

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 624.138:550.837

Н. Ю. Никулин

ИЗУЧЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ЗАКРЕПЛЕННОГО МАССИВА МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В [1] представлены итоги исследований геомеханических процессов в зоне высоконапорной инъекции грунтов (ВНИ), полученные инженерно-геологическим и сейсмоакустическим методами на опытном полигоне. Ниже приведены наиболее существенные результаты геоконтроля на этом же участке электрофизическими методами, которые

включали вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), круговое ВЭЗ и измерение срединного градиента. Схема расположения точек и профилей измерений изображена на рис. 1¹.

Все электроразведочные работы выполнялись низкочастотной аппаратурой типа ЭРП-5 «Березка» в соответствии со стандартной методикой,

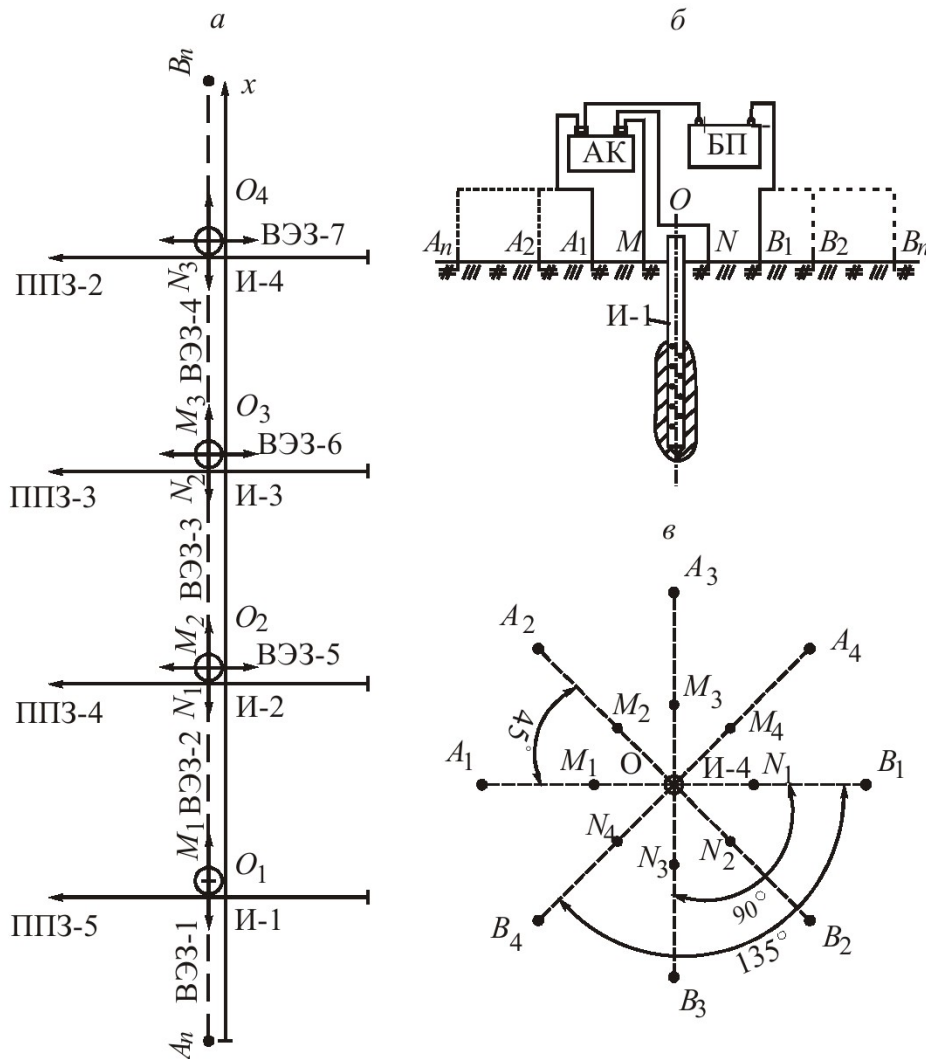


Рис. 1. Схемы опытного участка (а), установки ВЭЗ (б) и кругового ВЭЗ (в):

x – продольная координата; ППЗ-2-5 – профили поперечного зондирования;

И-1-4 – инжекторы; ВЭЗ-1-4 – установки продольного ВЭЗ; ВЭЗ-5-7 – установки поперечного ВЭЗ;

