

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 550.372:622.271.333:626

С.М. Простов, Е.В. Костюков, М.В.Гуцал

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Физической основой геоэлектрического контроля геомеханических и гидродинамических процессов в техногенных массивах гидротехнических сооружений (ГТС) из насыпных грунтов является взаимосвязь электрических свойств горных пород с их структурно-текстурными особенностями и степенью влагонасыщенности пор.

Анализ данных электроразведки в условиях различных геологических сред, обобщенных В.Н. Дахновым и В.Н. Кобрановой в работах [1, 2], позволил получить общую зависимость удельного электросопротивления (УЭС) пористой влагонасыщенной горной породы:

$$\rho = \alpha \kappa_2 m^{-\beta} W^{-\gamma} \rho_b, \quad (1)$$

где $\alpha, \kappa_2, \beta, \gamma$ – эмпирические параметры; α – параметр, зависящий от типа геологического отложения, $\alpha = 0,4-1$; κ_2 – параметр, определяющий влияние глинистого слоя на поверхности пор, $\kappa_2 = 1-1,6$; β – параметр, зависящий от извилистости поровых каналов, $\beta = 1,3-2,2$; γ – параметр, характеризующий смачиваемость порозаполняющим раствором поверхности твердой фазы, $\gamma = 1,4-3,5$; m – пористость породы; W – влагонасыщенность породы; ρ_b – УЭС увлажняющего раствора.

Эмпирические параметры, входящие в (1), изменяются в довольно широких пределах. Для уточнения этих диапазонов применительно к рассматривае-

мым техногенным массивам ГТС проведены комплексные исследования физических свойств, включающих гранулометрический состав, пористость, влагонасыщенность и УЭС в естественных условиях, а также УЭС хранящихся в ГТС жидкостей и отфильтрованной воды.

Инженерно-геологические изыскания, отбор проб из геологических скважин, определение их физико-механических параметров проводились ОАО “КузбассТИСИЗ”. Электрические свойства грунтов и жидкостей исследованы в лаборатории геоконтроля КузГТУ в стандартных ячейках кубической формы размером $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ м четырехэлектродным методом на постоянном токе.

Основные результаты исследований, необходимые для дальнейшего анализа, приведены в табл. 1 и 2 (P_{min} , P_{max} , \bar{P} – соответственно, минимальное, максимальное и среднее значение параметра; K_P – среднее квадратическое отклонение параметра P ; Δ – преобладающий размер частиц грунта, мм; δ – процентное содержание этих частиц в гранулометрическом составе, %).

Полученные данные позволяют обосновать диапазоны структурных постоянных исследуемых техногенных массивов.

Все породы характеризуются нарушенной структурой, представляют собой дисперсные образования, в которых основную роль при формировании

пор играют песчаные и суглинистые компоненты ($\Delta = 0,005-0,05$ мм).

По данным [2] постоянная геологического отложения может принять $\alpha \sim 1$. Поскольку содержание глинистых частиц $\delta \leq 20\%$, а УЭС растворов $\rho_b < 9$ Ом·м, проводимостью глинистого слоя на поверхности пор можно пренебречь, откуда следует, что $\kappa_2 \approx 1$.

Для несцементированных и slabосцементированных пород диапазон изменения параметра β значительно сужается и характеризуется наименьшими из приведенных выше значений: $\beta = 1,3-1,5$.

Наименее исследованным является параметр смачиваемости γ .

При строительстве дамб ГТС используют в том числе отходы обогатительных фабрик (в табл. 1 – дресвяный грунт), являющиеся результатом обработки пород химическими и поверхностно-активными веществами, существенно влияющими на смачиваемость поверхности структурных элементов. Это, в частности, объясняет аномально высокие значения ρ для данного типа пород.

Путем подстановки средних значений табл. 1 и 2 в уравнение (1) получены соотношения между основными структурными параметрами β и γ (рис. 1). Необходимо отметить, что диапазон $\gamma = 4,3-5,0$ для дресвяного грунта (породо-угольного осадка обогатительных фабрик) вы-

Таблица 1

Физико-механические свойства и УЭС насыпных пород техногенных массивов ГТС Кузбасса в естественных условиях

