. Построение лабораторных тарировочных зависимостей. Восемнадцать колец указанных диаметров ($D = 20-60$ см) в 6 плоскостях были соеди-

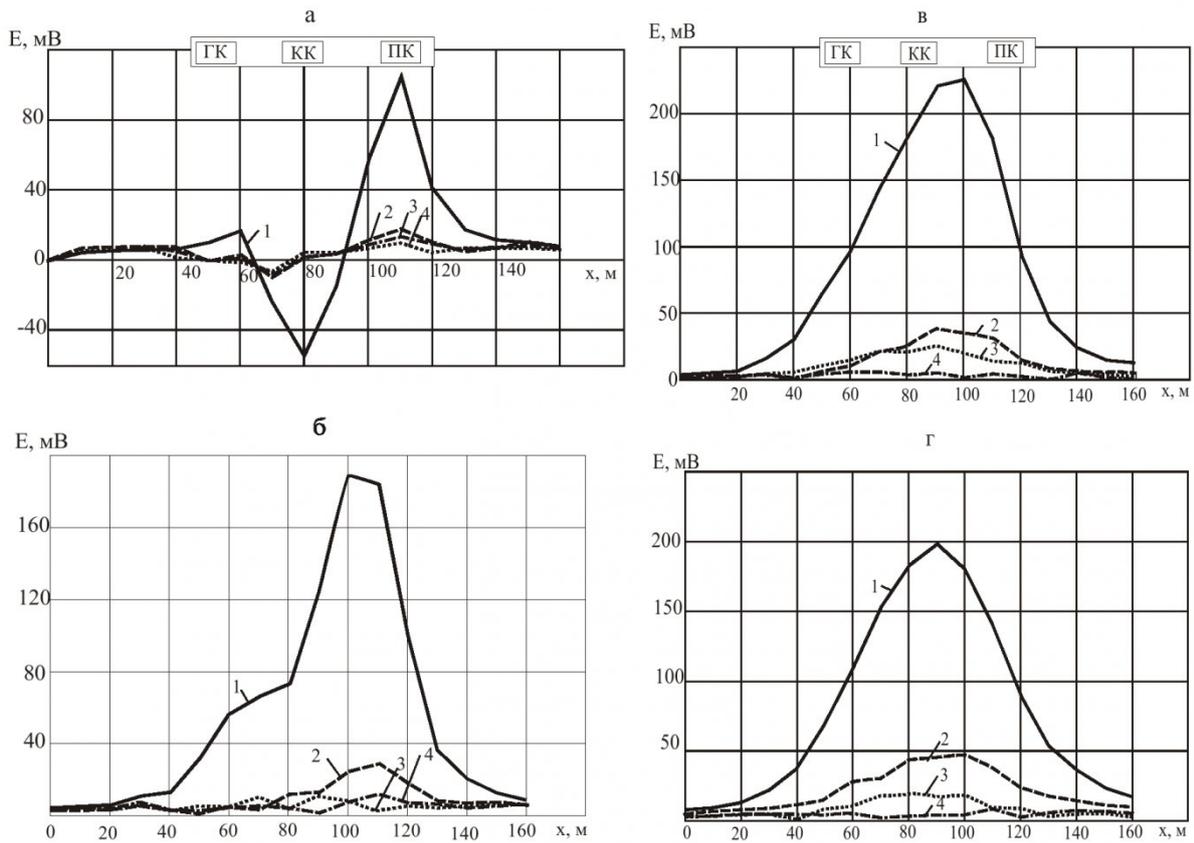


Рис. 2. Графики изменения чувствительности датчика при $D = 20$ см (а), 40 см (б), 60 см (в) и 80 см (г): 1 – $R^* = 0,1$ Ом; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100

нены последовательно, в разрыв цепи включали переменное сопротивление R^* . Датчик помещали в центр установки. Используя специальную методику расчета эквивалентного УЭС среды ρ , получали график функции $E(\rho)$, на котором выделяли отдельно низко- и высокоомную ветви.

3. Исследование реакции датчика на переход между зонами с высокой и низкой проводимостью. Кольца, входящие

в установку, разбивались на 3 зоны, в которых задавали различное сочетание УЭС.