O_1-O_4 – центры установок ВЭЗ (оси инжекторов); A_n, B_n – питающие электроды; M_n, N_n – приемные электроды; БП – блок питания; АК – автокомпенсатор «Березка»

изложенной в РСН-64-87. Зондирования выполнялись симметричной установкой $AMNB$ с максимальными разносами питающей линии $AB_{\max} = 30$ м, что согласно классической методике интерпретации ВЭЗ [2] позволило реализовать зондирование на глубину не менее 5 м. Профилирования были проведены продольными установками ВЭЗ вдоль линии инъекторов при $AB = 30$ м и поперечными при $AB = 11$ м. Центр каждой установки ВЭЗ располагался на оси соответствующего инъектора. В качестве питающих электродов использованы стальные, а приемных – медные штыри длиной 0,8 м, которые забивались на глубину до 0,3–0,5 м.

Круговые ВЭЗ проведены симметричной четырехэлектродной установкой $AMNB$ с максимальным разносом питающей линии $AB = 11$ м. Центр установки располагался на оси инъектора И-4. Измерения проводились с шагом поворота 45° .

Профилирование методом срединных градиентов выполнено вдоль продольного профиля инъекторов. Заземление питающих электродов А и В производилось на расстоянии 3 метра от инъекторов И-1 и И-4 соответственно. В качестве приемных электродов М и N использовались сами инъекторы.

По результатам ВЭЗ получены зависимости изменения эффективного удельного электрического сопротивления (УЭС) ρ_k на разных стадиях ВНИ. График ВЭЗ по инъектору И-3 приведен на рис. 2.

Результаты анализа ВЭЗ позволили сделать следующие выводы:

- после нагнетания цементно-песчаного раствора наблюдается увеличение среднего значения УЭС в зоне инъекции ($AB/2 = 2,2-11$ м) на 2–5 %;
- через 27 сут. после ВНИ происходит снижение среднего значения ρ_k по глубине с 21 до 16,1 Ом·м, это свидетельствует о том, что на этом про-

межутке времени происходит диффузное перемещение влаги из цементно-песчаного раствора в окружающий его грунтовый массив;

– по окончании эксперимента, через 62 сут. после ВНИ УЭС в зоне закрепления увеличивается до 19 Ом·м, что указывает на снижение влажности за счет испарения с поверхности земли и

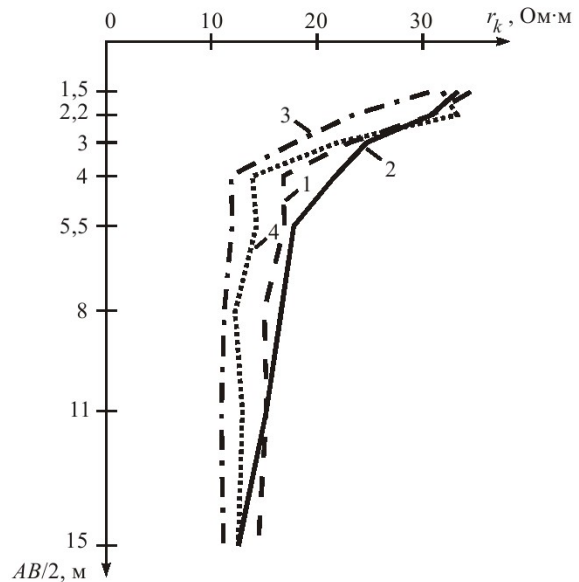


Рис. 2. Графики ВЭЗ по инъектору И-3: 1 – до ВНИ; 2 – через 1 сут. после ВНИ; 3 – 27 сут. после ВНИ; 4 – 62 сут. после ВНИ

набора прочности укрепляющим раствором.

Для оценки характера изменения электрофизических свойств массива по продольной оси x построены графики среднего УЭС вдоль профиля И-1–И-4 на упомянутых стадиях ВНИ, которые приведены на рис. 3.

