

УДК 624.130:550.834:550.837

Н.Ю. Никулин, А.В. Покатилов, А.В. Плотников, С.М. Простов

### КОНТРОЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОДНОРАСТВОРНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Для изучения процессов однорастворного электрохимического закрепления (ЭХЗ) грунтов <sup>1</sup>наряду с инженерно-геологическими изысканиями [1] был проведен комплекс геофизических исследований, включающий электрометрические и сейсмические методы. Электрометрические исследования проведены методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Этот метод позволил определить изменения удельного электрического сопротивления (УЭС) грунтов на разных этапах их закрепления. В ходе сейсмических исследований был изучен характер изменения скоростей распространения продольных  $V_p$  и по-

Общая технологическая схема проведения экспериментальных исследований представлена на рис. 1.

Геофизические работы методом ВЭЗ выполнены низкочастотной электроразведочной аппаратурой типа «Берёзка». Зондирования выполнялись симметричной установкой  $AMNB$  с максимальными разносами питающей линии  $AB$  – 22 м, что позволило проследить изменение УЭС на глубину до 3,5 м. Центр каждой установки ВЭЗ располагался на оси соответствующего иньектора. В качестве питающих электродов использованы стальные, а приемных – медные штыри длиной 0,8 м, которые

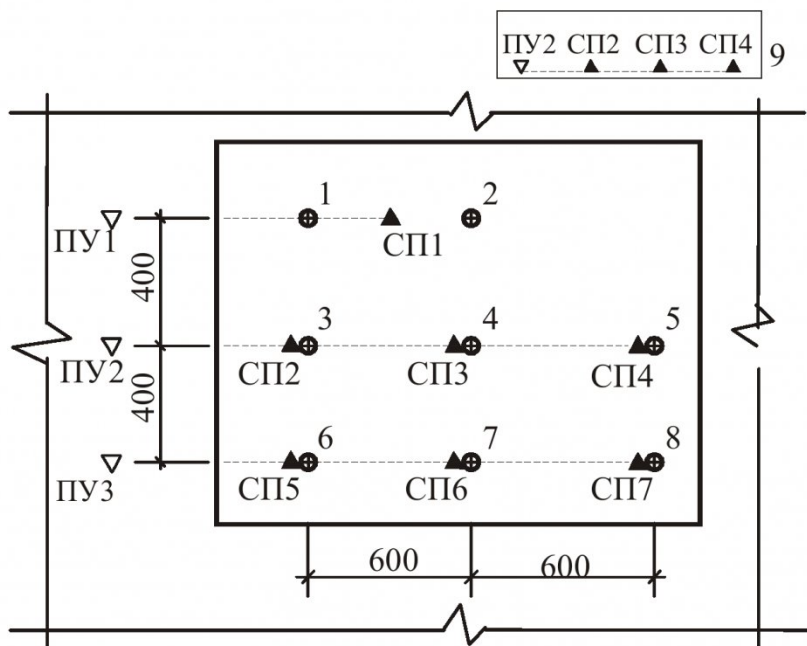


Рис. 1. Схема проведения геофизических исследований:  
1-8 – точка ВЭЗ (ось иньекторов); 9 – схема сейморазведочной установки;  
ПУ1-ПУ3 – пункт возбуждения сейсмических колебаний; СП1-СП7 – сейсмодатчики

Таблица 1. Параметры ВЭЗ

Параметр	1	2	3	4	5	6	7
$AB/2$ , м	1,5	2,2	3	4	5,5	8	11
$MN/2$ , м	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$k$	1,26	2,88	5,5	9,89	18,84	40,04	75,83

перечных  $V_s$  волн в грунте. Теоретические и методические аспекты геофизического мониторинга техногенных массивов изложены в работах [2–4].

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы

забивались на глубину до 0,3-0,5 м. Полуразносы питающей  $AB/2$  и приемной  $MN/2$  линий и коэффициенты установок  $k$  приведены в табл. 1.

При устройстве заземлений принимались меры для уменьшения сопротивления заземления путем подлива воды в токовых и приемных линиях. Питающая и приемные линии собраны из про-

водов марки ГПСМП, схема их подключения представлена на рис. 2. В качестве источников питания линии АВ использовались батареи АМЦГ-100.