Результаты исследований осевой и радиальной чувствительности датчика представле-

ны на рис. 2-5.

Графики осевой чувствительности при $D = 20$ и 40 см существенно асимметричны: в области низких сопротивлений ($R^* = 0,1$ Ом) на интервале ме-

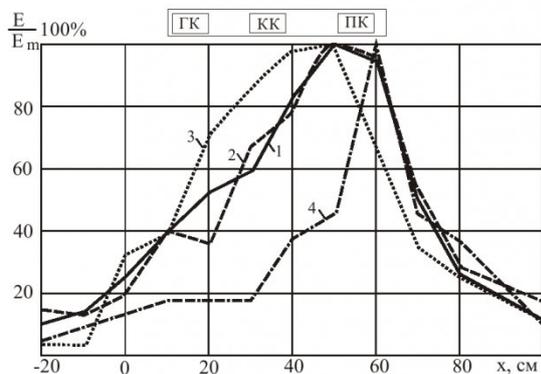


Рис. 3. Интегральная осевая характеристика датчика: 1 – $R^* = 0,1$ Ом; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100

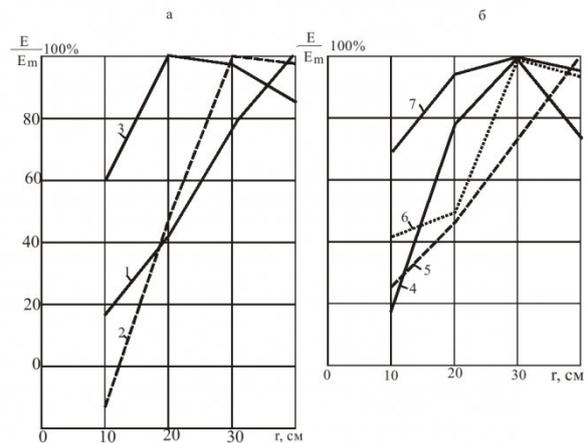


Рис. 4. Радиальные характеристики датчика в плоскостях генераторной (ГК), компенсационной (КК) и приемной (ПК) катушек (а), интегральные характеристики при различных УЭС среды (б): 1 – ГК ($x = 10$ см); 2 – КК ($x = 35$ см); 3 – ПК ($x = 60$ см); 4 – $R^* = 0,1$ Ом; 5 – 1 Ом; 6 – 10 Ом; 7 – 100 Ом

жду главными катушками сильным становится влияние поля компенсационной катушки КК, что приводит к отклонению E в отрицательную область, при $D = 60$ см влияние КК заметно ослабляется, при $D = 80$ см графики $E(x)$ симметричны относительно вертикальной оси с координатой $x = 90$ см (рис. 2).

Для оценки воспроизводимости эксперимента были проведены расчеты средней погрешности δ_{cp} измерений истинного значения E по результатам повторных замеров с использованием общепринятой методики:

$$\delta_{cp} = \frac{\delta}{E} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где δ - абсолютная погрешность измерения истинного значения E

$$\delta = \frac{t}{\sqrt{n}} S = \frac{t}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_{npi} - E_{обpi}}{2} \right)^2};$$

S - среднее квадратичное отклонение измеренных значений от средних; n - число замеров в серии; t - критерий Стьюдента для принятого уровня значимости $\alpha = 0,95$, E_{npi} ; $E_{обpi}$ - значения E при прямом и обратном ходе датчика.

Результаты расчетов показывают, что погрешность измерений во всех режимах не превышает 5%:

D , см	20	40	60	80
δ_{cp} , %	4,06	1,22	1,3	1,12

Интегральная осевая характеристика датчика весьма неравномерна: при работе в низкоомной области ($R^* = 0,1 - 10$ Ом, графики 1-3) зона наибольшей чувствительности расположена на интервале между компенсационной (КК) и приемной (ПК) катушками, в высокоомной области ($R^* = 100$ Ом, график 4) эта зона локализуется в районе ПК (рис.3).