Из приведенных данных следует, что наи-

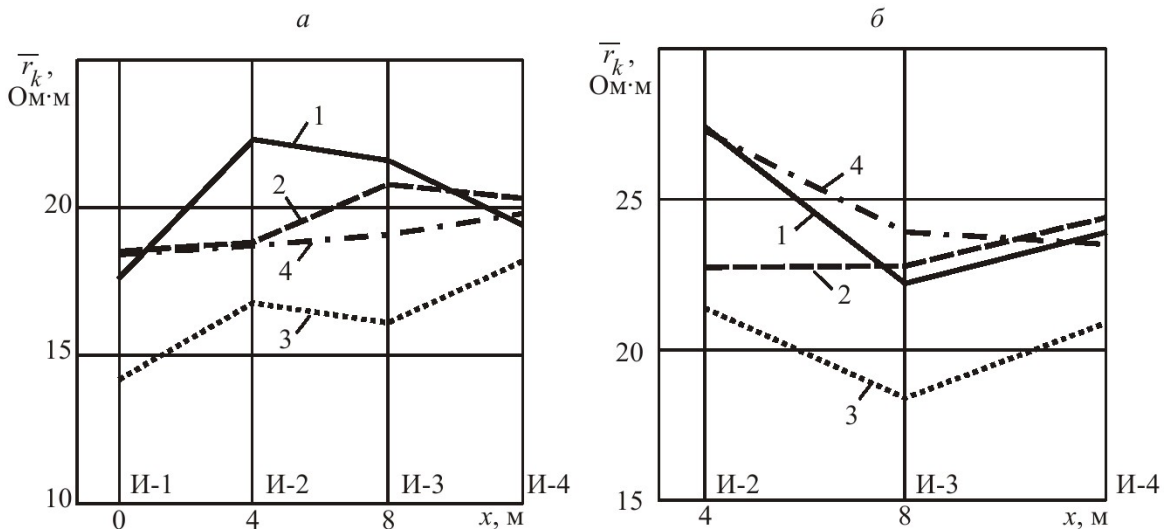


Рис. 3. Изменение среднего значения УЭС $\bar{\rho}_k$ вдоль профиля x для продольных (а)

и поперечных (б) установок ВЭЗ на различных стадиях ВНИ:

1 – до ВНИ; 2 – через 1 сут. после ВНИ; 3 – 27 сут. после ВНИ; 4 – 62 сут. после ВНИ

большее увеличение УЭС в процессе набора прочности достигнуто на участке расположения иньекторов И-3 и И-4, это согласуется с данными геомеханических испытаний грунтов, описанными в работе [1], при этом по данным поперечных ВЭЗ среднее значение УЭС на иньекторе И-2 достигло максимального значения $\bar{\rho}_k = 27,5$ Ом·м, что свидетельствует о распространении зоны ВНИ в поперечном направлении вследствие анизотропии закрепленного массива.

По данным кругового ВЭЗ на иньекторе И-4 сделана выборка максимальных и минимальных значений УЭС для следующих полуразносов питающих линий АВ/2 (рис. 4): 2,2; 3; 4; 5,5 м.

Изменение значений $\rho_{k \min}$ и $\rho_{k \max}$ закрепляе-

мых грунтов по глубине более наглядно представлено на графике зависимости УЭС от АВ/2 для различных этапов ВНИ (рис. 5).

Полученные результаты позволили детализировать установленные ранее закономерности:

- на следующие сутки после ВНИ происходит увеличение УЭС на 2,5–5 Ом·м на всю глубину зондирования, что свидетельствует о нарушении связей в массиве грунта (образование разрывов);
- за счет перемещения влаги из зоны иньекции в окружающий массив происходит снижение УЭС до значений, близких к первоначальным, данный процесс протекает на протяжении 20 сут. после окончания ВНИ;
- через 20 сут. после ВНИ начинается процесс