ВЭЗ как при основном, так и при пробном за-

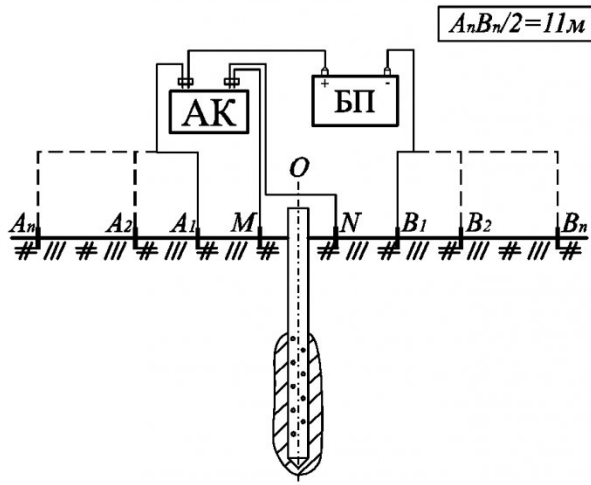


Рис. 2. Схема установки ВЭЗ: (ось иньектора); A1B1...AnBn – питающие линии; MN – приемные линии; БП – блок питания; АК – автокомпенсатор “Березка”; O – центр установки ВЭЗ

крепления выполнялось три раза: первое – до закрепления грунтов для установления их электрофизических свойств в естественном состоянии; два последующих – при пробном закреплении через 56 ч и 722 ч, а при основном - через 146 ч и 434 ч после начала обработки грунта током.

Измерение времени прохождения продольных и поперечных сейсмических волн через закрепленный массив проводилось с использованием цифровой многоканальной сейсморазведочной станции «ЛАККОЛИТ Х-М2» производства ООО «Логис».

Основные технические характеристики сейсмостанции следующие:

- диапазон регистрируемых частот, Гц 5–4000
- время регистрации, мс до 5120
- число накоплений 32000

В состав сейсмостанции входят: блок питания;

блок управления; сейсмостанция «ЛАККОЛИТ»; коса с сейсмоприемниками и источник сейсмических колебаний. Схема соединения составных элементов сейсмостанции приведена на рис. 3.

Для возбуждения сейсмических колебаний применялось ударное устройство массой 10 кг. При записи продольных волн удар наносился вертикально (система Z-Z), а поперечных – горизонтально в двух противоположных направлениях, перпендикулярных линии расстановки сейсмоприемников (система Y-Y). Т. к. поперечные волны обладают свойством инверсии при смене направления удара, повторные записи при регистрации поперечных волн обеспечивали определение времен первых вступлений и корреляцию их на сейсмограмме.

Для регистрации продольных волн применялись вертикальные сейсмоприемники СВ-30, для поперечных волн – горизонтальные СГ-10. Расстановка сейсмоприемников приведена на рис. 1.

Измерения акустических свойств массива проводились 4 раза: при пробном закреплении грунтов и 3 раза при основном закреплении.

По данным, полученным в ходе проведения вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), были построены графики изменения эффективного УЭС  $\rho_k$  грунта в основных зонах ЭХЗ во времени  $t$  (рис. 4). Основные полученные результаты состоят в следующем.

1. Наиболее значительные изменения УЭС происходили на глубине погружения иньекторов до отметки  $h = 2$  м.

2. При пробном закреплении (рис. 4, а, б) через 56 ч после начала закрепления в зоне ЭХЗ наблюдалось снижение УЭС в 1,07–1,3 раза, а в зоне электроосмоса в 1,16–1,25 раз. Через 722 ч после начала закрепления увеличение УЭС относительно исходных значений в зоне электрохимии составило 1,1–1,43 раза, а в зоне электроосмоса – 1,06–1,22 раза. Снижение УЭС на втором этапе объясняется интенсивным распространением электролита и увлажнением грунта в зоне электроосмоса. Далее процессы связывания частиц грунта и вытеснения влаги вызвали увеличение УЭС. В значительной степени данный процесс проявил себя в зоне ЭХЗ, так как закрепляющий раствор скон-