Размер зоны ослабления чувствительности изменяется неравномерно в различных се-

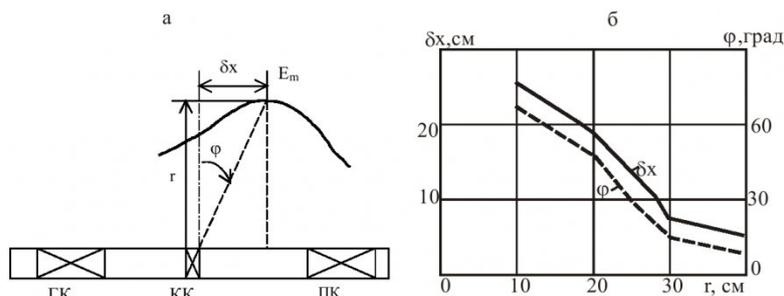


Рис. 5. Схема (а) и графики зависимости линейного δx и углового φ смещения точки максимума чувствительности датчика от плоскости компенсационной катушки (б)

чениях по оси датчика: наибольший размер этой зоны зафиксирован в плоскости генераторной катушки (ГК) ($r_{oc} = 0,4$ м), наименьший - в плоскости ПК ($r_{oc} = 0,2$ м) (рис. 4, а). Таким образом, граница зоны ослабления чувствительности приближено представляет собой усеченный конус, обращенный сужением в сторону ПК.

На интегральных радиальных характеристиках (рис. 4, б) максимум чувствительности зафиксирован на расстоянии $r=0,3$ м во всем диапазоне изменения R^* . При применении обсадной трубы из диэлектрика или малопроводящего материала влияние этой трубы, а также прилегающей к скважине зоны ослабления массива будет минимальным.

Анализ приведенных графиков показывает на то, что при приближении к оси датчика происходит смещение δx точки максимума чувствительности датчика в сторону приемной катушки ПК и соответствующий поворот φ радиуса - вектора этой точки (рис. 5), приведенные зависимости $\delta x(r)$ и $\varphi(r)$ близки к линейным.

Поскольку величина R^* много больше электросопротивления проволочного кольца, при расчете УЭС ρ моделируемой среды можно пренебречь индуктивностью кольца и скин-эффектом. При последовательном соединении колец в группе и включении в разрыв резистора R^* величина электросопротивления k -го кольца установки найдется из выражения

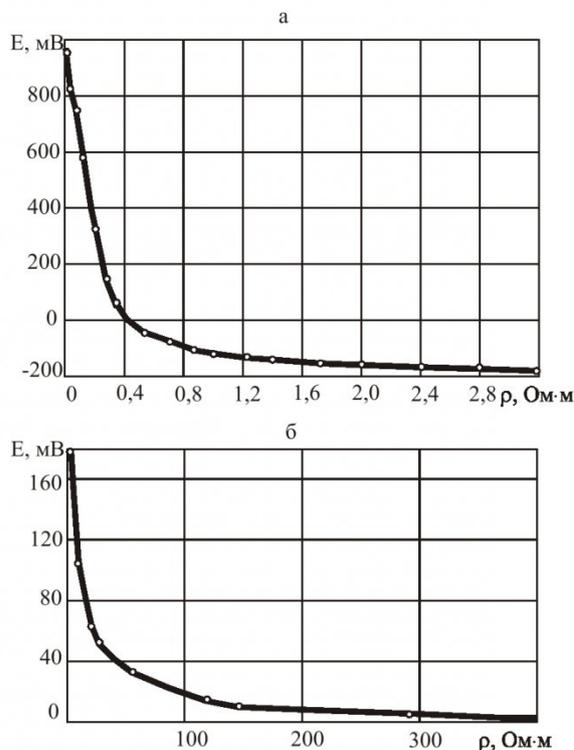


Рис. 6. Низкоомная (а) и высокоомная (б) ветви тарировочной зависимости

$$R_k = l_k R^* \left(\sum_{k=1}^n l_k \right)^{-1}, \quad (2)$$

где l_k – длина k – го кольца; n – число колец в группе.

Электросопротивление кольцевого участка породного массива, соосного датчику и эквивалентного рассмотренному выше проволочному кольцу, можно определить следующим образом:

$$R_M = \rho \frac{l_k}{\Delta S} = \rho \frac{l_k}{\Delta r \cdot \Delta x}, \quad (3)$$

где ΔS – сечение эквивалентного кольца; Δx – расстояние между плоскостями колец, Δr – разность радиусов соседних колец в плоскости, перпендикулярной оси датчика.