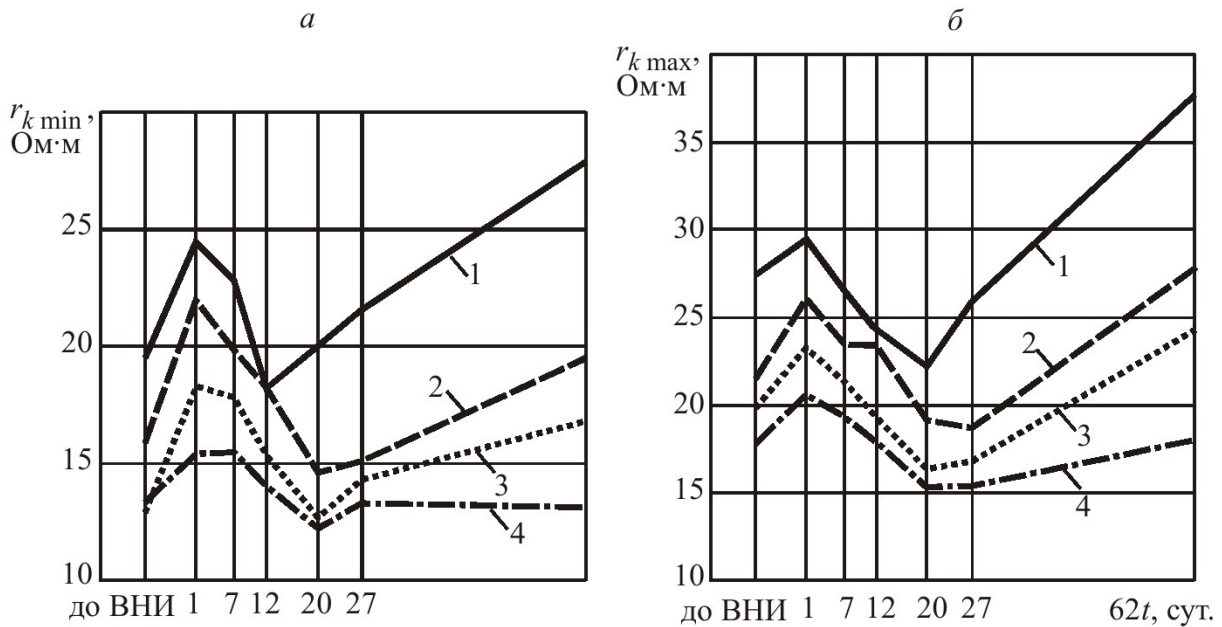


Рис. 4. Изменение минимального (а) и максимального (б) значения УЭС по результатам круговых ВЭЗ на различных стадиях ВНИ при применении полуразноса установки АВ/2:
1 – 2,2 м; 2 – 3 м; 3 – 4 м; 4 – 5,5 м

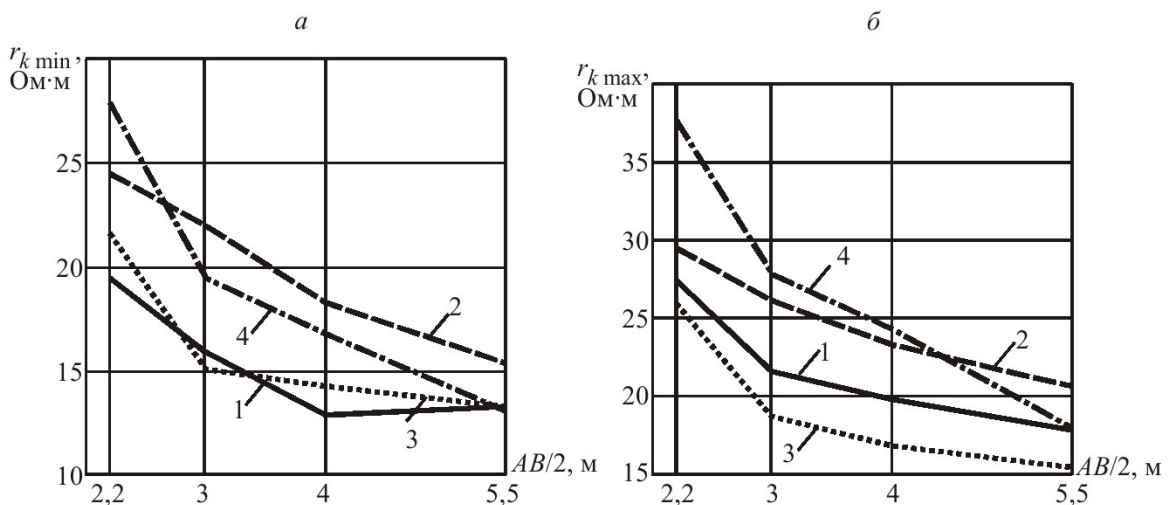


Рис. 5. Изменение минимального (а) и максимального (б) УЭС по результатам круговых ВЭЗ при различных разносах АВ/2:
1 – до ВНИ; 2 – через 1 сут. после ВНИ; 3 – 27 сут. после ВНИ; 4 – 62 сут. после ВНИ