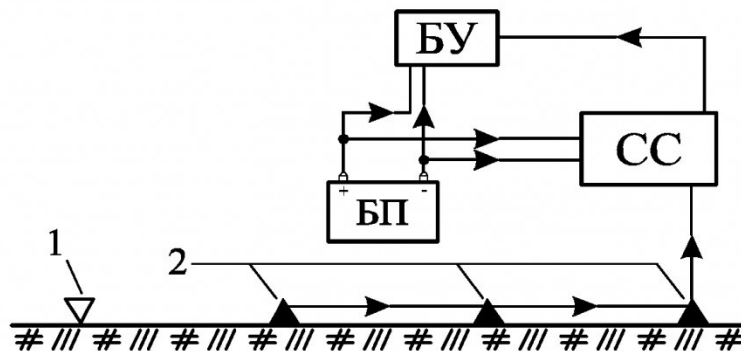


Рис.3. Схема подключения сейсморазведочной станции: 1 – пункт возбуждения сейсмических колебаний; 2 – сейсмоприемники; БП – блок питания; БУ – блок управления; СС – сейсмостанция «Лакколит»

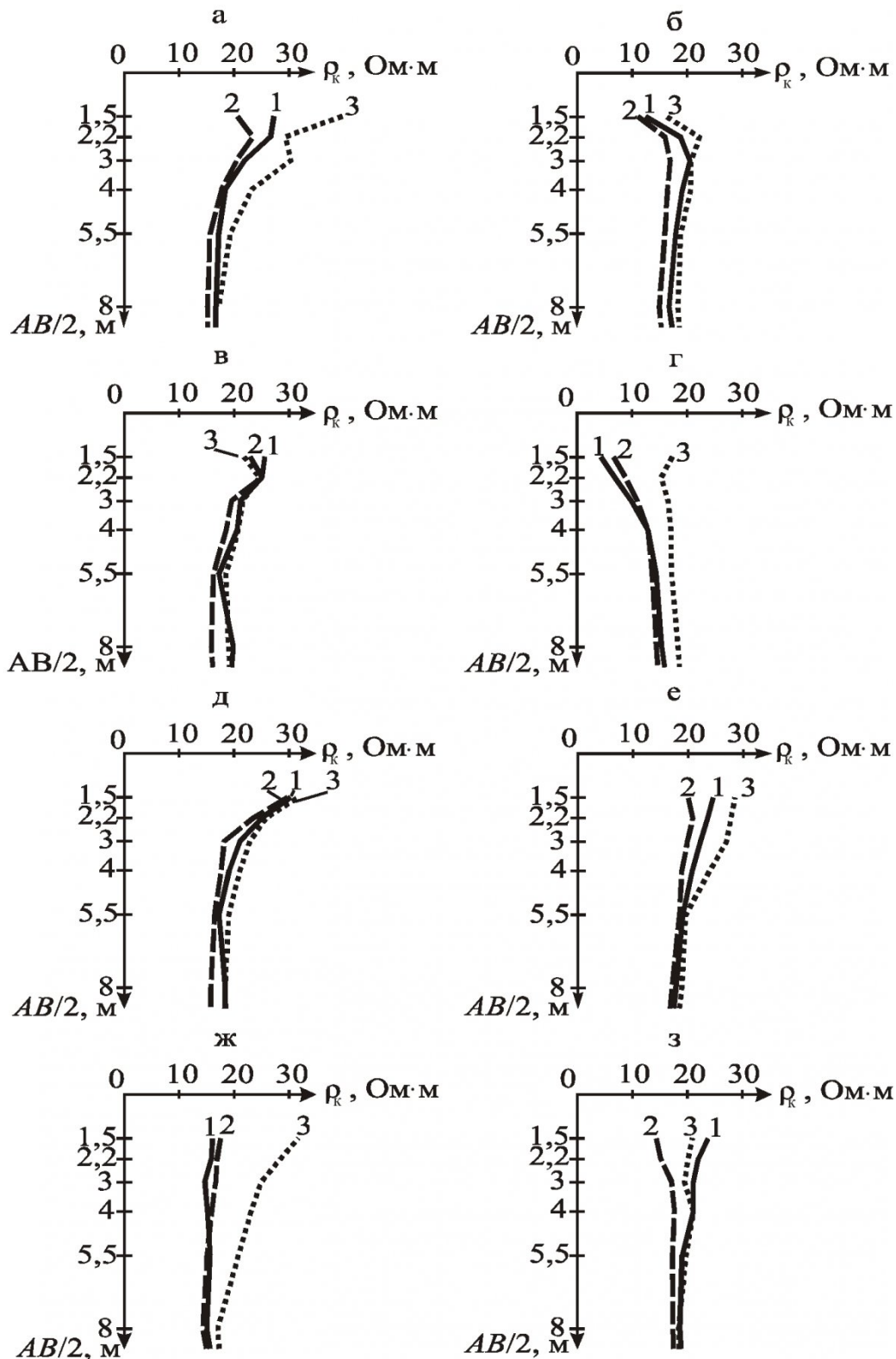


Рис.4. Графики ВЭС по инъекторам №1 (а), №2 (б), №3 (в), №4 (г), №5 (д), №6 (е), №7 (ж), №8 (з): 1 – до закрепления грунтов; 2 – через 4 сут. после закрепления; 3 – через 20 сут. после закрепления

центрирован на этом участке.

3. При основном закреплении грунтов (рис. 4, в–з) наибольший прирост УЭС выявлен в зоне электроосмоса. На глубине 1 м от поверхности земли УЭС в точке № 7 увеличилось на 81% (рис.

4, ж), а в точке № 4 – в 4,3 раза. В зоне ЭХЗ через 146 ч наблюдалось снижение УЭС, а затем через 434 ч – незначительное увеличение до прежних значений (рис. 4, в, д). Более интенсивное увеличение УЭС в зоне ЭХЗ наблюдалось в точках № 6