Введем постоянную K , учитывающую ограниченность размеров кольцевого интегратора и размеры зоны чувствительности датчика по оси и глубине зондирования:

$$R_M = R_k \cdot K = R_k \frac{\Delta X}{\Delta x(N' - 1)} \frac{r_p}{r_{kmax}} \quad (5)$$

где ΔX – размер зоны осевой чувствительности; N' – число групп колец в установке; r_p – предельная глубина радиального зондирования; r_{kmax} – максимальный радиус кольца в установке.

Решая (2) – (4) относительно ρ , получим

$$\rho = KR^* \Delta r \Delta x \left(\sum_{k=1}^n l_k \right)^{-1}. \quad (6)$$

Для установки на рис. 1, $\Delta x = const = 0,2$ м, $\Delta r = const = 0,1$ м. Из результатов исследований осевой и радиальной чувствительности $\Delta X = 2,0$ м, $r_p = 1,6$ м.

Полученная в результате лабораторных измерений на кольцевом интеграторе при $n = 18$ общая тарировочная зависимость имеет сложный характер, целесообразно выделить на ней две ветви – низкоомную (от

$E|_{R^*=0} = E_{max}$ до E_{min}) и высокоомную (от E_{min} до $E|_{R^* \rightarrow \infty}$).

Низкоомный участок рабочего диапазона датчика ($\rho = 0-3$ Ом·м) соответствует геоконтролю рудного массива (рис. 6, а), высокоомный ($\rho = 3-300$ Ом·м) – безрудных трещиновато-пористых влагонасыщенных породо-грунтовых массивов (рис. 6, б). Обе зависимости $E(\rho)$ гиперболического типа и обеспечивают диапазон измерений до 300 Ом·м.

Ввиду неравномерности осевой и радиальной характеристик датчика специально исследовался характер изменения полезного сигнала E на границе разнопроводящих сред. С этой целью в кольцевом интеграторе (рис. 1) моделировалась 3-

слойная среда, где каждому из слоев соответствовало по 2 последовательно соединенных группы колец ($n = 6$), причем УЭС крайних слоев принимались постоянными, а центрального – переменным.

Исследовалось 2 случая ($\rho_1 < \rho_2$) геологической неоднородности массива:

- 1) "высокоомное" включение – $\rho_1 < \rho_2 > \rho_1$ ($\rho_1 = const, \rho_2 = var$);
- 2) "низкоомное" включение – $\rho_2 < \rho_1 > \rho_2$ ($\rho_2 = const, \rho_1 = var$).

Таким образом, на модели исследовались все возможные случаи пересечения датчиком аномального слоя, причем толщина этого слоя (0,4 м) была соизмеримой с базой датчика (L

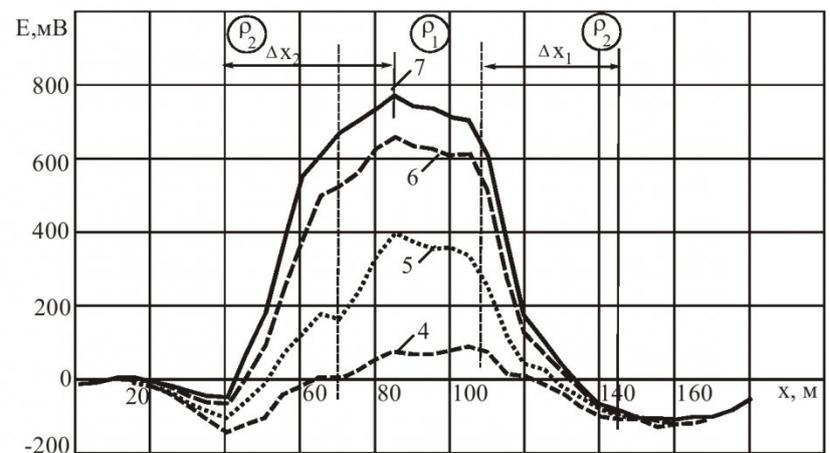
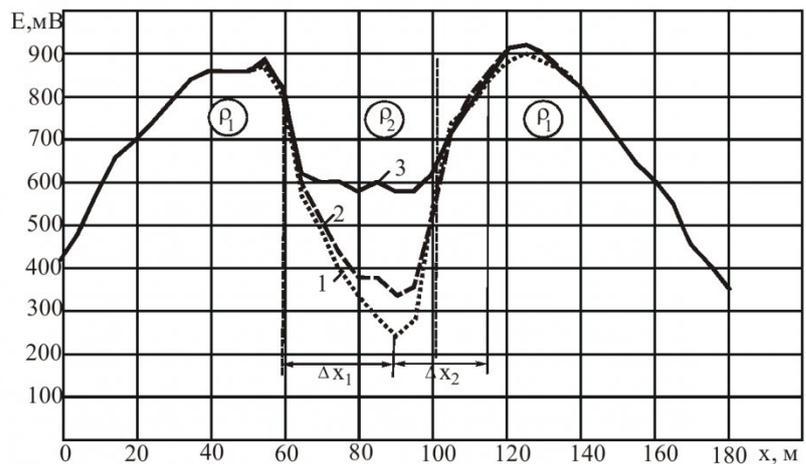