Объект	Порода	$\frac{\delta_{min} - \delta_{max}}{\delta_{min} - \delta_{max}}$, мм %	$\frac{m_{min} - m_{max}}{\bar{m}}$	$\frac{W_{min} - W_{max}}{\bar{W}}$	$\frac{\rho_{min} - \rho_{max}}{\bar{\rho}}$, Ом·м
Ограждающая перемычка ОАО “Разрез Кедровский”	Уплотненные обломки вскрышных пород (песчаника, аргиллита, алевролита), заполнитель полостей – щебень, дресва, угольная крошка, горельник, суглинок, песок	$\frac{1 - 200}{31,4 - 55,3}$	$\frac{0,38 - 0,51}{0,45}$	$\frac{0,12 - 0,22}{0,18}$	$\frac{41,3 - 68,1}{54,8}$
Дамба шламового отстойника ОФ ОАО “Шахта им. С.М. Кирова”	Грунт дресвяный с песчаным заполнителем (породо-угольный осадок шлама)	$\frac{1 - 60}{37,5 - 61,8}$	$\frac{0,38 - 0,478}{0,41}$	$\frac{0,19 - 0,44}{0,33}$	$\frac{1681 - 4537}{3627}$
	Суглинок бурый с включением щебня до 15 %	$\frac{0,005 - 0,05}{38,3 - 57,2}$	$\frac{0,35 - 0,46}{0,41}$	$\frac{0,29 - 0,31}{0,30}$	$\frac{321 - 58,5}{39,7}$
Дамба накопителя ОФ ЗАО “Черниговец”	Суглинок бурый повышенной плотности с включением щебня до 16-20%	$\frac{0,005 - 0,05}{45,8 - 63,9}$	$\frac{0,38 - 0,43}{0,41}$	$\frac{0,23 - 0,25}{0,24}$	$\frac{203 - 47,2}{35,4}$

Таблица 2

УЭС поронасыщающих жидкостей

Объект	Жидкость	ρ_B , Ом·м		
		$\rho_B min - \rho_B max$	$\bar{\rho}$	K_{ρ_B}
Ограждающая перемычка ОАО “Разрез Кедровский”	Глинистая пульпа	2,48-8,46	5,83	4,91 (84,1%)
	Отфильтрованная вода	4,18-4,57	4,23	0,15 (3,5%)
Дамба шламового отстойника ОФ ОАО “Шахта им. С.М. Кирова”	Угольный шлам	2,31-2,98	2,65	0,11 (3,8%)
	Отфильтрованная вода	1,74-2,90	2,24	0,22 (9,8%)
Дамба накопителя ОФ ЗАО “Черниговец”	Угольный шлам	3,47-5,23	4,29	0,34 (7,9%)
	Отфильтрованная вода	3,18-3,97	3,57	0,14 (3,9%)

ходит за пределы, характерные для пород естественного залегания.

Для исследованных грунтов целесообразно принимать следующие средние значения: $\beta = 1,4$; $\gamma = 1,5$ для суглинков; $\gamma = 1,7$ для уплотненных вскрышных пород; $\gamma = 4,6$ для дресвяного грунта.

Поскольку при отсутствии дополнительного уплотнения грунтов тела дамбы в процессе ее эксплуатации в большинстве случаев изменениями пористости m можно пренебречь, из (1) следует, что вариации ρ могут быть связаны только с изменением влагонасыщенности пор W за счет атмосферных осадков и фильтрации жидкости через

тело дамбы. Выражая из (1) W и относя к начальному значению W_0 , получим:

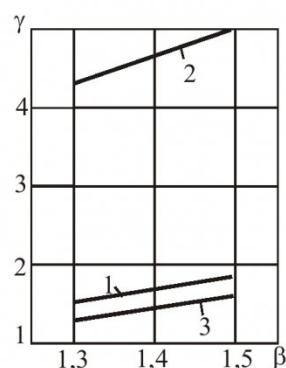


Рис. 1. Зависимость между параметрами β и γ насыпных горных пород дамб: 1 – уплотненные вскрышные породы; 2 – дресвяный грунт; 3 – суглинок

$$\frac{W}{W_0} = \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (2)$$

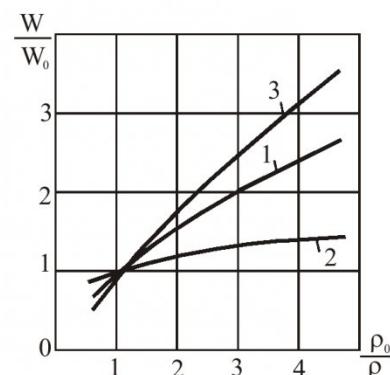


Рис. 2. Расчетная зависимость для прогноза изменения влагонасыщенности грунтов W дамб: 1 – вскрышные породы; 2 – дресвяный грунт; 3 – суглинок