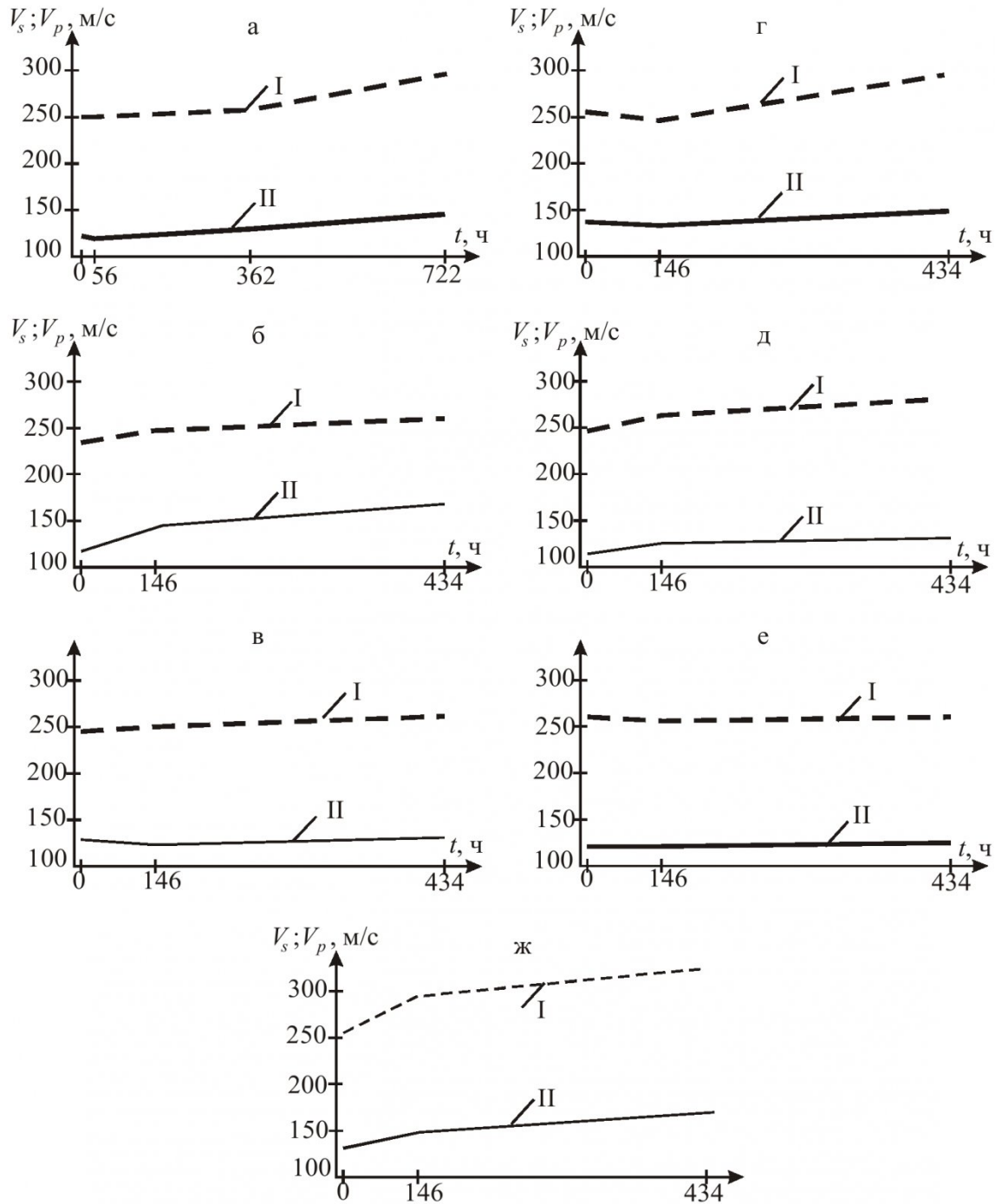


Рис.5. Графики изменения скоростей прохождения сейсмических волн в закрепленных грунтах во времени в точке СП1 (а), СП2 (б), СП3 (в), СП4 (г), СП5 (д), СП6 (е), СП7 (ж):  
 1 – изменения скорости продольных волн  $V_p$ ; 2 – изменение скорости поперечных волн  $V_s$

и № 8 (рис. 4, е, з) и составило 20-28% в приповерхностной части зоны закрепления.

При изучении акустических характеристик закрепленных грунтов оценивалось изменение скоростей прохождения продольных и поперечных сейсмических волн через закрепленный массив грунта (рис. 5). Сейсмоприемник на участке пробного закрепления устанавливался между зонами электроосмоса и ЭХЗ. Через 722 ч (рис. 5, а, б) после окончания закрепления скорость поперечных сейсмических волн на этом участке увеличилась на 24 % и составила 145 м/с. Скорость про-

дольной волны возросла на 18 %.

При основном закреплении в зоне электроосмоса (рис. 5, в, е) значительных изменений скоростей продольных и поперечных волн не выявлено. Наиболее интенсивное увеличение скоростей продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн наблюдалось в зоне электрохимии у инъекторов № 5 и № 8 – 1,16 и 1,27 раза соответственно (рис. 5, г, ж). В меньшей степени изменение скоростей проявилось на участке расположения инъекторов № 3 и № 6. Исходная скорость поперечной волны у инъектора № 3 составила 115 м/с, а после закрепления 165 м/с.