Рис. 7. Исследование зон с аномальной проводимостью, "высокоомное" включение ($\rho_1 = const = 0,14$ Ом·м, $\rho_2 = var$) (а); "низкоомное" включение ($\rho_2 = const = 1,7$ Ом·м, $\rho_1 = var$) (б):
1 – $\rho_2/\rho_1 = 20$; 2 – 5; 3, 4 – 2; 5 – 4; 6 – 12; 7 – 60

= 0,5 м) – расстоянием между главными катушками ГК и ПК.

Результаты исследований представлены на рис. 7.

Анализ графиков показывает, что во всех моделируемых случаях индукционный датчик позволяет уверенно контролировать расположение границы аномального слоя и изменение его УЭС. Вместе с тем, установлено, что ранее установленная асимметричность осевой характеристики датчика (смещение точки максимума чувствительности δx в сторону ПК и соответствующий поворот φ радиуса – вектора этой точки) является причиной особенностей характера графика $E(\rho)$ на границе слоев:

- при переходе датчика из

“низкоомной” среды с УЭС ρ_1 в “высокоомную” с УЭС ρ_2 расположение границы аномального слоя соответствует началу отрицательной аномалии на графике $E(x)$, размер переходной зоны составляет Δx_1 ;

- при переходе из “высокоомной” среды с УЭС ρ_2 в “низкоомную” с УЭС ρ_1 расположение границы слоев соответствует примерно середине переходной зоны Δx_2 .

Статистическая обработка графиков на рис. 7 позволила установить, что относительный размер переходной зоны Δx связан с соотношением ρ_2/ρ_1 .

Получены уравнения регрессии:

$$\frac{\Delta x_1}{L} = 0,391 + 0,105 \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

при корреляционном отношении $R = 0,932$ и критерии надежности $t = 5,76$;

$$\frac{\Delta x_2}{L} = 0,272 + 0,114 \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

при $R=0,882$ и $t=4,18$.

Полученные характеристики индукционного геоконтроля и установленные особенности графиков в неоднородных слоистых средах позволяют более точно интерпретировать результаты натуральных измерений, прогнозировать состояние и свойства укреплемых грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Простов С.М. Электромагнитный бесконтактный геоконтроль/ С.М. Простов, В.В. Дырдин, В.А. Хмяляйнен. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2002. – 132 с.
2. Простов С.М. Комплексный геоконтроль процессов инъекционного укрепления влагонасыщенных грунтов/ С.М. Простов, О.В. Герасимов, Е.А. Мальцев // Вестник КузГТУ. – 2003. - №3. – С.17-20.
3. Плюснин М. И. Индукционный каротаж. - М.: Недра, 1973. – 142 с.
4. Аксельрод С. М. О градуировке аппаратуры индукционного каротажа. – Изв. вузов. Нефть и газ. - 1960. - №5. – С. 19 – 25.

□ Авторы статьи:

Простов
Сергей Михайлович
- докт. техн. наук, проф. каф.
теоретической и геотехнической
механики

Мальцев
Евгений Анатольевич
- аспирант

Демьянов
Владимир Васильевич
- канд. физ.-мат. наук, доц. каф.
электропривода и автоматизации