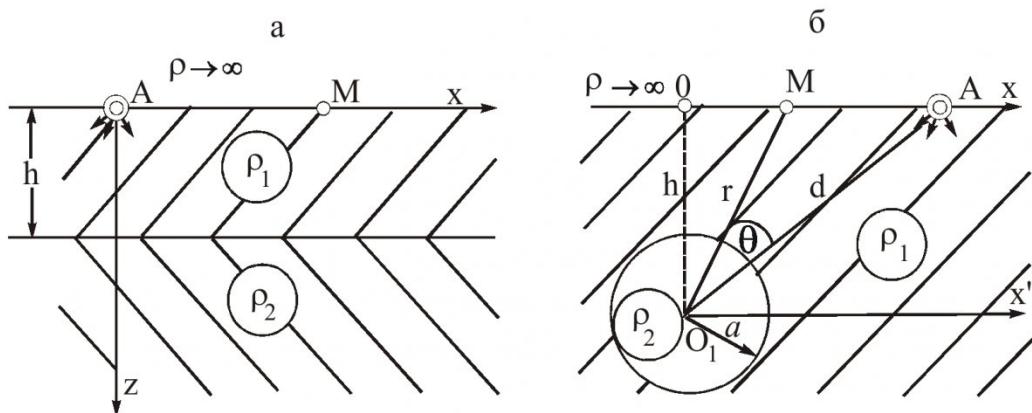


Рис. 3. Расчетные схемы для двухслойной среды (а) и сферического проводящего включения (б):

h – мощность слоя 1 и глубина центра включения; a – радиус включения; x, x', z, γ, θ – координаты; ρ_1, ρ_2 – УЭС сред; A – источник поля; M – расчетная точка

где ρ_0 – УЭС, соответствующее начальной влажности W_0 грунта.

Уравнение (2), представленное в виде графических зависимостей на рис. 2, можно использовать при мониторинге влагонасыщенности техногенных массивов ГТС как в относительных, так и в абсолютных единицах.

При уплотнении (консолидации) пород и отсутствии дополнительного притока влаги (стационарный гидродинамический режим) одновременно с уменьшением пористости m произойдет увеличение степени заполнения пор влагой W и площади электрического контакта между зернами породы. В рамках принятой модели, принимая зависимость W от m обратно пропорциональной, можно получить:

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{\beta-\gamma}}. \quad (3)$$

Поскольку для всех пород $\gamma > \beta$, из (3) следует, что увеличение ρ в данном случае соответствует увеличению m .

Полученные результаты позволяют перейти к анализу аномалий активных электрических полей в районе зоны геоконтроля техногенных массивов ГТС.

В соответствии с подхо-

дом, предложенным в [3], можно выделить две основные геоэлектрические модели исследуемой среды: если обводненная зона представляет собой протяженный проводящий слой, верхняя граница которого находится на глубине h от плоскости гребня, следует рассматривать двухслойное полупространство при $\rho_1 < \rho_2$ (рис. 3а); если обводненная зона локализована (имеет соизмеримые размеры в различных направлениях), ее целесообразно аппроксимировать сферическим проводящим включением (рис. 3б).

Воспользуемся классическими решениями поставленных задач, основанными на применении уравнения Лапласа

при соответствующих условиях на границах слоев, в бесконечности и вблизи источника A , приведенными в работах по теории электроразведки [4-6].

Для схемы на рис. 3а при четырехточечной установке AMNB вертикального зондирования (ВЭЗ) или электропрофилирования (ЭП) на земной поверхности ($z = 0$) для предельного случая ($N, B \rightarrow \infty$) решение может быть представлено путем разложения в степенной ряд:

$$\rho_K(x) = \rho_1 \times \left\{ 1 - 2 \sum_{i=1}^{\infty} \kappa^i x^3 \left[x^2 + (2ih)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \right\} \quad (4)$$