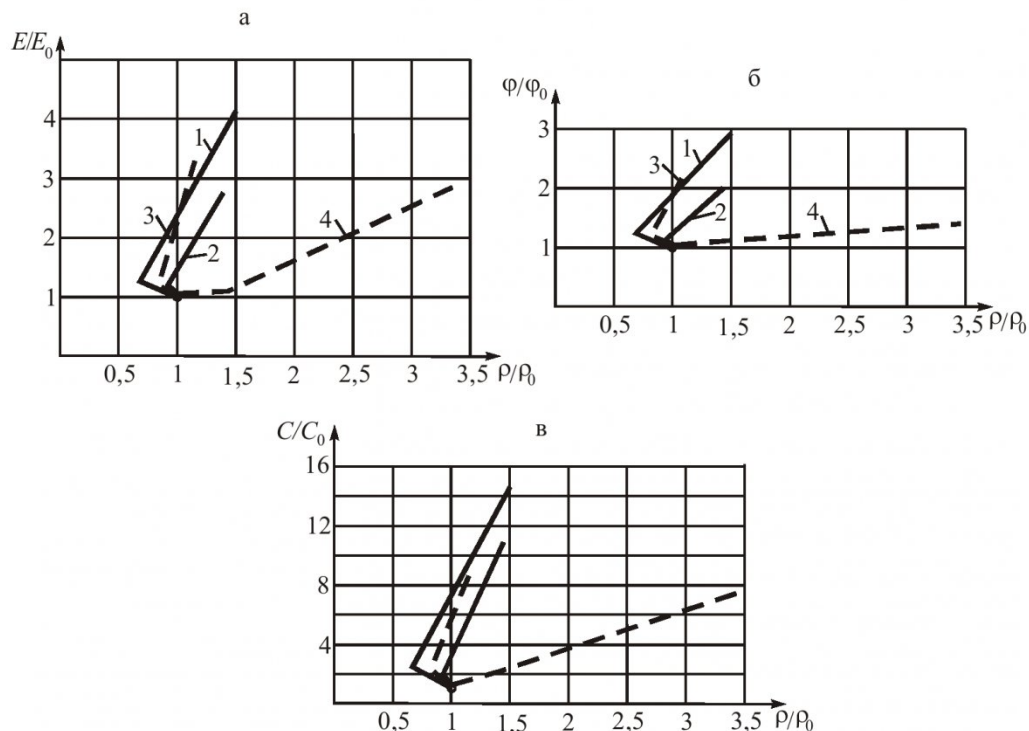


Рис.6. Взаимосвязь относительных изменений модуля деформации  $E$ , угла внутреннего трения  $\varphi$ , сцепления грунта  $C$  и эффективного удельного электросопротивления  $\rho_k$  при одностороннем ЭХЗ:

1 – в зоне ЭХЗ при пробном закреплении; 2 – в зоне электроосмоса при пробном закреплении; 3 – в зоне ЭХЗ при основном закреплении (точка №6); 4 – в зоне электроосмоса при основном закреплении (точка №4)

Скорость продольной волны возросла на 12%, а у иньектора № 6 на 11%.

В целом метод достаточно надежен для оценки степени закрепления грунтов методом ЭХЗ.

Накопленная база данных контролируемых параметров, определенных по результатам ЭХЗ прямыми и геофизическими методами, позволила построить зависимости между относительными изменениями параметров: деформационного –

модуля упругости  $E$ , прочностных – сцепления  $C$ , угла внутреннего трения  $\varphi$  и УЭС грунта  $\rho_k$  (рис. 6).

В дальнейшем при закреплении грунтов односторонним способом ЭХЗ полученные взаимосвязи позволят оперативно контролировать и прогнозировать относительное изменение прочностных и деформационных параметров по величине УЭС грунта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальное одностороннее электрохимическое закрепление глинистых грунтов / Никулин Н.Ю., Плотников А.В., Покатилов А.В., Простов С.М // Вестник КузГТУ, 2011, № 5. – С. 12-17. .