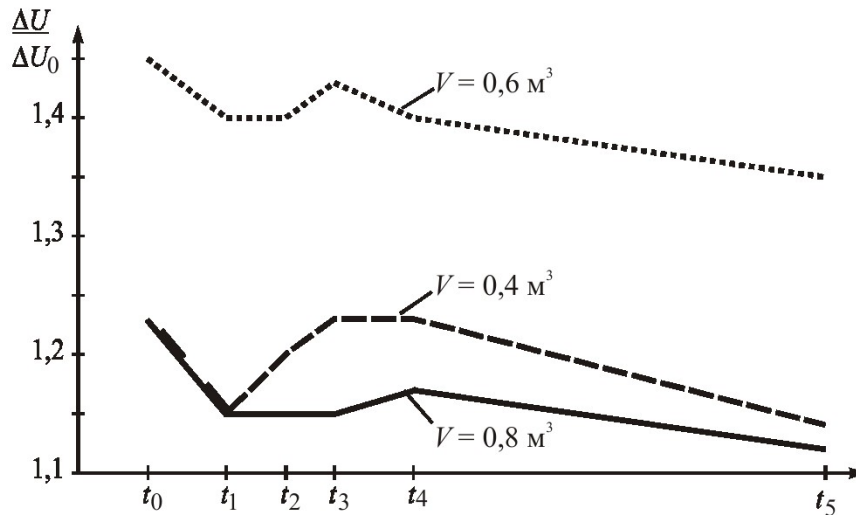


Рис. 6. Зависимость изменения относительной разности потенциалов между иньекторами от времени и расхода закрепляющего раствора на разных этапах ВНИ: t_0 – после тампонажа; t_1 – через 1 сут. после ВНИ; t_2 – 7 сут. после ВНИ; t_3 – 12 сут. после ВНИ; t_4 – 20 сут. после ВНИ; t_5 – 62 сут. после ВНИ

интенсивного набора прочности закрепленным массивом, это отражается в увеличении УЭС, особенно четко данный процесс выявлен для глубин, соответствующих глубине зондирования $AB/2=2,2$ м, так для $\rho_k \max$ изменение составило с 22 до 37,5 Ом·м. Для $AB/2 = 5,5$ м изменение УЭС не превышало 20 %.

Методом срединного градиента были получены данные о изменении падения напряжения ΔU по отношению к начальным значениям ΔU_0 . Измерения проводились с заземлением иньекторов, поэтому оценка зависимости изменения $\Delta U/\Delta U_0$ по времени проведена с учетом суммарного расхода закрепляющего раствора для каждой пары иньекторов, что составило соответственно $V = 0,8; 0,6; 0,4$ м³ (см. рис. 6).

Используя банк данных, полученных ранее и приведенных в работе [1], получены уравнения регрессии экспериментальных зависимостей конечных значений УЭС, скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн и несущей способности стандартной сваи P , которые приведены в табл. 1,

где r – коэффициент корреляции; η – корреляционное отношение; σ – среднее квадратичное отклонение; t – надежность оценки.

Анализ результатов проведенных комплексных исследований показал, что метод электрических зондирований с использованием различных модификаций (продольных, поперечных, круговых ВЭЗ, срединных градиентов) обеспечивает наиболее детальный и информативный геомониторинг гидрогеологических и геомеханических

Таблица 1. Корреляционные зависимости физических параметров укрепленного массива

Уравнение регрессии	r, η	σ	t
$V_s = 110,960 + 3,6085\rho_k$	$r = 0,684$	6,496	1,876
$V_s = 121,75 \exp(0,0204\rho_k)$	$\eta = 0,687$	6,474	1,891
$V_p = 222,926 - 12,2396\rho_k$	$r = 0,696$	21,344	1,937
$V_p = 270,228 \exp(0,02741\rho_k)$	$\eta = 0,698$	21,272	1,950
$P = 120,652 + 7,9408\rho_k$	$r = 0,793$	9,72	4,109
$P = 149,989 \exp(0,03125\rho_k)$	$\eta = 0,788$	9,825	4,043

процессов в зоне высоконапорной иньекции ослабленных грунтовых оснований технических сооружений как в пространстве, так и во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никулин, Н. Ю. Экспериментальное исследование геомеханических процессов в зоне высоконапорной иньекции грунтов / Н. Ю. Никулин, С. М. Простов, О. В. Герасимов // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 2. С. 3- 9.
2. Якубовский, Ю. В. Электроразведка. – М. : «Недра», 1973. – 304 с.

□ Авторы статьи

Никулин
Николай Юрьевич,
аспирант КузГТУ, инженер-
геофизик ООО «НООЦЕНТР-Д», e-
mail: n.y.nikuln@mail.ru