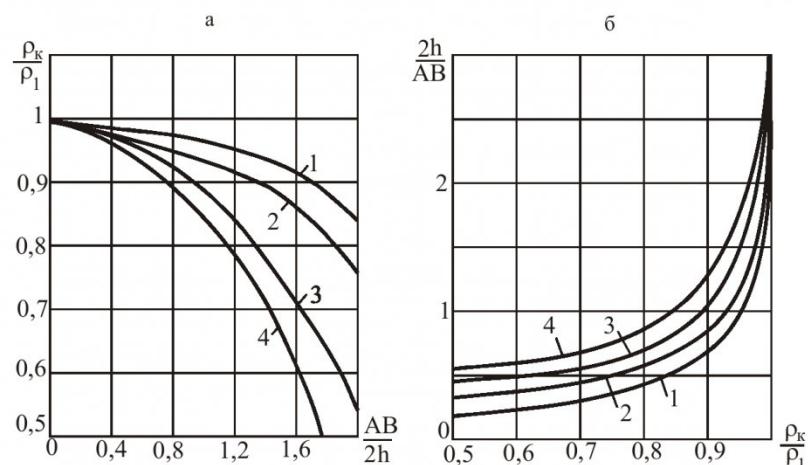
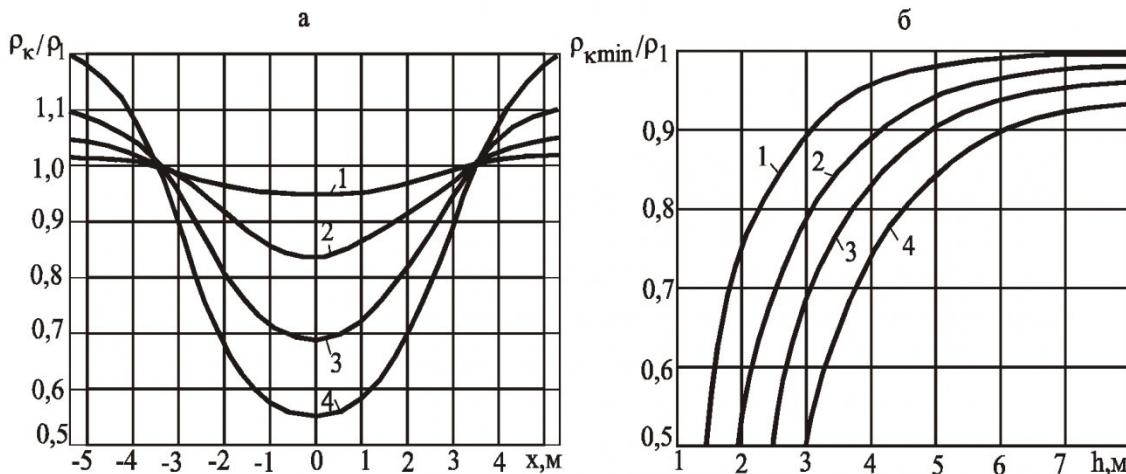


Рис. 4. Зависимости между эффективным УЭС при ВЭЗ (а), ЭП (б) и соотношением базы зондирования AB к мощности h насыпного грунта:

$$1 - \rho_1/\rho_2 = 1,5; 2 - 2; 3 - 5; 4 - 10$$

Рис. 5. Зависимости $\rho_k/\rho_1(x)$ при $h = 5 \text{ м}$, $\rho_2/\rho_1 = 0,1$ (а), $\rho_{kmin}/\rho_1(h)$ (б):1 – $a = 1,5 \text{ м}$; 2 – 2; 3 – 2,5; 4 – 4

где ρ_k – эффективное (кажущееся) УЭС неоднородной среды;

$$\kappa = (\rho_1 - \rho_2)(\rho_1 + \rho_2)^{-1}$$

– коэффициент отражения тока от границы слоев.

На рис. 4 приведены результаты компьютерного расчета по уравнению (4).

Графики $\rho_k/\rho_1(x/h)$ (рис. 4а) позволяют, увеличивая $AM = AB/2$ при ВЭЗ и сопоставляя реальный график с палеткой при известном соотношении ρ_2/ρ_1 , судить о расположении отметки $AB/2 = h$.

Графики на рис. 4б предназначены для количественной интерпретации результатов ЭП. При $AB = \text{const} > 5\Delta h$, пренебрегая непараллельностью границ слоев, можно получить зависимость, доступную для численной реализации:

$$h(x) = h_0 \frac{f[\rho_k(x)/\rho_1]}{f(\rho_{k0}/\rho_1)}, \quad (5)$$

где $h(x)$, $\rho_k(x)$ – значения h и ρ_k в точке ЭП с координатой x ; h_0 – значение h , определенное по данным геологических изысканий в скважинах; ρ_{k0} – величина ρ_k в точке геологических изысканий, отнесеной к h_0 .

Решение прямой задачи электроразведки для схемы на рис. 3, б также может быть

представлено в виде полинома. С погрешностью, не превышающей 10 %, оно может быть записано аналитически, используя первый член полинома:

$$\rho_k(x) = \rho_{k0} \times \left[1 - 2ka^3 \frac{h^2 - 2x^2}{\sqrt{(h^2 + x^2)^5}} \right]. \quad (6)$$

Построенные на основе (6) графические зависимости, приведенные на рис. 5, предназначены для интерпретации диаграмм ЭП: расположение центра сферы определяют по минимуму функции $\rho_k(x)$; сопоставляя график относительного УЭС $\rho_k/\rho_1(x)$ с палеткой (рис. 5, а), определяют эффективный радиус a обводненной зоны; по экстремальному значению $\rho_{kmin}/\rho_1(h)$ и a определяют глубину h аномальной зоны.