2. Простов, С. М. Электромагнитный геоконтроль процессов укрепления грунтов/ С. М. Простов, О. В. Герасимов, Е. А. Мальцев; РАЕН. – Томск: Изд-во ТГУ, 2007. – 211 с.
3. Герасимов, О.В. Исследование зависимости между механическими и электрофизическими свойствами грунтов, укрепляемых методом высоконапорной иньекции / О.В. Герасимов, С.М. Простов, Д.Ю. Пахомов // Вестник КузГТУ, 2006, №6. – С. 21-23.
4. Герасимов, О. В. Изучение процессов укрепления неустойчивых грунтов оснований сооружений сейсмическим методом / О. В. Герасимов, С. М. Простов // Вестник КузГТУ, –2006, № 6. – С. 15–19.

□ Авторы статьи:

Простов  
Сергей Михайлович,  
д.т.н., проф. теоретической  
и геотехнической механи-  
ки КузГТУ.  
Тел.8-3842-39-63-36,  
е – mail [raen@kuzstu.ru](mailto:raen@kuzstu.ru)

Никулин  
Николай Юрьевич,  
соискатель КузГТУ, ин-  
женер-геофизик ООО  
"НООЦЕНТР-Д".  
Тел. 8-3842-69-15-91  
е – mail n.y.[nikuln@mail.ru](mailto:nikuln@mail.ru)

Плотников  
Александр Валерьевич,  
канд. геол.-минер. наук,  
нач. отдела инженерно-  
строительных изысканий  
ООО "НООЦЕНТР-Д",  
Тел. (3842) 73-45-19,  
е – mail [plotn@inbox.ru](mailto:plotn@inbox.ru).

Покатилов  
Андрей Владимирович,  
канд.техн.наук, доцент  
каф. строительного произ-  
водства и экспертизы не-  
движимости ГУ КузГТУ,  
е – mail  
[an.pokatilov@yandex.ru](mailto:an.pokatilov@yandex.ru)