Весьма важным вопросом при решении обратных задач электроразведки и геоэлектрического контроля является эффективная глубинность зондирования z_3 , поскольку при анализе диаграмм ЭП и ВЭЗ величину z_3 принимают зависимой от разноса AB питающих электродов установки.

При обосновании z_3 анализируют функции горизонтальной составляющей плотности тока $j_x(z)$ и полного тока $I_x(z)$

(рис. 3, а) через вертикальную плоскость, проходящую перпендикулярно оси AB в середине базы:

$$j_x(z) = \frac{IL}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(L^2/4 + z^2)^3}}$$

$$(7) \frac{I_x(z)}{I} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^z j_x(z) dz = \\ = \frac{L}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{(L^2/4 + z^2)^3}} = \\ = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{2z}{L} \right), \quad (8)$$

где I – ток установки, протекающий через электроды AB ; $L = AB$ – база зондирования.

При оценке глубинности z_3 в однородной среде применяют два критерия:

- при $z = z_3$ имеет место перегиб графика функции $j_x(z)$;
- через сечение на глубине z_3 протекает половина зондирующего тока I .

Основные расчетные параметры применения этих критериев приведены в табл. 3.

Таким образом, даже для однородной среды нет единого мнения о глубинности зондирования, т.к. ее принимают в довольно широком диапазоне $z_3 = (0,25-0,5)AB$. В рассматрива-

мом случае техногенных массивов дамб ГТС среда является существенно неоднородной.

В этом случае величина z_3 зависит от структуры и УЭС слоев, слагающих геологический разрез, и не может быть рассчитана заранее.

В электроразведке рекомендовано при наличии высокопроводящих слоев значительной мощности принимать z_3 в диапазоне (0,1-0,25) AB .

При мониторинге геомеханического состояния дамб ГТС целесообразно применять экспериментальный метод определения z_3 на исследуемом участке, сопоставляя результаты ВЭЗ и ЭП с данными инженерно-геологических изысканий (геологическими разрезами).

Другой особенностью дамб как объекта геоэлектрического контроля является сложная форма поверхности, существенно отличающаяся от плоскости.

При этом массив не являет-

Таблица 3
Параметры тока при различных критериях глубинности

Критерий	z_3	$\frac{j_x(z_3)}{j_x(0)}$	Другие параметры
$\frac{\partial^2 j_x(z)}{\partial z^2} = 0$	0,25L	0,72	$\frac{I(z_3)}{I} = 0,29$
$\frac{I(z_3)}{I} = 0,5$	0,5 L	0,35	-

ся полупространством, как это заложено в теоретических моделях.

Учет влияния геометрических параметров дамбы (ширины гребня, высоты насыпного слоя, заложений откосов, степени заполнения хранилища) на изменение плотности зондирующего тока и геометрического коэффициента установки целесообразно осуществить на физической (электролитической) модели, поскольку данная задача является объемной.

Рассмотренные в данной работе теоретические и методические аспекты геоэлектрического контроля техногенных массивов ГТС реализованы в отраслевых указаниях [7] и используются при мониторинге геомеханических и гидродинамических процессов в насыпных грунтовых дамбах горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. – М.: Недра, 1981. – 344 с.
2. Кобранова В.Н. Физические свойства горных пород (Петрофизика). – М.:Гостоптехиздат, 1962. – 490 с.
3. Простов С.М. Определение параметров углевмещающих осадочных пород электрофизическим методом / С.М. Простов, А.С. Костромин // Вестник РАЕН (Зап.-Сиб. отд.). – 2001. – Вып. 4. – С. 163-168.
4. Якубовский Ю.В. Электроразведка / Ю.В. Якубовский, И.В. Ренард. – М.: Недра, 1991. – 359 с.
5. Матвеев Б.К. Электроразведка. – М.: Недра, 1990. – 368 с.
6. Жданов М.С. Электроразведка. – М.: Недра, 1986. – 316 с.
7. Методические указания по контролю геомеханических и фильтрационных процессов в техногенных породо-грунтовых массивах гидротехнических сооружений горных предприятий комплексным геоэлектрическим методом / ГУ КузГТУ, НФ “КУЗБАСС-НИИОГР”.– Кемерово, 2003. – 42 с.

Авторы статьи:

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

Костюков
Евгений Владимирович
– аспирант каф. теоретической и геотехнической механики

Гуцал
Максим Владимирович
– канд. техн. наук, ст. препод. каф. теоретической и геотехнической механики